



FS

STROJÍRENSKÁ METROLOGIE

část 1

Šárka Tichá

Obsah

Předmluva	6
1. Význam metrologie.....	7
2. Základní pojmy.....	7
2.1 Některé základní pojmy (ČSN 010115).....	7
2.1.1 Veličiny a jednotky.....	7
2.1.2 Měření.....	8
2.1.3 Měřicí přístroje a měřidla	9
2.1.4 Etalony	9
3. Zákon č.119 /2000 Sb. – o metrologii (výňatek).....	10
3.1 Zákonné měřicí jednotky	10
3.2 Měřidla	10
3.3 Státní metrologická kontrola měřidel	10
3.4 Návaznost měřidel.....	11
3.5 Schvalování typu měřidel vyrobených v tuzemsku	11
3.6 Schvalování typů dovezených měřidel	11
3.7 Certifikace referenčních materiálů	11
3.8 Ověřování a kalibrace	11
3.9 Hotově balené zboží označené symbolem „e“	12
3.10 Uvádění měřidel do oběhu.....	12
3.11 Používání měřidel.....	12
3.12 Úkoly subjektů.....	12
3.13 Úhrady	12
3.14 Pokuty subjektům	12
4. Základní měřicí jednotky.....	13
5. Instituce činné v oblasti metrologie.....	14
5.1 Ministerstvo průmyslu a obchodu.....	14
5.2 Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví	14
5.3 Český metrologický institut	14
5.4 Autorizovaná metrologická střediska	14
5.5 Střediska kalibrační služby	15
5.6 Český institut pro akreditaci.....	15
5.7 Oblastní inspektoráty Českého metrologického institutu.....	15
6. Návaznost měřidel.....	15
7. Chyby a nejistoty měření	17
7.1 Chyby měření, jejich příčiny a členění.....	17
7.1.1 Chyby hrubé.....	18
7.1.2. Chyby systematické.....	18
7.1.3 Chyby náhodné	20
7.2 Nejistota měření.....	22
7.2.1 Určování rozšířených nejistot.....	24
7.2.2 Vyjádření výsledku měření	24
8. Interference světla	25
8.1 Využití interference světla v metrologii.....	26

9. Koncové měřky	26
9.1 Základní parametry koncových měrek	27
9.2 Kontrola koncových měrek	28
9.3 Kalibrace měrek	28
9.3.1 Kontrola přilnavosti	28
9.3.2 Interferenční měření	28
9.3.3 Porovnávací měření	28
10. Tolerování a lícování	29
10.1 Tolerance rozměru jako funkce jmenovitého rozměru a stupně přesnosti	29
10.2 Základní informace	29
10.3 Základní úchylka	29
10.4 Uložení (lícování)	30
11. Pevná měřidla	30
12. Principy měřidel	33
12.1 Převody měřidel	33
12.1.1 Měřidla s převodem mechanickým	33
12.1.2 Měřidla s převodem opticko- mechanickým	36
12.1.3 Měřidla s převody elektrickými	37
12.1.4 Fotoelektrické přístroje	38
12.1.5 Měřidla s převody pneumatickými	39
13. Měření a kontrola rovinného úhlu	40
13.1 Jednotky	40
13.2 Měřicí prostředky	41
13.2.1 Úhlové měřky	41
13.2.2 Optické polygony	41
13.2.3 Úhlové šablony	42
13.2.4 Úhelníky	42
13.2.5 Úhloměry	43
13.2.6 Sklonoměr	43
13.2.7 Optická dělicí hlava	43
13.2.8 Optický dělicí stůl	44
13.2.9 Teodolity	44
13.3 Použití goniometrických funkcí pro měření úhlů	44
13.3.1 Sinusové pravítko	44
13.3.2 Tangentové pravítko	44
13.4 Měření svislé a vodorovné polohy	45
13.4.1 Olovnice	45
13.4.2 Libely	45
13.4.3 Hadicové vodováhy	46
14. Kuželové plochy a jejich kontrola	46
14.1 Tolerování kuželových ploch	46
14.2 Kontrola kuželových ploch	47
14.2.1 Kuželové plochy vnější	47
14.2.2 Kuželové plochy vnitřní	50
15. Kontrola a měření závitů	51
15.1 Tolerování závitů	51

15.2 Kontrola závitů	52
15.2.1 Kontrola závitů vnějších.....	52
15.2.2 Kontrola vnitřních závitů	54
16. Kontrola ozubených kol	55
16.1 Přesnost ozubených čelních kol – základní terminologie.....	55
16.2 Komplexní kontrola ozubených kol	59
16.2.1 Jednoboký odval	59
16.2.2 Dvouboký odval.....	59
16.3 Kontrola některých dílčích parametrů ozubených kol	60
16.3.1 Kontrola profilu zubu.....	60
16.3.2 Kontrola tloušťky zubů	61
16.3.3 Kontrola rozměru přes zuby M.....	61
16.3.4 Kontrola základní rozteče	62
16.3.5 Kontrola obvodové házivosti	62
17. Kontrola malých rozměrů	62
17.1 Měření malých otvorů	63
18. Měření velkých rozměrů	64
18.1 Měřidla a metody pro měření velkých rozměrů.....	65
18.2 Technologie měření velkých rozměrů	68
19. Odchytky tvaru a polohy (makrogeometrie povrchu)	69
19.1 Odchytky tvaru	70
19.1.1 Odchytky přímosti EFL	70
19.1.2 Odchytky rovinnosti TFE.....	72
19.1.3 Odchytky kruhovitosti EFK.....	74
19.1.4 Odchytky válcovitosti EFZ	76
19.2 Odchytky polohy.....	78
19.2.1 Odchytky rovnoběžnosti EPA	78
19.2.2 Odchytky souososti EPC	80
19.2.3 Odchytky souměrnosti EPP	81
19.2.4 Odchytky kolmosti dvou rovin EPR	82
19.3 Odchytky házení.....	83
19.3.1 Odchytky radiálního házení ECR.....	83
19.3.2 Odchytky axiálního házení ECA.....	83
19.3.3 Odchytky házení v daném směru ECD	84
19.3.4 Odchytky úplného radiálního házení ECTR.....	84
19.3.5 Odchytky úplného axiálního házení ECTA	84
20. Kontrola mikrogeometrie obrobené plochy	85
20.1 Základní pojmy.....	85
20.2 Parametry drsnosti (dle normy ČSN EN ISO 4287).....	85
20.2.1 Výškové (amplitudové) parametry.....	85
20.2.2 Délkové (šířkové) parametry.....	87
20.2.3 Tvarové parametry	87
20.3 Měření (kontrola) parametrů drsnosti	87
20.3.1 Měření drsnosti povrchu dotykovými profilometry.....	88
20.3.2 Kontrola porovnáváním s etalony drsnosti.....	88
20.3.3 Měření metodou světelného řezu.....	89

20.3.4 Měření s využitím interference světla	89
21. Měřicí stroje	90
21.1 Délkoměry.....	90
21.1.1 Abbého délkoměr	90
21.1.2 Universální délkový měřicí stroj	91
21.2 Měřicí mikroskopy	92
21.3 Projektory (profilprojektory).....	94
22. Souřadnicové měřicí stroje.....	95
22.1 Terminologie souřadnicových měření (nejdůležitější pojmy).....	95
22.2 Koncepce souřadnicových měřicích strojů	95
22.3 Základní prvky SMS	96
22.4 Měřicí systémy SMS.....	97
22.5 Snímací systémy SMS	98
22.6 Měření na souřadnicových měřicích strojích	98
22.7 Kontrola přesnosti souřadnicových měřicích strojů.....	99
23. Odměrovací systémy.....	99
24. Metrologické zajištění výrobního procesu	102
24.1 Technická dokumentace – kontrolní postupy	103
24.2 Výběr měřicích prostředků.....	104
24.3 Volba měřicí metody.....	104
25. Metrologické laboratoře	106
25.1 Požadavky na pracovní prostory.....	106
25.2 Přístrojové vybavení	106
25.3 Technická způsobilost	106
25.4 Požadavky na stavební provedení metrologických laboratoří	107
Literatura	109

Předmluva

Strojírenská metrologie má nezastupitelné místo při kvantifikaci vybraných parametrů jakosti a to jak výroby, výrobků nebo služeb. Dle norem ISO řady 9000 musí výrobce být schopen garantovat požadovanou jakost svých výrobků.

Problematiku jakosti ve strojírenství je možno sledovat z rozdílných hledisek.

Především je nutno uvažovat o jakosti z ohledem na plnění funkce výrobku na požadované úrovni – konstrukční hledisko.

Dále se musí zkoumat otázky způsobu dosažení požadované jakosti ve výrobě – technologické hledisko.

Důkladně je nutno studovat měření, kontrolu, regulaci a řízení jakosti – hledisko kontroly a řízení.

Nezbytné je rovněž sledovat provozuschopnost a udržování jakosti v průběhu užívání výrobku – provozní hledisko.

Neoddělitelnou součástí sledování jakosti je i hledisko ekonomické.

Základním dokumentem v oblasti metrologie je zákon o metrologii ve znění zákona č. 119/2000 Sb. a navazující vyhlášky Ministerstva průmyslu a obchodu České republiky. Účelem zákona je úprava práv a povinností fyzických osob, které podnikají a právnických osob a orgánů státní správy a to v rozsahu potřebného k zajištění jednotnosti a správnosti měřidel a měření.

Předložená skripta jsou věnována základním problémům metrologického zabezpečení v oblasti měření, vyhodnocování a zkoušení. Kladou si za cíl seznámit studenty strojních oborů, ale nejen je, se základními pojmy z oblasti metrologie, stěžejními částmi zákona č. 119/2000 Sb.- o metrologii, problematikou zpracování naměřených hodnot a určování nejistot měření v souladu s normami ISO, EN a dalšími souvisejícími dokumenty.

Dále se věnují metodice měření délek, rovinného úhlu, kontrole odchylek tvaru a polohy, hodnocení drsnosti povrchu, kontrole parametrů vybraných strojních součástí (závit, ozubené kolo), včetně principů měřidel. Zvláštní pozornost je věnována automatizaci procesů měření a měření na souřadnicových měřicích strojích.

Tento studijní materiál má obohatit znalosti studentů získaných na přednáškách, popř. být doplňkovým materiálem k zvládnutí úkolů na cvičeních a to jak v bakalářském studijním programu oboru „Strojírenství“ tak i magisterském studijním programu „Strojírenská technologie“.

Považuji za nezbytné, aby absolventi oboru Strojírenská technologie ovládali základy strojírenské metrologie jak po stránce teoretické, tak i praktické.

1. Význam metrologie

Metrologie patří mezi činnosti, které mají pro průmyslovou činnost hlavně z pohledu jakosti a technického rozvoje velký význam. Měření a s tím spojená potřeba kalibrace používaných měřidel je pro velkou část podnikatelské sféry nezbytným předpokladem pro zvyšování jakosti produkce s určujícím vlivem na její konkurenční postavení.

Metrologie je vědní a technická disciplína, zabývající se všemi poznatky a činnostmi, týkajícími se měření, je základem jednotného a přesného měření ve všech oblastech vědy, hospodářství, státní správy, obrany, ochrany zdraví a životního prostředí. **Metrologii** v systému řízení jakosti je nutno chápat jako soubor činností spojených s udržováním, evidencí, kalibrací a ověřováním měřidel, tedy tvorby a dodržování metrologického řádu. **Metrologie** jako vědní obor se zabývá činností v oblasti měření různých veličin. Její význam je dán nutností poznání určitého stavu jevu, ať jde o výrobní proces, experiment nebo bádání.

Jednotné a přesné měření je předpokladem vzájemné důvěry při směně zboží, ale stále více i jednou z nutných podmínek jakékoliv efektivní výroby.

Základní kategorie metrologie:

- fundamentální metrologie,
- průmyslová metrologie,
- legální metrologie
- vědecká metrologie

Fundamentální metrologie:

- základ metrologického systému,
- zabývá se soustavou měřicích jednotek, realizací jejich etalonů, metodami měření,
- má charakter vědeckého výzkumu.

Průmyslová metrologie:

- zabezpečuje jednotnost a správnost měření ve výrobě, zkušebnictví,
- zajišťuje činnosti spojené s kalibrací etalonů a pracovních měřidel.

Legální metrologie:

- cílem je chránit občany před důsledky špatného měření v oblasti úředních a obchodních transakcí, pracovních podmínek, zdraví a bezpečnosti,
- zabývá se stanovením zákonných měřicích jednotek, požadavků na měřidla, metodami měření a zkoušení.

Vědecká metrologie:

- organizace a vývoj etalonů a jejich uchovávání

2. Základní pojmy

Veškeré názvosloví a symbolika v celém oboru metrologie je u nás normalizováno ČSN 010115 – Mezinárodní slovník základních a všeobecných termínů v metrologii (z roku 1996) Tato norma je shodná se slovníkem Vocabulaire international des termes fondamentaux et généraux de métrologie, vypracovaným společně čtyřmi mezinárodními organizacemi (ISO, IEC, OIKL a BIPM) a vydaném sekretariátem ISO v Ženevě.

2.1 Některé základní pojmy (ČSN 010115)

2.1.1 Veličiny a jednotky

Veličina – vlastnost jevu, tělesa nebo látky, kterou lze kvalitativně rozlišit a kvantitativně určit (délka, hmotnost, teplota, elektrický odpor určitého drátu atd.).

Základní veličina – jedna z veličin, které jsou v určitém systému veličin konvenčně přijaty jako vzájemně nezávislé.

Odvozená veličina – veličina definována v systému veličin jako funkce základních veličin.

Rozměr veličiny – výraz, který vyjadřuje veličinu ze soustavy veličin jako součin mocnin základních veličin tohoto systému.

Jednotka (měřicí) – blíže určená veličina definovaná a přijatá konvencí, se kterou jsou porovnávány jiné veličiny stejného druhu za účelem vyjádření jejich hodnot ve vztahu k této veličině.

Značka (měřicí) jednotky – konvenční označení měřicí jednotky (m – značka metru, A – značka ampéru).

Systém (soustava) měřících jednotek – soubor základních a odvozených jednotek pro danou soustavu veličin, které jsou definovány podle daných pravidel.

Mezinárodní systém (soustava) jednotek SI – koherentní systém jednotek přijatý a doporučený Generální konferencí vah a měr (CGPM).

Základní (měřicí) jednotka – jednotka daného systému jednotek přijatá konvencí jako rozměrově nezávislá na ostatních jednotkách systému.

Odvozená (měřicí) jednotka – jednotka daného systému jednotek odvozená pomocí základních jednotek.

Hodnota veličiny – velikost blíže určené veličiny obecně vyjádřená jako měřicí jednotka násobená číselnou hodnotou (např.: 5,3 m, 12 kg, -40°C).

Pravá (skutečná) hodnota – hodnota, která je ve shodě s definicí dané blíže určené veličiny (jedná se o hodnotu, která by byla získána naprosto přesným - perfektním měřením, je neurčitého charakteru, v podstatě ji nelze určit).

Konvenčně pravá hodnota veličiny – hodnota veličiny, která je přisuzovaná blíže určené veličině a přijata (někdy konvencí) jako hodnota, jejíž nejistota je vyhovující pro daný účel.

2.1.2 Měření

Měření – souhrn činností s cílem stanovit hodnotu veličiny.

Metrologie – věda zabývající se měřením.

Měřicí metoda – logický sled po sobě následujících genericky posloupně popsaných činností, které jsou používány při měření.

Měřicí postup – soubor specifický popsaných činností, které jsou používány při blíže určených měřeních podle dané metody.

Měřená veličina – veličina jejíž hodnota je předmětem měření.

Ovlivňující veličina – veličina, která není předmětem měření, která však působí na výsledek měření.

Výsledek měření – hodnota získaná měřením přisouzená měřené veličině.

Přesnost (exaktnost) měření – těsnost shody mezi výsledkem měření a pravou (konvenčně pravou) hodnotou měřené veličiny.

Opakovatelnost měření – těsnost shody mezi výsledky po sobě následujících měření téže měřené veličiny (na stejném objektu), provedených při stejných podmínkách, tj: stejné měřicí metodě, týmž pozorovatelem, týmž měřidlem, na stejném místě, ve stejných pracovních podmínkách, opakovaně po krátké časové periodě.

Reprodukovatelnost měření – těsnost shody mezi výsledky měření téže měřené veličiny provedených za změněných podmínek měření (princip měření, měřicí metoda, pozorovatel, měřicí přístroj, místo, podmínky použití, čas).

Výběrová směrodatná odchylka – pro sérii n měření téže veličiny je to veličina s charakterizující rozptyl výsledků a je dána rovnicí:

$$s(x) = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}{n - 1}}$$

kde: x_i ... výsledek i -tého měření,
 $\bar{x}$... aritmetický průměr

Nejistota měření – parametr přidružený k výsledku měření, který charakterizuje rozptyl hodnot, které by mohly být důvodně přisuzovány k měřené veličině.

Chyba (měření) – výsledek měření minus pravá hodnota měřené veličiny.

Relativní chyba – podíl chyby měření a pravé hodnoty měřené veličiny (konvenčně pravé hodnoty).

Náhodná chyba – výsledek měření minus střední hodnota, která by vznikla z nekonečného počtu měření téže veličiny uskutečněných za podmínek opakovatelnosti.

Systematická chyba – střední hodnota, která by vznikla z nekonečného počtu měření téže měřené veličiny uskutečněných za podmínek opakovatelnosti, od které se odečte pravá hodnota měřené veličiny.

Korekce – algebraický připočtená hodnota nekorigovanému výsledku měření ke kompenzaci systematické chyby.

2.1.3 Měřicí přístroje a měřidla

Ztělesněná míra (hmotná) – zařízení určené k reprodukování nebo dodávání jedné nebo více známých hodnot dané veličiny trvalým způsobem, způsobem během používání (např.: závaží, míra objemu, etalon elektrického odporu, koncová měrka atd.).

Měřicí přístroj (měřidlo) – zařízení určené k měření samotné nebo ve spojení s přidavným zařízením.

Měřicí převodník – zařízení, které poskytuje výstupní veličinu jejíž vztah ke vstupní veličině je určen.

Měřicí řetězec – řada prvků měřicího přístroje nebo měřicího systému, která vytváří cestu pro měřicí signál od vstupu k výstupu (např.: elektroakustický měřicí řetězec obsahuje: mikrofon, zesilovač, filtr, zeslabovač a voltmetr).

Měřicí systém (sestava) – úplný soubor měřicích přístrojů a jiného vybavení, který je sestaven k provádění specifikovaných měření (např.: přístrojové vybavení pro ověřování lékařských teploměrů).

Analogový měřicí přístroj – měřicí přístroj, jehož výstupní signál nebo údaj je spojitou funkcí hodnoty měřené veličiny nebo výstupního signálu.

(pozn.: název se vztahuje na způsob prezentace výstupních signálů nebo údajů nikoli na funkční princip, např. ručičkový voltmetr, skleněný rtuťový teploměr).

Číslicový (digitální) měřicí přístroj – měřicí přístroj, který poskytuje digitalizovaný výstup nebo zobrazení.

Snímač – část měřicího přístroje nebo měřicího řetězce, na kterou bezprostředně působí měřená veličina. (např.: plovák u měřidla hladiny).

Ukazatel – pevná nebo pohyblivá část indikačního přístroje, jejíž poloha vzhledem ke stupnici umožňuje určení indikované hodnoty (ručička, pisátko).

Stupnice – uspořádaný soubor značek společně s jakýmkoliv přidruženým očíslováním, který tvoří část zobrazovacího zařízení měřicího přístroje.

Rozsah stupnice – soubor hodnot stupnice mezi krajními značkami stupnice.

Justování – činnost spočívající v uvedení měřicího přístroje do funkčního stavu vhodného pro jeho používání.

Seřizování – justování provedené pouze s použitím prostředků, které jsou k dispozici uživateli.

2.1.4 Etalony

Etalon – měřidlo měřicí přístroj, ztělesněná míra, referenční materiál nebo měřicí systém, určené k definování, realizování, uchovávání nebo reprodukování jednotky nebo jedné či více hodnot veličiny k použití pro referenční účely (např.: etalon hmotnosti 1kg, etalonová koncová měrka, etalonový ampérmetr).

Soubor podobných ztělesněných měr nebo měřicích přístrojů, který při jejich společném využívání vytváří etalon se nazývá **skupinový etalon**.

Soubor etalonů zvolených hodnot, které individuálně nebo v kombinaci poskytují sérii hodnot veličin téhož druhu se nazývá **sada etalonů**.

Primární etalon – etalon, který je určen nebo ve velkém rozsahu uznáván jako etalon, který má nejvyšší metrologické jakost a jehož hodnota je akceptována bez navázání na jiné etalony pro tutéž veličinu (platí jak pro jednotky základní tak i odvozené).

Sekundární etalon – etalon, jehož hodnota byla stanovena porovnáváním s primárním etalonem pro tutéž veličinu.

Mezinárodní etalon – etalon uznávaný mezinárodní dohodou k tomu, aby sloužil v mezinárodním rozsahu jako základ pro stanovení hodnot jiných etalonů předmětné veličiny.

Národní etalon – etalon uznáný národním rozhodnutím k tomu, aby sloužil v dané zemi jako základ pro stanovení hodnot jiných etalonů předmětné veličiny.

Referenční etalon – etalon, který obvykle má nejvyšší metrologické kvality, které jsou k dispozici v dané lokalitě nebo v dané organizaci a od kterého se odvozují měření tam uskutečňovaná a rovněž jako měřicí standard nebo měřicí etalon.

Pracovní etalon – etalon, který je běžně používán pro kalibraci nebo kontrolu ztělesněných měř, měřících přístrojů nebo referenčních materiálů.

Porovnávací etalon – etalon používaný jako prostředek při porovnávání etalonů.

Návaznost – vlastnost výsledku měření nebo hodnoty etalonu, kterou může být určen vztah k uvedeným referencím zpravidla národním nebo mezinárodním etalonům přes nepřerušovaný řetězec porovnávání, jejichž nejistoty jsou uvedeny.

Nepřerušovaný řetězec porovnávání se nazývá **řetězec návaznosti**.

Kalibrace – soubor úkonů, kterými se stanoví za specifických podmínek vztah mezi hodnotami veličin, které jsou indikovány měřicím přístrojem nebo měřicím systémem nebo hodnotami reprezentovanými ztělesněnou mírou nebo referenčním materiálem a odpovídajícími hodnotami, které jsou realizovány etalony.

Referenční materiál – materiál nebo látka, jejichž jedna nebo více hodnot vlastností jsou dostatečně homogenní a stanoveny s dostatečnou úrovní k použití ke kalibraci přístrojů, k vyhodnocování měřících metod nebo pro stanovení hodnot materiálů.

3. Zákon č.119 /2000 Sb. – o metrologii (výňatek)

Právním základem metrologie je zákon č. 505/1990 Sb.– o metrologii ve znění zákona č.119/2000 Sb. Účelem zákona je úprava práv a povinností fyzických osob, které jsou podnikateli, právnických osob (dále jen „subjekty“) a orgánů státní správy, a to v rozsahu potřebném k zajištění jednotnosti a správnosti měřidel a měření.

3.1 Zákonné měřicí jednotky

Subjekty a orgány státní správy jsou povinny používat základní měřicí jednotky, jejich označování, násobky a díly stanovené vyhláškou.

Základními měřicími jednotkami jsou: jednotka délky - metr (m), jednotka hmotnosti - kilogram (kg), jednotka času - sekunda (s), jednotka elektrického proudu – ampér (A), jednotka termodynamické teploty – kelvin (K), jednotka látkového množství – mol (mol), jednotka svítivosti – kandela (cd).

3.2 Měřidla

Měřidla slouží k určení hodnoty měřené veličiny. Spolu s nezbytnými pomocnými měřicími zařízeními se pro účely tohoto zákona člení na:

- **etalony** - slouží k realizaci a uchování jednotky určité veličiny nebo stupnice a přenosu na měřidla nižší přesnosti,
- **pracovní měřidla stanovená** (dále jen stanovená měřidla) - měřidla, které Ministerstvo průmyslu a obchodu stanoví vyhláškou k povinnému ověřování s ohledem na jejich význam pro ochranu zdraví, životního prostředí, bezpečnost při práci atd.,
- **pracovní měřidla nestanovená** (dále pracovní měřidla) - nejsou etalonem ani stanoveným měřidlem,
- **certifikované referenční materiály a ostatní referenční materiály** - materiály nebo látky přesně stanoveného složení nebo vlastností, používané pro ověřování nebo kalibraci přístrojů, vyhodnocování měřících metod a kvantitativní určování vlastností materiálů.

3.3 Státní metrologická kontrola měřidel

Státní metrologickou kontrolou měřidel se pro účely tohoto zákona rozumí schvalování typu měřidla, prvotní a následné ověřování stanoveného měřidla a certifikace referenčních materiálů.

3.4 Ná vaznost měřidel

Ná vazností měřidel se rozumí zařazení daných měřidel do nepřerušené posloupnosti přenosu hodnoty veličiny počínající etalonem nejvyšší metrologické jakosti pro daný účel (státní etalon, primární etalon) až na pracovní měřidla za účelem zajištění jednotnosti a přesnosti měření. Grafické zobrazení pomocí **schémat ná vaznosti** měřidel.

Státní etalony mají pro příslušný obor měření nejvyšší metrologickou jakost ve státě. Schvaluje je Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví (ÚNMZ), který stanoví způsob jejich tvorby, uchovávání a používání.

Státní etalony uchovává Český metrologický institut (ČMI) nebo oprávněné subjekty pověřené ÚNMZ k této činnosti.

Státní etalony se navazují hlavně na mezinárodní etalony uchovávané dle mezinárodních smluv nebo na státní etalony jiných států s odpovídající metrologickou úrovní.

3.5 Schvalování typu měřidel vyrobených v tuzemsku

Měřidla podléhající schvalování typu ještě před zahájením výroby stanoví ministerstvo vyhláškou. Na žádost mohou být schváleny i typy jiných nově vyráběných měřidel.

Schvalování typu měřidla provádí Český metrologický institut. Zjišťuje, zda měřidlo bude schopno plnit funkci, pro kterou je určeno, a zda nemůže ohrozit bezpečnost při práci, zdraví nebo život jeho uživatelů nebo životní prostředí. Postup schvalování určí ministerstvo vyhláškou.

Na základě zkoušek a dalších zjištění Český metrologický institut vydá certifikát, že měřidlo jako typ schvaluje a přidělí mu značku schválení typu, kterou musí výrobce (pokud tak stanoví ministerstvo vyhláškou) umístit na měřidlo.

Platnost certifikátu o schválení typu měřidla zaniká uplynutím deseti let od data jeho vydání. Tuto lhůtu může ČMI na žádost výrobce nebo dovozce prodloužit o dalších deset let.

Platnost certifikátu o schválení typu se pozastavuje, jestliže změnou konstrukce měřidla, použitého materiálu nebo technologie jeho výroby byly ovlivněny vlastnosti rozhodné pro jeho schválení. Výrobce měřidla schváleného typu je povinen hlásit ČMI tyto změny a ten rozhodne, zda je nutné provést nové schválení nebo zda zůstává v platnosti schválení původní.

ČMI může platnost certifikátu o schválení typu měřidla pozastavit nebo i zrušit sám, jestliže vyráběná měřidla neodpovídají schválenému typu.

Měřidla neschváleného typu, pokud měl být typ schválen, nelze uvádět do oběhu. ČMI je oprávněn zjišťovat u výrobce, zda jsou měřidla vyráběna dle schváleného typu.

3.6 Schvalování typů dovezených měřidel

Nově dovážené typy stanovených měřidel podléhají povinnému schvalování typu. Žádost o schválení typu dovezeného měřidla podává ČMI ten, kdo uskutečňuje dovoz, pokud již nebyl typ schválen na žádost zahraničního výrobce před realizací dovozu.

Měřidla, která mají původ ve státech Evropských společenství, se považují za měřidla, jejichž typ byl schválen podle tohoto zákona, pokud jsou označena značkami platnými v Evropském společenství a jsou stanoveny vyhláškou ministerstva.

3.7 Certifikace referenčních materiálů

Certifikované referenční materiály jsou materiály, jejichž složení nebo vlastnosti byly certifikovány ČMI nebo autorizovaným metrologickým střediskem.

Certifikaci referenčního materiálu se potvrzuje hodnota jedné nebo více vlastností materiálu nebo látky postupem zajišťujícím návaznost na správnou realizaci jednotky, kterou se vyjadřují hodnoty vlastností, uvedené v certifikátu (náležitosti certifikátu stanoví ministerstvo vyhláškou).

Pro ověřování stanovených měřidel nebo kalibraci hlavních etalonů lze použít jen certifikované referenční materiály.

3.8 Ověřování a kalibrace

Ověřování a kalibrace měřidel je zjištění a potvrzení, že dané měřidlo má požadované metrologické vlastnosti (postup ověřování stanovených měřidel stanoví ministerstvo vyhláškou). O ověření stanoveného měřidla vydá ČMI nebo autorizované metrologické středisko ověřovací list nebo měřidlo opatří úřední značkou (náležitosti ověřovacího listu a grafickou podobu úřední značky stanoví ministerstvo vyhláškou).

Měřidla, která mají původ v zemích Evropského společenství se považují za měřidla ověřena dle tohoto zákona, pokud jsou označena značkami platnými v Evropském společenství a stanoveny vyhláškou ministerstva.

Při kalibraci pracovního měřidla se jeho metrologické vlastnosti porovnávají zpravidla s etalonem; není-li etalon k dispozici, lze použít certifikovaný nebo ostatní referenční materiál za předpokladu dodržení zásad stanovených schématem návaznosti.

3.9 Hotově balené zboží označené symbolem „e“

Hotově balené zboží označené symbolem „e“ je pro účel zákona zboží určené k prodeji a umístěné do obalu bez přítomnosti spotřebitele, jehož množství obsažené v obalu, hlavně objem nebo hmotnost má předem stanovenou hodnotu, kterou nelze změnit bez otevření nebo zjevného porušení obalu.

Balírny nebo dovozce hotově baleného zboží před uvedením do oběhu jsou oprávněni je označit symbolem „e“ pokud:

- mají osvědčení o metrologické kontrole hotově baleného zboží vydané ČMI (způsob a metody metrologické kontroly a náležitosti osvědčení stanoví ministerstvo vyhláškou),
- je dodržena hodnota jmenovitého obsahu a řady jmenovitých množství obsahu hotově baleného zboží v případech stanovených vyhláškou,
- jsou dodrženy dovolené odchylky obsahu hotově baleného zboží stanovené vyhláškou,
- jsou uvedeny na obalech hotově baleného zboží údaje stanovené vyhláškou.

3.10 Uvádění měřidel do oběhu

Před uvedením stanovených měřidel do oběhu má jejich výrobce a po provedení opravy těchto měřidel oprávněná povinnost zajistit jejich prvotní ověření, u ostatních měřidel jejich prvotní kalibraci. Výrobce certifikovaného referenčního materiálu má před jeho uvedením do oběhu povinnost předložit referenční materiál k certifikaci.

Prvotní ověření dovážených stanovených měřidel, prvotní kalibraci dovážených etalonů a pracovních měřidel a certifikaci dovážených referenčních materiálů zajišťuje jejich uživatel, pokud tak již nebylo zajištěno dovozcem nebo zahraničním výrobcem.

3.11 Používání měřidel

Stanovených měřidel může být používáno pro daný účel jen po dobu platnosti provedeného ověření. ČMI je oprávněn zjišťovat u uživatelů plnění povinnosti předkládat stanovené měřidlo k ověření. Pokud je měřidlo užíváno bez platného ověření, měřidlo zaplombuje nebo zruší úřední značku.

Jednotnost a správnost pracovních měřidel zajišťuje v potřebném rozsahu jejich uživatel kalibrací, není-li pro dané měřidlo vhodnější jiný způsob či metoda.

3.12 Úkoly subjektů

Subjekty:

- vedou evidenci používaných stanovených měřidel podléhajících novému ověření s datem posledního ověření a předkládají tato měřidla k ověření,
- zajišťují jednotnost a správnost měřidel a měření a jsou povinny vytvořit metrologické předpoklady pro ochranu zdraví zaměstnanců, bezpečnosti práce a životního prostředí přiměřeně ke své činnosti.

3.13 Úhrady

Výkony v metrologii se poskytují za úplatu, pokud předpisy o správních poplatcích nestanoví vyměření poplatku.

3.14 Pokuty subjektům

Úřad může uložit pokutu až do výše 1 000 000,- Kč subjektu, který např.:

- uvedl do oběhu měřidlo, jehož typ nebyl schválen, ač měl být nebo které nemělo vlastnosti schváleného typu anebo nebylo ověřeno, i když mělo být,
- použil stanovené měřidlo bez platného ověření k účelu, pro který byl předmětný druh měřidla vyhlášen jako stanovený,
- neoprávněně použil, pozměnil nebo poškodil úřední nebo kalibrační značku měřidla,

- ověřil stanovené měřidlo nebo provedl úřední měření bez oprávnění nebo vyrobil, popřípadě opravil měřidlo bez registrace předepsané zákonem,
- neposkytl zaměstnancům ČMI zákonem stanovenou součinnost,
- neplní stanovené povinnosti,
- použil ke kalibraci hlavního etalonu referenční materiál bez certifikátu nebo opatřil certifikovaný referenční materiál neplatným certifikátem,
- uvedl do oběhu hotově balené zboží označení symbolem „e“ v rozporu se stanovenými povinnostmi.

Při ukládání pokut se přihlíží hlavně k závažnosti, způsobu, době trvání a následkům protiprávního jednání. Pokuta je splatná do 30 dnů od nabytí právní moci rozhodnutí o uložení pokuty. Výnos pokut plyne do státního rozpočtu.

4. Základní měřicí jednotky

Oficiální definice všech základních jednotek SI jsou schváleny Generálními konferencemi vah a měr CGPM. První definice byla schválena v roce 1889 a poslední 1993. Tyto definice jsou čas od času upravovány tak, aby odpovídaly současnému vývoji vědy a aby se umožnila přesnější realizace základních jednotek.

Základních jednotek je sedm. V **tab. 4.1** jsou uvedeny jejich názvy a značky

Tab. 4.1 Základní jednotky SI

základní jednotka SI	název jednotky	značka jednotky	dosažitelná úroveň realizace (reprodukce) základní jednotky (r.2000)
délka	metr	m	10^{-9}
hmotnost	kilogram	kg	10^{-9}
čas	sekunda	s	10^{-15}
elektrický proud	ampér	A	10^{-5}
termodynamická teplota	kelvin	K	10^{-4}
látkové množství	mol	mol	10^{-2}
svítivost	kandela	cd	10^{-4}

Zákon č.119/2000 - o metrologii v §2 ukládá subjektům a orgánům státní správy používat základní měřicí jednotky, jejich značení, násobky a díly. V **tab. 4.2** jsou uvedeny názvy a značky násobných a dílčích předpon SI.

Tab. 4.2 Názvy a značky násobných a dílčích předpon SI.

Názvy a značky násobných předpon SI					
násobek	předpona	značka	násobek	předpona	značka
10^{24}	yotta-	Y-	10^9	giga-	G-
10^{21}	zetta-	Z-	10^6	mega-	M-
10^{18}	exa-	E-	10^3	kilo-	k-
10^{15}	peta-	P-	10^2	hekto-	h-
10^{12}	tera-	T-	10^1	deka-	d-
Názvy a značky dílčích předpon SI					
násobek	předpona	značka	násobek	předpona	značka
10^{-1}	deci-	d-	10^{-12}	piko-	p-
10^{-2}	centi-	c-	10^{-15}	femto-	f-
10^{-3}	mili-	m-	10^{-18}	atto-	a-
10^{-6}	mikro-	μ-	10^{-21}	zepto-	z-
10^{-9}	nano-	n-	10^{-24}	yocto-	y-

5. Instituce činné v oblasti metrologie

5.1 Ministerstvo průmyslu a obchodu

Ministerstvo průmyslu a obchodu:

- zabezpečuje řízení státní politiky v oblasti metrologie ,
- vypracovává koncepce rozvoje metrologie,
- zajišťuje řízení Úřadu pro technickou normalizaci, metrologii a zkušebnictví (ÚNMZ).

5.2 Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví

Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví (ÚNMZ):

- řídící orgán - sídlí v Praze,
- zabezpečuje úkoly vyplývající ze zákona o metrologii a navazujících vyhlášek a úkolů v oblasti sbližování technických předpisů a norem ČR s dokumenty EU,
- stanovuje program státní metrologie a zabezpečuje jeho realizaci,
- zastupuje Českou republiku v mezinárodních metrologických orgánech a organizacích, zajišťuje úkoly vyplývající z tohoto členství a koordinuje účast orgánů a organizací na plnění těchto úkolů i úkolů vyplývajících z mezinárodních smluv,
- autorizuje subjekty k výkonům v oblasti státní metrologické kontroly měřidel a úředního měření, pověřuje oprávněné subjekty k uchovávání státních etalonů, pověřuje střediska kalibrační služby a kontroluje plnění stanovených povinností u všech těchto subjektů; při zjištění nedostatků v plnění stanovených povinností může autorizaci odebrat,
- uděluje souhlas s navázáním hlavních etalonů na etalony zahraničních subjektů se srovnatelnou metrologickou úrovní,
- provádí kontrolu činnosti Českého metrologického institutu,
- poskytuje metrologické expertizy, vydává osvědčení o odborné způsobilosti metrologických zaměstnanců a stanoví podmínky za účelem zajištění jednotného postupu subjektů pověřených uchováváním státních etalonů, autorizovaných metrologických středisek, středisek kalibrační služby a subjektů pověřených výkonem úředního měření,
- zveřejňuje ve Věstníku Úřadu pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví zejména subjekty pověřené k uchováváním státních etalonů, autorizovaná metrologická střediska, subjekty autorizované pro úřední měření, střediska kalibrační služby, státní etalony, seznamy certifikovaných referenčních materiálů a schválené typy měřidel atd.

5.3 Český metrologický institut

Český metrologický institut (ČMI):

- je výkonným orgánem se sídlem v Brně,
- zabezpečuje českou státní a primární etalonáž jednotek a stupnic fyzikálních a technických veličin,
- provádí metrologický výzkum a uchovávání státních etalonů včetně přenosu hodnot měřících jednotek na měřidla nižších přesností,
- provádí certifikaci referenčních materiálů,
- provádí výkon státní metrologické kontroly měřidel, tj. schvalování typu a ověřování měřidel,
- provádí registraci subjektů, které vyrábějí nebo opravují stanovená měřidla, popřípadě provádějí jejich montáž,
- provádí výkon státního metrologického dozoru u autorizovaných metrologických středisek, středisek kalibrační služby, u subjektů autorizovaných pro výkon úředního měření, u subjektů, které vyrábějí nebo opravují stanovená měřidla, popřípadě provádějí jejich montáž, u uživatelů měřidel,
- provádí metrologickou kontrolu hotově baleného zboží,
- poskytuje odborné služby v oblasti metrologie,
- může povolit předběžnou výrobu před schválením typu měřidla.

5.4 Autorizovaná metrologická střediska

Autorizovanými metrologickými středisky jsou organizace, které Úřad autorizoval k výkonům v oblasti státní metrologie po akreditaci, spočívající v prověření úrovně jejich metrologického i prostorového vybavení a kvalifikace pracovníků.

Tato střediska provádí v rozsahu autorizace státní kontrolu měřidel a uchovávání etalonů. ÚNMZ přiděluje metrologickému středisku úřední značku pro ověření měřidla.

5.5 Střediska kalibrační služby

Střediska kalibrační služby jsou organizace, které jsou Úřadem pověřeny na základě akreditace ke kalibraci měřidel pro jiné subjekty.

5.6 Český institut pro akreditaci

Český institut pro akreditaci (ČIA):

- buduje a zajišťuje akreditační systém v ČR v souladu s evropskými normami řady 45000,
- provádí akreditaci zkušebních a kalibračních laboratoří,
- uděluje, odnímá nebo mění osvědčení o akreditaci, rozhoduje o jeho neudělení (pozastavení),
- zpracovává, vydává předpisy, metodické pokyny, metodické příručky z oblasti své působnosti,
- zabezpečuje a provádí posuzování žadatelů o akreditaci,
- vede registr žadatelů o akreditaci a akreditovaných míst,
- zabezpečuje a realizuje dohled nad trvalým dodržováním akreditačních kritérií atd.

5.7 Oblastní inspektoráty Českého metrologického institutu

Oblastní inspektoráty ČMI:

- ČMI má 7 regionálních inspektorátů (Praha, Plzeň, České Budějovice, Liberec, Pardubice, Brno, Opava) a 4 pobočky (Most, Jihlava, Kroměříž, Olomouc),
- zabezpečují sekundární etalonáže,
- zabezpečují výkon státní metrologické kontroly měřidel v rozsahu své působnosti atd.

6. Návaznost měřidel

Návazností měřidel se pro účely zákona č. 119/2000 Sb. rozumí zařazení daných měřidel do nepřerušené posloupnosti přenosu hodnoty veličiny počínající etalonem nejvyšší metrologické jakosti pro daný účel.

Návaznost je vlastnost měřidel popisující proces, kterým se údaj měřícího přístroje (zhmotné míry) může zodpovědným způsobem porovnat přes jednu nebo více úrovní se státním etalonem pro měřenou veličinu (jednotku). **Návaznost** je charakterizovaná některými hlavními znaky:

- **nepřerušovaný řetězec porovnávání** vedoucí k etalonu akceptovanému zúčastněnými stranami, obvykle státním nebo mezinárodním etalonům,
- **nejistota měření**, která musí být pro každou úroveň návaznosti určena v souladu s přijatými metodami a musí být stanovena tak, aby bylo možno určit celkovou nejistotu celého řetězce,
- **dokumentace** – každý krok v řetězci musí být proveden v souladu s dokumentovanými a všeobecně uznávanými postupy,
- **způsobilost laboratoře nebo orgánů**, které vykonávají jeden nebo více kroků v řetězci musí prokázat svoji způsobilost (dokladovat, že byli akreditováni),
- **reference na jednotky SI** – řetězec porovnávání musí končit primárním etalonem (etalon pro realizaci jednotek SI),
- **rekalibrace** – kalibrace musí být opakovaná ve vhodných intervalech, délka intervalů závisí na počtu proměnných veličin (požadovaná nejistota, frekvence používání, způsob používání, stabilita zařízení).

Úkol vytvoření nepřerušovaného řetězce přenosu hodnoty měřící jednotky od státního etalonu po pracovní měřidla pro příslušnou veličinu patří mezi základní úlohy metrologického zabezpečení.

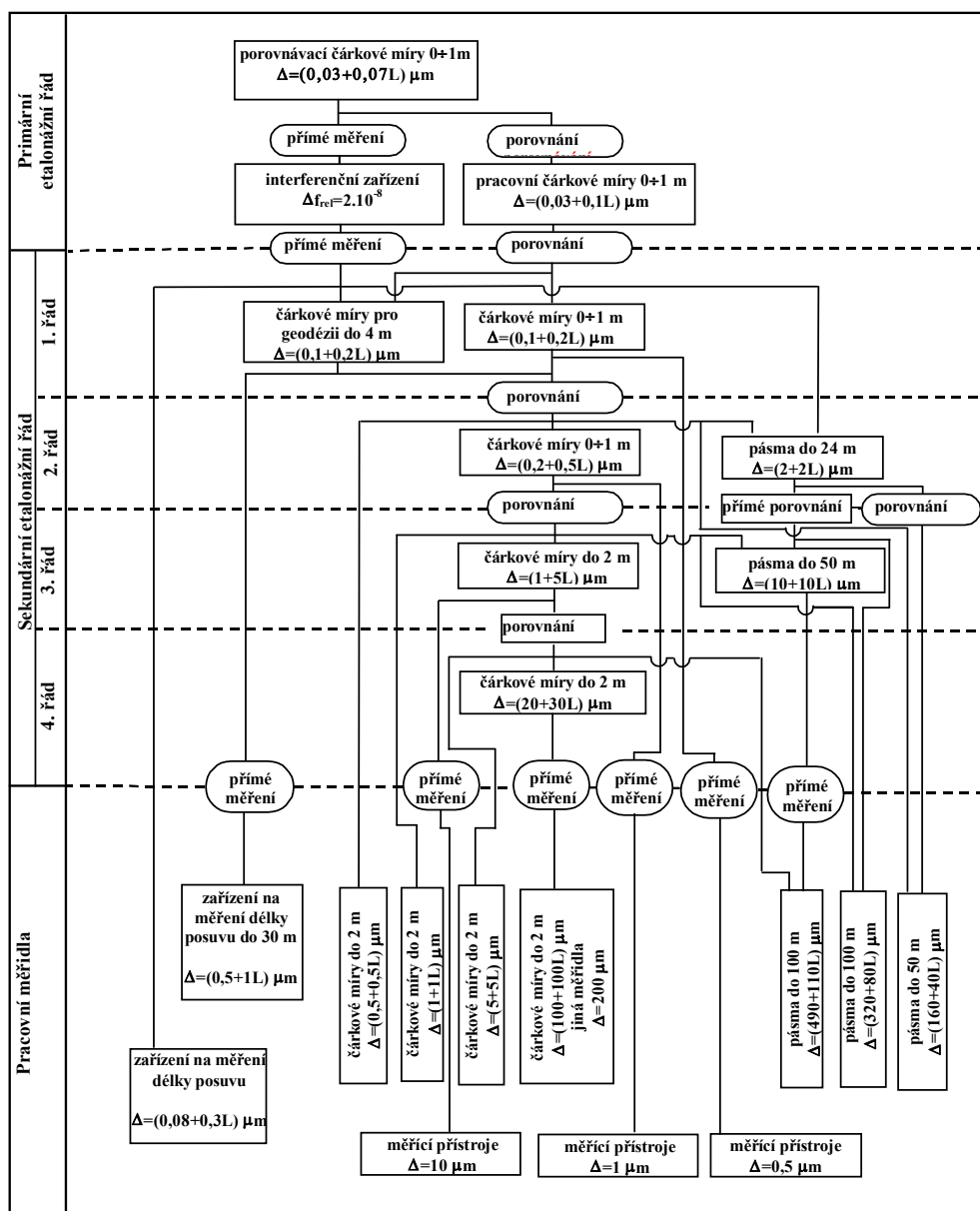
Návaznost na soustavu jednotek SI je možno docílit přímou nebo nepřímou návazností na příslušný primární etalon nebo přírodní fyzikální konstantu, jejíž hodnota (z hlediska příslušné jednotky SI) je známá a doporučená CGPM (Generální konference pro míry a váhy).

V případech, kde není možné zabezpečit návaznost až k jednotkám SI, při vytváření důvěry mohou být použity jiné prostředky, např.:

- použití vhodných certifikovaných referenčních materiálů,
- reciproční měření,

- vzájemné uznání norem nebo metod, které jsou jasně specifikované a schválené zúčastněnými stranami.

Na **obr. 6.1** je příklad schématu návaznosti délkových měřidel.



Obr. 6.1 Schéma návaznosti délkových měřidel

Stupňovitá hierarchie měřidel pro danou veličinu se vytváří tak, že se určí vhodný druh měřidel, metod a prostředků navazování, které musí být respektované při ověřování, kalibraci etalonů a pracovních měřidel. Hierarchie měřidel (etalonů) může být:

- volná,
- určená jednoduchým principem,
- pevná.

Volná hierarchie – uživatel má při důležitých měřeních povinnost prokázat návaznost na státní etalony.

Hierarchie určená jednoduchým principem – je založena na pravidle, že přesnost etalonu, na který se navazuje musí být několikrát vyšší než přesnost pracovního měřidla nebo pracovního etalonu. Nevýhodou tohoto principu je, že pro různé měřidla je vhodný jiný poměr přesnosti. Hodnoty vhodných poměrů se výrazně liší rovněž u přesných a méně přesných měřidel téže veličiny.

Pevná hierarchie – pro každou veličinu (druh měřidla) platí schéma návaznosti se specifikovanými řády přesnosti. Nevýhodou pevné hierarchie je její složitost.

Účelem schémat návaznosti na úrovni státu je:

- pro každou významnou veličinu určení vhodně odstupňovaných řádů přesnosti etalonů,
- výběr druhů měřidel schopných plnit funkci etalonů v každém řádu,
- určení metody přenosu hodnoty jednotky mezi jednotlivými řády etalonů nebo etalony a pracovními měřidly.

Schémat návaznosti měřidel jsou vytvořeny pro každou veličinu zvlášť, v případě příliš složitého a nepřehledného schématu se mohou rozdělit do ucelených částí dle měřicího rozsahu, charakteristického druhu měřidla nebo dle jiných znaků.

Každé schéma návaznosti se skládá z:

- grafické části, která poskytuje názorný přehled pro základní orientaci v návaznosti měřidel příslušné veličiny,
- textové části, kde jsou uvedené důležité informace o jednotlivých stupních hierarchie a návaznosti, vysvětlení, doporučení a komentáře.

Schémat návaznosti se člení na.

- **oblast státního etalonu** – obsahuje základní informace o státním etalonu a prostředcích navazování,
- **oblast referenčních a pracovních etalonů** – nejdůležitější část schémat, člení se podle hierarchie na řády a stanovuje požadavky na druhy a metrologické vlastnosti měřidel jednotlivých řádů a rovněž metody a prostředky navazování, odstupňování řádů referenčních a pracovních etalonů posuzované z hlediska hodnot poměrných nejistot mezi sousedními řády má být 3:1 až 10:1.
- **oblast pracovních měřidel** – obsahuje vybrané charakteristické a nejrozšířenější druhy pracovních měřidel rozdělených podle druhu, měřicího rozsahu a přesnosti.

7. Chyby a nejistoty měření

7.1 Chyby měření, jejich příčiny a členění

Měření je soubor experimentálních úkonů, jejichž cílem je určení hodnoty určité veličiny, tj. určení kvantitativní charakteristiky určitého kvalitativního znaku (vlastnosti) určitého objektu.

Opakujeme-li měření za stejných podmínek zjistíme, že výsledky měření se od sebe více nebo méně liší. Toto je způsobeno nepřesnostmi měřicího systému, nedodržením konstantních podmínek měření atd. **Každé měření je zatíženo chybou.**

Chyba měření (absolutní) je rozdíl mezi naměřenou hodnotou a pravou (konvenčně pravou) hodnotou, udává se v jednotkách měřené veličiny:

$$\varepsilon = y - x_0$$

kde: ε ... absolutní chyba,
 y ... naměřená hodnota,
 x_0 ... pravá (konvenčně pravá, skutečná) hodnota.

Cílem měření je určení skutečné hodnoty, je to možné jen určením chyby měření. Chyba je kladná, je-li naměřená hodnota větší než pravá (konvenčně pravá, skutečná) hodnota a při odhadu skutečné hodnoty se od naměřené hodnoty odečítá (postup se nazývá korekce naměřené hodnoty).

Relativní chyba je poměr absolutní chyby měření a pravé (konvenčně pravé) hodnoty měřené veličiny:

$$\delta = \frac{\varepsilon}{x_0} \text{ popř.: } \delta = \frac{\varepsilon}{x_0} \cdot 100[\%]$$

Hlavní příčiny vzniku chyb:

- měřidlo, měřicí systém (jsou dány nedokonalostí a nespolehlivostí měřících přístrojů, např.: chyby tření, chyby způsobené posunutím nuly, chyby umístění atd.),
- měřicí metoda (nerespektování dynamických vlastností měřidel, zanedbání některých funkčních závislostí - nepřímé měření),
- podmínky, při kterých se měření provádí (hlavně chyba teplotní),

- osoba, která měření provádí a vyhodnocuje (závisí na subjektivních vlastnostech osoby pozorovatele – zručnost, zkušenost, kvalifikace, psychický stav, chyba paralaxy, omezená rozlišovací schopnost).

Členění chyb:

- dle časové závislosti: statické, dynamické,
- dle možnosti vyloučení: odstranitelné, neodstranitelné,
- dle způsobu výskytu: chyby hrubé, chyby systematické, chyby náhodné.

7.1.1 Chyby hrubé

Příčinou **chyb hrubých** je nesprávně provedené měření, nesprávný odečet údaje, nesprávný způsob zpracování, vada přístroje, nesprávná manipulace s měřidlem apod. Výsledek měření ovlivněný hrubou chybou je nepoužitelný. Naměřené hodnoty zatížené hrubou chybou se ze souboru naměřených hodnot vylučují a nesmí se v měření pokračovat, pokud nebudou příčiny odstraněny. V některých případech je možno toto provést až po otestování podezřelých naměřených hodnot a to z důvodu možnosti, že naše rozhodnutí o vyloučení (nevyloučení) podezřelých hodnot ze souboru by mohlo být nesprávné.

Testování podezřelých hodnot (hodnot zatížených hrubou chybou) je možno uskutečnit za předpokladu normálního rozdělení hustoty pravděpodobnosti.

Postup při testování odlehle hodnoty při neznámé směrodatné odchylce střední hodnotě je následující:

- a) ze souboru naměřených hodnot $x_1 < x_2 < \dots < x_n$ se vypočte střední hodnota,

$$\bar{x} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i$$

- a výběrová směrodatná odchylka

$$s(x) = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}{n-1}}$$

- b) pro posouzení odlehlosti podezřelých hodnot souboru (x_2, x_n) se vypočtou normované hodnoty H_2, H_n ($x_2 < \bar{x}, x_n > \bar{x}$):

$$H_2 = \frac{\bar{x} - x_2}{s(x)} \text{ popř. } H_n = \frac{x_n - \bar{x}}{s(x)}$$

- c) z tabulek se určí mezní hodnota H pro předem stanovenou pravděpodobnost p a počet měření v souboru n (tab. 7.1).

Tab. 7.1 Mezní hodnoty H pro pravděpodobnost $p = 95\%$

Rozsah výběru n	5	10	15	20	30	40	50	100
Mezní hodnoty H	1,67	2,18	2,41	2,56	3,402	3,48	3,541	3,723

- d) za předpokladu, že $H_2 < H$ a $H_n > H$ hodnota x_2 není zatížena hrubou chybou a ponechá se v souboru, ale hodnota x_n je ovlivněna hrubou chybou a ze souboru naměřených hodnot se vyloučí.

7.1.2. Chyby systematické

Chyby systematické vznikají z příčin, které působí soustavně a jednoznačně co do smyslu a velikosti. Působení systematické chyby se dá zjistit změnou měřících poměrů, např. provedením měření na jiném přístroji, jiným pozorovatelem, za jiných podmínek atd.

Dle poznatelnosti systematické chyby dělíme na:

- **zjistitelné** (mají konkrétní znaménko a hodnotu, lze je použít ke korekci naměřené hodnoty),
- **neznámé** (nemají konkrétní znaménko, nedají se použít ke korekci naměřené hodnoty, zachází se s nimi jako s chybami náhodnými a zahrnují se do nejistoty měření).

Dle příčin výskytu systematické chyby dělíme na:

- **chyby měřidla** (vznikají při výrobě, činnosti a při používání, jsou způsobené nepřesností výroby jednotlivých funkčních elementů, nepřesností montáže, změnou pracovních podmínek, zjišťují se kalibrací nebo ověřováním),
- **chyby měřicí metody** (hlavní příčiny jsou nesprávná volba měřicí metody, nesprávné umístění měřené součásti na směr měření, vliv přitlačné síly, deformace atd.),
- **chyby osobní** (jsou způsobeny osobou, která provádí měření, příčiny – nevědomost, neopatrnost, nepozornost, nedokonalost lidských smyslů atd.),
- **chyby způsobené vlivem prostředí** (vlhkost, prašnost, teplota, osvětlení, tlak atd.).

Teplotní chyba

Teplotní chyba je způsobena rozdílem teploty měřené součásti a měřidla (popř. rozdílem jejich teplot) a teplotou referenční (20°C). Teplota jako vstupní veličina působí na přesnost měření přímo, ale i nepřímo (ovlivňuje tlak, vlhkost vzduchu atd.).

Systematická chyba teplotní ε_{ST} se pro absolutní metodu měření vypočte dle vztahu:

$$\varepsilon_{ST} = \alpha \cdot L \cdot (T - T_0)$$

kde: ε_{ST} ... systematická chyba teplotní,
 α ... koeficient délkové roztažnosti,
 L ... naměřená hodnota délkového rozměru,
 T ... teplota, při které se uskutečnilo měření,
 T_0 ... teplota referenční $T_0 = 20^\circ\text{C}$.

Při porovnávacím měření se systematická chyba vypočte dle vztahu:

$$\varepsilon_{STV} = L_S \cdot \alpha_S \cdot (T_S - T_0) - L_N \cdot \alpha_N \cdot (T_N - T_0)$$

kde: ε_{STV} ... systematická chyba naměřeného rozměru $v = L_S - L_N$,
 L_S ... rozměr součásti,
 L_N ... rozměr etalonu,
 $\alpha_S, (\alpha_N)$... koeficient délkové roztažnosti součásti (etalonu),
 $T_S, (T_N)$... teplota součásti (etalonu).

Vztah pro výpočet systematické teplotní chyby parametru v platí za předpokladu, že jednotlivé části měřidla (měřicího přístroje) mají stejnou teplotu a stejný koeficient délkové roztažnosti. Ve skutečnosti měřený rozměr je výsledkem lineárního rozměrového obvodu:

$$v = L_S - \sum_{i=1}^k l_i$$

Potom výsledný vztah pro výpočet teplotní systematické chyby parametru v je:

$$\varepsilon_{STV} = L_S \cdot \alpha_S (T_S - T_0) - \sum_{i=1}^k l_i \cdot \alpha_i (T_i - T_0)$$

kde: l_i ... délka i-tého členu měřicího přístroje (měřidla),
 α_i ... koeficient délkové roztažnosti i-tého členu,
 T_i ... teplota i-tého členu.

Eliminace teplotní systematické chyby:

1. měření se provede při teplotě T_0 ,
2. v případě, že $T \neq T_0$ je potřebná doba pro vyrovnání teplot τ :

$$\tau = 31,7 \frac{G}{S} \cdot \log \frac{\Delta t_1}{\Delta t_2}$$

kde: G ... hmotnost součásti [g],
 S ... plocha povrchu součásti [cm^2],
 Δt_1 ... počáteční rozdíl teplot součásti a okolí před stabilizací [$^\circ\text{C}$],

Δt_2 ... konečný rozdíl teplot součásti a okolí po stabilizaci [°C].

Vyjádření výsledné systematické chyby

V případě přímého měření:

$$\varepsilon_S = \sum_{i=1}^n \varepsilon_{Si}$$

kde: ε_{Si} ... dílčí systematická chyba

V případě nepřímého měření, kdy hodnota veličiny y je funkcí nezávislých veličin $x_1, x_2, x_i, \dots, x_n$ změřených přímo metodou, které jsou zatíženy známými systematickými chybami $\varepsilon_{Sx1}, \varepsilon_{Sx2}, \dots, \varepsilon_{Sxn}$:

$$\varepsilon_{Sy} = \sum_{i=1}^n \left[\frac{\partial f}{\partial x_i} \cdot \varepsilon_{Sxi} \right]$$

kde: $\frac{\partial f}{\partial x_i}$... parciální derivace funkční závislosti podle nezávislé veličiny x_i ,

ε_{Si} ... dílčí systematická chyba.

7.1.3 Chyby náhodné

Náhodné chyby jsou způsobené příčinami náhodného charakteru co do velikosti a směru působení. Při každém jednotlivém měření určité veličiny se vyskytnou náhodné chyby a ovlivňují každou naměřenou hodnotu. Při opakovaném měření za stejných podmínek (osoba, metoda, měřidlo, prostředí apod.) bude soubor naměřených hodnot v důsledku působení náhodných chyb vykazovat rozptyl (velikost rozptylu je úměrná vlivu náhodných chyb). Z jedné naměřené hodnoty nelze posoudit vliv náhodných vlivů, ale pouze ze souboru naměřených korigovaných hodnot je možno určit velikost náhodné chyby pomocí intervalu, ve kterém se bude nacházet s určitou pravděpodobností (jistotou) „skutečná“ hodnota naměřené veličiny.

Obecné vlastnosti náhodných chyb je možno vyjádřit dvěma zákony statistického charakteru:

- malé chyby jsou častější než chyby velké,
- chyby kladné jsou stejně četné jako chyby záporné (za předpokladu symetrického rozložení chyb).

Náhodné chyby mají při měření ve strojírenství nejčastěji Gaussovo (normální) rozdělení hustoty pravděpodobnosti výskytu.

Normální náhodná veličina nabývá hodnot v intervalu $<-\infty, \infty>$ s hustotou pravděpodobnosti výskytu:

$$f(x) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} \cdot e^{-\frac{(x_i - \mu)^2}{2\sigma^2}}$$

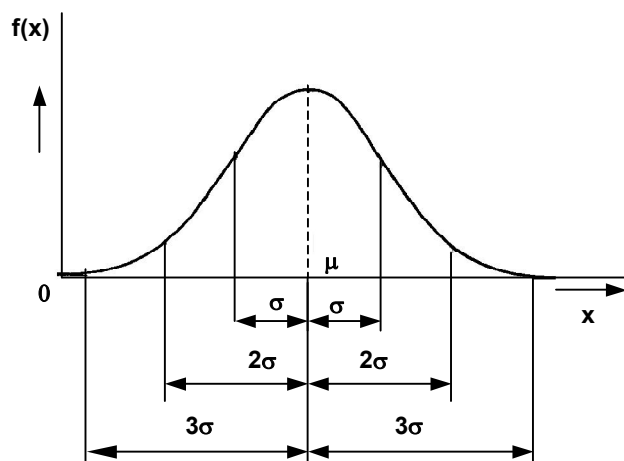
kde: σ ... směrodatná odchylka,
 x_i ... dílčí hodnoty,
 μ ... střední hodnota.

a distribuční funkci:

$$F(x) = \int_{-\infty}^{\infty} f(x) \cdot dx = \int_{-\infty}^{\infty} \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} \cdot e^{-\frac{(x_i - \mu)^2}{2\sigma^2}} \cdot dx$$

Normální rozdělení má dva parametry: μ – střední hodnotu a σ – směrodatnou odchylku. V bodě μ nabývá $f(x)$ maximum a je symetrická kolem přímky $x = \mu$. Parametr σ vymezuje takovou vzdálenost od μ , že v těchto hodnotách má funkce $f(x)$ inflexní body.

Intervaly vymezené délkou násobku parametru σ vymezují určité části hodnot náhodné veličiny (**obr.7.1**):



- interval $\langle \mu - \sigma, \mu + \sigma \rangle$ obsahuje 68,27 % náhodné veličiny,
- interval $\langle \mu - 2\sigma, \mu + 2\sigma \rangle$ obsahuje 95,45% náhodné veličiny,
- interval $\langle \mu - 3\sigma, \mu + 3\sigma \rangle$ obsahuje 99,73% náhodné veličiny.

Obr. 7.1 Parametry normálního rozdělení

Charakteristiky náhodného výběru

Základní charakteristikou výsledku měření (charakteristikou polohy souboru naměřených hodnot) je **výběrový průměr**:

$$\bar{x} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i$$

kde. x_i ... jednotlivé naměřené hodnoty veličiny **X**,
 n ... počet měření.

Rozptyl naměřených hodnot je charakterizován nejčastěji **výběrovou směrodatnou odchylkou**:

$$s(x) = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}{n-1}}$$

Směrodatnou odchylku rozptylu dílčích aritmetických průměrů můžeme pokládat za funkci **n** veličin x_i měřených se stejnou výběrovou směrodatnou odchylkou a lze ji vypočítat ze vztahu:

$$s(\bar{x}) = \frac{s(x)}{\sqrt{n}}$$

Náhodná chyba je násobkem směrodatné odchylky, která se určuje na základě zvolené pravděpodobnosti známého průběhu rozdělení hustoty pravděpodobnosti náhodných veličin.

Postup určení náhodné chyby pro zvolenou pravděpodobnost:

- pro zvolenou pravděpodobnost **p** určíme hodnotu **Φ(Z)**:

$$\Phi(Z) = \frac{p}{2}$$

- pro hodnotu **Φ(Z)** určíme hodnotu **Z** (Z ... normovaná náhodná veličina pro jednotkovou směrodatnou odchylku) - pomocí tabulek,
- náhodná chyba pro zvolenou pravděpodobnost **p**:

$$\varepsilon_n = Z \cdot s(\bar{x})$$

Takto stanovená hodnota náhodné chyby určuje interval kolem průměru $\bar{x}$, ve kterém se bude nacházet skutečná hodnota naměřené veličiny s předem stanovenou pravděpodobností.

Hodnotu $s(\bar{x})$ používáme ke stanovování nejistot typu A (u_A). Pravděpodobnost směrodatné odchylky (68,27% - standardní nejistota) nevyhovuje, požadujeme vyšší hladinu pravděpodobnosti. Hodnota $s(\bar{x})$ je vhodná pro srovnávání dvou nebo více řad měření, ale pro porovnávání s předem požadovanými hodnotami (např.: tolerancemi rozměrů na technických výkresech) není vhodná, protože při žádném měření nelze pominout existenci chyb měření, nelze také zabezpečit 100% jistotu výsledku, proto se zavádí pojem **nejistota měření** (viz samostatná kapitola), která nahrazuje vyjádření pomocí krajní chyby. Hodnoty pravděpodobnosti krajní nejistoty se blíží 100% a tak můžeme naměřené výsledky porovnávat s předem požadovanými hodnotami. Vyjádření nejistot je opačné než u chyb (nejistotě 5% odpovídá „krajní chyba“ s pravděpodobností 95%).+

Určení výsledné náhodné chyby

Pro funkční závislost mezi výstupní veličinou **y** a vzájemně nezávislými vstupními veličinami **x_i** [$y = f(x_1, x_2, \dots, x_m)$] a při znalosti náhodných chyb vstupních veličin pro zvolenou pravděpodobnost výsledná náhodná chyba se určí dle vztahu:

$$\varepsilon_{ny} = \sqrt{\sum_{i=1}^m \left(\frac{\partial f}{\partial x_i} \cdot \varepsilon_{nx_i} \right)^2}$$

kde: $\frac{\partial f}{\partial x_i}$... parciální derivace funkční závislosti dle nezávislé proměnné x_i

ε_{ny} ... náhodná chyba veličiny **y**,

ε_{nx_i} ... náhodná chyba nezávislé veličiny **x_i**.

Pro funkční závislost mezi výstupní veličinou **y** a vzájemně závislými vstupními veličinami **x_i** [$y = f(x_1, x_2, \dots, x_m)$] a při znalosti náhodných chyb vstupních veličin pro zvolenou pravděpodobnost výsledná náhodná chyba se určí dle vztahu:

$$\varepsilon_{ny} = \sqrt{\sum_{i=1}^m \left(\frac{\partial f}{\partial x_i} \cdot \varepsilon_{nx_i} \right)^2 + \sum_{\substack{i,k=1 \\ i \neq k}}^m \frac{\partial f}{\partial x_i} \cdot \frac{\partial f}{\partial x_k} \cdot \varepsilon_{nx_i} \cdot \varepsilon_{nx_k} \cdot r_{x_{ik}}}$$

$$r_{x_{ik}} = \frac{s_{x_{i,k}}}{s_{x_i} \cdot s_{x_k}}$$

kde: $r_{x_{ik}}$... korelační koeficient,

$s_{x_{i,k}}$... kovariance (korelační moment),

s_{x_i}, s_{x_k} ... směrodatné odchylky vstupních veličin x_i, x_k .

7.2 Nejistota měření

Pojem nejistota měření je relativně nový a v současné době velmi aktuální. U akreditovaných pracovišť se dle mezinárodních norem, směrnic a pokynů evropských organizací jednoznačně vyžaduje, aby výsledky měření, ověření, kalibrace, zkoušení byly uvedeny s nejistotou dané procedury.

Nejistotou se rozumí parametr charakterizující rozsah (interval) hodnot kolem výsledku měření, který můžeme odůvodněně přiřadit hodnotě měřené veličiny. Může se týkat výsledku měření, ale také hodnot odečtených na použitých přístrojích, hodnot použitých konstant, korekce atd., na kterých nejistota výsledku závisí.

Základem je pravděpodobnostní princip. Předpokládá se, že nejistota měření pokryje skutečnou hodnotu s předpokládanou pravděpodobností.

Základní charakteristikou nejistoty je **standardní nejistota u**, která je vyjádřena hodnotou směrodatné odchylky $s(\bar{x})$, při normálním rozdělení zaručuje výsledek s pravděpodobností 68,27%.

Standardní nejistoty se dle způsobu vyhodnocení člení na:

standardní nejistoty typu A (u_A):

- jsou získané z opakovaných měření,
- jejich hodnota s počtem měření klesá,
- současné technické prostředky umožňují zpracování velkého počtu naměřených hodnot a tím dávají možnost zmenšení velikosti standardní nejistoty typu A,
- při nezávislých naměřených hodnotách se standardní nejistota váže na výběrový průměr a zjistí se výpočtem směrodatné odchylky $s(\bar{x})$:

$$u_A = s(\bar{x}) = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}{n(n-1)}}$$

standardní nejistoty typu B (u_B):

- jejich hodnota nezávisí na počtu měření,
- metodika určování této nejistoty je metodika určování standardní nejistoty vázané na výběrový průměr určená jiným způsobem, nikoliv výpočtem směrodatné odchylky z opakovaných měření,
- jiné způsoby:
 - údaje nejistot uvedené v ověřovacích listech etalonů, stanovených měřidel, v kalibračních listech, certifikátech apod.,
 - nejistoty uvedené ve výsledcích předchozích měření,
 - nejistoty určené tabulkových koeficientů,
 - specifikace metrologických vlastností měřidel výrobců,
 - odhad na základě zkušenosti.

Postup stanovení nejistoty typu B (u_B):

- vytipování možných zdrojů těchto nejistot,
- určení standardních nejistot (převzetím, odhad apod.),
- posouzení závislosti mezi jednotlivými zdroji (určení korelačních koeficientů pro vzájemně závislé zdroje),
- výpočet výsledné nejistoty typu B (u_B) dle vztahů:

pro vzájemně nezávislé zdroje: $u_B = \sqrt{\sum_{i=1}^k \left(\frac{\partial f}{\partial z_i} \cdot u_{Bz_i} \right)^2}$

pro vzájemně závislé zdroje: $u_B = \sqrt{\sum_{i=1}^k \left(\frac{\partial f}{\partial z_i} \cdot u_{Bz_i} \right)^2 + \sum_{\substack{i,k=1 \\ i \neq k}}^k \frac{\partial f}{\partial z_i} \cdot \frac{\partial f}{\partial z_k} \cdot u_{Bz_i} \cdot u_{Bz_k} \cdot r_{z_{ik}}}$

kde: $\frac{\partial f}{\partial z_i}$... parciální derivace funkční závislosti dle zdroje z_i ,

u_{Bz_i} ... standardní nejistota typu B zdroje z_i .

Známe-li nejistoty obou typů pak můžeme určit hodnotu **kombinované standardní nejistoty** u_C .

Kombinovaná standardní nejistota u_C je kladnou druhou odmocninou ze součtu kvadrátů standardních nejistot u_A , u_B :

$$u_C = \sqrt{u_A^2 + u_B^2}$$

Standardní nejistota charakterizuje nejistotu intervalem jehož překročení (odlehlost skutečné hodnoty od udávané hodnoty) má poměrně velkou pravděpodobnost. Praxe proto upřesňuje charakteristiku nejistoty intervalem, jehož překročení má malou pravděpodobnost, hovoří se o **rozšířené nejistotě** U_C .

Rozšířená kombinovaná nejistota pro libovolnou pravděpodobnost:

$$U_C = k_U \cdot u_C$$

kde: k_U ... koeficient rozšíření (pokrytí).

Používání rozšířené nejistoty se omezuje na nejistotu výsledku měření, přičemž je vždy třeba uvést jakým způsobem byla její hodnota získána.

7.2.1 Určování rozšířených nejistot

Rozšířená nejistota U se udává místo kombinované standardní nejistoty v případech, kdy se požaduje vysoká spolehlivost (pravděpodobnost), že hodnota měřené veličiny bude překryta intervalem $<\bar{x} - U, \bar{x} + U>$ vymezeným touto nejistotou okolo hodnoty $\bar{x}$. Z pohledu statistiky jde o úlohu určení intervalu spolehlivosti, případně hranic intervalu spolehlivosti pro zvolenou pravděpodobnost p .

Zjednodušeně rozšířená nejistota je násobkem kombinované nejistoty u_C :

$$U = k_U \cdot u_C$$

Koeficient k_U se nazývá **koeficient rozšíření** nebo **pokrytí** a jeho hodnota se určuje:

- konvencí,
- výpočtem z údajů poskytovaných experimentátorem pro výpočet výsledků měření.

Konvenční hodnoty k_U se pohybují od $k_U=2$ (nejčastěji) do $k_U=3$ a bývají obsaženy:

- v technických normách a předpisech všeobecného určení,
- v individuálních dohodách, technických podmínkách, kontraktech apod.

Pro přímé měření jedné veličiny při velkém počtu měření ($n>30$) a při nekorelovaných zdrojích standardních nejistot typu B s rovnoměrným rozdělením odchylek je:

$$U = k_U \cdot u_C = k_p \sqrt{u_A^2 + u_B^2}$$

kde: $k_U=k_p$ má z normálního rozdělení pro konfidenční pravděpodobnost p hodnoty:

- $k_{0,9}=1,645$,
- $k_{0,95}=1,96$,
- $k_{0,99}=2,576$.

Pro případ shodný s předchozí, kdy počet opakovaných měření $n<30$ se pro výpočet použije stejný vztah, ale s $k_U = t_p$, kde hodnoty t_p jsou kritické hodnoty Studentova rozdělení pro pravděpodobnosti p , kdy $t_p=f(n,\alpha)$ (n je počet měření a $\alpha=1-p$).

Při přímém měření jedné veličiny a malém počtu měření ($n<10$) je předepsán výpočet rozšířené nejistoty dle vztahu:

$$U = 2 \cdot \sqrt{k_{UA}^2 \cdot u_A^2 + u_B^2}$$

V **tab. 7.2** jsou uvedeny hodnoty k_{UA} pro pravděpodobnost $p=95\%$.

Tab. 7.2 Hodnoty k_{UA} pro pravděpodobnost $p=95\%$

n	2	3	4	5	6	7	8	9
k_{UA}	7,0	2,3	1,7	1,4	1,3	1,3	1,2	1,2

7.2.2 Vyjádření výsledku měření

Při vyjadřování výsledku měření je nutno uvádět nejistotu na dvě platné číslice. Celý výpočet nejistoty se musí provést s nezaokrouhlenými hodnotami, až pak se provádí zaokrouhlení (dle normy ČSN 01 1010).

Při konečném zaokrouhlení výběrového průměru z naměřených hodnot postupujeme tak, že zaokrouhlená číslice má být řádově shodná s druhou platnou číslicí nejistoty. Tedy ve výsledku měření se uvádí výběrový průměr jako nejpravděpodobnější hodnota výsledku měření jen na tolik míst, aby jeho číslice nejnižšího řádu měla týž řád jako číslice nejnižšího řádu nejistoty měření při stejné jednotce metrologické veličiny.

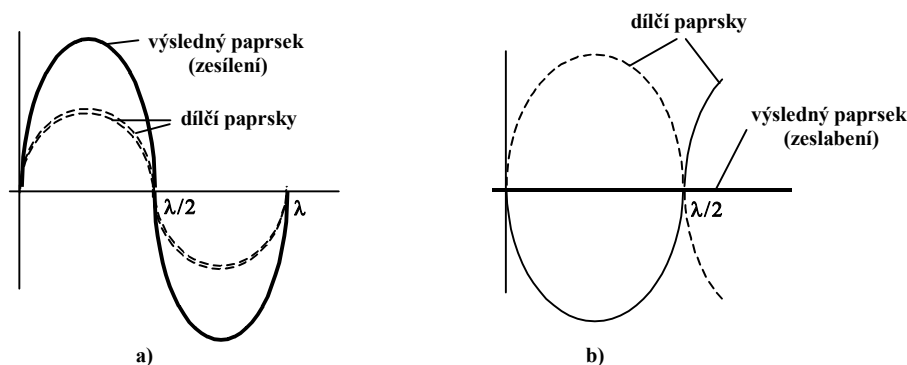
Výsledek měření píšeme v následující podobě. Nejprve uvedeme značku veličiny, jíž se další údaje týkají, dále zpravidla píšeme rovnítko, pak výslednou hodnotu a za znaménkem $\pm$ nejistotu. Pokud má vyjádřená veličina jednotku, připojíme jednotku.

Např.: $L = 58,65\text{mm} \pm 0,12\text{mm}$ nebo $L = (58,65 \pm 0,12)\text{mm}$ (vynechání závorek u druhého případu není správné)

8. Interference světla

Interference je založena na vlnové podstatě světla. Jednotlivé částice světla kmitají kolmo k pohybu šíření světla (příčné vlnění). Maximální výchylka od střední polohy se nazývá amplituda A , její velikost určuje intenzitu světla, která je přímo úměrná čtverci amplitudy.

Světlo každého zdroje je složeno z různých jednobarevných světél o určité vlnové délce λ . K rozdělení světla na jednotlivé složky se využívá lomu a rozkladu v hranolu nebo ohybu na ohybové mřížce. Interferovat mohou jen paprsky koherentní, tj. vycházejí z jednoho zdroje. Interference nastává tehdy, setká-li se v tomtéž bodě několik periodických kmitů, které mají stejné periody a konstantní na čase nezávislá fázová posunutí. Rozdělíme-li koherentní světelný paprsek ve dva, můžeme každý vést jinou optickou dráhou a pak je spojit. Dráhy obou paprsků budou různě dlouhé, to znamená, že do místa spojení přijdou v různých fázích, tj. pozorujeme jejich vzájemné zesílení nebo zeslabení. Z tohoto fázového posunutí můžeme usuzovat na dráhový rozdíl paprsků a tento dráhový rozdíl vypočítat.

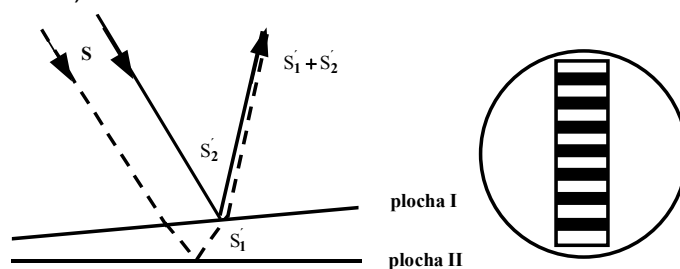


Obr.8.1 Zesílení a zeslabení světla interferencí

Je-li dráhový rozdíl obou paprsků od jejich rozdělení k opětovnému spojení roven lichému násobku půlvln, vznikne tma. Je-li dráhový rozdíl nulový nebo je-li roven celistvému násobku vlnových délek, je výsledná amplituda dvojnásobná a intenzita světla se zesílí. Představíme-li si světlo jako vlnoplochy, pak v místech, kde nastává zeslabení – zesílení intenzity světla (**obr. 8.1**), dostaneme **interferenční proužky**, které se používají k měření.

Rozdělení paprsků se v měřicí technice nejčastěji provádí planparalelní destičkou, hranoly s dělicí rovinou nebo destičkou, kde dělicí rovina nebo destička je opatřena polopropustnou vrstvou. Tato polopropustná vrstva rozděluje dopadající paprsek ve dva: jeden paprsek propouští na zrcadlo, druhý paprsek dopadá na měřenou součást, od které se odráží zpět. Tento způsob se nejčastěji používá u interferenčních komparátorů nebo interferenčních mikroskopů.

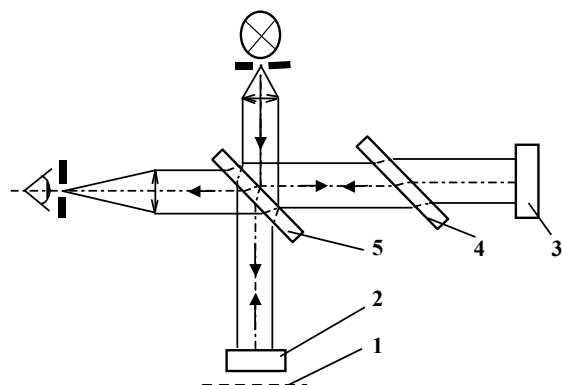
Vznik interference nejlépe poznáme na klínové vrstvě. Položíme-li na hladkou lesklou plochu planparalelní destičku a lehkým tlakem ji posuneme stranou, vznikne mezi oběma styčnými plochami tenký vzdušný klín (**obr. 8.2**).



Obr. 8.2 Vznik interference v klínové vrstvě a interferenční proužky na měřené ploše

8.1 Využití interference světla v metrologii

Celá řada přístrojů využívajících interference světla je založena na principu Michelsonova interferometru (**obr. 8.3**).



- svazek vstupujících paprsků se na polopropustné desce 5 dělí do dvou svazků, které se odrážejí od zrcadel 2 a 3,
- odražené paprsky se opět vracejí, interferují na polopropustné desce a vycházejí z přístroje,
- obraz zrcadla 3 v polopropustné desce leží v referenční rovině 1,
- nakloněním zrcadla 2 vznikne klínová vrstva, která vyvolá vznik interference,
- paprsky odražené od polopropustné desky 5 procházejí deskou na rozdíl od druhého paprsku dvakrát, je pro kompenzaci vložena do druhého svazku paprsků deska 4.

Obr. 8.3 Schéma Michelsonova interferometru

Interference světla je možno v metrologii využít:

- ke kontrole střední délky koncové měrky,
- ke kontrole odměřovacích systémů měřících a výrobních strojů,
- ke kontrole rovinnosti,
- ke kontrole přímosti,
- ke kontrole drsnosti atd.

9. Koncové měrky

Koncové měrky:

- jsou všeobecně uznávány jako základ délkového měření ve strojírenské výrobě,
- jsou to etalony délky reprezentující specifický díl délky (metru), mezinárodního systému jednotek SI,
- vyrábějí se nejčastěji ve tvaru hranolů o průřezu 9x30 mm do jmenovitého rozměru 10mm a 9x35mm nad 10 mm délky,
- měřicí plochy jsou opracovány s vysokou přesností rozměrovou, rovnoběžností funkčních ploch a drsností povrchu.

Koncové měrky se používají:

- pro nastavení měřidel, měřících přístrojů a přípravků,
- k ověřování a kalibraci měřidel,
- jako etalon délky,
- pro přímou kontrolu délkových rozměrů výrobků.

Požadavky kladené na materiál koncových měrek:

- vysoká tvrdost,
- otěruvzdornost,
- korozivzdornost,
- rozměrová stálost,
- malý koeficient délkové roztažnosti,
- dobrá nasávací schopnost,
- dobrá obrobitelnost.

Nejčastěji používané materiály:

- nástrojová ocel 19 422 - nevýhodou je malá odolnost proti korozi $\Rightarrow$ nutné používat při práci s měrkami rukavice a po skončení práce provést konzervaci,
- karbid wolframu (WC) – vysoká tvrdost a otěruvzdornost,

- keramický materiál (nejčastěji oxid zirkonu ZrO_2) - korozivzdornost, vysoká rozměrová stálost.

Značení koncových měrek dle ČSN EN ISO 3650 (ČSN 25 3308):

- koncové měrky musí být trvale značeny jmenovitou délkou v milimetrech,
- je-li na měrce uvedena třída přesnosti, musí být použito toto značení:

▪ kalibrační třída K:	K
▪ třída 0:	0
▪ třída 1:	-
▪ třída 2:	=

Požadovaný rozměr měrky se skládá z jednotlivých měrek, které se spojují tzv. nasáváním. Správně nasáté měrky s nepoškozenými funkčními plochami drží spolu vlivem molekulových přitažlivých sil. Při sestavování rozměrů z jednotlivých měrek je nutno pamatovat na chyby, které mohou ovlivnit celý rozměr.

Chyby:

- vlastní chyby měrky,
- chyba způsobená nepřesnostmi ve styku dvou měrek (cca $0,1 \div 0,2 \mu m$),
- chyba ve styku měrky s plochou stolku komparátoru, měrky a funkční plochy snímače apod. (cca $0,2 \div 0,4 \mu m$).

9.1 Základní parametry koncových měrek

Základními parametry koncových měrek jsou (**obr.9.1**):

délka koncové měrky v libovolném bodě (l) - kolmá vzdálenost zvoleného bodu volné (nenasáté) plochy od rovinné plochy desky, na které je měrka nasátá,

středová délka koncové měrky (l_c) - délka kolmice středu volné měřicí plochy měrky na plochu k níž měrka přilnula svou druhou plochou,

odchylka délky v libovolném bodě od jmenovité délky (t_e) – algebraický rozdíl $l - l_n$,

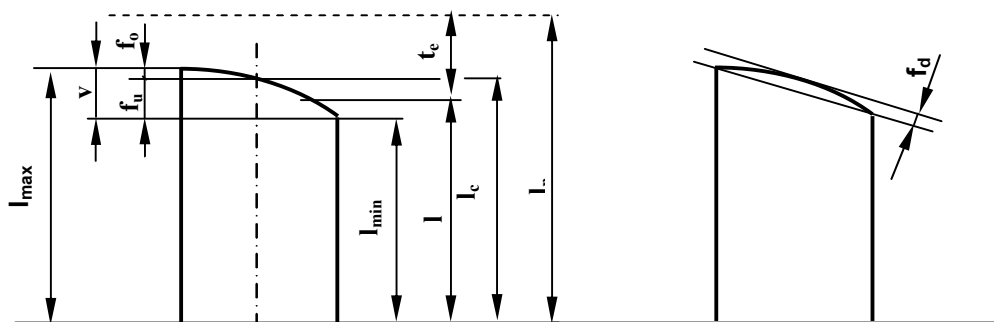
odchylka rovinnosti (f_d) – nejmenší vzdálenost mezi dvěma rovnoběžnými plochami, mezi kterými leží všechny body měřicí plochy,

rozpětí délky (v) – rozdíl mezi největší délkou koncové měrky l_{max} a nejmenší délkou l_{min} (rozpětí délky je rovno součtu odchylek f_o a f_u od střední délky l_c),

tvrdost měřicích ploch musí být min. 800 HV nebo 62 HRC,

přilnavost – schopnost měřicích ploch měrek přilnout působením molekulárních sil k jiným měřicím plochám nebo na plochy se stejnou úpravou povrchu,

koeficient délkové roztažnosti - pro ocel při teplotě $(10 \div 30)^\circ C$ musí být v rozmezí $(11,5 \pm 1) 10^{-6} K^{-1}$, pro jiné materiály musí výrobce hodnotu tohoto koeficientu uvést v dokumentaci.



Obr. 9.1 Základní parametry koncové měrky

Měřicí plochy měrek nesmí být poškozené, připouští se jen drobné rýhy, které nemají vliv na přilnavost a které neovlivňují výsledky měření.

9.2 Kontrola koncových měrek

Kontrola koncových měrek je složitou operací, při které se kontrolují všechny jakostní parametry měrky vč. koroze, mechanického poškození, drsnosti atd.

Každá koncová měrka musí splňovat požadavky své třídy (specifikace požadavků viz ČSN EN ISO 3650). Shoda se specifikacemi se prokazuje v souladu s ISO 14253-1.

9.3 Kalibrace měrek

Měření koncových měrek je sledem jednotlivých přenosů délky vycházejících ze základní definice jednotky délky a pokračují interferenčním navázáním vyšší třídy (přednostně třídy K) koncových měrek. Dále smí následovat jeden nebo více přenosů porovnávacím měřením ostatních tříd koncových měrek.

9.3.1 Kontrola přilnavosti

Schopnost měřicích ploch koncových měrek přilnout se zkouší použitím optické destičky,, která musí mít zajištěnou odchylku rovinnosti $0,1\mu\text{m}$. Přilnutá měřicí plocha musí být prohlédnuta přes optickou destičku a nesmí vykazovat žádné interferenční pruhy, barevné a lesklé skvrny. U měrek třídy přesnosti 1 a 2 jsou lesklé skvrny a stíny v malém rozsahu přípustné.

9.3.2 Interferenční měření

Měřená délka

Délka koncové měrky (třída přesnosti K) se měří ve středu měřicí plochy interferenční metodou. Měření odchylek f_o a f_u od středové délky se provádí v bodech největší délky $l_{\max}$ a nejmenší délky $l_{\min}$ koncové měrky. Pomocná destička, na kterou je měrka přilnuta po dobu měření, by měla být vyrobena ze stejného materiálu jako měřená měrka a mít stejnou úpravu povrchu příslušné plochy, jinak nutno zavést korekce - rozdílné vlastnosti materiálů.

Korekce k interferenčním měřením

Do výpočtů se berou korekce významných vlivů, např.: teploty, atmosférického tlaku, vlhkosti, odchylky teploty měrky od 20°C , vliv přilnavosti na délku koncové měrky, nastavení interferometru atd.

Kalibrační list

Kalibrační list musí obsahovat:

- výsledky měření, hlavně středovou délku l_c nebo odchylku středové délky od jmenovité délky $l_c - l_n$,
- odhadnuté nejistoty měření a návaznost s odkazem na použití etalon,
- koeficient teplotní délkové roztažnosti (přepočet délky na teplotu 20°C).

Kalibrační list musí uvádět, kterou měřicí plochou byla koncová měrka při měření přilnuta a zda koncová měrka byla nasunuta na pomocnou destičku každou ze dvou měřicích ploch.

9.3.3 Porovnávací měření

Stanovit délku koncové měrky porovnávací metodou znamená určit rozdíl mezi středovou délkou referenční koncové měrky a měrky měřené při algebraickém uplatnění referenční délky. Měřicí plochy každé z měrek jsou kontaktovány smyslech, délkový rozdíl je měřen indikátorem délky s vysokou rozlišovací schopností.

Středová délka

Při porovnávacím měření je přenášena středová délka referenční koncové měrky na zkoušenou měrku.

Rozpětí délky

Měření se provádí tak, že se stanovuje rozdíl mezi středem a čtyřmi rohy měřicí plochy přibližně 1,5 mm od bočních ploch. Pokud pro stanovení rozpětí délky byly použity jiné body než v rozích měřicí plochy, musí být umístění popsáno.

Korekce v porovnávacím měření

Korekce musí být provedeny na:

- chybu správnosti měřicího zařízení,
- vliv teploty od 20°C a rozdílného koeficientu teplotní délkové roztažnosti porovnávaných měrek,

- vliv rozdílné deformace kontaktu snímače s měřicími plochami.

Kalibrační list

Kalibrační list musí obsahovat:

- výsledky měření, hlavně středovou délku l_c nebo odchylku středové délky od jmenovité délky $l_c - l_n$,
- odhadnuté nejistoty měření a návaznost,
- koeficient teplotní délkové roztažnosti koncových měrek použitý pro provedení korekce.

10. Tolerování a lícování

10.1 Tolerance rozměru jako funkce jmenovitého rozměru a stupně přesnosti

Za účelem návaznosti tolerance rozměru s jmenovitým rozměrem se zavádí pojem **toleranční pole**. Poloha tolerančního pole vůči jmenovitému rozměru je dána mezními hodnotami, šířka pole je určena tolerancí.

Za účelem zajištění stejné úrovně přesnosti pro různé jmenovité rozměry jsou zavedeny stupně přesnosti jako ukazatel přesnosti. Tolerance pro daný jmenovitý rozměr se určí dle vztahu:

$$IT = k \cdot i$$

kde: i ... toleranční jednotka,

k ... součinitel zohledňující stupeň přesnosti.

Norma ISO (PN-EN 20286-1) zahrnuje 20 stupňů přesnosti IT (01, 0, 1÷18).

10.2 Základní informace

Dle norem PN-EN 20286-1 a PN-EN 20286 jsou normalizovány tolerance pro rozměry do jmenovitého rozměru 3150 mm. Tento rozsah je rozdělen do dvou skupin: střední rozměry do 500 mm a velké rozměry 500÷3150 mm.

V jednotlivých skupinách jsou rozsahy rozděleny do 21 skupin, pro každou skupinu se vypočte toleranční jednotka pro geometrický střed mezí příslušné skupiny:

$$D = \sqrt{D_1 \cdot D_2}$$

kde: D_1 a D_2 ... rozměrové meze dané skupiny.

Pro rozměry do 500 a IT 5 ÷ IT8:

$$i = 0,45\sqrt{D} + 0,001D \text{ [}\mu\text{m]}$$

Pro stupně přesnosti IT01, IT0 a IT1 se vypočte přímo velikost tolerance dle vztahů:

$$IT01 = 0,3 + 0,008D$$

$$IT0 = 0,5 + 0,012D$$

$$IT1 = 0,8 + 0,02D$$

Tolerance pro stupně přesnosti IT2, IT3 IT4 jsou odstupňovány přibližně v geometrické řadě s krajními členy tvořenými číselnými hodnotami pro IT1 a IT5.

Pro rozměry 500 ÷ 3150 pro všechny stupně přesnosti hodnoty toleranční jednotky se určí ze vztahu:

$$i = 0,004D + 2,1 \text{ [}\mu\text{m]}$$

Pozn.: Do všech vztahů hodnotu D dosazujeme v mm.

10.3 Základní úchylka

Vzdálenost skupiny tolerancí od nulové čáry je určena pomocí tzv. **základní úchylky**. Je to ta ze dvou mezních úchylek, která je bližší jmenovitému rozměru. **Základní úchylka** tedy určuje polohu tolerančního pole vzhledem k nulové čáře. Norma PN-EN20660-1 stanovuje 28 poloh tolerančního pole pro hřídele (označení malá písmena: a, b, c,,zc) a 28 poloh pro díry (označení velká písmena: A, B, C, ..., ZC).

Značení úchylek:

- dolní mezní úchylka:
 - ♦ pro hřídele: ei,
 - ♦ pro díry: EI.
- horní mezní úchylka:
 - ♦ pro hřídele: es,
 - ♦ pro díry: ES.

10.4 Uložení (lícování)

Uložení popisuje charakter spolupráce vycházejí z rozměrů součástí před jejich spojením.

Způsoby uložení:

- **uložení volné** (po smontování díry a hřídele vždy nastane vůle, tj. dolní mezní rozměr díry je větší nebo rovný hornímu meznímu rozměru hřídele),
- **uložení pevné** (po smontování díry a hřídele vždy nastane přesah, tj. horní mezní rozměr díry je menší nebo rovný dolnímu meznímu rozměru hřídele),
- **uložení přechodné** (po smontování díry a hřídele může nastat vůle i přesah, což závisí na skutečných rozměrech díry a hřídele).

Soustavy uložení jednotné díry a jednotného hřídele:

- **soustava jednotné díry** – poloha tolerančního pole díry pro všechna uložení je neměnná – označení základní úchylky **H**, dle uložení se mění poloha tolerančního pole hřídele.
- **soustava jednotného hřídele** – poloha tolerančního pole hřídele pro všechna uložení je neměnná – označení základní úchylky **h**, dle uložení se mění poloha tolerančního pole díry.

Z pohledu jakosti uložení soustavy jednotné díry a jednotného hřídele jsou si rovnocenné. Rozdíl mezi soustavami je hlavně rázu technologického a ekonomického. Upřednostňuje se soustava jednotné díry (nižší náklady na výrobu a kontrolu). Soustava jednotného hřídele má nezastupitelné místo např.: u klikových hřídelí nebo stupňovitých pístů.

11. Pevná měřidla

K zajištění vyměnitelnosti součástí, tj. dodržení rozměrů v určité toleranci, jsou ve výrobě používána pevná měřidla, která umožňují zjištění polohy skutečného rozměru součástí v tolerančním poli, popř. i jeho tvar jednoduchým, hospodárným a dostatečně přesným způsobem.

Rozdělení pevných měřidel:

- netoleranční:
 - používají se, je-li stanoven jen jeden rozměr, např. jmenovitý,
 - lze zde zařadit drátoměry, spároměry atd.
- toleranční (mezní) – kalibry:
 - jejich rozměry jsou jednoznačně stanoveny,
 - zjišťujeme, zda se rozměr kontrolované součásti nachází v dovořených mezích,
 - mívají dobrou a zmetkovou stranu,
 - svým tvarem musí měřidlo odpovídat Taylorovu zákonu, tj. dobrá strana měřidla (kalibru) má odpovídat ideální součásti, aby byla zaručena vzájemná vyměnitelnost a má být tak dlouhá jako kontrolovaná díra (u kalibru na kontrolu děr), zmetková strana má naopak jednotlivé rozměry kontrolovat bodově, aby bylo možné zjistit místní odchylky tvaru, které překračují toleranční pole,
 - způsob kontroly mezními měřidly je takový, že dobrá strana má kontrolovanou plochou projít vlastní hmotností, resp. „lehce“ nasunout nebo našroubovat, zatímco zmetková strana se může na kontrolovanou plochu maximálně okrajem zachytit.

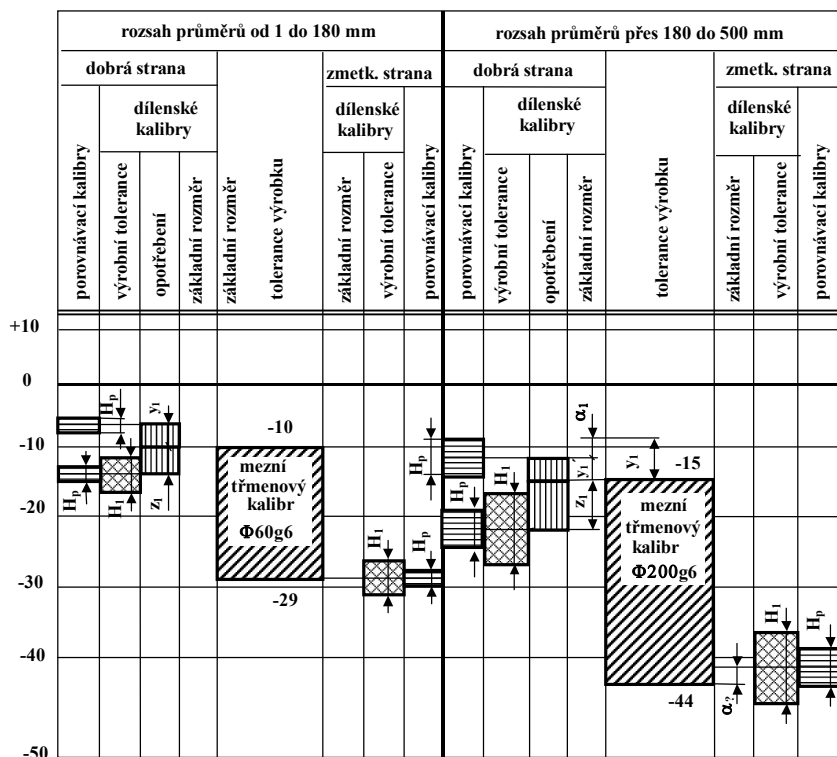
Při kontrole se používají:

- dílenské kalibry (pro výrobu),
- porovnávací kalibry (pro kontrolu dílenských kalibrů):
 - pro kontrolu dobré strany nové,
 - pro kontrolu dobré strany opotřeбенé,

- pro kontrolu zmetkové strany,
- přejímací kalibry (při přejímce výrobků zákazníkem nebo v dílnách přejímacími orgány).

Nové kalibry jsou ve výrobě používány do doby, kdy jejich opotřebení dosáhne poloviny dovoleného opotřebení, pak se z výroby stáhnou a jsou využívány hlavně ke konečné kontrole a to do úplného využití tolerance měřidla.

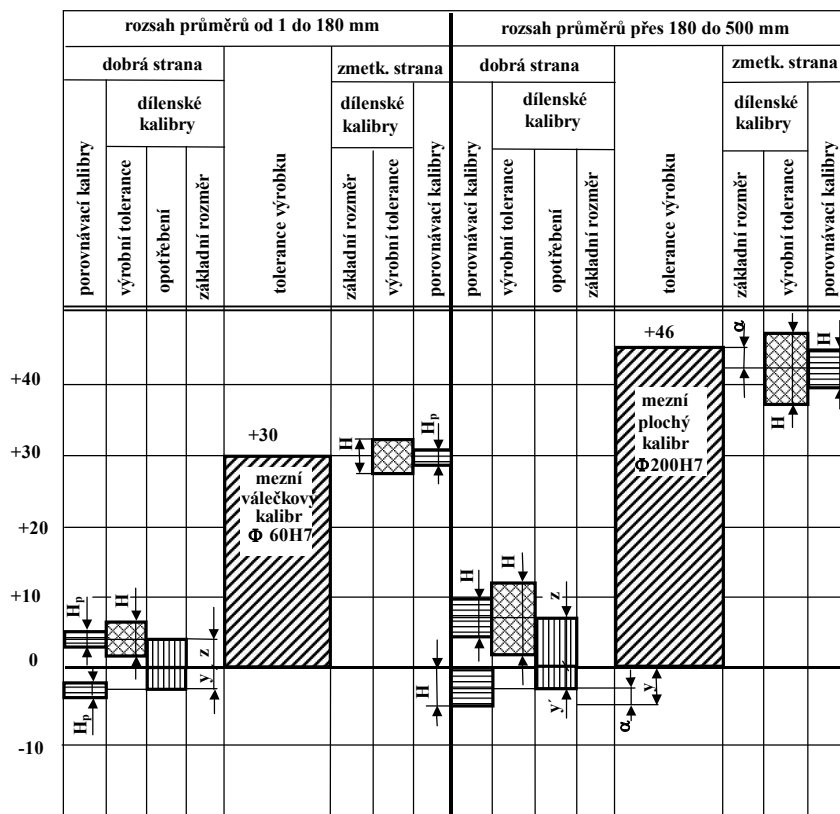
Správnost měření mezními kalibry ovlivňuje výrobní tolerance kalibru, opotřebení měřících ploch a chyby způsobené nepřesností měření kalibru. Vzájemný vztah tolerance výrobků a tolerance dílenských a porovnávacích kalibru **obr. 11.1 a 11.2**. Na jeho základě je možno vypočítat jednotlivé rozměry kalibrů (**tab. 11.1, 11.2**).



Obr. 11.1 Vzájemný vztah tolerance výrobků a tolerance dílenských a porovnávacích kalibrů pro hřídele

Tab. 11.1 Vztahy pro výpočet jednotlivých rozměrů pro kalibry na kontrolu hřídeli

kalibr	rozměr měřidla	tolerance
dílenský-dobrá strana nová	$HMR-z_1$	$\pm 0,5H_1$
dílenský-dobrá strana opotřebená	$HMR+y_1-\alpha_1$	
dílenský-zmetková strana	$DMR+\alpha_1$	$\pm 0,5H_1$
porovnávací pro dobrou stranu novou	$HMR-z_1$	$\pm 0,5 H_p$
porovnávací pro dobrou stranu opotřebenou	$HMR+y_1-\alpha_1$	$\pm 0,5 H_p$
porovnávací pro zmetkovou stranu	$DMR+\alpha_1$	$\pm 0,5 H_p$



Obr. 11.2 Vzájemný vztah tolerance výrobků a tolerance dílských a porovnávacích kalibrů na otvory

Tab. 11.2 Vztahy pro výpočet jednotlivých rozměrů pro kalibry na kontrolu otvorů

kalibr	rozměr měřidla	tolerance
dílský-dobrá strana nová	DMR+z	$\pm 0,5H$
dílský-dobrá strana opotřebovaná	DMR-y+ α	
dílský-zmetková strana	HMR- α	$\pm 0,5H, \pm 0,5H_0$
porovnávací pro dobrou stranu novou	DMR+z	$\pm 0,5 H_p$
porovnávací pro dobrou stranu opotřebovanou	DMR-y+ α	$\pm 0,5 H_p$
porovnávací pro zmetkovou stranu	HMR- α	$\pm 0,5 H_p$

Význam jednotlivých značení ke vztahům v tabulkách 11.1 a 11.2:

DMR ... dolní mezní rozměr součásti

HMR ... horní mezní rozměr součásti,

z ... úchylka středu tolerančního pole dobrá strana kalibru na otvory vzhledem k DMR,

z₁ ... úchylka středu tolerančního pole dobrá strana kalibru na hřídele vzhledem k HMR,

H ... výrobní tolerance kalibru válečkového (plochého),

H₀ ... výrobní tolerance kalibru s kulovými dotyky (odpichy),

H₁ ... výrobní tolerance kalibrů na kontrolu hřidel,

H_p ... výrobní tolerance porovnávacích kalibrů,

y, (y₁) ... dovolená mez opotřebování dobré strany kalibrů na kontrolu otvorů (hřidel),

α , (α_1) ... pojistné pásmo pro vyrovnaní chyb při kontrole rozměrů nad 180 mm kalibry na otvory (hřídele), pro rozměry do 180 mm $\alpha=\alpha_1=0$.

Všechny parametry jsou tabelizovány a závisí na druhu kalibru, jmenovitém rozměru a stupni přesnosti.

12. Principy měřidel

Měřidla je možno obecně rozdělit dle různých kriterií např.:

dle zákona č. 119 /2000 Sb. – o metrologii:

- etalony,
- stanovená měřidla,
- pracovní měřidla,
- referenční materiály.

dle způsobu měření:

- absolutní - zjišťujeme přímo hodnoty celkových rozměrů,
- komparační (porovnávací) – zjišťujeme odchylky od předem nastavené hodnoty, nejčastěji od jmenovitého rozměru,
- toleranční – zjišťujeme, zda bylo vyhověno předpisu, tj. zda nejsou překročeny mezní hodnoty rozměrů, popř. mezní úchytky.

dle principu měření na měřidla s převodem:

- mechanickým,
- elektrickým,
- optickým,
- pneumatickým,
- kombinovaným atd.

dle toho, zda při měření dochází ke kontaktu funkční části měřidla s měřeným objektem na měřidla:

- dotyková,
- bezdotyková.

dle účelu na měřidla pro měření:

- délek,
- úhlů,
- průtočného množství,
- objemu,
- teploty atd.

dle počtu měřených souřadnic:

- jednosouřadnicové měřicí systémy (posuvné měřítko),
- dvousouřadnicové měřicí systémy (měřicí mikroskop),
- třísouřadnicové měřicí systémy (třísouřadnicové měřicí stroje).

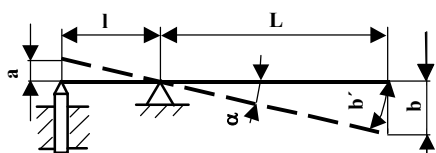
12.1 Převody měřidel

12.1.1 Měřidla s převodem mechanickým

V konstrukci měřidel se nejčastěji setkáváme s těmito mechanickými převody:

- pákovým,
- pružinovým (torzním),
- ozubenými koly,
- kombinací základních.

Měřidla s pákovým převodem



- konstrukce je založena na principu dvojramenné páky (základní princip **obr. 12.1**),
- rameno **L** přenáší ve zvětšení pohyb měřicího dotyku na stupnici,

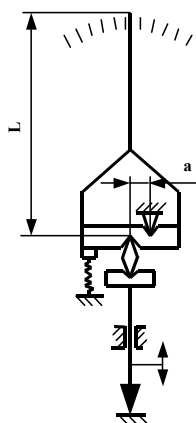
- převod měřidla:
$$p = \frac{b}{a} = \frac{L}{l}$$

Obr. 12.1 Princip pákového převodu

- při pákovém převodu se dopouštíme chyby $f = b' - b$ (neodečítáme hodnotu na kruhové stupnici). úpravou stupnice je možno tento vliv snížit (nerovnoměrná stupnice),

- výhodou těchto přístrojů je:
 - jednoduchá konstrukce,
 - nízká cena,
 - lehké a rychlé měření,
 - používají se pro hrubší měření.

Minimetr (páka s hrotovým uložením)



- podstatou minimetru je dvojramenná páka, uložená na hrotech, s velkým převodem (**obr.12.2**),
- kratší rameno tvoří vzdálenost hrotů,
- delší rameno tvoří délka ručičky až ke spodnímu hrotu,
- u nejpřesnějších minimetrů je poměr ramen $a:L = 1:1000$,
- minimetr je porovnávací měřidlo.

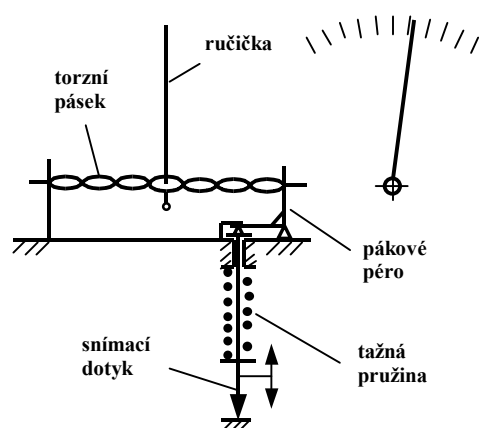
Obr. 12.2 Schéma minimetru

Měřidla s převodem pružinovým

Základní princip:

- přístroje jsou založeny na deformaci pružin,
- rozměry se odměřují tak, že se zjistí deformace pružiny, která nastane stlačením při měření součástí,
- tohoto principu využívají **mikrokátory**,
- vyznačují se velkou přesností,
- maximální chyba nepřesáhne 1% hodnot ukazování,
- pracují bez rozdílů ukazování při změně směru měření.

Princip měřidla (**obr. 12.3**):



- hlavní částí je oboustranně vinutý torzní pásek, (plochá pružina) v jehož středu je připevněna velmi jemná ručička,
- pružina je z poloviny pravotočivá, druhá polovina je levotočivá,
- pokud se takto svinutá pružina na koncích připevní a napíná se, její střední část, ve které je upevněna ručička se bude otáčet kolem své podélné osy,
- při uvolnění pružiny (ovládané od snímacího dotyku) její otočení kolem osy bude opačné,
- pohybuje-li se dotyk při měření nahoru, tlačí na vrchní část pákového péra, pásek se napíná a naklání se ručička,

Obr. 12.3 Schéma měřidla s převodem pružinovým

- převod tohoto mechanismu je tvořen tažnou pružinou, torzním páskem s ručičkou a regulačním (stavitelným) pérem, který slouží jako regulační element,
- převod ploché pružiny závisí na průřezu torzního pásku, počtu závitů a délce lomené páky, na které je upevněn jeden konec ploché pružiny,

- celkový převod je funkcí jednotlivých dílčích převodů:

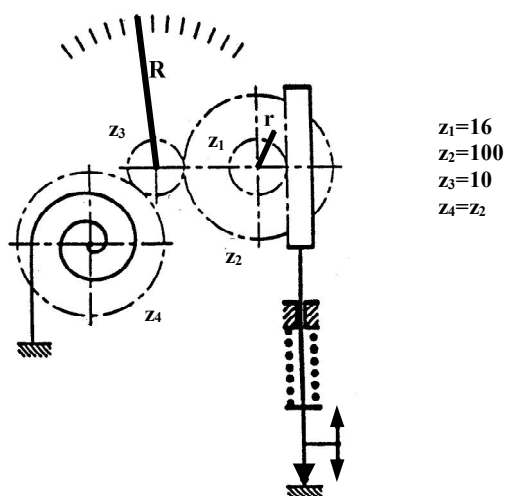
$$p = \frac{k_1 \cdot k_2 \cdot k_3}{g}$$

kde: k_1 ... převod tažné pružiny,
 k_2 ... převod ploché pružiny,
 k_3 ... převod ručičkového ukazatele,
 g ... výchylka regulačního péra pro vychýlení ručičky o 1° .

Měřidla s převody ozubenými koly a segmenty

Základní princip:

- hlavním představitelem této skupiny jsou **číselníkové úchylkoměry** (princip obr.12.4),
- pohyb snímacího dotyku se přenáší ozubenou tyčí a dvojitým ozubeným převodem nebo vřetenem a šnekem na číselník,
- převodový mechanismus dovoluje velký měřicí rozsah:
 - 3 mm nebo 10 mm pro setinové úchylkoměry,
 - 1 mm pro tisícinové úchylkoměry,
- měřicí síla: cca 0,5 až 1,5 N,
- ke stlačení dotyku je potřebná síla, která překoná sílu pružiny úchylkoměru a sílu způsobenou třením, při vysouvání dotyku jde o sílu rovnou rozdílu síly pružiny a síly způsobené třením,
- při změně pohybu měřicího dotyku (např. kontrola házení) se mění měřicí síla o dvojnásobek síly způsobené třením.(vzniká nevratnost-reverzibilita), proto je třeba měřicí dotyk před jednotlivým měřením nadzvednout a pozvolna spustit.



Obr. 12.4 Schéma číselníkového úchylkoměru

Tab. 12.1 Dovolené chyby číselníkových úchylkoměrů

hodnota dělení	třída přesnosti	reverzibilita v μm	chyba v měřicím rozsahu v μm			
			0,1 mm	1 mm	3 mm	10 mm
0,01	I	3	5	-	10	15
0,01	II	5	8	-	15	20
0,001	III	1,6	2	4	-	-

- číselníkové úchylkoměry se kontrolují pomocí koncových měrek, kdy se porovnává hodnota čtení na stupnici úchylkoměru s rozměrem koncové měrky a to v obou směrech (dovolené chyby číselníkových úchylkoměrů viz tab.12.1),
- pro rychlou kalibraci se používají speciální přístroje.

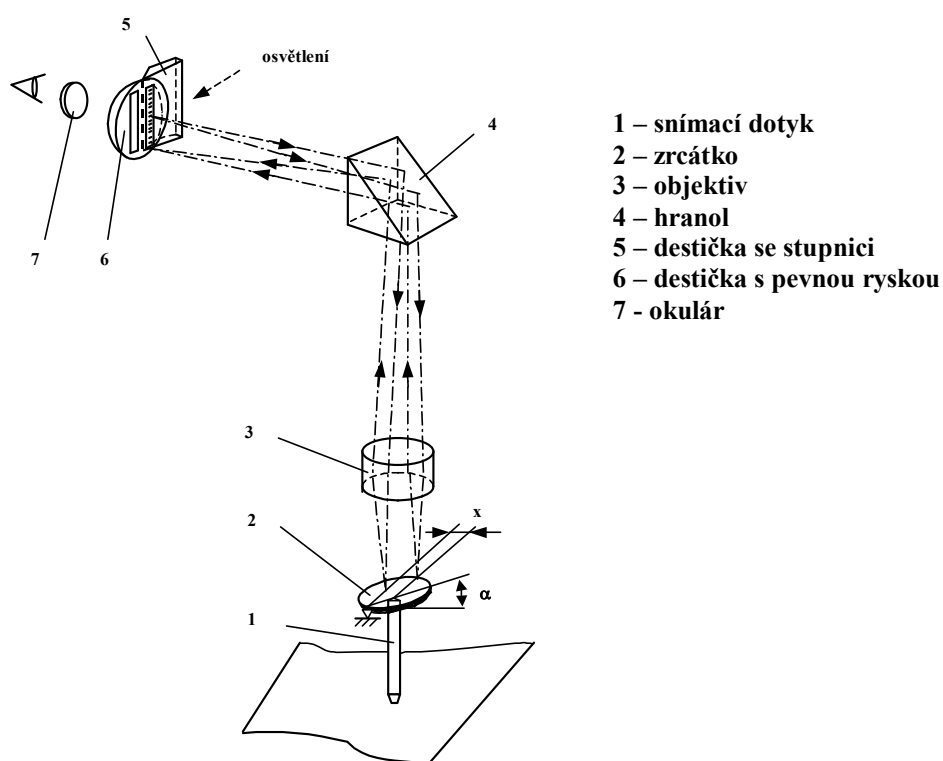
12.1.2 Měřidla s převodem opticko- mechanickým

U měřidel s opticko-mechanickým převodem se přenos pohybu snímacího doteku na stupnici realizuje společným působením mechanických prvků (páky) a optických prvků (soustava čoček, hranolů, zrcátek, zdrojů světla). Využívá se vlastnosti objektivu a výkyvného zrcátka. Potřebného zvětšení se dosahuje opakovaným odrazem na zrcadlech.

Princip optimetru (**obr. 12.5**):

- je založen na odrazu světelných paprsků od zrcadla nakláněného měřícím dotykem,
- axiálně přesuvný měřící dotyk naklápí otočné zrcátko,
- světelné paprsky procházejí od zdroje světla a procházejí přes skleněnou destičku s vyrytým převráceným obrazem stupnice,
- po odrazu prochází paprsky hranolem, objektivem a dopadají na zrcátko, od kterého se odráží a procházejí přes objektiv a hranol zpět na pevnou destičku s pevnou čárkovou značkou,
- obraz stupnice oproti pevné čarce je možno sledovat okulárem nebo u projekčních optimetrů na matnici,
- měřící síla : cca 1,2 N,
- rozsah optimetrů: $\pm 20\mu\text{m}$ nebo $\pm 100\mu\text{m}$,
- dělení stupnice: $1\mu\text{m}$ nebo $0,2\mu\text{m}$, popř. $0,1\mu\text{m}$,
- nejistota měření se určí dle vztahu:
$$u = \pm \left(0,2 + \frac{L}{100} \right) \mu\text{m}$$

kde: L ... měřená délka v mm,



Obr.12.5 Schéma optimetru

Optimetry se používají hlavně pro komparační (porovnávací) měření - kontrola kalibrů, pracovních koncových měrek atd.)

12.1.3 Měřidla s převody elektrickými

U snímačů s převody elektrickými se měřená odchylka mění v elektrickou veličinu, která se po zesílení převádí v údaj na stupnici, signál popř. v záznam na registrační papír.

Přístroje s převody elektrickými se vyznačují poměrně vysokou přesností a jednoduchostí.

Používají se:

- pro přesná měření v laboratorních i dílenských podmínkách,
- ve vícerozměrových přípravcích, sledovacích měřidlech atd.,
- v regulačních obvodech,
- v třídících systémech atd.

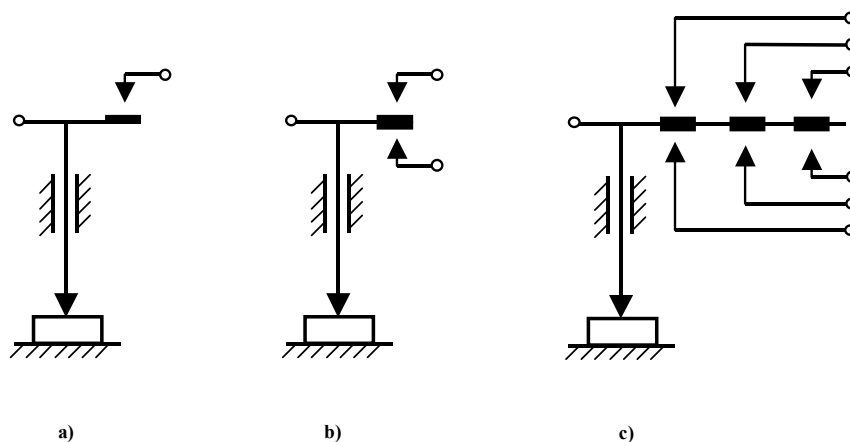
Základní rozdělení:

- elektrokontaktní,
- indukční,
- kapacitní,
- fotoelektrické.

Elektrokontaktní snímače

Elektrokontaktní snímače:

- slouží k rozměrové kontrole v sériové, popř. hromadné výrobě,
- pracujeme s nimi jako s mezními měřidly, zjišťujeme zda rozměr měřené součásti leží ve stanovených tolerančních mezích,
- princip je založen na rozsvěcování světla určité barvy v případě, že rozměr součásti překročí některou s předem nastavených tolerančních mezí,
- pomocí koncových měrek se nastaví polohy stavitelných kontaktů, tj. příslušná tolerance rozměru,
- mohou vymezovat jednu mez, dvě meze i více mezí (jednoduché schéma **obr. 12.6**).



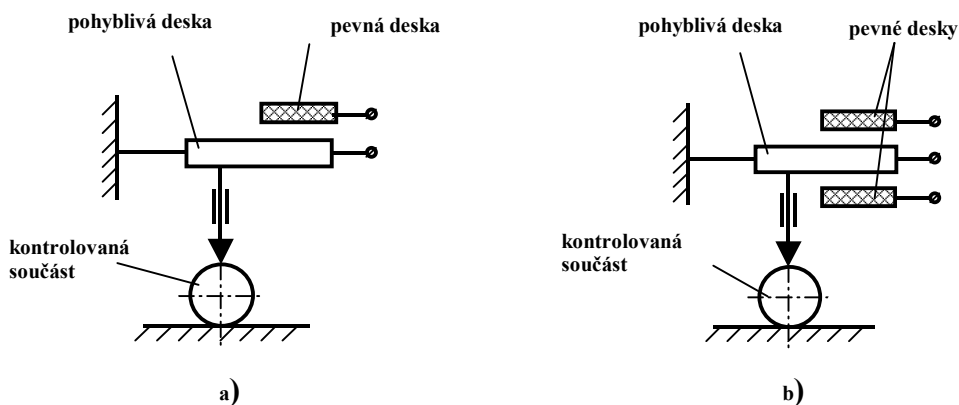
Obr. 12.6 Schéma elektrokontaktních snímačů

a – vymezující jednu mez, b – vymezující dvě meze, c – vymezující více mezí

Kapacitní přístroje

Kapacitní přístroje:

- základem je kapacitní snímací hlavice a elektronický zesilovač,
- princip měření spočívá ve změně kapacity kondenzátoru, způsobené změnou měřené délky,
- kapacitní způsob může být dotykový nebo bezdotykový,
- kapacitní snímače mohou být jednoduché (jedna pevná a jedna pohyblivá deska) nebo diferenciální (dvě pevné desky a jedna pohyblivá – zvětšení citlivosti), schéma viz **obr.12.7**.

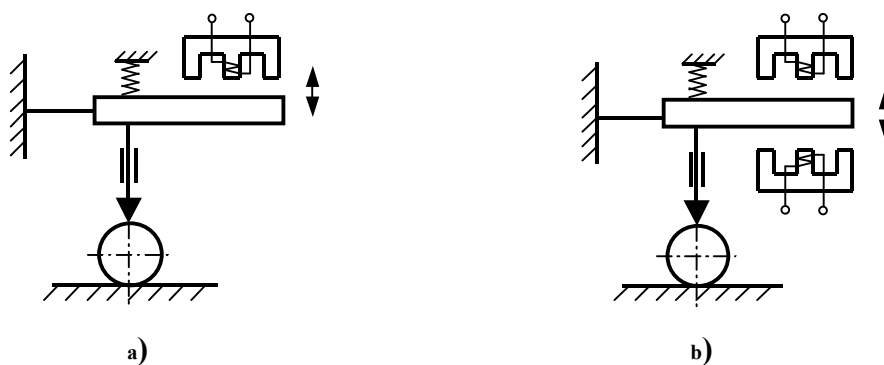


Obr.12.7 Schéma kapacitních snímačů
a – jednoduchý, b – diferenciální

Indukční přístroje

Indukční přístroje:

- nejdůležitější skupina elektrických měřicích přístrojů,
- podstatou měření je skutečnost, že změna rozměru mění indukčnost cívky nebo soustavy cívek,
- mohou být jednoduché a diferenciální (**obr. 12.8**),
- jednoduché:
 - mají jednu cívku o indukčnosti L ,
 - při zvětšení rozměru součásti měřící dotek překoná odpor pružiny a dojde k posunutí kotvy což způsobí změnu indukčnosti L mezi cívkou a kotvou,
- diferenciální:
 - mají dvě cívky o indukčnostech L_1 a L_2 ,
 - vychýlením kotvy se zmenší mezera mezi jednou cívkou a kotvou a mezera druhá se zvětší,
 - tím dojde ke změně indukčnosti obou cívek, což dovoluje zvětšit citlivost systému,
 - přiblížením kotvy k některé cívkě, znění se indukčnost v cívkách magnetu, poruší se rovnováha a ručička elektrického přístroje se vychýlí.



Obr. 12.8 Schéma indukčních snímačů
a – jednoduchý, b - diferenciální

12.1.4 Fotoelektrické přístroje

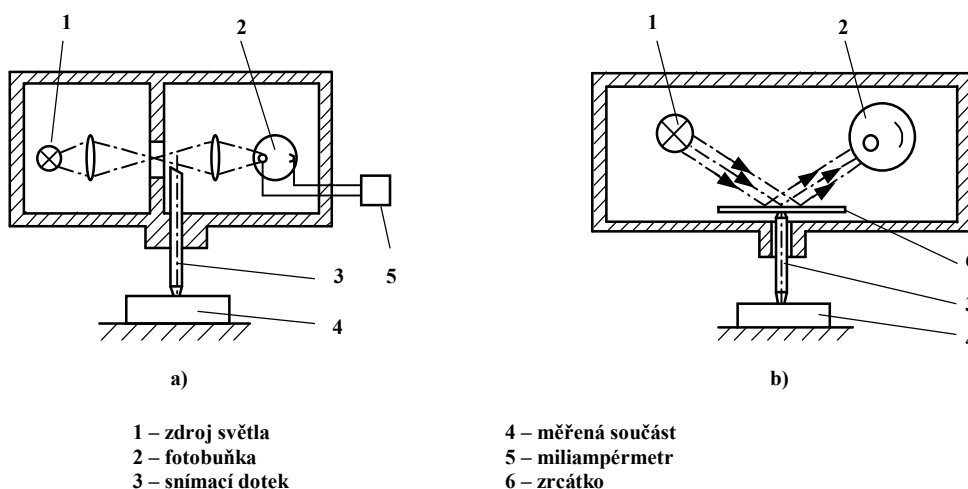
Fotoelektrické přístroje:

- jsou založeny na fotoelektrickém jevu,
- základ tvoří fotobuňka - elektronka zvláštního druhu (katoda z materiálu citlivého na světlo).

Podstata fotoelektrického jevu:

- určité látky vlivem působení fotonů - světelných kvant vysílají elektrony,
- intenzita vysílání závisí na energii světla a charakteristice elektronky,
- měřená veličina se převádí buď na jas zářící plochy nebo při stálém jasu na její velikost,

- ke změně jasu se může použít optického šedého klínu,
- přístroje vybavené fotobuňkou slouží často k měření bez dotyku (mohou měřit součásti, které se pohybují, což se využívá u třídících automatů),
- schémata dvou typů fotoelektrických snímačů viz **obr. 12.8**.



Obr. 12.8 Schémata fotoelektrických snímačů
a – clonkový typ, b – zrcátkový typ

12.1.5 Měřidla s převody pneumatickými

U pneumatických snímačů změna rozměru způsobí změnu parametrů stlačeného vzduchu a to buď tlaku nebo průtočného množství popř. rychlosti. Dle toho, který z těchto parametrů se využívá pro měření rozlišují se snímače:

- tlakové,
- průtočné,
- rychlostní.

Základní prvky pneumatických systémů:

- zdroj stlačeného vzduchu o tlaku do 0,6 MPa (kompresor, centrální rozvod, tlaková láhev),
- regulátor tlaku – regulace tlaku vzduchu ze zdroje na pracovní tlak a jeho udržení:
 - nízkotlaké – mokré, pracovní tlak < 0,15 MPa,
 - vysokotlaké – suché, pracovní tlak > 0,15 MPa,
- pneumatické měřidlo, např. rotametr.

Tlakové pneumatické přístroje

Tlakové pneumatické přístroje:

- jsou nejčastěji používané,
- při měření se sleduje změna tlaku stlačeného vzduchu,
- tlak se nejčastěji měří přímo manometrem, který je ocejchován v délkových jednotkách,
- princip tlakového pneumatického měřidla viz **obr. 12.9**,
- stlačený vzduch o konstantním tlaku p_1 vstupuje do komory průřezem S_1 ,
- z komory vystupuje průřezem S_2 a naráží na povrch měřené součásti vzdálené od výstupní dýzy o hodnotu z ,
- zjišťuje se změna tlaku p_2 v tlakové komoře, která je vyvolaná změnou vzdálenosti z dýzy od měřené součásti,
- za předpokladu, že $S_1 \cong S_2$ platí:

$$p_2 = \frac{p_1}{1 + \frac{S_2}{S_1}},$$

kde: S_1 ... průřez vstupní dýzy,

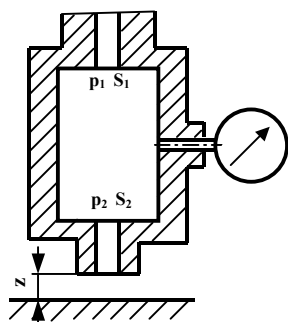
$$S_1 = \frac{\pi d_1^2}{4},$$

$$S_2 \dots \text{povrch válce o } \phi d_2 \text{ a výšky } z, \quad S_2 = \pi d_2 z = \frac{\pi d_2^2}{4}$$

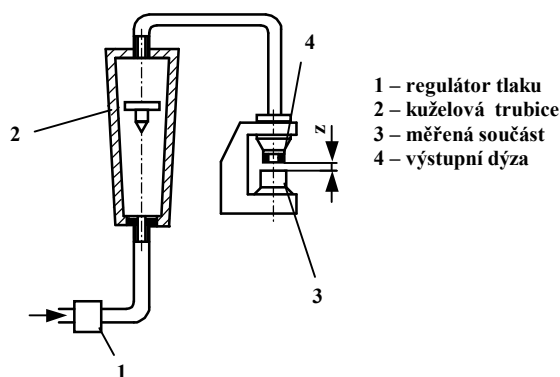
Průtočné pneumatické přístroje

Průtočné pneumatické přístroje:

- mají pružinový regulátor pro regulaci konstantního vstupního tlaku vzduchu,
- změna průtočného množství vzduchu se určuje podle výšky plováku, který rotuje v kuželové skleněné trubici,
- plovák se ustálí při měření v poloze, která odpovídá okamžitému průtočnému množství, které závisí na vzdálenosti dýzy a měřené součásti,
- za předpokladu konstantního tlaku vzduchu a konstantního obvodu dýzy bude platit: $Q=f(z)$,
- schéma viz **obr.12.10**.



Obr. 12.9 Princip tlakového přístroje

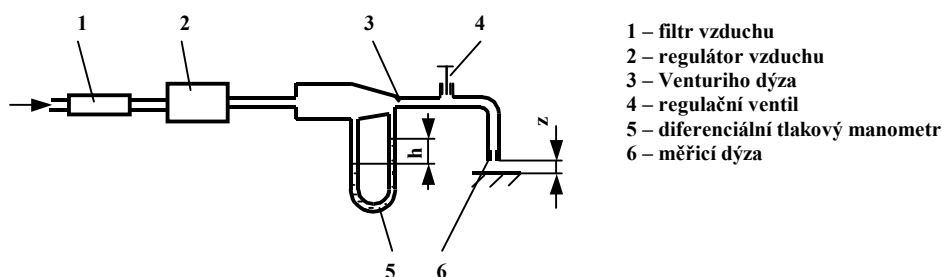


Obr. 12.10 Princip průtočného přístroje

Rychlostní pneumatické přístroje

Rychlostní pneumatické přístroje:

- průřez výstupní dýzy se udržuje konstantní (na rozdíl od průtočných přístrojů),
- v tomto průřezu se měří rychlost vzduchu, která se určuje ve dvou různých příčných průřezech,
- schéma viz **obr.12.11**.



Obr. 12.11 Princip rychlostního přístroje

13. Měření a kontrola rovinného úhlu

Oproti měření délek, měření rovinného úhlu nepotřebuje zvláštní úhlový normál, neboť představuje rovnoměrně rozdělený kruh. Obvod kruhu má stále stejný násobek svého průměru:

$o = \pi \cdot D$ (to neznamená, že rozdělení obvodu kruhu je jednoduché).

13.1 Jednotky

Rovinný úhel 1 radián:

- v soustavě SI je doplňkovou jednotkou,
- odpovídá délce oblouku 1m na rameni 1m ($1\text{rad} = \frac{180}{\pi}$, $1\text{rad} \approx 57^\circ$),
- radián je jednotka, která se nedá exaktně realizovat, v technické praxi nemá využití.

Starý stupeň:

- rovinný úhel 1° je úhel, který svírá 360. díl kruhu,
- dělí se na minuty a vteřiny ($1^\circ = 60'$, $1' = 60''$)
- šedesátinné dělení je přes drobné nevýhody ve strojírenství používáno nejčastěji.

Grad (gon):

- značka: 1^g , $1^g = 100^{og}$ (centigrad),
- vedlejší jednotka rovinného úhlu (při setinovém dělení pravého úhlu)
- grad (gon) = 0,015 707 96 rad,
- využití hlavně v geodézii,
- nový stupeň je výhodný pro pohodlné počítání na počítačích z důvodu desetinného dělení.

Starý stupeň se nedá odstranit, neboť se k němu vážou starší jednotky stanovené vzhledem k zeměkouli, navigaci, mořeplavbě, např.: 1 mořská míle = 1 střední délková minuta = 1852,01 m, 1 zeměpisná míle = 1/15 rovníkového stupně = 7420,44 m. Protože rozdělení do starých stupňů souvisí s časem (15° otáčky zeměkoule $\approx$ 1 hodina) zůstává toto dělení dále v platnosti.

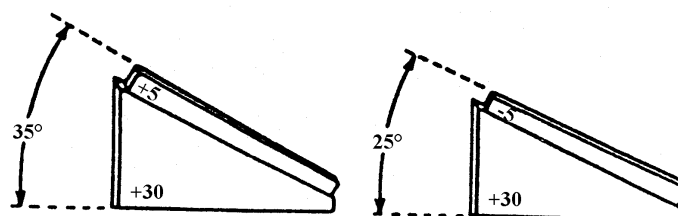
Při měření úhlových hodnot musíme uvážit, že minuty a vteřiny jsou hodnoty velmi malé, např. $1''$ úhel sklonu odpovídá výškový rozdíl 1 m na vzdálenosti 200 km (Praha-Brno).

13.2 Měřicí prostředky

13.2.1 Úhlové měrky

Úhlové měrky

- jsou základem měření úhlů (**obr. 13.1**),
- jsou to ploché 2÷16 mm vysoké hranoly s jedním nebo několika definovanými úhly,
- definovaný úhel je vytvořen lapovanými rovinnými plochami,
- umožňují skládání měrek nasátím, což dává možnost vytvoření nových hodnot úhlů,
- materiálem měrek je nástrojová ocel, popř. karbid chrómu.



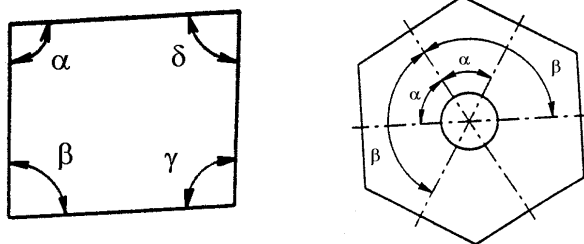
Obr. 13.1 Úhlové měrky

13.2.2 Optické polygony

Optické polygony:

- přesné mnohaboké hranoly s definovanými úhly (**obr. 13.2**),
- je možno uvažovat úhly mezi bočními stěnami nebo úhly mezi normálami k těmto rovinám,
- představují určitý druh přesného dělení kruhu,
- přívlastek optický zdůrazňuje fakt, že funkční plochy polygonu působí jako zrcadla a používají se na měření úhlů optickými přístroji,
- k přesnému stanovení skutečných úhlů stačí měřit jen malé úhlové rozdíly, např. interferenci, autokolimátorem,
- vyrábějí se z oceli, skla nebo křemene,
- dle tvaru se dělí na:

- symetrické,
- nesymetrické.



Obr.13.2 Optické polygony

13.2.3 Úhlové šablony

Úhlové šablony:

- jsou určeny pro speciální měření a kontrolu (kontrola závitů, rybin, úkosů, kontrola geometrie nástrojů atd.),
- patří sem průsvitné šablony, závitové měrky, okuláry mikroskopů s vynesnými úhly atd.

13.2.4 Úhelníky

Úhelníky:

- úhlová měřidla zhmotňující úhel 90° ,
- používají se pro kontrolu kolmosti ploch, nastavení pravých úhlů, orýsování atd.,
- dle přesnosti se vyrábějí jako:

▪ nožové:	dovolená odchylka $\pm\Delta=(2+0,01L) \mu\text{m}$,
▪ normál:	dovolená odchylka $\pm\Delta=(5+0,02L) \mu\text{m}$,
▪ dílenský úhelník I:	dovolená odchylka $\pm\Delta=(10+0,05L) \mu\text{m}$,
▪ dílenský úhelník II:	dovolená odchylka $\pm\Delta=(20+0,1L) \mu\text{m}$.

(L ... delší rameno úhelníku v mm)

Při kontrole součásti je položen úhelník i součást na příměrnou desku a porovnáváním světelné šterbiny mezi součástí a úhelníkem je vyhodnocena odchylka kolmosti. Odchylku zjišťujeme buď porovnáním bez jejího číselného vyhodnocení nebo číselným údajem tak, že mezi součást a horní a dolní část příměrného ramene úhelník vložíme koncové měrky – rozdíl hodnot koncových měrek odpovídá odchylce kolmosti na délce ramene.

Kontrola úhelníků

Kontrola úhelníků:

- jde o kontrolu velikosti odchylky měřícího ramene úhelníku od jeho jmenovité (přípustné) hodnoty,
- kontrola se provádí:
 - vizuálně pomocí přesných příměrných válců,
 - pomocí výkyvných pravítek nebo přesných válců,
 - speciálními přístroji.

Kontrola pomocí příměrných válců

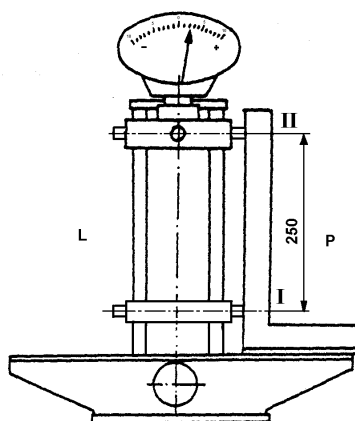
Příměrné válce ke kontrole kolmosti jsou broušeny a lapovány, čelní plocha je přesně kolmo broušena. Měření se provádí na kontrolní desce. Přiložením úhelníku k válci se kontroluje kolmost průsvitem (popř. používáme koncové měrky, které se vkládají mezi kontrolní válec a úhelník, je možno určit případnou hodnotu odchylky).

Kontrola výkyvnými pravítky

Kontrola výkyvnými pravítky se provádí tak, že jsou pravítka (válce) zavěšeny do zvláštního stojanu a přesně vyrovnány do pravého úhlu, úhelník se přiloží a osvětlí zezadu (případná odchylka se zjistí průsvitem).

Speciální přístroj Keilpart:

- přístroj (**obr. 13.3**) má oboustranné, pohyblivé měřící dotyky,
- na kolmém vedení je měřící hlavice s dotyky a úchylkoměrem nastavitelná do libovolné výškové polohy,
- spodní dotyky jsou pevné a slouží jako dorazy,
- měření se provádí v levé a pravé poloze úhelníku (tím se eliminuje případná odchylka kolmosti vedení měřící hlavice vzhledem k základním plochám) vždy ve spodní a horní poloze úchylkoměru na odměřeném rameni (ve spodní poloze je možné vynulovat úchylkoměr).



$$\text{odchylka úhelníku: } \Delta u = \frac{L - P}{2} \text{ } [\mu\text{m}]$$

$$\text{odchylka přístroje: } \Delta p = \frac{L + P}{2} \text{ } [\mu\text{m}]$$

L, P ... odečtené hodnoty na úchylkoměru

Při měření je nutno brát ohled na znaménko odečtené hodnoty (záporné vlevo, kladné vpravo od nuly) a správně dosadit do vztahů.

Obr. 13.3 Kontrola úhelníku na přístroji Keilpart

13.2.5 Úhломěry

Úhломěry:

- jednoduché, velmi rozšířené měřící prostředky pro nastavování a orýsování úhlů,
- **mechanické úhломěry** mají limbus kovový, odečítání hodnot pomocí nonia,
- **optické úhломěry** mají skleněnou stupnici v tělese úhломěru, odečítání malým mikroskopem (lupou), hodnota nejmenšího dílku 5',
- **elektronické úhломěry** (úhломěrné převodníky), kde se elektromechanicky, magneticky apod. převádí údaj o poloze kódovaného kruhu na analogový nebo digitální údaj v jednotkách rovinného úhlu.

13.2.6 Sklonoměr

Sklonoměr (inklinační libela):

- úhломěrný přístroj na měření sklonů ploch vůči základní vodorovné rovině,
- má větší rozsah než libely,
- jde o přístroj vybavený limbem (nebo jeho části) a obvykle je opatřen libelou, která je uložena v otočném tělese společně s odečítacím mikroskopem a plní funkci nulového indikátoru.

13.2.7 Optická dělicí hlava

Optické dělicí hlavy:

- se používají k přesnému nastavování nebo měření úhlů při kontrole vaček, roztečí, drážek apod.,
- v otočné skříni je uloženo vřeteno, na kterém je šroubové kolo zapadající do šneku a skleněný limbus,

- úhlová hodnota je odvozena od skleněného kotouče s úhlovou stupnicí od 0 do 360°,
- poloha je odečítána pomocí mikroskopu, který je v horní části hlavy,
- v zorném poli je skleněné měřítko s minutovou stupnicí, které je posuvné nastavovacím šroubem,
- je možno odečítat hodnoty na 10",
- nejistota měření : $\pm(10+10\sin\alpha) ["]$,
- před započítím měření je nutné pečlivé vystředění měřené součásti, např. tisícínovým úchylkoměrem, aby se neprojevovalo čelní ani obvodové házení, vystředění má zásadní vliv na přesnost měření.

13.2.8 Optický dělicí stůl

Optický dělicí stůl:

- používají se pro kontrolu úhlů u součástí se svislou osou otáčení (často jsou součástí vybavení měřicích strojů),
- princip odvození úhlové míry je obdobný jako u dělicích hlav (skleněný kotouč se stupnicí a mikroskopem, inkrementální kruh snímáný fototranzistorem),
- stůl je opatřen drážkami se středícím otvorem k ustavení součásti, dobré vycentrování má vliv na přesnost měření,
- na obvod u stolu je stupnice k hrubému nastavení úhlů po 1°,
- k jemnějšímu nastavení slouží matnice, na které jsou zobrazeny stupně (ve dvojité rysce), minuty a sekundy ve světelném okénku.

13.2.9 Teodolity

Teodolity:

- slouží k vytyčování a měření úhlů v horizontální a vertikální poloze (měření deformace rozměrných objektů, mostů, jeřábových drah, geodetická měření atd.),
- rozdělení dle konstrukce:
 - mechanické (kovový limbus),
 - optické (skleněný limbus),
 - digitální (s inkrementálními a kódovanými kruhy).

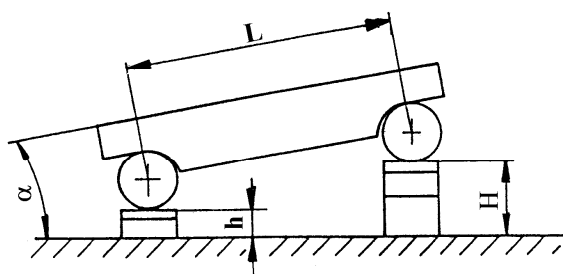
13.3 Použití goniometrických funkcí pro měření úhlů

Při využití goniometrických funkcí jde o měření nepřímá s poměrně vysokou přesností.

13.3.1 Sinusové pravítko

Sinusové pravítko:

- samostatné není prostředkem pro měření úhlů, tím se stává až ve spojení s koncovými měrkami, které jej umožňují použít na nastavování a měření úhlů (**obr. 13.5**),
- používá se hlavně pro kontrolu úhlů na součástkách a jako přípravek při přesném obrábění,
- rozteč opěrných válečků: 100, 150, 200, 300.



$$\text{platí: } \sin \alpha = \frac{H-h}{L}$$

Obr. 13.5 Sinusové pravítko

13.3.2 Tangentové pravítko

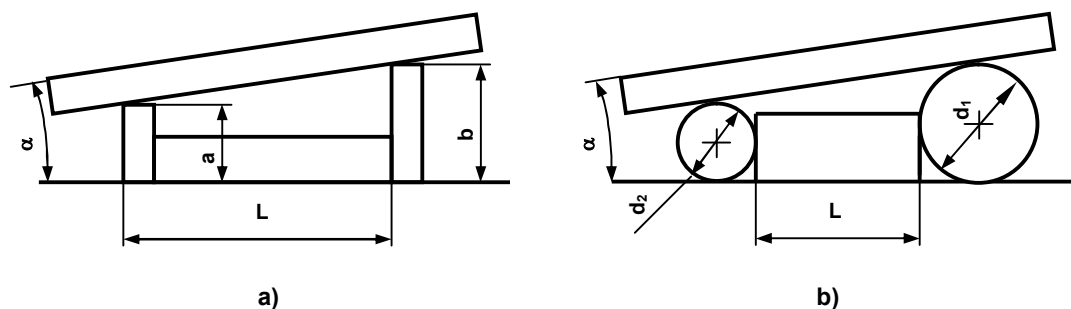
Tangentové pravítko:

- pravítko položené na dvě měrky vzdálené od sebe o určitou vzdálenost (**obr.13.6a**), rozdíl velikosti měrek a vzdálenosti L těchto měrek určuje tangentu úhlu,

- místo měrek se často používají válečky, jejichž vzdálenost je možno nastavit měrkami (**obr.13.6b**),
- měření je méně přesné než pomocí sinusového pravítka,

platí: při použití měrek: $\operatorname{tg} \alpha = \frac{b-a}{L}$

při použití válečků: $\operatorname{tg} \alpha = \frac{2(d_1 - d_2)}{d_1 + d_2 + 2L}$



Obr. 13.6 Tangentové pravítko

13.4 Měření svislé a vodorovné polohy

Používají se olovnice a libela (vodováhy). Oba typy měřidel jsou založeny na působení zemské gravitace.

13.4.1 Olovnice

Olovnice:

- závaží symetrické kolem těžiště uvázané na motouzu,
- pro lepší odečítání je na motouzu navlečen kroužek o stejném průměru jako závaží,
- přesnost olovnice roste s délkou motouzu,
- použije-li se pro odečítání lupa, lze při délce motouzu 1 m odečítat s přesností 1'

13.4.2 Libely

Libely můžeme rozdělit na:

- kapalinové,
- elektronické (kyvadlové).

Všechny libely fungují na základě působení zemské gravitace a mohou plnit dvě základní funkce:

- ustavení roviny do vodorovné polohy,
- měření malých úhlů (sklonů) a měření odchylek od vodorovné polohy.

Libely kapalinové využívají vlastností bublin v uzavřených nádobách naplněných kapalinou (éter, etyléter) – bublina vždy se snaží zaujmout nejvyšší polohu.

Libely kapalinové:

- trubicové (kapalina ve skleněné trubici), používají se pro měření,
- krabicové (kapalina ve válcové nádobě), používají se k ustavování.

Trubicové libely:

- podstatou je skleněná válcová trubice se zakřivenou horní stěnou o poloměru **R**, která je až na malou bublinu naplněna kapalinou,
- vnější strana je opatřena stupnicí, velikost dílků je normalizovaná (cca 2mm),
- délka bubliny se volí tak, aby při teplotě 20°C byla rovna 0,3 až 0,4 délky vodováhy.

Citlivost libely je dána úhlem (převýšením), o který se musí naklonit libela, aby se bublina posunula o 1 dílek stupnice a vyjadřuje se :

- úhlem ve vteřinách (např. dvouvteřinová libela),

- převýšením v mm, které nastane na délce 1m, když se bublina posune o 1 dílek, např.: citlivost $0,01\text{mm.m}^{-1}$.

Přesnost libely určuje nejmenší úhel, který můžeme libelou určit (za předpokladu, že bezpečně jsme schopni odečíst 1/5 dílku stupnice, tj. 0,4mm, lze říci, že přesnost je rovna 1/5 citlivosti).

Pohyblivost bubliny je úhel, o který je nutno naklonit libelu tak, aby se vychýlila z rovnovážné polohy o hodnotu postřehnutelnou okem bez zvětšovacího zařízení, tj. cca o 0,2mm.

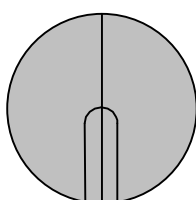
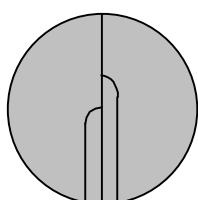
Pro kontrolu vodorovné a svislé polohy se používají **libely rámové** (mají libelu uloženou v rámu s přesně kolmo zabroušenými plochami).

Elektronická (kyvadlová) libela:

- umožňuje odečítání v nepřístupných místech a v jiném místě než je měřicí místo,
- hlavní část tvoří speciálně uložené kyvadlo, jehož poloha vůči tělesu libely je závislá na poloze roviny, na které je libela uložena,
- kyvadlo při změně polohy nezůstává v klidu – nutno vhodně tlumit např. kapalinou, elektromagneticky apod.).

Koincidenční libela:

- měření je přesnější než u běžných libel,
- v rámu je trubice zacloněná po délce (vidíme jen polovinu bubliny),
- soustava skleněných hranolů zobrazí obě nezacloněné poloviny bubliny, které se v zorném poli pohybují proti sobě, obraz se pozoruje lupou (**obr. 13.4**),
- při pohybu bubliny např.: o 1mm se vzdálí nebo přiblíží obě vedle sebe zobrazené poloviny konce bubliny u dvojnásobného zvětšení o dvojnásobnou vzdálenost tj. 2mm,
- poloviny se musí ustavit tak, aby se ztotožnily vzhledem ke značce (**obr. 13.4**),
- libela má citlivost $2''$, tj. $0,01\text{mm.m}^{-1}$,
- měření ze dvou stran - eliminace vnitřní chyby libely



$$u_{\text{plochy}} = \frac{L + P}{2}$$

$$u_{\text{libely}} = \frac{L - P}{2}$$

Obr.13.4 Zorné pole koincidenční libely před a po vyrovnaní

13.4.3 Hadicové vodováhy

Hadicové vodováhy:

- jsou založeny na principu spojených nádob,
- uloží k určování výškových rozdílů mezi dvěma rovinami,

přesnost není příliš velká, výškové rozdíly se dají měřit s přesností $\pm 0,5\text{mm}$.

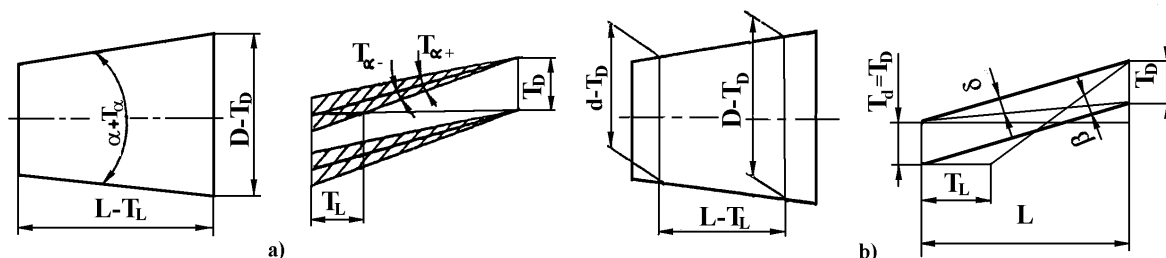
14. Kuželové plochy a jejich kontrola

14.1 Tolerování kuželových ploch

Při tolerování kuželových ploch je nutné uvažovat všechny geometrické veličiny, kterými může být kužel zadán. Kuželová plocha může být zadána:

- a) průměrem **D**, délkou **L** a vrcholovým úhlem α (**obr. 14.1a**) úhlová tolerance není závislá na průměru a délce,
- b) dvěma průměry **D**, **d** a jejich vzájemnou vzdáleností **L** (**obr.14.2b**) – úhlová tolerance je závislá na tolerancích průměrů i délky kužele, můžeme získat vrcholový úhel buď o δ menší nebo o β větší

$$\operatorname{tg} \frac{\delta}{2} = \frac{T_D \cos^2 \frac{\alpha}{2}}{2L - \frac{T_D}{2} \sin \alpha} \quad \operatorname{tg} \frac{\beta}{2} = \frac{T_D \cos^2 \frac{\alpha}{2} - T_L \sin \alpha}{2L - 2T_L \cos^2 \frac{\alpha}{2} + T_D \sin \alpha}$$



Obr. 14.1 Tolerování kuželů

Nepřesnostmi při výrobě vzniká celá řada odchylek, z nichž nejdůležitější je odchylka kuželovitosti.

Odchylku kuželovitosti definujeme jako rozdíl vrcholového úhlu jmenovitého kužele a vrcholového úhlu kužele skutečného. S ohledem na měřicí metody používané v praxi vyjadřujeme ji v mm na zvolenou délku kužele.

Zvláštnosti lícování kuželových ploch je to, že tento typ spojení umožňuje regulovat tuhost uložení na základě stupně zasunutí. Stupeň přesnosti lícování kuželů je určen úplností vzájemného styku kuželových ploch. Rozhodujícím činitelem je shodnost vrcholových úhlů kuželového otvoru a kuželové části hřídele. Norma ČSN 01 4276 stanovuje tolerance vrcholového úhlu v 17 stupních přesností (AT1÷ AT17).

Toleranční pole kuželů je vytvořeno dvěma souosými mezními kužely, u nichž je rozdíl mezi největším a nejmenším průměrem v kterémkoli řezu kolmém k ose kužele po celé délce stejný.

Kuželové spojení dělíme podle způsobu uložení na:

- těsná (smyková uložení),
- hybná (vyznačují se nastavitelností vůle),
- pevná (přesah vzniká vtlačením vnějšího kužele do kuželového otvoru).

Základem toleranční soustavy pro lícování kuželů jsou čtyři druhy tolerancí:

- **tolerance průměrů kužele T_D** , která je platná pro všechny průměry kuželové plochy po celé délce. Je definovaná jako rozdíl největšího a nejmenšího průměru kužele ležícího mezi polohami mezních kuželů. Její velikost se stanoví obdobně jako tolerance pro válcové součásti.
- **tolerance vrcholového úhlu**, jež je udávaná buď v úhlových nebo délkových jednotkách. Definujeme ji jako rozdíl mezi největším a nejmenším úhlem kužele. Tolerance úhlu se může na součásti projevit dvojím způsobem a to jako odchylka průměru vzniklá z odchylky úhlu na celé délce kužele nebo jako odchylka vrcholového úhlu kužele.
- **tolerance geometrického tvaru kužele**, tj. odchylka přesnosti tvořící přímky a odchylka kruhovitosti průřezu.
- **tolerance průřezu řezu kužele**, daná pro průměr kužele v určitém definovaném řezu. Tato odchylka platí pouze pro průměr v tomto řezu.

Každá z těchto tolerancí může teoreticky využít celé toleranční pole. Prakticky to znamená, že všechny uvedené typy tolerancí působí současně a o toleranční prostor se dělí.

14.2 Kontrola kuželových ploch

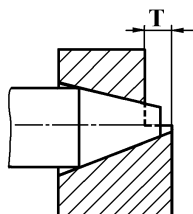
14.2.1 Kuželové plochy vnější

Možnosti kontroly:

- kontrola na barvu pomocí vnitřních kuželových kalibrů,

- kontrola pomocí sinusového pravítka,
- kontrola úhloměrem,
- kontrola speciálními měřicími přístroji,
- kontrola pomocí válečků stejného (nestejného) průměru aj.

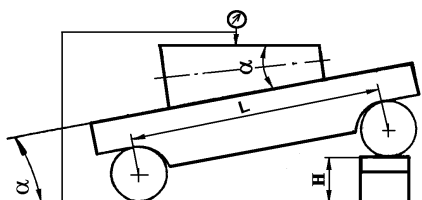
Kontrola na barvu pomocí vnitřních kuželových kalibrů



- kuželový kalibr (kroužek) se potře berlínskou modří a nasune na kontrolovaný kužel a pootočí,
- otisk barvy na kontrolovaném kuželu nám ukáže jeho nepřesnosti oproti kalibru,
- kalibry jsou opatřeny dvěma plochami, které označují toleranční pole **T** (**obr.14.2**),
- odchylku kuželovitosti se touto metodou nedá zjistit.

Obr. 14.2 Vnitřní kuželový kalibr

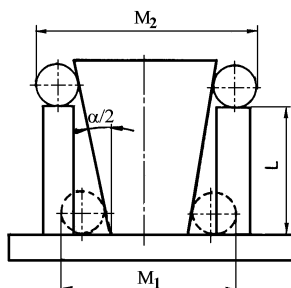
Kontrola pomocí sinusového pravítka



- je možno vyčíslit odchylku vrcholového úhlu
- pod sinusové pravítko se vkládají koncové měrky až površka kužele je rovnoběžná s průměrnou deskou (kontroluje se číselníkovým úchylkoměrem),
- pak je možno vyčíslit velikost vrcholového úhlu α ,
- platí: $\sin \alpha = \frac{H}{L}$
- princip viz **obr. 14.3**

Obr. 14.3 Kontrola pomocí sinusového pravítka

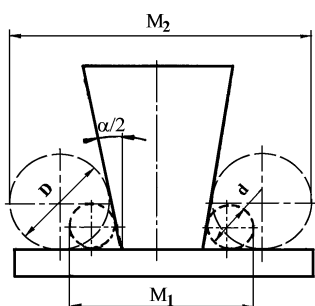
Kontrola pomoci válečků stejného průměru



- jde o velmi často používanou metodu
- z naměřených hodnot rozměrů přes válečky M_1 , M_2 a rozměru použitých měrek L (obr. 14.4) určíme vrcholový úhel α :
- $$\operatorname{tg} \frac{\alpha}{2} = \frac{M_2 - M_1}{2L}$$
- u tohoto způsobu je nutno počítat s chybou $\pm 30''$.

Obr. 14.4 Kontrola pomoci stejných válečků

Kontrola vnějšího kužele pomoci válečků nestejného průměru

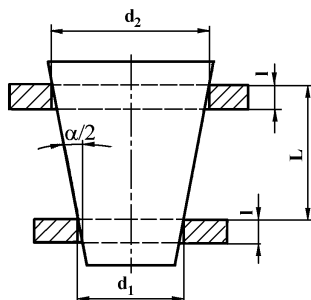


- jde o podobnou metodu jako předchozí,
- velikost vrcholového úhlu α závisí na změřených parametrech D , d , M_1 a M_2 (obr. 14.5) dle vztahu:

$$\cos \frac{\alpha}{2} = \frac{2 \left(\frac{M_2 - M_1}{D - d} - 1 \right)}{\left(\frac{M_2 - M_1}{D - d} \right)^2 - 2 \left(\frac{M_2 - M_1}{D - d} - 1 \right)}$$

Obr. 14.5 Kontrola pomoci nestejných válečků

Kontrola vnějšího kužele pomoci měřících kroužků



- jde o méně přesnou metodu,
- kroužky jsou ocelové, kalené a lapované,
- při měření musí být nasazeny kolmo na osu kužele,
- velikost vrcholového úhlu závisí na průměrech kroužků d_1 , d_2 a vzdálenosti L (obr. 14.6) dle vztahu:

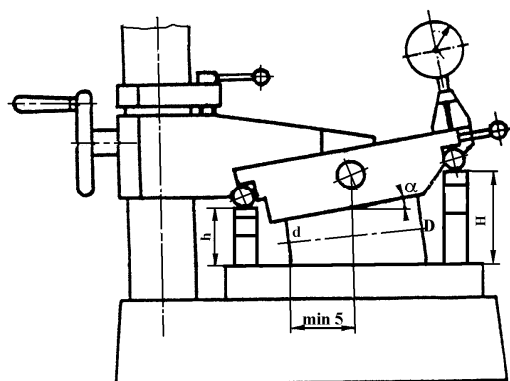
$$\operatorname{tg} \frac{\alpha}{2} = \frac{1}{2} (d_2 - d_1) \cdot \frac{1}{L}$$

Obr. 14.6 Kontrola pomocí kroužků

Kontrola úhloměrem

- je možno provádět jen u kuželů méně přesných,
- nejistota měření je poměrně velká.

Kontrola speciálními měřicími přístroji (pomocí přístroje fy Feinmess Suhl)



- přístroj je opatřen ramenem, kde na společném čepu je upevněna přílohná deska se sinusovým pravítkem, které je možno vyklápět (cca o $\pm 60'$) a podložit příslušnými měrkami (**obr. 14.7**),
- vyklonění sinusového pravítka se ukáže na upevněném číselníkovém úchylkoměru,
- posunutí ručičky úchylkoměru o $1\mu\text{m}$ odpovídá úhlovému vyklopení sinusového pravítka o $2''$,
- sinusové pravítko má vzdálenost válečků 200 mm.
- rozsah použití přístroje pro úhel kužele $0 \div 45^\circ$,
- nejistota měření při nastavení měrkami $\pm 10''$.

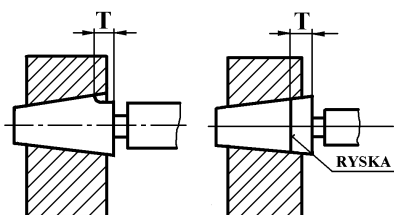
Obr. 14.7 Měřidlo pro kontrolu klínů a kuželů fy Feinmess Suhl

14.2.2 Kuželové plochy vnitřní

Možnosti kontroly:

- kontrola na barvu pomocí kuželových kalibrů,
- kontrola pomocí sinusového pravítka,
- kontrola pomocí kuliček nestejného průměru aj.

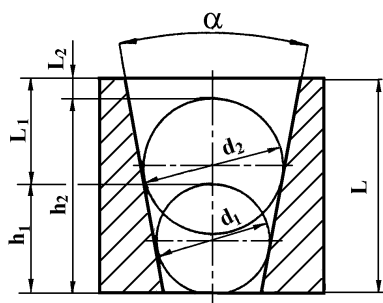
Kontrola na barvu pomocí kuželových kalibrů



- postup je obdobný jako při kontrole kuželových ploch vnějších,
- kalibry jsou opatřeny buď tolerančním stupněm nebo hranou s ryskou (**obr. 14.8**),
- nevýhodou je, že nelze kontrolovat průběh kuželovitosti po celé délce

Obr. 14.8 Vnější kalibry

Kontrola pomocí kuliček nestejného průměru

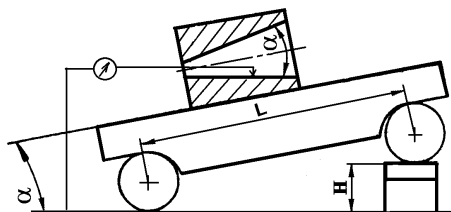


- velikost vrcholového úhlu α se vypočte z naměřených hodnot parametrů d_1 , d_2 , h_1 , h_2 , popř. L_1 a L_2 (**obr. 14.9**):

$$\sin \frac{\alpha}{2} = \frac{\frac{d_2}{2} - \frac{d_1}{2}}{h_2 - h_1 - \frac{d_2}{2} + \frac{d_1}{2}}$$

Obr. 14.9 Kontrola pomocí kuliček

Kontrola pomoci sinusového pravítka



- princip kontroly je obdobný jako při kontrole vrcholového úhlu vnějšího kužele (**obr. 14.10**)

Obr. 14.10 Kontrola pomoci sinusového pravítka

15. Kontrola a měření závitů

15.1 Tolerování závitů

Řetězec norem, které se zabývají závity, zahrnuje následující články:

- jmenovitý profil, jmenovité rozměry,
- tolerance,
- systém kontroly a tolerance kontrolních kalibrů.

Nejběžnějším v konstrukci a technologii typem závitu je závit metrický, jehož jmenovitý profil má tvar trojúhelníku. Veškeré rozměry profilu závisí na rozteči P . Výšku H základního trojúhelníku je

možno určit dle vztahu:

$$H = \frac{\sqrt{3}}{2} P$$

Norma PN-ISO 724 se zabývá definováním jmenovitých rozměrů metrických závitů, tj. d , d_1 , d_2 pro vnější závit a D , D_1 a D_2 pro vnitřní závit.

Tolerance metrických závitů jsou určeny v normě PN-ISO 965. Soustava tolerancí metrických závitů se opírá o tolerování dvou průměrů závitů a to d_2 a d u vnějšího závitů a D_2 a D_1 u vnitřního závitů. Jsou stanoveny různé třídy tolerancí na nichž závisí tolerance průměrů. Tolerance vrcholového průměru závitů (d a D_1) závisí na třídě tolerancí a rozteči P . Tolerance středního průměru závitů (d_2 a D_2) závisí kromě třídy tolerancí a hodnoty rozteče rovněž na jmenovitém průměru.

Základní odchyłka určuje polohu tolerančního pole závitů a závisí jen na rozteči závitů. Byly určeny následující polohy tolerančních polí:

- pro vnitřní závit: G , H ,
- pro vnější závit: e , f , g , h .

Hodnota základní odchyłky se vztahuje ke všem průměrům závitů, tj. D , D_1 , D_2 popř. d , d_1 , d_2 . To znamená, že jmenovitý profil závitů je rovnoměrně posunut do plusu pro vnitřní závit a do minusu pro závit vnější.

Průměry závitů jsou tolerovány přímo. Tolerance rozteče a bočního úhlu se neurčují přímo, ale skutečný profil závitů se musí vejít do tolerančního pole na předpokládané délce zašroubování. Jsou určeny tři normalizované délky zašroubování označené: S (krátká), N (střední) a L (dlouhá).

Třída a poloha tolerance určuje toleranční pole závitů. Obecně toleranční pole středního (d_2 , D_2) a vrcholového průměru (d , D_1) mohou být různé. Doporučuje se, aby dle možnosti toleranční pole pro oba průměry byla stejná. Doporučená toleranční pole pro vnitřní a vnější metrické závity viz **tab. 15.1** a **tab. 15.2**.

Tab. 15.1 Doporučená toleranční pole pro vnitřní závity

Třída závitů	Poloha tolerančního pole G			Poloha tolerančního pole H		
	S	N	L	S	N	L
přesný	-	-	-	4H	5H	6H
středně přesný	(5G)	6G	(7G)	5H	6H	7H
hrubý	-	(7G)	(8G)	-	7H	8H

Tab. 15.2 Doporučená toleranční pole pro vnější závity

Třída závitu	Poloha tolerančního pole e			Poloha tolerančního pole f			Poloha tolerančního pole g			Poloha tolerančního pole h		
	S	N	L	S	N	L	S	N	L	S	N	L
přesný	-	-	-	-	-	-	-	(4g)	(5g4g)	(3h4h)	4h	(5h4h)
středně přesný	-	6g	(7e6e)	-	6f	-	(5g6g)	6g	(7g6g)	(5h6h)	6h	(7h6h)
hrubý	-	8e)	9e8e)	-	-	-	-	8g	(9g8g)	-	-	-

Příklad označení závitu:

M6x0,75 – 7g6g – L (závit vnější jemný, jmenovitý průměr 6 mm, rozteč P=0,75 mm, toleranční pole středního průměru 7g, toleranční pole vrcholového průměru 6g, délka zašroubování L – dlouhá).

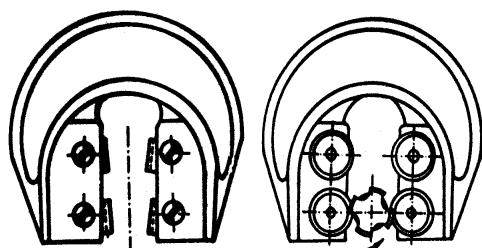
15.2 Kontrola závitů

15.2.1 Kontrola závitů vnějších

Druhy kontroly:

- komplexní kontrola (závit je kontrolován jako celek – nelze vyhodnotit skutečné rozměry závitu, nýbrž jen dodržení předepsané tolerance),
- dílčí kontrola (jsou kontrolovány jednotlivé parametry závitu samostatně).

Komplexní kontrola



Obr.15.1 Hřebínkový a rolničkový kalibr

- kontrola se provádí pomocí pevných závitových kroužků nebo pomocí třmenových závitových kalibrů (hřebínkový, rolničkový viz **obr. 15.1**),
- dobrý závitový kroužek se musí dát lehce šroubovat (dobrá strana závitového třmenového kalibru musí lehce přejít vlastní hmotností kontrolovaným závitem),
- tím je zaručeno, že střední průměr závitu d_2 nepřekročí horní mezní rozměr a že chyby rozteče P a úhlu boků závitu α jsou vyrovnány příslušným zmenšením d_2 .

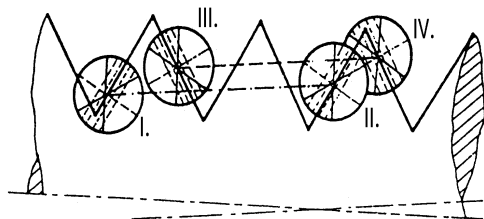
Kontrola rozteče P

Rozteč závitu P – axiální pohyb středu závitového boku vztažený k ose závitu odpovídající jedné celé otočce tohoto bodu.

Kontrola pomocí závitových hřebínkových šablon

- rychlá kontrola informativního charakteru.

Kontrola pomocí dílenské (univerzálního) mikroskopu



- v mikroskopu se nastaví stínový obraz závitu,
- střed nitkové kříže se nastaví na jeden bok závitu a odečte se příslušná hodnota v podélném směru, přesune stínový obraz na druhý bok a opět se načte hodnota,
- rozdíl čtení odpovídá rozteči kontrolovaného závitu (princip měření je patrný z **obr.15.2**),
- platí: $2P = \frac{(II - I) + (IV - III)}{2}$
- je možno použít přesných závitových nožíků, které se přikládají těsně k profilu závitu.

Obr. 15.2 Kontrola rozteče závitu mikroskopem

Kontrola středního průměru d_2

Střední průměr závitu d_2 :

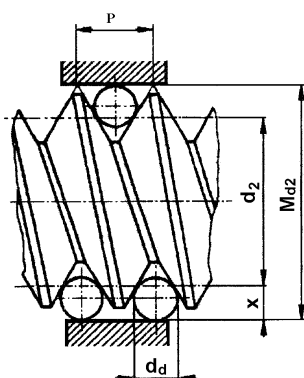
- kolmý rozdíl středů boků závitu.
- kolmý rozdíl dvou rovnoběžných boků závitu (pro symetrický profil).

Kontrola třídrátkovou metodou

- jde o normalizovanou metodu (**obr.15.3**),
- pro danou rozteč **P** se vyberou drátky příslušného průměru d_d (jsou tabelizovány),
- průměr drátků d_d je možno vypočíst dle vztahu:

$$d_d = \frac{P}{2 \cos(\alpha / 2)}$$

- délkovým měřidlem (mikrometr, délkoměr) se změří rozměr přes drátky **Md₂**,



- vztah pro výpočet středního průměru **d₂**:

$$d_2 = Md_2 - d_d \left(1 + \frac{1}{\sin \alpha / 2} \right) + \frac{P}{2} \cot g \frac{\alpha}{2} - k_1 + k_2$$

kde:

k_1 ... korekce zohledňující úhel stoupání šroubovice ($k_1=1\div 2\mu\text{m}$),

k_2 ... korekce zohledňující měřicí tlak,

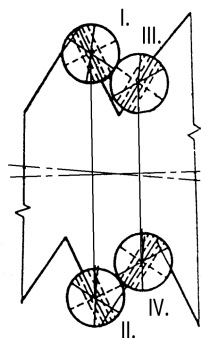
- hodnoty korekce jsou tabelizovány.
- na základě znalosti **Md₂** určíme střední průměr závitu **d₂**:

$$d_2 = Md_2 - 2x,$$

kde: hodnota **2x** vypočtena z geometrických vztahů je tabelizována.

Obr. 15.3 Třídrátková metoda

Kontrola pomocí dílenské (univerzálního) mikroskopu

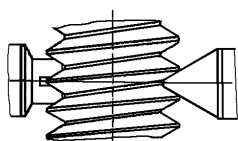


- kontrola se provádí buď metodou stínového obrazu nebo pomocí závitových nožíků,
- na dva proti sobě ležící boku závitů se nastavuje průsečík nitkového kříže mikroskopu,
- rozdíl posunutí v příčném směru odpovídá hodnotě středního průměru,
- pro eliminaci vlivu odchylky souososti osy středících důlků a osy závitového profilu měříme průměry na protilehlých bocích závitu (**obr. 15.4**),
- hodnota středního průměru **d₂** je aritmetický průměr z obou měření se určí ze vztahu:

$$d_2 = \frac{(II - I) + (IV - III)}{2}$$

Obr. 15.4 Kontrola pomocí mikroskopu

Kontrola pomocí mikrometru s vyměnitelnými doteky



- doteky jsou vyměnitelné pro různý vrcholový úhel a rozteč závitu (**obr. 15.5**),
- mikrometry se nastavují nastavitelnými měrkami nebo pomocí závitových kalibrů,
- hodnota **d₂** je nepříznivě ovlivněna chybou úhlu boku závitu (cca $0,01\div 0,2\text{ mm}$).

Obr. 15.5 Vyměnitelné dotyky

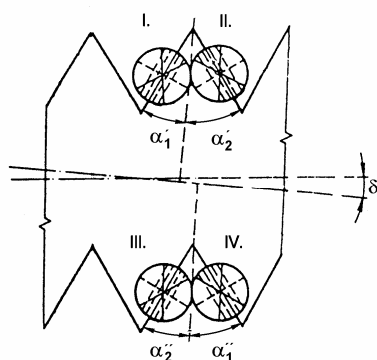
Kontrola vrcholového úhlu závitu

Kontrola pomoci dílenské (univerzálního) mikroskopu

- používá se hlavice s úhlovým okulárem (s přesností na minuty),
- do zorného pole se nastaví stínový obraz závitového profilu,
- jedna ryska v tomto obrazu se ztotožní s příslušným bokem závitu,
- při měření musí být osa středících důlků totožná s osou závitu,
- chyba špatného nastavení se vyloučí měřením úhlů rovněž na protější straně závitu (**obr. 15.6**),

– platí:
$$\alpha_1 = \frac{\alpha'_1 + \alpha''_1}{2} \quad \alpha_2 = \frac{\alpha'_2 + \alpha''_2}{2} \quad \alpha = \alpha_1 + \alpha_2$$

- u závitů s větším úhlem stoupání šroubovice nevidíme z důvodu prostorového zakřivení šroubové plochy ostrý obraz závitu,



- pro vyloučení této nepřesnosti je třeba vyklonit měřicí hlavici o střední úhel šroubovice β , který vypočteme ze vztahu:

$$\beta = 18,25 \frac{P}{d_2},$$

- pro přesné měření je možno použít závitové nožíky v osovému řezu, které se nechají dosednout na bok závitu,
- nožíky mají na čelní ploše vyryty přesné rysky (ve vzdálenosti 0,3 nebo 0,9 mm), které se ztotožňují s ryskami, které vidíme v okuláru mikroskopu,
- při použití mikroskopu s revolverovou hlavici, kde jsou na skleněné destičce vyryty přesné profily závitů (metrický, Whitworthův atd.), můžeme kontrolovat rovněž zaoblení, sražení atd.

Obr. 15.6 Kontrola vrcholového úhlu pomocí mikroskopu

15.2.2 Kontrola vnitřních závitů

Možnosti kontroly parametrů vnitřního závitu jsou omezené a u malých závitů (pod 10 mm) nemožné. Často je jedinou možností použití závitových kalibrů.

Kontrola rozteče závitu

- kontrolu rozteče vnitřních závitů větších průměrů je možno provést na měřicím mikroskopu opatřeném upravenou hlavici tak, že optická osa tvoří úhel 90° ,
- kontrolovaný závit se promítá v zorném poli okuláru,
- osa vložené části, která se vsune do závitové části, musí být rovnoběžná s osou měřeného závitu.

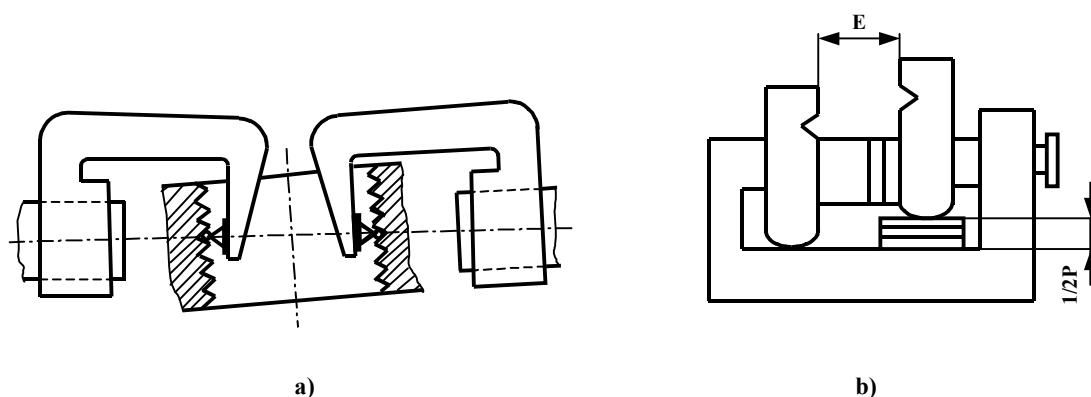
Kontrola vrcholového úhlu

- kontrolu je možno provést obdobně jako rozteče na mikroskopu se speciálně upravenou hlavici,
- většinou přímé měření je velmi obtížné,
- pokud je nutno provést tuto kontrolu provádí se nepřímou - otiskovou metodou (kontrola se provede na otisku kontrolovaného závitu).

Kontrola středního průměru

- u větších průměrů se používají mikrometrické odpichy opatřené závitovými vložkami,
- přesnější kontrolu je možno provést na univerzálním délkoměru s nastavnými rameny pro vnitřní měření s vyměnitelnými kulovými doteky,
- kontrolovaná součást je volně uložena na pohyblivém stolku,
- ramena se nastaví na požadovaný rozměr pomocí přípravku, koncových měrek a šablon s profilem kontrolovaného závitu,
- dle tabulek se určí vzdálenost **E** a nastaví pomocí koncových měrek,

- na tuto vzdálenost se seřídí počáteční poloha dotyků, která odpovídá jmenovité hodnotě středního průměru D_2 ,
- jedna ze šablon je posunuta o polovinu rozteče závitu (schéma měření a seřízení doteků **obr.15.7**).



Obr. 15.7 Kontrola středního průměru matice
a – princip kontroly, b – nastavení ramen

16. Kontrola ozubených kol

Funkčnost ozubených kol je podmíněna dodržением požadovaných kinematických vlastností a potřebného dotyku funkčních ploch zubů k přenosu zařízení v průběhu provozu. Z kinematického hlediska je plynulost chodu dána změnami pohybu soukolí při malých pootočeních. Nezbytné je dodržení určité boční vůle mezi nepracovními boky zubů.

Nepřesnosti ozubení vznikají jako projevy:

- nepřesnosti použitého nástroje a jeho ustavení,
- nepřesnosti výrobního stroje,
- upnutí obrobku na stroji,
- způsobu výroby ozubení a jeho parametrech.

16.1 Přesnost ozubených čelních kol – základní terminologie

Definice a mezní hodnoty odchylek vztažených na stejnolehle boky zubů jsou obsahem normy ISO1328-1.

Odchyly profilu

Odchyłka profilu – odchylka mezi skutečným a teoretickým profilem měřena v čelní rovině na kolmici k evolventě.

Použitelná délka profilu (L_{AF}) – vzdálenost mezi dvěma body profilu zubu určenými tečnami k základní kružnici, z nichž jedna je v poloze vnější hranice a druhá je v poloze vnitřní hranice použitého profilu. Použitelná délka je omezena vrcholem zubu, počátkem sražení nebo zaoblení hlavy zubu (bod A). Směrem k patě zubu je tato délka omezena buď přechodem boku zubu do paty nebo počátkem podřezání (bod F) (**obr. 16.2**).

Činná délka profilu (L_{AE}) – část použitelné délky profilu, která je vztažena k činnému profilu; směrem k vrcholu zubu je činná délka profilu omezena stejně jako použitelná délka profilu (bod A); směrem k patě zubu činná délka končí koncovým bodem E efektivního dotyku se spoluzabírajícím evolventním čelním kolem (**obr. 16.2**).

Rozsah vyhodnocovaného profilu (L_a) – část použitelné délky profilu, která je určující pro vymezení mezních úchylek v souladu s příslušným stupněm přesnosti (zpravidla 92% činné délky profilu (L_{AE}) počínaje bodem E (**obr. 16.2**).

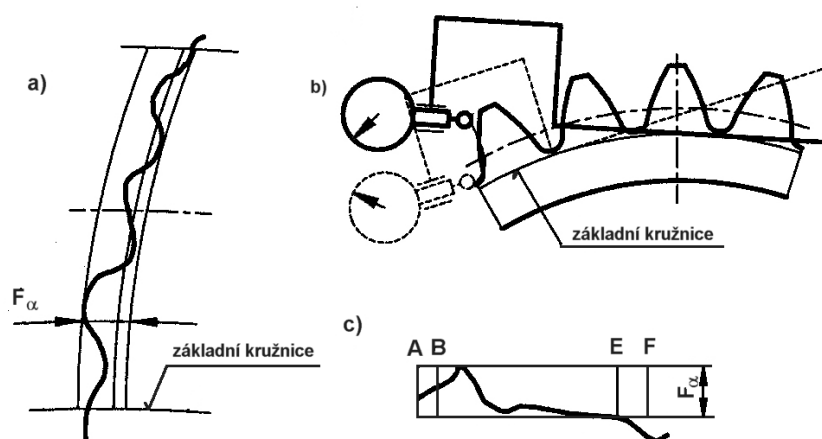
Teoretický profil – profil stanovený na základě konstrukčních požadavků, zpravidla v čelní rovině.

Střední profil měřeného boku - profil určený nahrazením pořadnic skutečného profilu pořadnicemi odpovídající přímkou (poloha a sklon středního profilu jsou získány metodou nejmenších čtverců). Střední profil je doplňkem pro stanovení odchylky tvaru profilu ($f_{f\alpha}$) a odchylky úhlu profilu ($f_{H\alpha}$) (**obr. 16.2**).

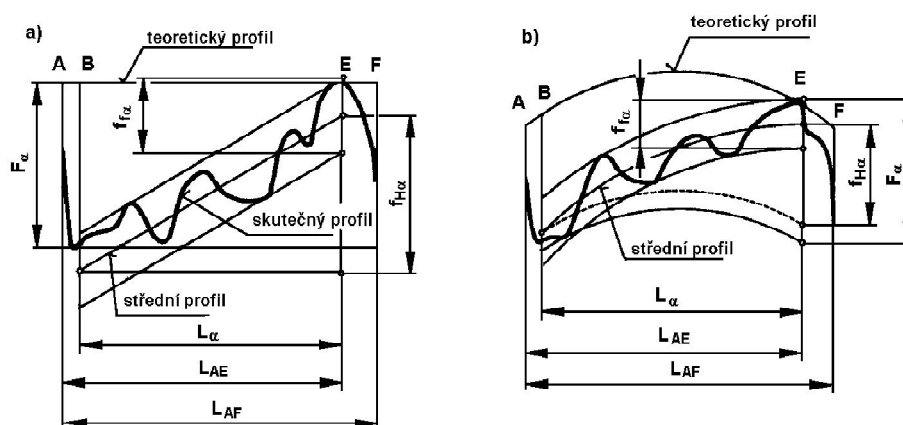
Odchylka profilu (F_α) - vzdálenost mezi dvěma ekvidistantami teoretického profilu mezi nimiž je skutečný profil v rozmezí rozsahu vyhodnocení L_α (**obr.16.1**)

Odchylka tvaru profilu ($f_{f\alpha}$) - vzdálenost mezi dvěma ekvidistantami středního profilu, umístěnými v konstantní vzdálenosti od středního profilu tak, aby zahrnovaly skutečný profil v rozsahu vyhodnocení L_α (**obr. 16.2**).

Odchylka úhlu profilu ($f_{H\alpha}$) - vzdálenost mezi dvěma ekvidistantami teoretického profilu, které protínají střední profil v koncových bodech rozsahu vyhodnocení L_α (**obr.16.2**).



Obr.16.1 Odchylka profilu zubu F_α
a – definice odchylky, b – princip měření evolventoměrem, c – analýza záznamu



Obr. 16.2 Odchylka profilu F_α , odchylka tvaru profilu $f_{f\alpha}$, odchylka úhlu profilu $f_{H\alpha}$
a – nemodifikovaná evolventa, b – modifikovaná evolventa

Odchytky sklonu zubu

Odchylka sklonu zubu – odchylka mezi teoretickou a skutečnou boční křivkou zubu měřená ve směru tečny základního válce evolventního čelního kola.

Délka boční křivky zubu – délka úměrná šířce ozubení s vyloučením sražení nebo zaoblení.

Délka vyhodnocení boční křivky zubu (L_β) – délka boční křivky zubu, zkrácená na každém konci o menší z hodnot: buď 5% šířky ozubení nebo délky odpovídající jednomu modulu.

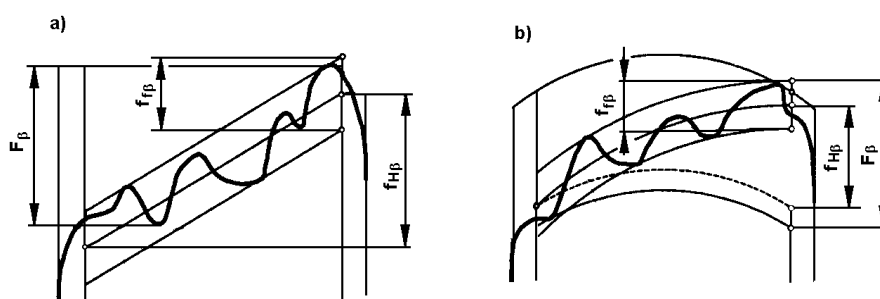
Teoretická boční křivka zubu – boční křivka zubu stanovená na základě konstrukčních požadavků.

Střední boční křivka zubu – boční křivka zubu stanovena nahrazením pořadnic skutečné boční křivky zubu pořadnicemi přímky (poloha a sklon střední boční křivky jsou získány metodou nejmenších čtverců). Tato křivka je určující pro stanovení odchylky tvaru sklonu zubu (f_{β}) a odchylky úhlu sklonu zubu ($f_{H\beta}$).

Odchylka sklonu zubu (F_{β}) – vzdálenost mezi dvěma ekvidistantními teoretickými bočními křivkami zubu, které omezují skutečnou boční křivku zubu v rozsahu jejího vyhodnocení L_{β} (**obr. 16.3**).

Odchylka tvaru sklonu zubu (f_{β}) – vzdálenost mezi dvěma ekvidistantními středními bočními křivkami zubu, umístěnými v konstantní vzdálenosti od středu boční křivky zubu tak, že omezují skutečnou boční křivku zubu v rozsahu jejího vyhodnocení L_{β} (**obr. 16.3**).

Odchylka úhlu sklonu zubu ($f_{H\beta}$) – vzdálenost dvou průsečíků teoretických bočních křivek boku v koncových bodech zubu v rozsahu L_{β} (**obr. 16.3**).



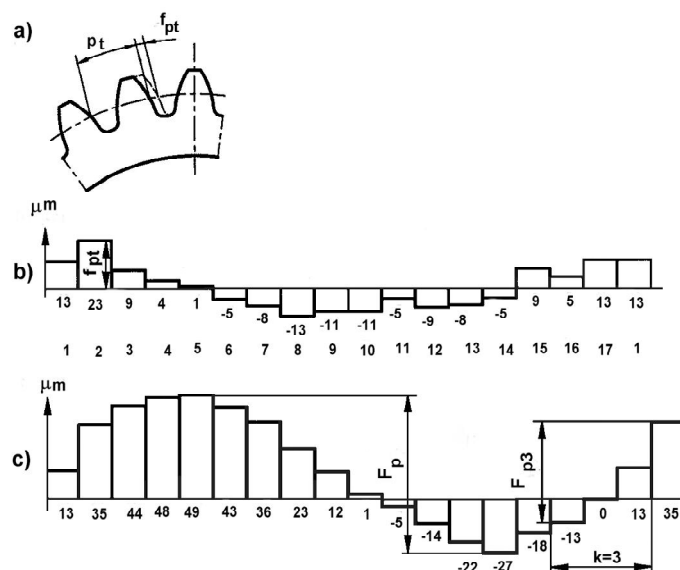
Obr. 16.3 Odchylky úhlu sklonu zubu

Odchylky roztečí

Odchylka čelní rozteče (f_{pt}) – algebraický rozdíl mezi skutečnou a teoretickou délkou rozteče v čelní rovině na kružnici se středem na ose ozubení, která prochází přibližně středem výšky zubu (**obr. 16.4**).

Součtová odchylka k roztečí kola (F_{pk}) – algebraický rozdíl mezi skutečnou a teoretickou délkou oblouku o k roztečích v čelní rovině na kružnici se středem na ose ozubení, která prochází přibližně středem výšky zubu, teoreticky je to algebraický součet jednotlivých odchylek čelních roztečí pro k roztečí na libovolném úseku této kružnice (**obr. 16.4**).

Součtová odchylka roztečí (F_p) – součtová odchylka stanovena pro celý obvod ozubeného kola ($k=1+z$) na stejnohlých bocích zubů kola. Představuje úplnou amplitudu křivky znázorňující průběh součtové odchylky roztečí (**obr. 16.4**).



Obr. 16.4 Odchylky roztečí

a – definice odchylky, b – graf odchylky čelní rozteče, c – graf součtové odchylky roztečí

Kinematické odchylky

Kinematická odchylka kola (f_i') - největší rozdíl mezi skutečným a teoretickým obvodovým umístěním referenční kružnice měřeného kola při záběru s měřicím kolem během jedné otáčky měřeného kola. V průběhu měření dochází k dotyku pouze na jedné dvojici odpovídajících boků zubů (tzv. jednoboký odval – obr. 16.5).

Místní kinematická odchylka kola (f_i') – hodnota kinematické odchylky kola v rozsahu jedné rozteče (obr. 16.5).

Soustava přesnosti dle ISO

Pro odchylky stejnolehých boků zubů norma (ISO ČSN 1328-1) stanovuje 13 stupňů přesnosti: 0 ÷ 12 (0 – nejvyšší přesnost, 12 – nejnižší přesnost).

Norma stanovuje přípustní mezní odchylky na základě průměru roztečné kružnice d , modulu m a šířky ozubení b .

Stupeň přesnosti je určen porovnáním hodnot naměřených odchylek s odchylkami mezními. **Přípustné odchylky** přiřazené pátému stupni přesnosti se určí následovně:

odchylka čelní rozteče f_{pt}	$f_{pt} = 0,3(m + 0,4\sqrt{d}) + 4$	
součtová odchylka k roztečí kola F_{pk}	$F_{pk} = f_{pt} + 1,6\sqrt{(k-1)m}$	
součtová odchylka roztečí F_p	$F_p = 0,3m + 1,25\sqrt{d} + 7$	
odchylka profilu F_{α}	$F_{\alpha} = 3,2\sqrt{m} + 0,22\sqrt{d} + 0,7$	
odchylka sklonu zubu F_{β}	$F_{\beta} = 0,1\sqrt{d} + 0,63\sqrt{b} + 4,2$	
místní kinematická odchylka kola f_i'	$f_i' = K(4,3 + f_{pt} + F_{\alpha})$	
	$K = f(\varepsilon_r)$	$\varepsilon_r \dots$ úplný součinitel záběru
kinematická odchylka kola F_i'	$F_i' = F_p + f_i'$	
odchylka tvaru profilu $f_{f\alpha}$	$f_{f\alpha} = 2,5\sqrt{m} + 0,17\sqrt{d} + 0,5$	
odchylka úhlu profilu $f_{H\alpha}$	$f_{H\alpha} = 2\sqrt{m} + 0,14\sqrt{d} + 0,5$	
odchylka tvaru sklonu zubu $f_{f\beta}$ a $f_{H\beta}$	$f_{f\beta} = f_{H\beta} = 0,07\sqrt{d} + 0,45\sqrt{b} + 3$	

Faktor kroku mezi dvěma po sobě jdoucími stupni přesnosti je roven $\sqrt{2}$. Požadované mezní odchylky pro kteroukoliv přesnost můžeme stanovit vynásobením nezaokrouhlené mezní odchylky stupně přesnosti 5 koeficientem $2^{0,2(Q-5)}$ (Q ... stupeň požadované přesnosti).

Odchylky kombinované a odchylky házivosti

Tyto odchylky jsou předmětem normy ISO 1328-2 a jsou to tyto:

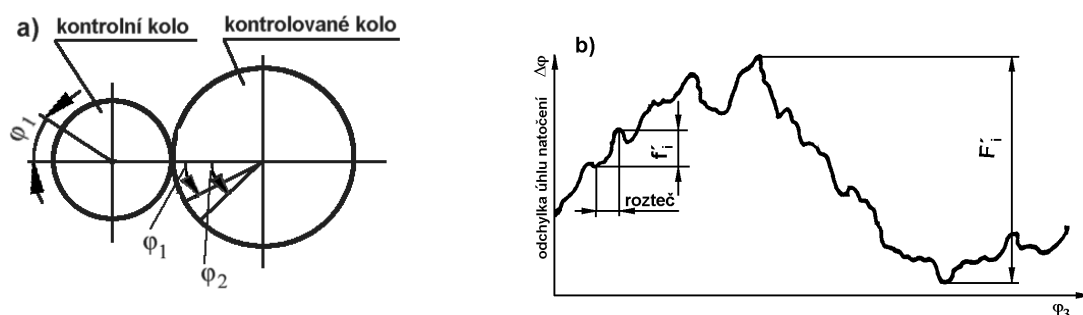
- nestejnomyšernost vzdálenosti os kol - F''_i (dvouboký odval),
- nestejnomyšernost vzdálenosti os na rozteči - f''_i (dvouboký odval),
- házivost - F_r .

16.2 Komplexní kontrola ozubených kol

16.2 1 Jednoboký odval

Kontrola ozubených kol jednobokým odvalem:

- princip kontroly jednobokým odvalem je zobrazen na **obr. 16.5a**,
- základní metoda hodnocení kinematické přesnosti,
- osová vzdálenost ozubených kol je stálá,
- v době záběru jedno kolo je hnací (kontrolní), druhé je hnané (kontrolované) a slabě bržděno tak, aby byl zajištěn stálý styk spolupracujících boků zubů,
- mezi nepracovními boky zubů je vůle,
- rychlost otáčení kol je malá, tzn. že případné geometrické odchylky ozubení se projeví v nerovnoměrném pohybu kontrolovaného (hnaného) kola,
- jmenovitý úhel pootočení hnaného (kontrolovaného) kola je součinem úhlu pootočení hnacího (kontrolního) kola a převodového poměru,
- případné rozdíly mezi zaznamenaným a jmenovitým úhlem pootočení hnaného kola se zaznamenají do grafu jako funkce úhlu pootočení hnacího kola (**obr. 16.5b**),
- používá se jak při kontrole správnosti smontovaných párů ozubených kol, tak i jednotlivých ozubených kol.



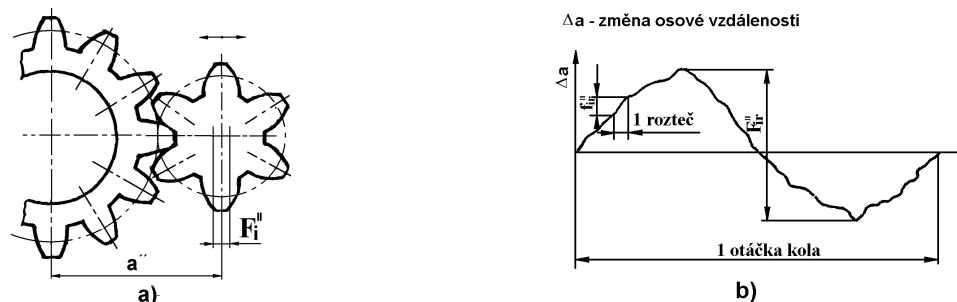
Obr. 16.5 Jednoboký odval

a – princip jednobokého odvalu, b – graf odchylky: φ_1 – úhel pootočení kontrolního kola, φ_2 – zaznamenaný úhel pootočení kontrolovaného kola, φ_3 – jmenovitý úhel pootočení kontrolovaného kola odpovídající pootočení kola kontrolního φ_1

16.2.2 Dvouboký odval

Kontrola ozubených kol dvoubokým odvalem:

- jde o metodu zjišťování kombinovaných odchylek a házivosti,
- princip kontroly je na **obr. 16.6a**,
- osa jednoho kola je pevná, druhé je dotlačováno k prvnímu tak, aby byl zajištěn oboustranný dotyk,
- rychlost otáčení je malá,
- geometrické odchylky kontrolovaného kola se projeví ve změně osové vzdálenosti spolupracujících kol,
- odchylky je možno zaznamenat graficky (**obr. 16.6b**) nebo číselně, např. na stupnici číselníkového úchylkoměru.



Obr. 16.6 Dvouboký odval
a – princip dvoubokého odvalu, b – grafický záznam dvoubokého odvalu

16.3 Kontrola některých dílčích parametrů ozubených kol

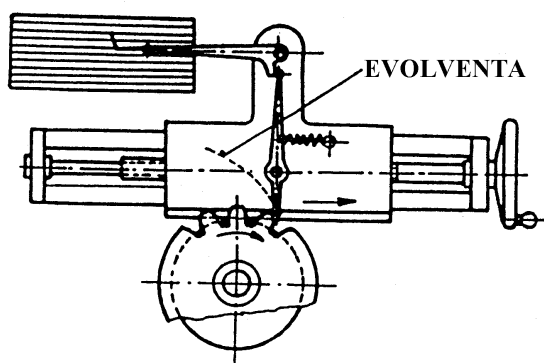
16.3.1 Kontrola profilu zubu

Kontrola profilu zubu:

- přesnost tvaru profilové křivky je ovlivněna způsobem obrábění ozubení, seřízením stroje, parametry a nastavením nástroje,
- odchylky profilu zubu se kontroluje na přístroji, který vytváří přesnou evolventu tím, že se odvaluje pravítko po kotouči, který má stejný průměr jako základní kružnice kontrolovaného kola,
- přístroj je opatřen dotykem, který se odvaluje po profilu zubu,
- výsledky kontroly – odchylky se zobrazí na číselníku úchylkoměru nebo se zapisují odchylky kontrolovaného profilu ve zvětšení na milimetrový papír
- dle konstrukce dělíme přístroje **evolventoměry** na dva typy:
 - s pevnou základní kružnicí – použití v sériové výrobě (**obr. 16.7**),
 - se stavitelnou základní kružnicí – pro výzkumné účely.

Princip evolventoměru s pevnou základní kružnicí (**obr. 16.7**):

- kontrolované ozubené kolo a kotouč o průměru základní kružnice kontrolovaného kola se upínají na trn přístroje,
- kruhový kotouč přiléhá k pravítku, které je spojeno se suportem,
- na suportu je otočná dvouramenná páka, jejíž jeden konec vytváří dotek a druhý je v záběru se zapisovací pákou,
- otočnou pákou se přenáší z boku zubu ozubeného kola všechny nerovnosti evolventy na pisátko registračního přístroje,



- při správné evolventě je čára nakreslená pisátkem rovnoběžná s posuvem suportu,
- je-li profil zubu odchýlen od evolventy teoretické, pisátko nakreslí čáru vlnitou,
- u evolventoměru se stavitelnou základní kružnicí se průměr základní kružnice nastavuje pomocí spirálového nonia.

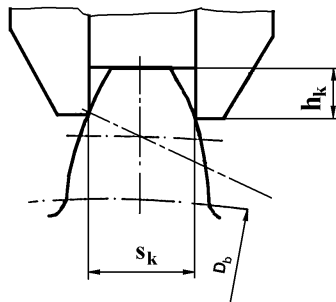
Obr. 16.7 Evolventoměr s pevnou základní kružnicí

16.3.2 Kontrola tloušťky zubů

Kontrola tloušťky zubů:

- měřením zjišťujeme, zda bude při záběru zubu dodržena stanovená vůle na dané osové vzdálenosti,
- nepoužívá se pro přesná měření, neboť je závislá na přesnosti hlavové kružnice,
- tloušťka zubu se měří:
 - na oblouku roztečné kružnice,
 - na sečně,
 - v konstantní tloušťce a výšce zubu,
- měření se provádí zuboměrem.

Měření tloušťky zubu s_k v konstantní výšce h_k



- konstantní výška a tloušťka zubů je závislá na základní rozteči, tj. je odvozena od základní kružnice a není tedy závislá na počtu zubů, ale jen na modulu, úhlu záběru a případném posunutí základního profilu,
- základní schéma **obr. 16.8**,
- výhody měření:
 - lze měřit přímo na stroji,
 - jednoduché měřidlo,
- nevýhody měření:
 - závislost měření na přesnosti průměru hlavové kružnice.

Obr. 16.8 Kontrola tloušťky zubu s_k v konstantní výšce h_k

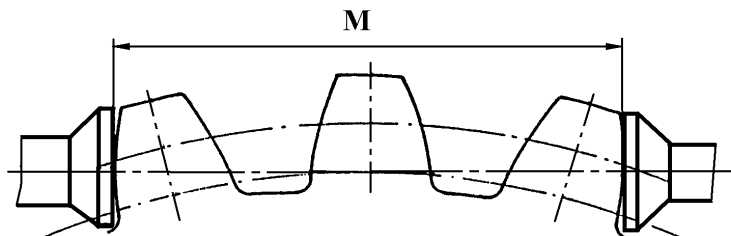
Hodnoty s_k a h_k jsou tabelizovány a vypočítají se ze vztahů:

$$s_k = \frac{\pi m \cos^2 \alpha}{2} \quad h_k = m \left(1 - \frac{\pi \cos \alpha \sin \alpha}{4} \right)$$

16.3.3 Kontrola rozměru přes zuby M

Kontrola rozměru přes zuby M :

- nejrozšířenější způsob k přímému stanovení boční vůle, neboť součet odchylek rozměrů přes zuby obou spoluzabírajících kol určuje přímo boční vůli při jmenovité osové vzdálenosti (**obr. 16.9**),
- jmenovitý rozměr přes zuby M je vzdálenost mezi rovnoběžnými rovinami, které se v tečně dotýkají dvou protilehlých boků zubů, přičemž se předpokládá ozubení bez vůle,
- měření se provádí přes tolik zubů z' , aby dotyk měřících ploch měřidla byl přibližně na roztečné kružnici,



Obr. 16.9 Kontrola rozměru přes zuby M

- pro normální ozubení ($\alpha=20^\circ$): $z' = \frac{z}{9} + 0,5$ hodnoty z' tabelizovány

- určení rozměru přes zuby **M**:

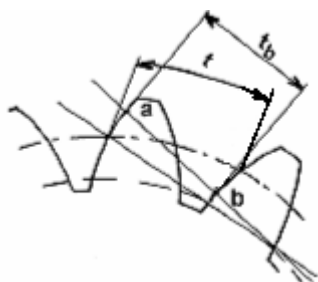
$$M = m \cos \alpha \left[\pi \left(z' - 0,5 \right) + z (\operatorname{tg} \alpha - \operatorname{arcc} \alpha) \right], \quad \text{hodnoty tabelizovány}$$

- výhody měření:
 - jednoduché měřidlo (talířkový mikrometr, talířkový passametr, talířkový mikropassametr),
 - lze měřit přímo na stroji ve výrobě,
 - ze změřeného rozměru je snadno zjistitelné posunutí základního profilu,
 - měření vychází od obrobených boků zubů – není závislé na přesnosti průměru hlavové kružnice,
 - kontrola rozměru přes zuby **M** u čelních ozubených kol se šikmými zuby se provádí kolmo na osu zubu.

16.3.4 Kontrola základní rozteče

Základní rozteč - nejkratší vzdálenost mezi dvěma stejnohlými čelními profily zubů, která je omezena průsečíky těchto profilů a jejich společné normály (**obr. 16.10**).

- odchylka základní rozteče má vliv na plynulost záběru,
 - jmenovitá (teoretická) hodnota základní rozteče je funkcí modulu **m** a úhlu záběru α :



$$t_b = \pi \cdot m \cdot \cos \alpha$$

- kontrola se obvykle provádí speciálním přenosným měřidlem, které se pomocí etalonu nastavuje nejčastěji na jmenovitou hodnotu t_b pro přímé zjišťování odchylek,
- naměřené odchylky základní rozteče jsou ovlivněny odchylkami rozteče a odchylkami tvaru profilu.

Obr. 16.10 Základní rozteč t_b

16.3.5 Kontrola obvodové házivosti

Obvodová házivost:

- působí jako periodická změna velikosti a směru osové vzdálenosti ozubeného soukolí,
- vzniká:
 - z dvojnásobku výstřednosti ozubení vůči ose kola,
 - ze složky odpovídající vlivu nerovnoměrnosti zubových mezer způsobených chybami zubových roztečí levých a pravých boků zubů.
- kontrola:
 - číselníkovým úchylkoměrem (přesný trn, kulový dotek, kontrola mezery po mezeře),
 - přístroje na kontrolu dvoubokého odvalu (u kruhových diagramu se projeví jako výstřednost záznamu, u pravoúhlých diagramů jako sinusovka).

17. Kontrola malých rozměrů

Malými rozměry nazýváme rozměry pod 5 mm a tolerují se podle základních tolerancí ISO. Měření malých vnějších rozměrů nečiní těžkosti jak při kontrole mezními měřidly tak i při kontrole délkovými měřidly. Komplikovanější měření je u malých otvorů, hlavně u rozměrů pod 1 mm.

17.1 Měření malých otvorů

Prostředky používané pro měření malých otvorů je možno rozdělit na:

- kalibry,
- kuželové jehly (kuželová měřidla),
- mikroskopické, optické,
- pneumatické atd.

Kalibry do děr:

- měřicí část výměnná a v držáku je držena kleštinovým upínáním,
- nevýhodou je, že se změří jen nejmenší průměr a nepostihne se geometrický tvar.

Kuželové měřidlo:

- základní části jsou výměnné kužely s malou kuželovitostí (čím menší kuželovitost tím vyšší přesnost, ale zmenší se rozsah měřidla),
- možné rozsahy: 0-2, 2-4, 4-6, 6-8, 8-10 mm,
- vhodné pro průchozí otvory nebo hlubší otvory bez sražení hran,
- nevhodné pro nehluboké slepé otvory,
- nevýhodou je, že se změří jen jeden průměr a to vždy nejmenší a nedostaneme obraz o geometrickém tvaru celého profilu otvoru.

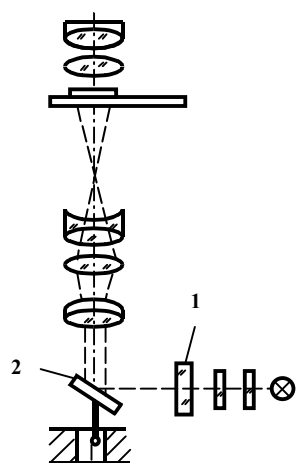
Dutinoměr na malé otvory – měřidlo INTO:

- porovnávací měření,
- měřidlo se nastavuje na jmenovitý rozměr pomocí koncových měrek uchycených v držáku,
- měřicí doteky jsou výměnné a rozměrově odstupňovány (po 0,5 mm nebo 1 mm),
- pracovní část doteků je tvořena polokoulemi,
- podélné proříznutí doteku umožňuje měření s daným rozsahu.

K nejpřesnějšímu měření se používají speciálně konstruované měřicí optické přístroje.

Optické přístroje pro měření malých děr

Opticko-mechanická hlavice:

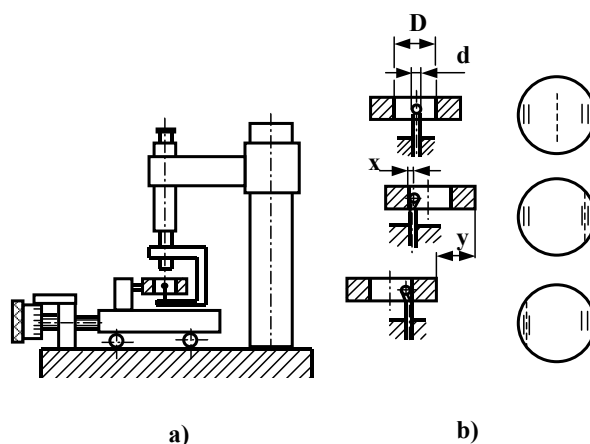


- bývá příslušenstvím univerzálního nebo dílenského mikroskopu (schéma **obr.17.1**),
- umožňuje měřit otvory do 2 mm,
- měří se mechanickým dotykem spojeným se zrcátkem,
- světelný zdroj promítá na zrcátko obraz rysky vyryté na desce 1,
- od zrcátka 2 se tento obraz odráží a promítá do okuláru,
- průměr otvoru se měří dle vychýlení doteku, který vychýlí zrcátko,
- vychýlením zrcátka se vychýlí obraz rysky,
- posunutí se měří spirálovým noniem,
- rozměr otvoru se vypočte jako součet vodorovné dráhy čepu odečtené pomocí spirálového nonia a hodnoty průměru měřicího dotyku.

Obr. 17.1 Opticko-mechanická hlavice

Mikroskopy

Mikroskopy se dají měřit malé otvory buď přímo bezdotykově s použitím okuláru se záměrným nitkovým křížem nebo pomocí mechanického dotyku (schéma a princip přístroje **obr. 17.2**).



Obr. 17.2 Přístroj na měření malých otvorů
a – schéma přístroje, b – zorné pole mikroskopu při měření

- na vrchlíku mechanického dotyku je ryska, která se pozoruje mikroskopem,
 - při měření se pohybuje nejprve součást doprava, až stěna otvoru se dotkne mechanického dotyku a začne ji vychylovat doprava tak dlouho, až umístíme rysku přesně mezi dvě rysky na okulárové destičce mikroskopu (mechanický dotyk se vychýlí o hodnotu x),
 - totéž se provede ve směru doleva,
 - průměr otvoru:
$$D = y + d - 2x$$
- kde: y – rozdíl krajních hodnot,
 d – průměr kuličky,
 x – vychýlení kuličky.
- přesnost: $\pm 1 \mu\text{m}$,
 - použití: např. ke diamantových průvlaků k tažení drátů.

Bezdotykové metody při kontrole malých otvorů

- pomocí mikroskopů, projektorů:
 - u zvětšeného otvoru se měří průměr zaměřením nitkového kříže jako tečny na jedné straně průměru a přesunutím na druhou stranu,
 - buď se přesouvá součást a průměr se měří mikrometrickým šroubem nebo součást stojí a přesunutí nitkového kříže se měří spirálovým noniem,
 - na přesnost měření má vliv stav hrany a drsnost povrchu měřeného otvoru,
- pneumatický způsob měření (trysky karburátorů, plynových hořáků):
 - přímé propouštění vzduchu kontrolovaným otvorem,
 - neměříme průměr, ale příčný průřez (z něhož následně vypočteme průměr).

18. Měření velkých rozměrů

Velkými rozměry se ve strojírenství běžně rozumí rozměry nad 500 mm. V tomto duchu je také koncipována norma ČSN 01 0202, která se vztahuje k zaměnitelnosti součástí ve strojírenské výrobě.

Měření velkých rozměrů ve strojírenství patří k oblastem metrologie s celou řadou problémů např.:

- průvodní jevy ovlivňují výsledek měření ve větší míře než při měření běžných rozměrů (tuhost měřidla, tepelná roztažnost apod.),
- chybí vhodná a cenově dostupná měřicí technika,
- tyto skutečnosti často nejsou zohledňovány konstruktéry a na výkresech jsou často předepisovány tolerance, které nejsou běžně dostupnými měřicími prostředky postižitelné.

Klasická měřidla pro měření velkých rozměrů se svým principem podstatně neliší od měřidel pro rozměry do 500 mm. Tato měřidla jsou v této oblasti mnohem citlivější k průvodním jevům, proto vyžadují skutečně dokonalou znalost a dovednost při jejich použití. Jsou to hlavně:

- mikrometrické odpichy,
- třmenové mikrometry,
- posuvná měřidla,
- speciální posuvná, vysouvací a mikrometrická měřidla.

Jejich použitelnost je omezená hlavně v oblasti 3000 až 4000 mm. Jako možné řešení zabezpečení této oblasti je využití nekonvenčních metod měření (geodetických metod, laserinterferometrického měření atd.).

18.1 Měřidla a metody pro měření velkých rozměrů

Ocelová měřítka:

- méně přesné měření,
- rozměr s přesností na milimetry, odhad na desetinu mm.

Odpichy:

- slouží jak pro měření vnitřních rozměrů, tak k přenosu míry na třmenová měřidla a také k měření od pomocných základen,
- běžně se používají odpichy pevné, vysouvací, mikrometrické a skládací,
- přesnost měření mikrometrickými odpichy závisí na:
 - nastavení odpichu na jmenovitý rozměr, popř. na kalibraci odpichu (provádí se obvykle na délkoměrech ZEISS),
 - chybě čtecího zařízení,
 - pružných deformacích,
 - teplotní chybě,
 - osobní chybě, tj. odečtu naměřené hodnoty a vyhledávání měřicí polohy,
 - vlivu sešroubování u skládacích odpichů,
- pro eliminaci pružných deformací se odpichy do délky 2000 mm podepírají v tzv. Besselových bodech pro něž platí:

$$l = 0,211 \cdot L$$

kde: l ... vzdálenost podepření od měřicích konců odpichu,
 L ... délka odpichu v mm.

- u rozměrů nad 2000 mm je podložení v Besselových bodech nepohodlné, proto je nutné dodržet zásadu, že odpich je podkládán ve stejných bodech při nastavování na délkoměru i při vlastním měření.

Měřicí pásma:

- používají se obvykle pro měření nad 6000 mm (někdy i pro menší rozměry),
- jejich výhodou je malá hmotnost, jednoduchost a také to, že s rostoucí měřenou délkou roste chyba měření pásmem pomaleji než u klasických měřidel,
- při použití měřicích pásem rozeznáváme dva základní způsoby a to **měření přímé a opásáním**,
- bude-li prováděna korekce chyb, je možno měření měřicími pásmy použít pro tolerance IT12 až IT10.

Měření měřicími pásmy - metoda přímá:

- měření je možno provádět v poloze svislé nebo vodorovné,
- je nutné, aby pásmo leželo po celé délce měření na podložce,
- není-li to možné realizovat, provede se korekce naměřeného výsledku na chybu z průvřesu,
- měření je zatíženo řadou chyb, např.: chybou stupnice, chybou způsobenou napínací silou, chybou teplotní, chybou průvřesu atd.

Měření měřicími pásmy - metoda opásáním:

- metoda je založena na určení průměru z délky obvodu,
- výsledek měření je závislý na dodržení celé řady podmínek, které mají vliv na velikost celkové chyby měření,
- při stanovení celkové chyby opásáním působí např. tyto chyby:
 - chyba milimetrové stupnice a chyby metrových úseků,
 - chyba způsobená nestálou napínací silou (při měření musí být pásmo napínáno stejnou silou jako bylo napínáno při kalibraci),
 - chyba způsobená třením,
 - chyba teplotní,
 - chyba způsobená tloušťkou pásma,
 - chyba způsobená šroubovým vložením pásma atd.
- při zodpovědném přístupu k měření, dodržení všech zásad správného měření a při provádění korekcí metrových úseků použitého pásma je možno očekávat nejistotu $\pm 0,5$ mm při měření průměru 10 m.

Měření odvalem:

- princip spočívá ve zjišťování parametru obrobku pomocí odvalovacího kolečka o definovaném obvodu (zpravidla 0,5 m) přitlačeného na obrobek,
- metodu lze použít jen pro rotační součásti s nepřerušovaným povrchem z neporézního materiálu,
- u této metody je nutno řešit problémy spojené s kalibrací měřicího zařízení – eliminace skluzu,
- metodu lze použít až do průměru 20 000 mm.

Pevná měřidla:

- nejčastěji slouží jako mezní měřidla (jednostranné, dvoustranné),
- zjišťujeme, zda rozměr součásti je v tolerančním poli či nikoliv,
- vyrábějí se do rozměru 2000-3000 mm,
- pro větší rozměry se nepoužívají, protože se vlastní hmotnosti snadno deformují.

Posuvná měřidla:

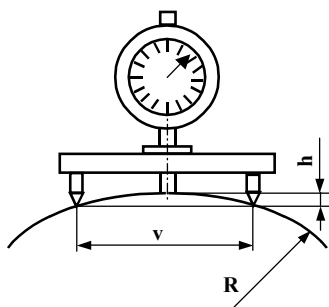
- vyrábějí se pro rozsahy 1000 – 4000 mm.

Mikrometrická měřidla:

- vyrábějí se do 3000 mm se stoupáním mikrometrického šroubu 0,5 mm,
- přesnost 0,01 mm,
- rozsah měření se mění vyměnitelnými pevnými dotyky.

Měřidla s číselníkovým úchylkoměrem:

- příklad použití měřidla s číselníkovým úchylkoměrem **obr. 18.1** - metoda tětivy,
- na příčnici jsou dva pevné dotyky s konstantní vzdáleností v ,
- úchylkoměrem se měří výška h ,
- poloměr měřené součásti se vypočte ze vztahu:



$$R = \frac{v^2}{8h} + \frac{h}{2}$$

- přesnost měření tímto způsobem je velká, zvláště použije-li se citlivý úchylkoměr.

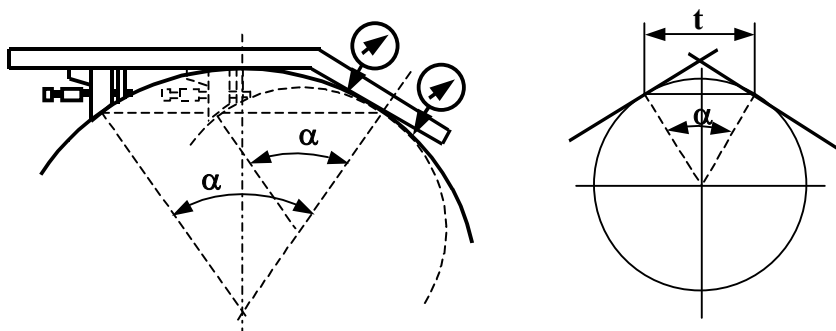
Obr. 18.1 Měřidlo s číselníkovým úchylkoměrem

Cylindrometry:

- přístroj je opatřen prohnutým dlouhým ramenem, na jehož vedení je posuvný držák mikrometrického šroubu (**obr. 18.2**),
- na druhém rameni jsou dva číselníkové úchylkoměry nastavené tak, aby ukazovaly stejnou hodnotu,
- délka tětiny se změří mikrometrickým šroubem,
- poloměr součásti se vypočte ze změřené tětiny t a úhlu α dle vztahu:

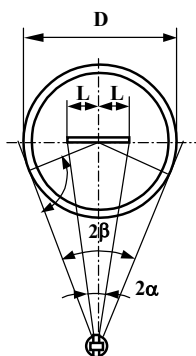
$$R = \frac{t}{2 \sin \frac{\alpha}{2}}$$

- měřidlo je upraveno tak, že stačí dělit poloviční délku tětiny konstantou přístroje, která má hodnotu $\sin \frac{\alpha}{2}$,



Obr. 18.2 Princip cylindrometru

Metoda měření pomocí teodolitu



- jde o optickou metodu - geodetické měření,
- přesným teodolitem se ve vodorovné rovině změří paralaktický úhel 2α k základové lati a úhel tečen 2β z osy teodolitu k měřenému válci (**obr.18.3**),
- hledaný průměr D se určí ze vztahu:

$$D = \frac{2L \sin \beta}{\operatorname{tg} \alpha}$$

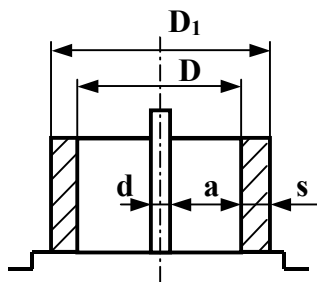
kde: L ... polovina délky základové latě (mm),

- výhodou této metody je možnost měření i v průběhu obrábění,
- požadavek vhodných optických a prostorových podmínek.

Obr. 18.3 Měření teodolitem na svislém soustruhu

Měření rozměrů od pomocných měřických základů

Metody se používají tehdy, má-li se změřit rozměr, který je dostupnými měřidly přímo obtížně měřitelný, popř. vůbec neměřitelný, např.: na soustruzích, kdy máme měřit rozměr větší než měřidlo, které máme k dispozici (příklady viz **obr.18.4**, **obr.18.5**).

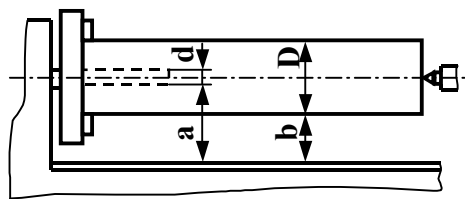


Obr. 18.4 Měření průměru na svislém soustruhu při použití středového sloupu

- pomocná měřická základna je umístěna uvnitř obrobku,
- odpichem změříme vzdálenost a vnitřního válcového povrchu prstence od středového sloupu, průměr středového sloupu d změříme mikrometrem,
- hledaný průměr D se určí ze vztahu:

$$D = 2a + d$$
- změříme-li tloušťku stěny prstence s , pak vnější průměr prstence D_1 získáme ze vztahu:

$$D_1 = d + 2(a + s)$$



Obr. 18.5 Měření průměru od základny umístěné vodorovně

- pomocná měřická základna je umístěna vně obrobku,
- před vlastním obráběním je ve stroji upnut válec s přesně definovaným průměrem d ,
- od tohoto válce se změří vzdálenost a k pomocné základně, např.: loži soustruhu,
- po vyjmutí válce a upnutí měřeného obrobku změříme vzdálenost b ,
- průměr obrobku určíme ze vztahu:

$$D = 2 \left(a + \frac{d}{2} - b \right)$$

Laserinterferometrická měření

Laserové interferometry jsou nejpresnější zařízení pro měření délky a dalších geometrických veličin. Ve srovnání s optickými pravítky a jinými odměřovacími systémy dosahují řádově vyšších přesností a měří na větší vzdálenosti. Laserinterferometrická měření jsou v současné době v provozních podmínkách používána hlavně pro kontrolu odměřovacích systémů obráběcích strojů, pro kontrolu a měření rozměrů v automobilovém a leteckém průmyslu, pro kontrolu odchylek polohy velkých rozměrů atd.

18.2 Technologie měření velkých rozměrů

Pro zabezpečení správného a rychlého měření ve výrobě je nezbytné, aby kontrolní operace byly nedílnou součástí výrobních postupů. Je třeba vypracovat řádné kontrolní postupy, které zajistí použití nejvhodnějších měřidel a kontrolních metod.

Vypracování technologie měření zahrnuje tyto úkoly:

- výběr vhodné metody a zařízení k měření součásti, přičemž je nutno přihlížet k velikosti měřeného dílce nebo montážního celku, k předepsané výrobní toleranci daného rozměru a ke tvaru součásti,
- určení nutných podmínek zajišťujících dosažení nejlepších výsledků měření,
- vypracování projektu měřících a kontrolních zařízení,
- sestavení kontrolního postupu, popř. podrobné návody.

Výběr vhodné metody a zařízení k měření

Při výběru metod a měřidel pro měření velkých rozměrů vycházíme z předepsaných tolerancí, k nimž pak určíme odpovídající přesnost měření, obvykle 1/5 až 1/10 z požadované tolerance.

Při výběru vhodného měřidla je nutno přihlídnout k jeho konstrukci a vlastnostem, popř. k pracnosti jeho výroby a jeho ceně.

Dále je nutno volit mezi přímou a nepřímou metodou měření. Přesnost přímých metod měření je obvykle vyšší než metod nepřímých, proto nepřímých metod používáme jen tehdy, je-li přesnost pro daný případ dostatečná a měření je rychlejší a snadnější.

K měření vnitřních rozměrů se použije nepřímé metody tehdy, není-li k dispozici odpich potřebné délky, popř. měřicí stroj pro kalibraci odpichu.

Pro všechny typy odpichů se doporučují hlavice s číselníkovým úchylkoměrem, které značně usnadňují a urychlují nalezení správné polohy odpichu a zvyšují tak přesnost měření.

Pro větší rozměry nad 2500 mm se doporučuje použití nepřímých metod. Nejčastěji se používají metody měření od pomocných měřicích ploch, hlavně při měření na obráběcích strojích, kde je možno s výhodou použít obrobených ploch jako měřicích základů. Metoda opásání je vhodná, je-li nutno měřit válce nad 2500 mm.

Pro měření velkých rozměrů lze doporučit i optické metody, např.: laserinterferometrická měření, kolimační měření atd.

Stanovení nezbytných podmínek pro měření

Optimální podmínky a způsoby měření velkých rozměrů je nutno volit takové, aby vedly k nejmenším chybám a pro danou přesnost ekonomicky zdůvodnitelné.

Základní zásady pro měření jsou tyto:

- při měření musí být použita jen ověřená a zkalibrovaná měřidla,
- pro vyloučení nebo alespoň zmírnění vlivu teploty na přesnost měření je nutno zajistit vyrovnaní teplot obrobku a měřidla,
- teplota v místnosti nesmí kolísat více, než je dovoleno pro dosažení požadované přesnosti,
- počet měření provedených ve stejných kontrolních bodech nesmí být menší než 3,
- k zmenšení vlivu deformací je nutno měřidla podpírat při měření ve stejných bodech jako při jejich kontrole,
- stejně důležité je i dodržení stejné polohy měřidla při měření i kontrole.

Sestavení kontrolních postupů (kontrolních technologických listů)

Kontrolní listy je nutno vypracovat pro každou jednotlivou součást. Jde-li o složité a nákladné součásti, u nichž je nutná mezioperační kontrola, vypracovávají se kontrolní postupy i pro tuto kontrolu. Každý kontrolní postup musí obsahovat:

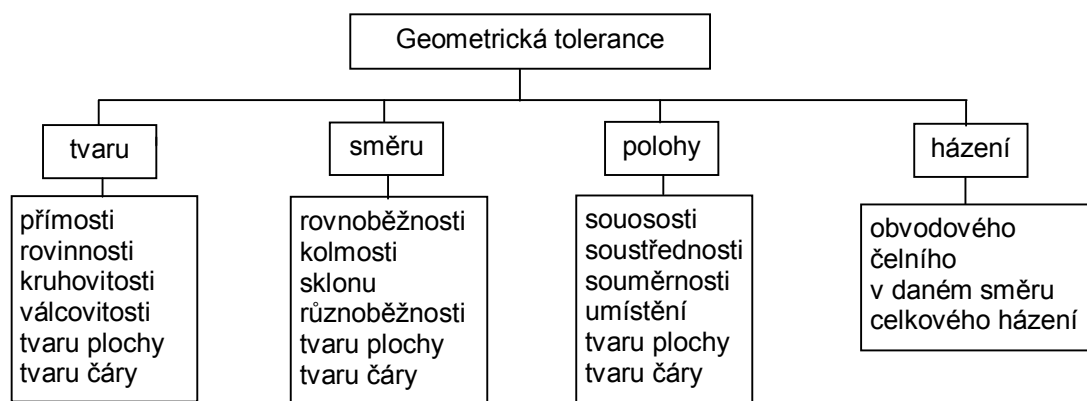
- náčrt součásti v poloze, v níž je v okamžiku měření se všemi rozměry a jejich tolerancemi, které se mají měřit,
- seznam kontrolních úkonů v pořadí, v němž se budou realizovat,
- seznam měřidel a měřicích prostředků vč. jejich označení, předepsaných pro požadované kontrolní úkony,
- měří-li se nepřímou metodou, je nutno nakreslit schéma měření a uvést potřebný matematický aparát,
- stanovení podmínek měření, které je nutno dodržet pro dosažení požadované přesnosti,
- podrobný popis metody měření.

19. Odchytky tvaru a polohy (makrogeometrie povrchu)

Skutečné plochy vykazují určité odchytky vzhledem k jmenovitým hodnotám.

Dle normy ISO 1101 **geometrická tolerance** je definována jako toleranční pole, ve kterém se musí nacházet skutečný prvek součásti. Základní tolerance definované pro geometrickou přesnost dle normy ISO 1101 (**obr. 19.1**).

Geometrické odchytky jsou výsledkem nepřesnosti procesu výroby a musí být měřeny a kontrolovány.



Obr. 19.1 Klasifikace geometrických tolerancí

19.1 Odchyly tvaru

Odchylka geometrického tvaru je hodnota vychýlení skutečného profilu součásti od jeho jmenovitého profilu. **Odchylka geometrického tvaru** je největší odchylka bodů skutečné plochy, určená ve směru normály k jmenovité ploše v rozsahu vztažného úseku. Pro hodnocení tvarové přesnosti je normou určeno kritérium obalových prvků (čar na profilu nebo ploch na tělese), v odůvodněných případech norma připouští využití středního prvku (čára nejmenších čtverců).

Obalový prvek (čára nebo plocha):

- má jmenovitý tvar,
- dotýká se hodnoceného prvku (profilu, plochy),
- dotýká se hodnoceného prvku vně materiálu.

19.1.1 Odchylka přímosti EFL

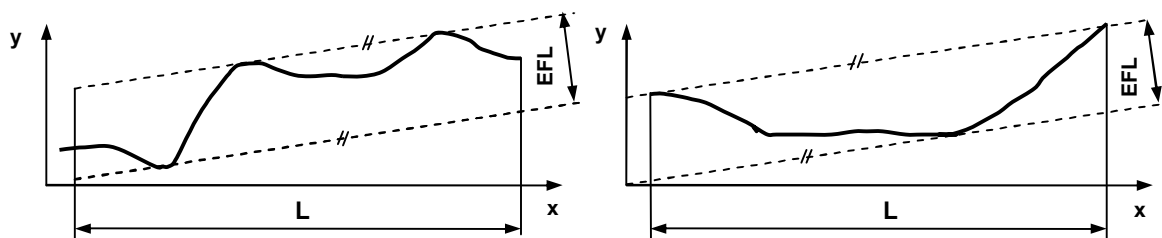
Odchylku přímosti můžeme měřit různými způsoby podle toho, jaké máme požadavky na přesnost a jaké měřicí prostředky máme k dispozici. Odchylku přímosti obvykle zjišťujeme na dlouhých úzkých plochách (např. vedení obráběcích strojů), popř. jako součást měření odchylek válcovitosti nebo kuželovitosti na povrchových přímkách součástí.

Odchylka přímosti (EFL) je největší naměřená vzdálenost skutečné přímky od obalové přímky rozsahu vztažného úseku.

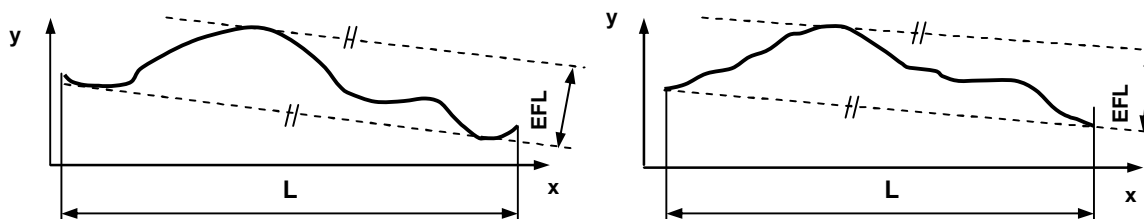
Výchozím podkladem pro stanovení odchylky je zjištěný profil. Při vyhodnocování odchylky přímosti ze zjištěného profilu je důležité jednoznačně určit jeho obálkovou přímku, od níž se vyhodnotí minimální odchylka přímosti. Této podmínce vyhovuje jen jeden ze dvou případů:

- obálková přímka se dotýká zjištěného profilu ve dvou nejvyšších bodech – profil je vydutý (konkávní) (**obr. 19.2**),
- obálková přímka se dotýká zjištěného profilu v jednom nejvyšším bodě a je rovnoběžná se spojnicí dvou nejnižších bodů profilu – profil je vypuklý (konvexní) (**obr. 19.3**).

Pokud není z průběhu zjištěného profilu jednoznačně zřejmé, zda poloha obálkové přímky vyhovuje jednoznačně jednomu z obou případů, určí se odchylka přímosti podle obou případů, pak definici odpovídá ta poloha obalové přímky, u které je odchylka přímosti nejmenší.



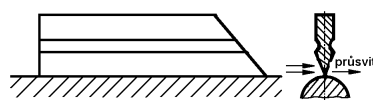
Obr. 19.2 Obalová přímka ve dvou nejvyšších bodech profilu



Obr. 19.3 Obalová přímky v jednom nejvyšším bodě profilu

Kontrola (měření) odchylek přímosti

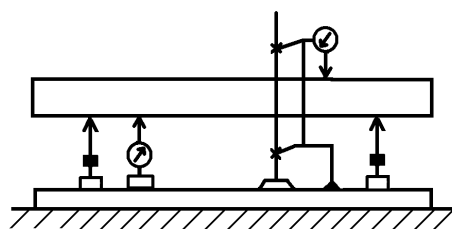
Kontrola vlasovým pravítkem



- metoda je vhodná pro dílenské podmínky,
- odchylku přímosti určujeme průsvitem - kvalitativní metoda (obr. 19.4).

Obr. 19.4 Kontrola vlasovým pravítkem

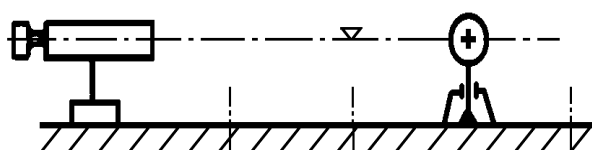
Měření pomocí průměrné desky a úchylkoměru (koncových měrek)



Obr. 19.5 Měření úchylkoměrem (koncovými měrkami) od průměrné desky

- kvantitativní metoda,
- průměrná deska (pravítko) je podložena na měřené ploše stejně vysokými podložkami (obr. 19.5),
- číselníkovým úchylkoměrem (koncovými měrkami) zjišťujeme při posouvání podél měřené plochy odchylku přímosti jako rozdíl největší vzdálenosti měřené plochy od základny a výšky podložek,
- metoda vhodná jen pro krátké délky

Měření optickou metodou záměrným dalekohledem a záměrným křížem

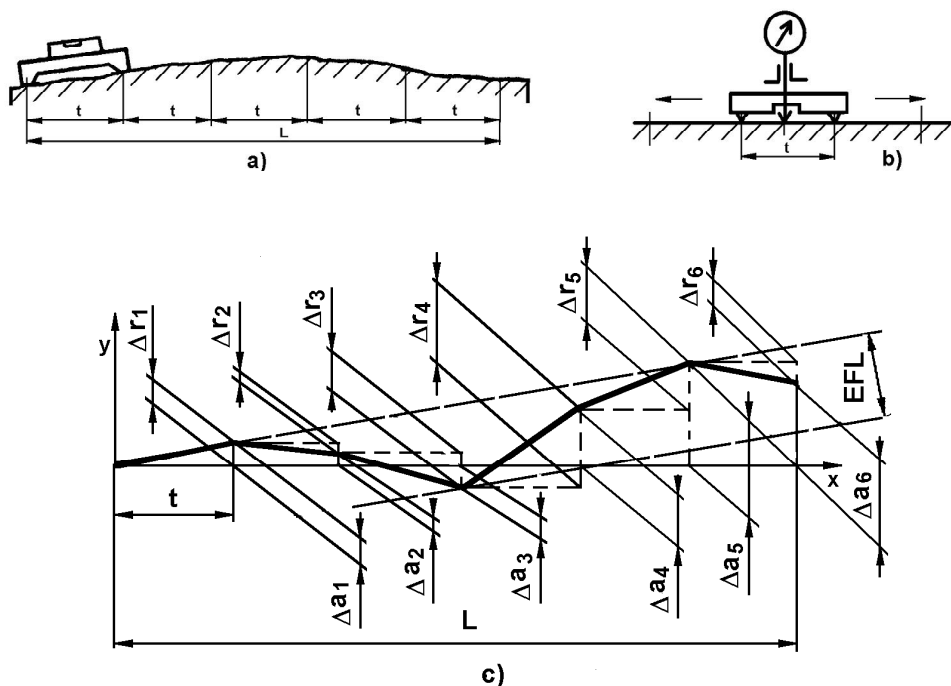


Obr. 19.6 Měření zaměřovacím dalekohledem a záměrným terčem

- záměrný dalekohled (laser) je upnut na tuhém stojanu a nastaven tak, aby jeho optická osa byla přibližně rovnoběžná měřeným povrchem (obr. 19.6),
- záměrným terčem se posunuje po měřené ploše a výškové rozdíly od optické osy se odečtu v dalekohledu.

Měření sečnou (krokovou) metodou

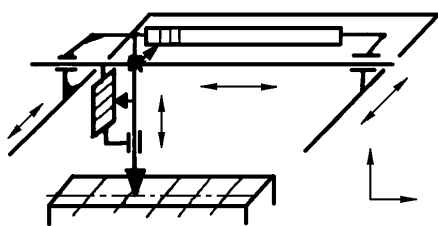
- zjišťují se relativní změny sklonu dílčích úseků profilu,
- k měření je možno použít libelu, úchylkoměr (obr. 19.7a, obr. 19.7b), zrcátko autokolimátoru, apod., které se upevňují na měřicí můstky,
- můstky dosedají na měřenou plochu je ve dvou relativně malých opěrných plochách o rozteči t ,
- délka t závisí na délce kontrolované plochy,
- odchylka přímosti se vyhodnocuje graficky v pravouhlém souřadném systému (obr. 19.7c).



Obr. 19.7 Kontrola přímosti

a – dvoubodým měřicím můstkem a libelou, b – dvoubodým měřicím můstkem se středovým měřicím dotekem a číselníkovým úchylkoměrem, c – grafický průběh přímosti

Měření na trísouřadnicovém měřicím stroji



- umožňuje měření výškových souřadnic od obalového prvku,
- využívá se trajektorie přímočarého pohybu jako relativní základny (obr. 19.8),
- pomocí vhodného softwaru umožňuje vyhodnotit odchylku přímosti ihned po sejmutí bodů.

Obr. 19.8 Měření na souřadnicovém měřicím stroji

19.1.2 Odchylka rovinnosti TFE

Odchylka rovinnosti (TFE) je největší vzdálenost skutečné roviny od obalové roviny. Definice obalové roviny odpovídá vždy jen jedné ze tří možných poloh. Obalová roviny se dotýká kontrolované plochy:

- ve třech nejvyšších bodech (vydutý – konkávní tvar plochy),
- v jednom nejvyšším bodě a je rovnoběžná s rovinou procházející třemi nejnižšími body (vypuklý – konvexní tvar plochy),

- ve dvou nejvyšších bodech a je rovnoběžná se spojnicí dvou nejnižších bodů reliéfu plochy (sedlový tvar plochy).

Vzhledem k tomu, že určení odchylek rovinnosti dle definice je technicky i časově náročné, předepisují se někdy po dohodě místo rovinnosti mezní odchylky přímosti v podélném, příčném a úhlopříčném směru.

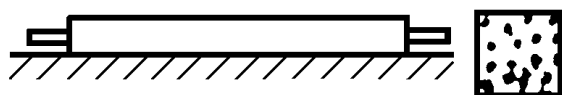
Stav měřicí techniky neumožňuje úplné měření odchylek rovinnosti. Z naměřených hodnot odchylek tvaru zvolených bodů plochy lze přepočtem k jedné zvolené společné rovině vytvořit matematický model plochy. Vyhodnocení odchylek rovinnosti z matematického modelu lze provést:

- grafickými metodami od obalové roviny,
- výpočtem od střední nebo obalové roviny,
- na mechanickém analogovém modelu od obalové roviny,
- vyhodnocením měřené plochy vzhledem k zjednodušené základně.

Kontrola odchylek rovinnosti

Kontrola příměrnou deskou na barvu

- metoda je vhodná pro dílenské podmínky,
- na příměrnou desku se nanese velmi tenká vrstva speciální barvy, položí se na kontrolovanou plochu a posuvnými a krouživými pohyby se barva rozetře po celé ploše,
- podle velikosti zabarvených ploch se posuzuje rovinnost (dobrá rovina musí být rovnoměrně zabarvena na vrcholech nerovnosti po celé ploše (**obr.19.9**),

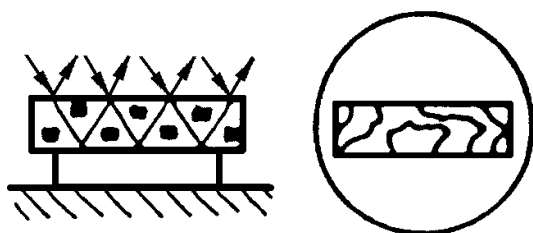


- metodou je možno rozlišit odchylky rovinnosti větší než 0,01 až 0,02 mm,
- je možno posuzovat i jakost plochy dle počtu zabarvených plošek na jednotku plochy,

Obr. 19.9 Kontrola pomocí příměrné desky na barvu

Kontrola s využitím interference světla

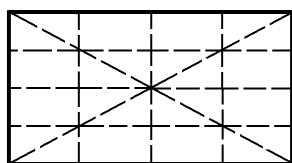
- kontrola (měření) se provádí pomocí planparalelní destičky, která se přiloží na dokonale očištěný povrch,
- mezi měřenou plochou a planparalelní destičkou vznikne vzdušný klín, čímž dopadající světlo interferuje,
- na ploše se objeví interferenční proužky, podle nichž posuzujeme kontrolovanou plochu (**obr. 19.10**),



- interferenční proužky jsou různého tvaru dle zakřivení kontrolované plochy,
- je-li plocha absolutně rovná, interferenční proužky jsou rovnoběžné,
- výškový rozdíl bodů na dvou sousedních interferenčních proužcích odpovídá polovině vlnové délky světla,
- interferenční měření velkých ploch se provádí interferometry pro měření rovinnosti ploch.

Obr. 19.10 Interferenční metoda kontroly

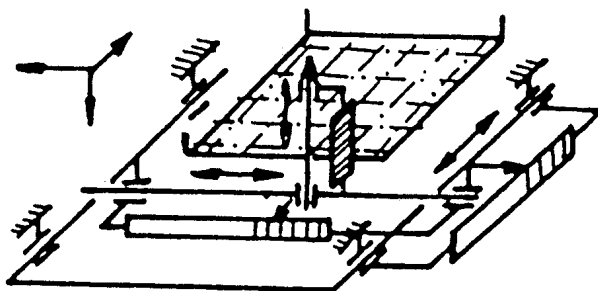
Metoda měření na základě odchylek přímosti



- jde o nepřímou metodu
- odchylky přímosti se měří v soustavě rovnoběžných podélných a k nim kolmých řezů plochy a ve dvou úhlopříčných řezech (**obr. 19.11**),
- za odchylku rovinnosti se považuje největší odchylka přímosti naměřená v některém z řezů.

Obr. 19.11 Kontrola měřením přímosti

Kontrola na souřadnicovém měřicím stroji



- měření je možno provádět od obalové roviny, kterou sejmem vhodným počtem bodů a matematicky vyrovnáme do souřadného systému měřené roviny,
- zvolíme vhodnou síť bodů, kterou sejmem v ručním nebo automatickém režimu (**obr. 19.12**),
- pomocí vhodného softwaru vyhodnotíme odchylku rovinnosti,
- výsledkem je matematický model reliéfu kontrolované plochy.

Obr. 19.12 Měření pomocí souřadnicového měřicího stroje

19.1.3 Odchylka kruhovitosti EFK

Odchylka kruhovitosti (EFK) je největší naměřená kolmá vzdálenost profilu od obalové (referenční) kružnice.

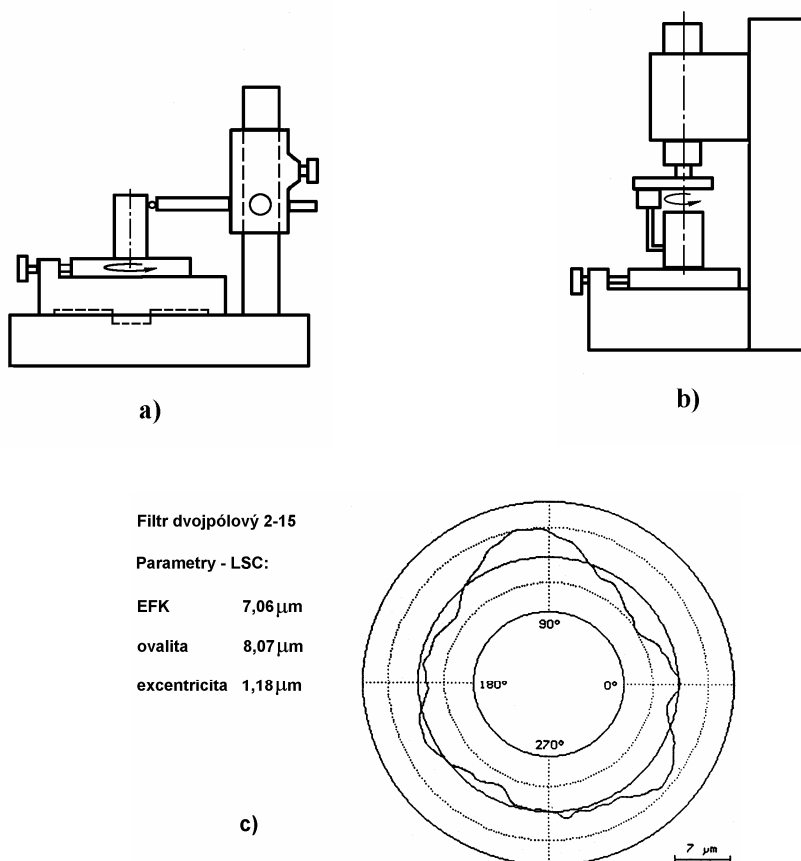
Referenční kružnice:

- **střední kružnice nejmenších čtverců (LSC):** kružnice pro níž platí, že součet čtverců odchylek této kružnice od sejmutého profilu součásti je nejmenší,
- **nejmenší opsaná kružnice (MCC):** nejmenší kružnice, kterou je možno zakreslit okolo sejmutého profilu hřídele,
- **největší vepsaná kružnice (MIC):** největší kružnice, kterou je možno zakreslit do sejmutého profilu otvoru,
- **nejmenší pásmo-mezikruží (MZC):** dvě soustředné kružnice, které obklopují sejmutý profil a mají nejmenší radiální vzdálenost.

Kontrola (měření) odchylek kruhovitosti

Měření změn poloměru (metoda radiální, absolutní metoda)

- měření se provádí na speciálních měřicích přístrojích a to buď s otočným vřetenem – měřená součást stojí (**obr. 19.13b**) nebo s otočným stolem, kdy snímač stojí a otáčí se součást (**obr. 19.13a**),
- před započítím měření je nutno provést dokonalé středění a centrování součásti tak, aby osa součásti se shodovala s osou rotace vřetena nebo stolu,
- poloměrové (radiální) pohyby snímače jsou převáděna na elektrické signály, které jsou dále zpracovány,
- výsledkem měření je buď grafický záznam průběhu profilu kruhovitosti součásti nebo jeho číselné vyhodnocení,
- výhodou této metody je, že sejmutý profil odpovídá skutečnému profilu,
- metoda je spíše použitelná v laboratorních podmínkách.



Obr. 19.13 Měření odchylky kruhovitosti radiální metodou
a – otočný stůl, b – otočné vřeteno, c – záznam profilu kruhovitosti

Metody relativní (dvoubodová, třibodová, n-bodová metoda)

- důvodem širokého zájmu o tyto metody je všeobecná dostupnost a možnost širokého uplatnění mikropočítačů v měřicí technice,
- u těchto metod rozlišujeme opěrné (základní) body a body snímání, které vzhledem k soustavě souřadnic určují parametry metody, tj. úhly α , β (2α - úhel mezi tvořícími čarami opěrných bodů, β - úhel mezi směrem pohybu snímacího doteku a osou x), **obr. 19.4**,
- z teoretického hlediska úhel α splňuje podmínku: $0 < \alpha \leq \pi/2$,
- vzhledem k praktické realizaci metody α splňuje podmínku: $18^\circ \leq \alpha \leq 70^\circ$,
- úhel β splňuje podmínky: $-\pi \leq \beta \leq \pi$, $-\pi/2 \leq \beta < (-\alpha - \pi/72^\circ)$, $(-\alpha + \pi/72^\circ) < \beta < 0$,
- charakteristickou vlastností relativních metod je, že změřená odchylka **EFK_M** není shodná se skutečnou odchylkou **EFK_S**,
- poměr těchto odchylek se nazývá součinitelem zvětšení **K_n** a platí:

$$K_n = \frac{EFK_M}{EFK_S} = f(\alpha, \beta, n)$$

kde: **n** pro pravidelné profily určuje tzv. n-hrnatost, pro nepravidelné profily číslo postupné harmonické složky Fourierovy řady

- tento koeficient má důležitou funkci u relativních metod a rozhodujícím způsobem podmiňuje možnosti měření jednotlivých skutečných profilů kruhovitosti,
- pro popis měřeného a skutečného profilu a jeho harmonickou analýzu je možno použít známou trigonometrickou Fourierovu řadu:

$$EFK(\varphi) = C_0 + \sum_{n=2}^k C_n \cos(n\varphi + \varphi_n)$$

kde: C_0 ... poloměr vztažné (referenční) kružnice,
 C_n ... amplituda n-té harmonické složky profilu kruhovitosti,

φ_n ... fázové posunutí n-té harmonické složky profilu kruhovitosti.

Dvoubodová metoda

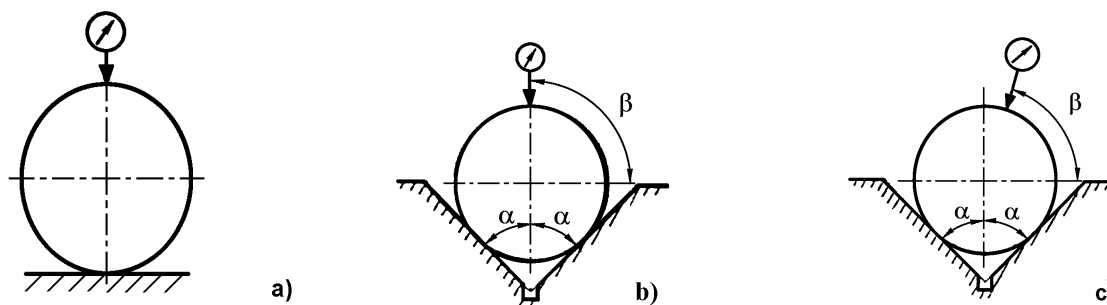
- jednoduchá metoda všeobecně používaná v průmyslové praxi (**obr. 19.14a**),
- umožňuje měření s využitím universálních měřicích přístrojů,
- platí: $2\alpha=\pi$, $\beta=\pi/2$, $\alpha=\beta$,
- mohou se používat pro měření profilu se sudým počtem nepravidelnosti (ovalita- $n=2$, čtyřhran $n=4$ apod.),
- pro výpočet skutečné odchylky se stanoví konstantní součinitel $K_n=2$,
- nedostatkem těchto metod je, že jich nelze použít při měření odchylek profilu s lichým počtem nepravidelnosti.

Tříbodové metody symetrické

- mohou se realizovat jako přímé ($\beta=\pi/2$) (**obr. 19.14b**) a obrácené ($\beta=-\pi/2$),
- tradičně se používají úhly α : 30° , 36° , 45° , 54° , 60° ,
- vzhledem k velké proměnlivosti hodnoty součinitele zvětšení K_n ($0 \leq K_n \leq 2,73$), používají se nejčastěji pro profily s lichým počtem nepravidelnosti,
- používají se pro měření tvaru jak vnitřních, tak i vnějších profilů,
- metoda tříbodová, symetrická, obrácená se může použít pro měření kruhovitosti velkých průměrů, když měřená součást je během měření v klidu a otáčí se měřicí přístroj.

Tříbodové metody nesymetrické

- tyto metody spojují výhody dvoubodových a tříbodových symetrických metod a tím umožňují měřit všechny případy odchylek kruhovitosti (**obr. 19.14c**),
- mohou být realizovány v přímé ($0 \leq \beta < \alpha$, $\alpha < \beta < \pi/2$) i obrácené verzi ($-\pi/2 < \beta < -\alpha - \pi/72$, $-\alpha + \pi/72 < \beta < 0$),
- umožňují měření odchylek kruhovitosti vnějších i vnitřních průměrů součástí,
- podstatným problémem nesymetrických metod je výběr takové kombinace úhlů α a β , aby možnosti měření pro jednotlivé profily byly co největší a problémy využívání součinitele zvětšení K_n byly minimální.

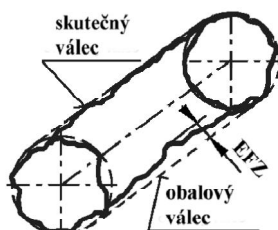


Obr. 19.14 Relativní metody

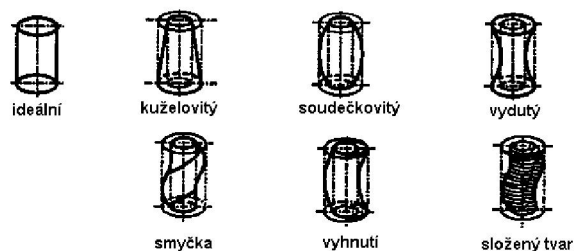
a – dvoubodová metoda, b – tříbodová metoda symetrická, c – tříbodová metoda nesymetrická

19.1.4 Odchylka válcovitosti EFZ

Odchylka válcovitosti (EFZ) je největší naměřená kolmá vzdálenost mezi skutečným válcem a válcem obalovým (**obr. 19.15**).



Obr. 19.15 Odchylka válcovitosti



Obr. 19.16 Typické tvary odchylek válcovitosti

Odchylka válcovitosti je komplexní odchylka, zahrnující:

- odchylku kruhovitosti v příčných řezech,
- odchylku přímosti povrchových přímek v podélných řezech,
- odchylku rovnoběžnosti povrchových přímek s osou obalového válce.

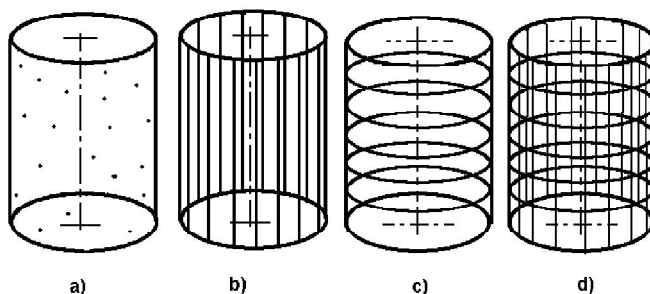
Kromě toho mohou nastat další případy:

- průměry skutečného válce se u obou konců směrem ke středu zvětšují,
- průměry se směrem ke středu zmenšují,
- průměry jsou stejné, ale spojnice středů jednotlivých průřezů neleží na přímce.

Na **obr. 19.16** jsou zobrazeny některé typické tvary odchylek válcovitosti.

Měření odchylek válcovitosti

- měření je možno provádět na souřadnicových měřicích strojích nebo přístrojích na měření odchylek tvaru,
- je možno provádět měření v několika příčných řezech s využitím měřicích prismať, ale je nutno mít na zřeteli, že kombinace jednotlivých měření zvětšuje nepřesnost měření,
- norma ISO 12180-2 určuje podmínky měření válcovitosti,
- v zásadě by měla být použita metoda klece (podél tvořících přímek a v příčných řezech, **obr. 19.17d**),
- pravděpodobnost podchycení jednotlivých nepřesností u této metody je velmi vysoká,
- pokud není možno realizovat metodu klece, norma ISO 12180-2 připouští použití metody bodové (**obr. 19.17a**), metody tvořících přímek bodové (**obr. 19.17b**) nebo metody příčných řezů (**obr. 19.17c**) – tyto metody poskytují velmi zredukované množství informací v porovnání s metodou klece.



Obr. 19.17 Strategie měření odchylky válcovitosti

a – metoda bodová, b – metoda tvořících přímek, c – metoda příčných řezů, d – metoda klece

19.2 Odchyly polohy

Při vyhodnocování odchylek polohy má velký význam jednotná interpretace základů, které určují geometrický souřadnicový systém na součásti, v němž je stanovena kótami nebo jen zobrazením jmenovitá poloha hodnoceného prvku. Těmito základnami mohou být:

- skutečné roviny, které se při měření nahrazují obalovými rovinami nebo rovinami souměrnosti,
- přímky (osy souměrnosti),
- body (střed).

19.2.1 Odchylka rovnoběžnosti EPA

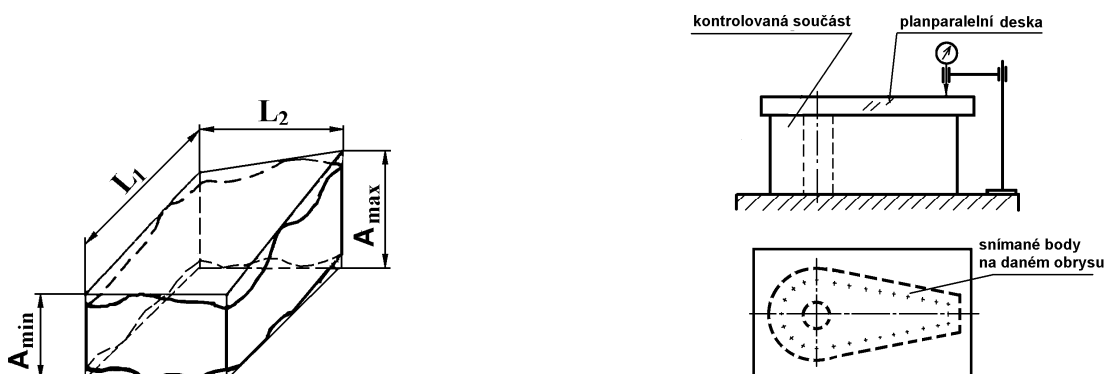
Odchylka rovnoběžnosti se může týkat:

- dvou rovin,
- přímky a roviny,
- dvou přímek v rovině,
- dvou přímek v prostoru.

Odchylka rovnoběžnosti dvou rovin

Odchylka rovnoběžnosti dvou rovin EPA je rozdíl největší a nejmenší vzdálenosti mezi rovinami v rozsahu vztažného úseku (**obr. 19.18**):

$$EPA = A_{\max} - A_{\min}$$



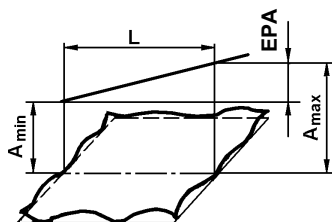
Obr. 19.18 Odchylka rovnoběžnosti dvou rovin **Obr. 19.19** Měření odchytky rovnoběžnosti dvou rovin

Měření odchytky rovnoběžnosti pomocí délkového měřidla

- součást se položí základní plochou na porovnávací rovinu (příměrnou desku) (**obr. 19.19**),
- na kontrolovanou plochu se položí planparalelní deska,
- číselníkovým úchylkoměrem ve stojánku se na desce měří potřebný počet bodů a na základě naměřených hodnot se vypočte odchylka,
- měření je možno provádět rovněž na souřadnicovém měřicím stroji, kdy vztažnou rovinou je buď plocha upínacího stolu nebo jako vztažnou rovinu lze použít i jinou rovinu měřené součásti, která se matematicky vyrovná.

Odchylka rovnoběžnosti osy (přímky) s rovinou

Odchylka rovnoběžnosti osy (přímky) s rovinou EPA je rozdíl největší a nejmenší vzdálenosti mezi osou (přímkou) a rovinou v rozsahu vztažného úseku (**obr. 19.20**).

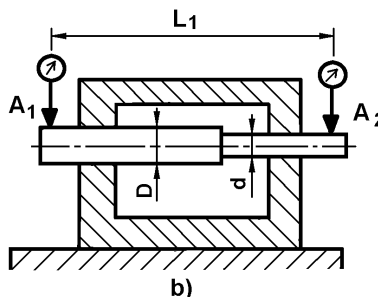
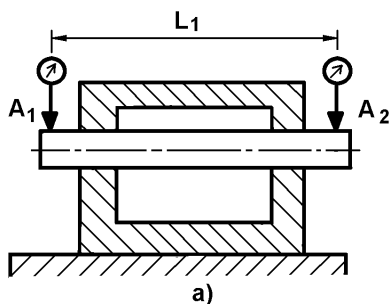


$$EPA = A_{\max} - A_{\min}$$

Obr. 19.20 Odchylka rovnoběžnosti přímky s rovinou

Měření odchylky rovnoběžnosti osy (přímky) s rovinou

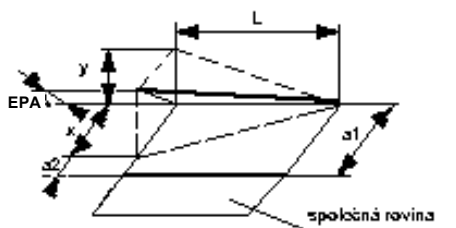
- měřená součást se položí základnou na průměrnou desku (vztažná rovina),
- kontrolovaná přímka (osa) se ztělesní válcovým trnem,
- pomocí číselníkového úchylkoměru (popř. jiného měřidla) se sejmou na obou koncích body A_1 , A_2 v jeho nejvyšších bodech a vzdálenosti L_1 (obr. 19.21a),
- odchylka rovnoběžnosti: $EPA = A_2 - A_1$,
- při rozdílných průměrech otvorů musí být trn osazený (obr. 19.21b),
- odchylka rovnoběžnosti: $EPA = (A_2 - A_1) - \frac{D-d}{2}$,



Obr. 19.21 Měření odchylky rovnoběžnosti přímky a roviny

Odchylka rovnoběžnosti dvou přímek v prostoru

Odchylka rovnoběžnosti dvou přímek (os) v prostoru EPA je geometrický součet odchylek rovnoběžnosti průmětů přímek (os) na dvě vzájemně kolmé roviny. Jedná z těchto rovin je společná rovina přímek (os) (obr. 19.22).



$$x = a_1 - a_2$$

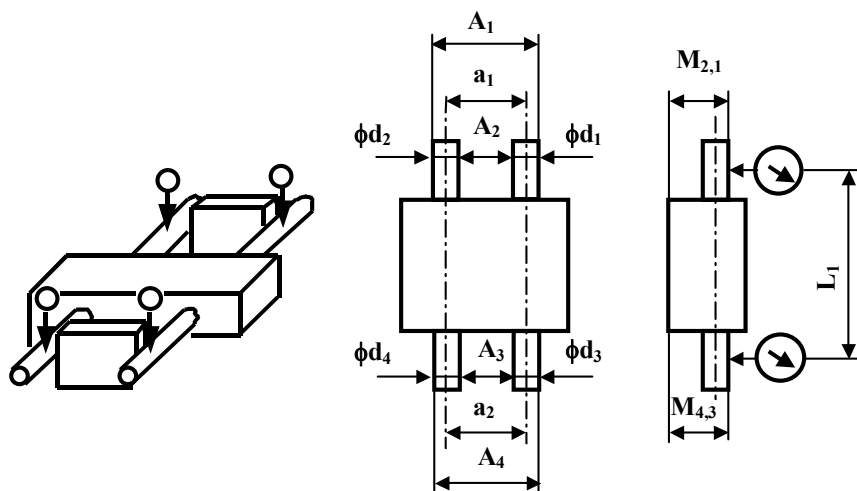
$$EPA = \sqrt{x^2 + y^2}$$

Obr. 19.22 Odchylka rovnoběžnosti dvou přímek v prostoru

Měření odchylky rovnoběžnosti dvou přímek v prostoru

- měření je možno provést pomocí číselníkového úchylkoměru a koncových měrek (obr. 19.23),
- měřená součást se položí na porovnávací rovinu tak, aby kontrolované přímky (osy) ležely v rovině rovnoběžné s porovnávací rovinou,
- kontrolované přímky se zhmotní válcovými trny, v předem zvolené vzdálenosti L_1 se určí vzdálenosti A_1 a A_4 a ve stejné vzdálenosti se určí pomocí koncových měrek vzdálenosti A_2 a A_3 ,

číselníkovým úchylkoměrem nebo měrkami se změří vzdálenosti M_1 až M_4 , v rovinách, ve kterých byla provedena všechna měření se určí průměry trnů d_1 až d_4 .



Obr. 19.23 Měření odchylek rovnoběžnosti přímek v prostoru

Platí:

$$a_1 = \frac{A_1 + A_2}{2} \quad a_2 = \frac{A_3 + A_4}{2}$$

sklon os:

$$\Delta x = \frac{a_1 - a_2}{L_1}$$

rovnoběžnost os v rovině kolmé ke společné rovině:

$$\Delta y = \frac{\left(M_3 - \frac{d_3}{2}\right) - \left(M_1 - \frac{d_1}{2}\right) - \left(M_4 - \frac{d_4}{2}\right) - \left(M_2 - \frac{d_2}{2}\right)}{L_1}$$

odchylka rovnoběžnosti dvou přímek v prostoru:

$$EPA = \sqrt{\Delta x^2 + \Delta y^2}$$

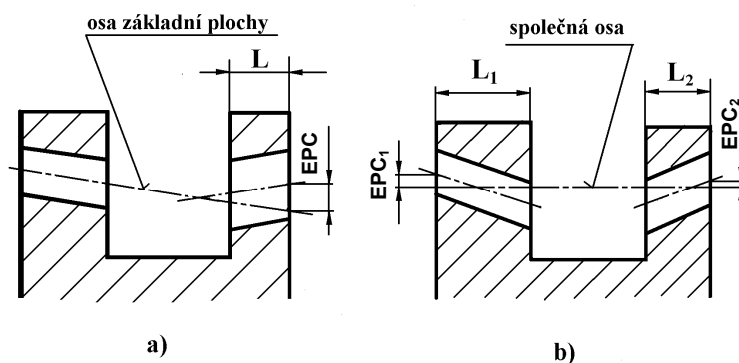
Odchylku rovnoběžnosti dvou přímek v prostoru můžeme rovněž měřit pomocí libely, zaměřovacím dalekohledem s pentagonálními hranoly nebo na souřadnicovém měřicím stroji.

19.2.2 Odchylka souososti EPC

Rozlišujeme:

- **odchylku souososti od osy základní plochy** – největší vzdálenost mezi osou uvažované rotační plochy a osou základní plochy na délce vztažného úseku (**obr. 19.24a**),
- **odchylku souososti od společné osy** – největší vzdálenost mezi osou uvažované rotační plochy a společnou osou dvou nebo více rotačních ploch na délce vztažného úseku (**obr. 19.24b**).

Měření je možno provádět pomocí úchylkoměru, kolimátorem s dalekohledem (**obr. 19.25**), popř. autokolimátorem nebo na souřadnicovém měřicím stroji.

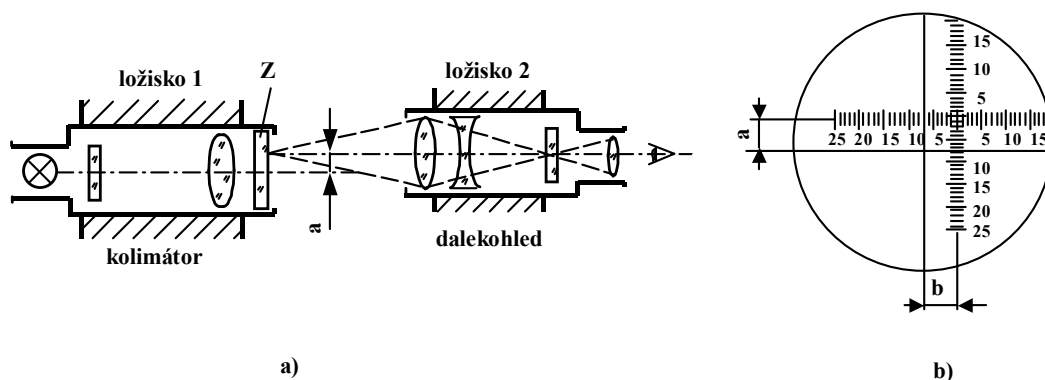


Obr. 19.24 Odchylka souosost
a – od osy základního prvku, b – od společné osy

Měření odchylky souososti

Měření odchylky souososti kolimátorem s dalekohledem

- před objektiv kolimátoru je umístěna značka **Z** s vyrytou milimetrovou křížovou stupnicí (**obr. 19.25a**),
- dalekohled je zaostřen na značku **Z**,
- odchylku souososti je možno odečíst v zorném poli (**obr. 19.25b**).



Obr. 19.25 Kontrola souososti pomocí kolimátoru a dalekohledu
a – princip metody, b – zorné pole

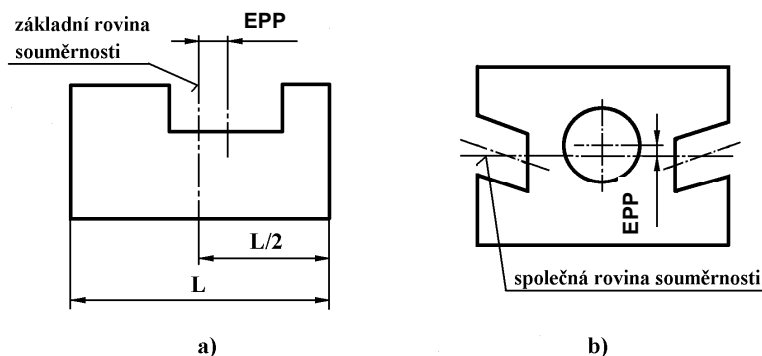
Měření odchylky souososti na třísouřadnicovém měřicím stroji

- samostatně se zpravidla neprovádí,
- bývá předepsáno jako doplněk měření průměrů se společnou osou,
- po změření potřebných prvků (průměrů otvorů nebo vnějších průměrů) je možno s využitím výpočetní techniky vyhodnotit i souosost.

19.2.3 Odchylka souměrnosti EPP

Rozlišujeme:

- **odchylku souměrnosti od základního prvku** – největší vzdálenost mezi rovinou souměrnosti (osou) uvažovaného prvku (prvků) a rovinou souměrnosti základního prvku v rozsahu vztažného úseku (**obr. 19.26a**),
- **odchylku souměrnosti ke společné rovině souměrnosti** – největší vzdálenost mezi rovinou souměrnosti (osou) uvažovaného prvku (prvků) a společnou rovinou souměrnosti dvou nebo více prvků v rozsahu vztažného úseku (**obr. 19.26b**).



Obr. 19.26 Odchylka souměrnosti

a – k ose základního prvku, b – ke společné ose souměrnosti

Měření odchylek souměrnosti

Měření na třísouřadnicovém měřicím stroji

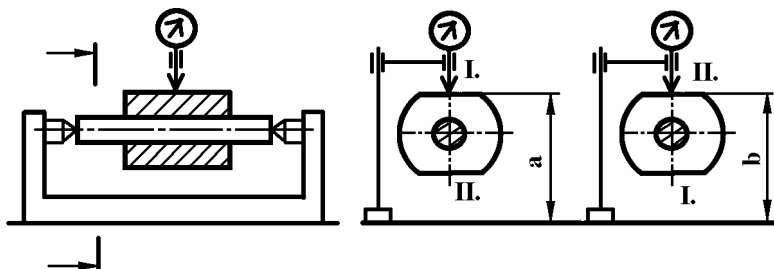
- zkalibrovaným snímačem se sejme na upnuté součásti dostatečné množství bodů vyhodnocovaných geometrických prvků (drážek, rovin, válců apod.),
- pomocí vhodného softwaru se vyhodnotí souměrnost těchto prvků.

Měření rotačních součástí pomocí hrotového přístroje

- podmínkou správného měření je zajištění rovnoběžnosti osy hrotového přístroje a kontrolované plochy se základnou (**obr. 19.27**),
- úchylkoměrem se změří výška plochy I,
- součást se otočí o 180° a změří se výška plochy II,

$$EPP = \frac{a - b}{2}$$

- totéž se provede ve vzdálenosti vztažného úseku,
- odchylka souměrnosti plochy k ose rotace je největší hodnota ze zjištěných hodnot.



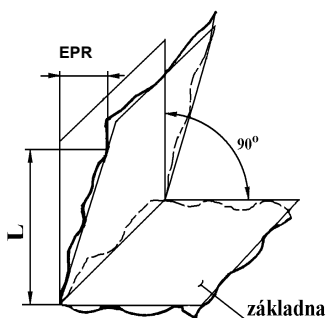
Obr. 19.27 Měření souměrnosti rotační plochy

19.2.4 Odchylka kolmosti dvou rovin EPR

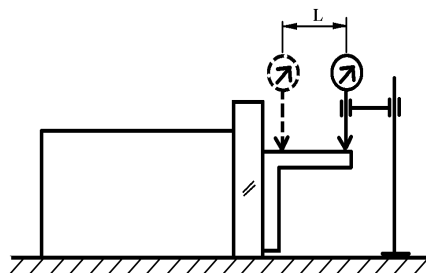
Odchylka kolmosti dvou rovin EPR – odchylka úhlu mezi rovinami od pravého úhlu (90°), vyjádřena v lineárních jednotkách na délce vztažného úseku (**obr. 19.28**).

Měření odchylek kolmosti

- měření pomocí úhelníků,
- měření pomocí kontrolních válců,
- měření pomocí vhodných měřicích přístrojů (rámovou libelou a sklonoměrem, autokolimátorem, úhloměry, mikroskopy),
- měření na souřadnicovém měřicím stroji.



Obr. 19.28 Odchylka kolmosti rovin



Obr. 19.29 Měření odchylky kolmosti dvou rovin

Příklad měření odchylky kolmosti dvou rovin pomocí úhelníku a úchylkoměru (**obr. 19.29**).

- měřená součást se položí základní plochou na průměrnou desku,
- na kontrovanou plochu se položí planparalelní deska a k ní úhelník v rovině kolmé na obě kontrované roviny (je-li odchylka rovinnosti kontrované plochy malá, není nutno přikládat planparalelní desku),
- na horním rameni úhelníku se proměří dva body vzdálené od sebe o délku L ,
- odchylka kolmosti se stanoví jako rozdíl naměřených hodnot v rozsahu měřené délky L .

19.3 Odchylky házení

19.3.1 Odchylka radiálního házení ECR

Odchylka radiálního házení ECR – rozdíl největší a nejmenší vzdálenosti bodů skutečného profilu rotační plochy od základní osy v řezu kolmém k základní ose (**obr. 19.30**).

V radiálním házení se projevuje odchylka kruhovitosti profilu posuzovaného průřezu společně s odchylkou jeho středu od základní osy.

Měřicí metody

Měření v hrotovém přístroji délkovým měřidlem

- součást upnuta mezi hroty,
- číselníkovým úchylkoměrem změříme házení v několika místech délky kontrovaného průměru,
- největší naměřená hodnota je odchylka radiálního házení,
- podmínkou správného měření je rovnoběžný podélný posuv číselníkového úchylkoměru s osou měřené součásti,
- nejčastěji používaná metoda.

Měření na souřadnicovém měřicím stroji

- metoda je obdobná jako při měření válcovitosti, kruhovitosti a souososti.

Měření pomocí měřicího mikroskopu

- součást je upnuta mezi hroty tak, aby se vyhodnocovaný průměr dostal do zorného pole mikroskopu,
- při otáčení součásti se pozoruje změna kontury povrchové přímky vztažného průměru ve směru kolmém na osu součásti,
- maximální naměřená změna je hodnotou radiálního házení.

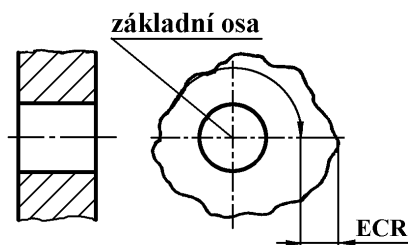
19.3.2 Odchylka axiálního házení ECA

Odchylka axiálního házení ECA – rozdíl největší a nejmenší vzdálenosti bodů skutečného profilu čelní plochy od roviny kolmé k základní ose (**obr. 19.31**).

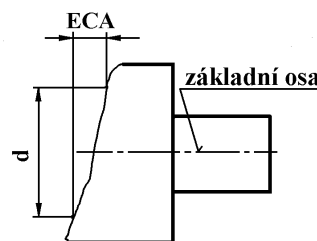
Při axiálním házení se projevuje odchylka kolmosti čela k ose součásti na délce rovné průměru čela a částečně odchylka rovinnosti posuzované plochy.

Měření je možno obdobně jako při měření radiálního házení provádět:

- číselníkovým úchylkoměrem v hrotovém měřidle nebo v prizmatické podložce,
- na třísouřadnicovém měřicím stroji,
- na mikroskopu apod.



Obr. 19.30 Odchylka radiálního házení



Obr. 19.31 Odchylka axiálního házení

19.3.3 Odchylka házení v daném směru ECD

Odchylka házení v daném směru ECD – rozdíl největší a nejmenší vzdálenosti bodů skutečného profilu rotační plochy v řezu uvažované plochy kuželem, jehož osa je totožná se základní osou a jehož povrchová přímka má daný směr, tj. do vrcholu tohoto kužele (**obr. 19.32**).

Házení s daným směrem zahrnuje odchylku tvaru profilu posuzovaného řezu v daném směru společně s odchylkou polohy osy posuzované plochy vzhledem k základní ose. Směr házení se doporučuje zadávat ve směru normály k posuzované ploše, která může být kuželová nebo vytvořena křivkou.

Metody měření jsou stejné jako u axiálního házení.

19.3.4 Odchylka úplného radiálního házení ECTR

Odchylka úplného radiálního házení ECTR – rozdíl největší a nejmenší vzdálenosti všech bodů skutečné plochy od základní osy v rozsahu vztažného úseku (**obr. 19.33**).

Odchylka úplného radiálního házení zahrnuje odchylku válcovitosti a souososti se základní osou.

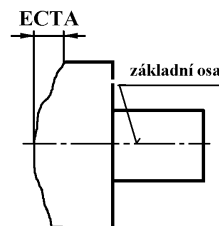
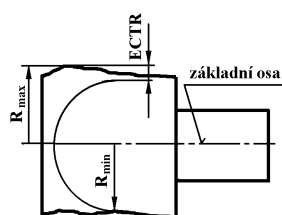
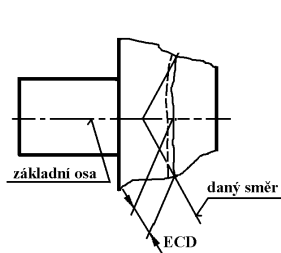
Měřicí metody jsou obdobné jako při měření radiálního házení. Měřidlo, které snímá odchylku úplného radiálního házení, musí mít navíc přímočarý pohyb ve směru osy měřeného válce.

19.3.5 Odchylka úplného axiálního házení ECTA

Odchylka úplného axiálního házení ECTA – rozdíl největší a nejmenší vzdálenosti čelní plochy od roviny kolmé k základní ose (**obr. 19.34**).

Odchylka úplného axiálního házení zahrnuje odchylku rovinnosti posuzované plochy společně s odchylkou kolmosti této plochy k základní ose. Měřicí metody jsou obdobné jako při měření axiálního házení.

Měřidlo, které snímá odchylku úplného axiálního házení, musí mít pohyb rovnoběžný s čelem měřené součásti (kolmo na osu rotace).



Obr. 19.32 Házení v daném směru Obr. 19.33 Úplné radiální házení Obr. 19.34 Úplné axiální házení

20. Kontrola mikrogeometrie obrobené plochy

20.1 Základní pojmy

Struktura povrchu je členěna na jednotlivé složky podle rozteče příslušných nerovnosti. Jde o složku s nejmenší roztečí tvořící drsnost povrchu, dále složku nazvanou vlnitost a složku s největší roztečí nerovnosti určenou základním profilem. Norma ČSN EN ISO4287 definuje tyto geometrické parametry:

- **R** pro drsnost povrchu,
- **W** pro vlnitost povrchu,
- **P** pro základní profil.

Základním zdrojem informace je profil (profilová metoda). Normou ČSN EN ISO4287 jsou definovány:

Profil povrchu – průsečnice skutečného povrchu a dané roviny.

Snímaný profil – geometrické místo středů snímacího hrotu stanovených parametrů (od něj jsou odvozeny ostatní profily).

Referenční profil – dráha, po které se snímač podél vedení pohybuje v rovině řezu.

Základní profil – úplný profil po aplikaci krátkovlnného filtru λ_s . Reprezentuje základnu pro číslicové zpracování profilu pomocí filtru profilu a pro výpočet a hodnocení parametrů profilu. Základním profilem není tvar získaný metodou nejmenších čtverců.

Zbytkový profil – základní profil získaný snímáním ideálně hladkého a rovného povrchu (optická rovina). Zbytkový profil se skládá z odchylek vedení, vnějších a vnitřních poruch a odchylek vzniklých při přenosu profilu.

Profil drsnosti – profil odvozený ze základního profilu potlačením složek použitého filtru profilu λ_c . Profil drsnosti je základem pro hodnocení parametrů drsnosti.

Profil vlnitosti – profil odvozený postupnou aplikací filtru profilu λ_f a filtru λ_c na základní profil.

Filtrace

Filtrace je proces odstraňování nežádoucích složek profilu. Hodnota, která odděluje dlouhovlnné složky od krátkovlnných se nazývá mezní vlnová délka filtru - **cut-off** (viz ČSN EN ISO11562:1996).

Filtry profilu

Filtr λ_s – definuje rozhraní mezi drsností a krátkovlnnými složkami,

Filtr λ_c – určuje rozhraní mezi složkami drsnosti a vlnitosti,

Filtr λ_f – určuje rozhraní mezi vlnitostí a delšími složkami přítomnými na povrchu.

Základní délka l_r – délka ve směru osy x používaná pro rozpoznání nerovnosti charakterizujících daný profil. Základní délka pro drsnost l_r je číselně rovna hodnotě filtru λ_c .

Vyhodnocovaná délka l_n – délka ve směru osy x používaná pro posouzení vyhodnocovaného profilu, vyhodnocovaná délka může obsahovat jednu a více základních délek.

20.2 Parametry drsnosti (dle normy ČSN EN ISO 4287)

20.2.1 Výškové (amplitudové) parametry

Největší výška výstupku profilu R_p – výška Z_p největšího výstupku profilu v rozsahu základní délky l_r (obr. 20.1).

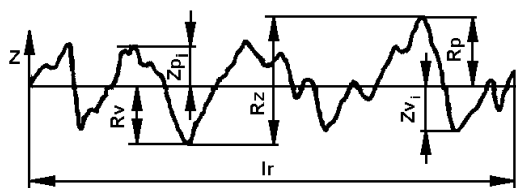
Největší hloubka prohlubně profilu R_v – hloubka Z_v nejnižší prohlubně profilu v rozsahu základní délky l_r (obr. 20.1).

Největší výška profilu R_z – součet výšky Z_p největšího výstupku a hloubky Z_v nejnižší prohlubně v rozsahu základní délky l_r (obr. 20.1).

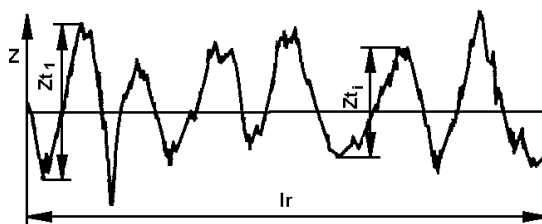
Průměrná výška profilu R_c – průměrná hodnota výšek Z_t prvků profilu v rozsahu základní délky. l_r Měření R_c vyžaduje zadání jedné vertikální a horizontální hladiny řezu (obr. 20.2).

$$R_c = \frac{1}{m} \sum_{i=1}^m Z_{t_i}$$

Celková výška profilu R_t – součet výšky Z_p nejvyššího výstupku a hloubky Z_v nejnižší prohlubně v rozsahu vyhodnocované délky l_r .

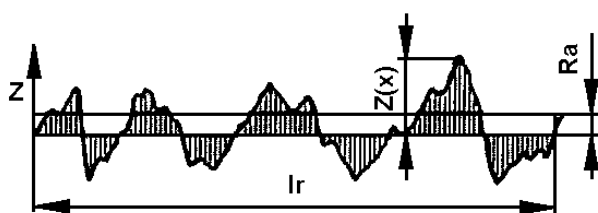


Obr. 20.1 Parametry R_v , R_p , R_z



Obr. 20.2 Parametry pro stanovení R_c

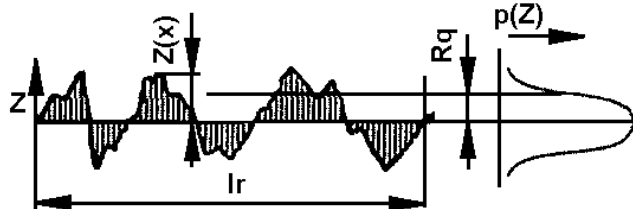
Střední aritmetická úchylka profilu R_a – aritmetický průměr absolutních hodnot pořadnic $Z(x)$ v rozsahu základní délky l_r (obr. 20.3). Vypovídací schopnost parametru R_a je nízká, R_a nereaguje citlivě na extrémní výšky hrotů profilu a hloubky rýh profilu.



$$R_a = \frac{1}{l_r} \int_0^{l_r} |Z(x)| dx$$

Obr. 20.3 Parametr R_a

Průměrná kvadratická úchylka profilu R_q – průměrná kvadratická hodnota pořadnic $Z(x)$ v rozsahu základní délky l_r (obr. 20.4). Parametr R_q má význam při statistickém pozorování profilu povrchu, neboť zároveň odpovídá standardní odchylce z profilových souřadnic.

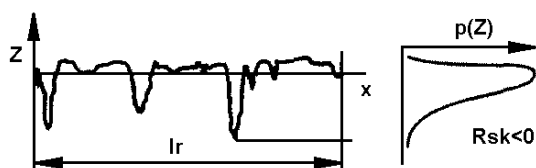


$$R_q = \sqrt{\frac{1}{l_r} \int_0^{l_r} Z^2(x) dx}$$

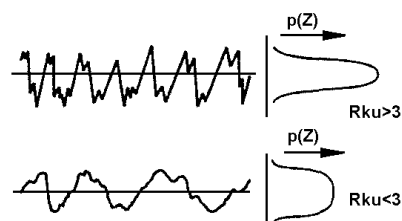
Obr. 20.4 Parametr R_q

Šikmost posuzovaného profilu (součinitel asymetrie – skewness) R_{sk} – podíl průměrných hodnot třetích mocnin pořadnic $Z(x)$ a třetí mocniny hodnoty R_q v rozsahu základní délky l_r (obr. 20.5). Negativní hodnota R_{sk} odpovídá dobrým vlastnostem nosnosti profilu.

Špičatost posuzovaného profilu R_{ku} – podíl průměrných hodnot čtvrtých mocnin pořadnic $Z(x)$ a čtvrtá mocniny hodnoty R_q v rozsahu základní délky l_r . Při normálním rozdělení souřadnic profilu $R_{ku}=3$, ostřejší výstupky a rýhy $R_{ku}>3$ a naopak (obr. 20.6).



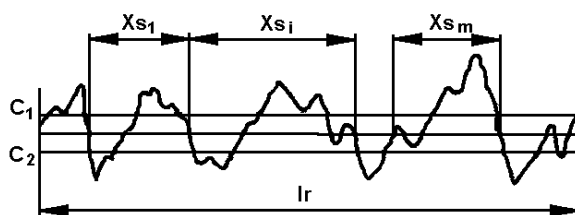
Obr. 20.5 Parametr R_{sk}



Obr. 20.6 Parametr R_{ku}

20.2.2 Délkové (šířkové) parametry

Průměrná vzdálenost prvků profilu RSm – průměrná hodnota šířek Xs prvků profilu v rozsahu základní délky l_r (obr. 20.7). Vyhodnocení vyžaduje zadání hladiny řezu C_1, C_2 .

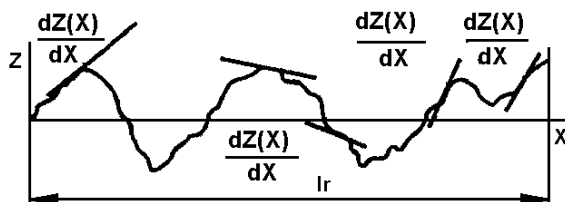


$$RSm = \frac{1}{m} \sum_{i=1}^m Xs_i$$

Obr. 20.7 Parametr RSm

20.2.3 Tvarové parametry

Průměrný kvadratický sklon posuzovaného profilu $R\Delta q$ – průměrná kvadratická hodnota sklonu pořadnic dZ/dX v rozsahu základní délky l_r (obr.20.8). Parametr $R\Delta q$ má význam při hodnocení tribologických vlastností, odrazu světla, galvanickém pokovování.

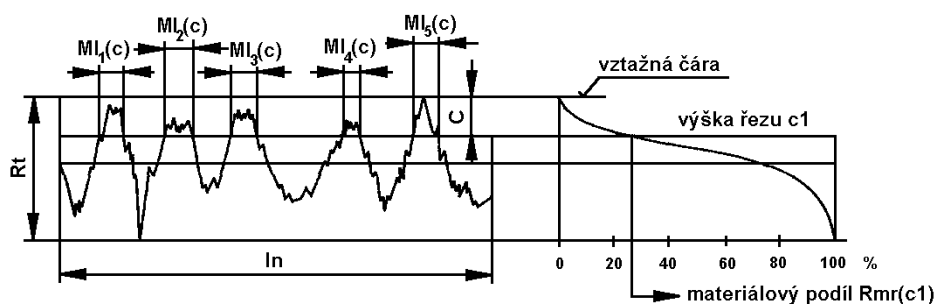


$$R\Delta q = \sqrt{\frac{1}{l_r} \int_0^{l_r} \left(\frac{dZ}{dX} \right)^2 dx}$$

Obr. 20.8 Parametr $R\Delta q$

Materiálový podíl profilu (nosný podíl) $Rmr\textcircled{c}$ - procentuální podíl délky materiálu prvků profilu $MI\textcircled{c}$ na dané úrovni c k vyhodnocované délce l_n (obr.20.9).

$$Rmr(c) = \frac{100}{l_n} \sum_{i=1}^n MI_i(c) = \frac{100 \cdot MI(c)}{l_n} \quad [\%]$$



Obr. 20.9 Parametr $Rmr\textcircled{c}$

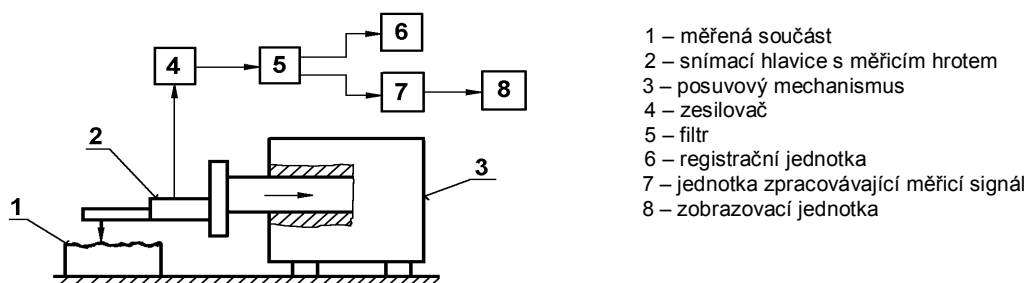
20.3 Měření (kontrola) parametrů drsnosti

Pro hodnocení drsnosti se využívá nejčastěji kritérium středního prvku (střední čára profilu - čára nejmenších čtverců).

20.3.1 Měření drsnosti povrchu dotykovými profilometry

Norma PN-ISO 3274: 1996 obsahuje základní charakteristiky dotykových přístrojů pro měření parametrů drsnosti. Metoda umožňuje zjišťování číselných hodnot jednotlivých parametrů drsnosti a lze ji využít pro nejmodernější statistická a spektrální hodnocení nerovnosti povrchu.

Dotykový profilometr se skládá z části mechanické a elektronické (schéma obr. 20.10).



Obr. 20.10 Princip měření dotykovým profilometrem

Mechanická část:

- stůl, na který se umísťuje měřená součást,
- rameno se snímáním hrotem, které se pohybuje určitou konstantní rychlostí a snímání hrot snímá nerovnosti povrchu,
- přímočarý vratný pohyb je zajištěn pomocí elektromotorku, popř. pneumaticky.

Elektronická část:

- transformuje mechanický signál generovaný snímáním hrotem sledujícím nerovnosti povrchu měřené plochy na elektrický signál, který se zpracovává (číselná hodnota příslušného parametru drsnosti nebo grafický záznam nerovnosti povrchu).

Použité převodníky pracují na principu piezoelektrickém, magnetoelektrickém, indukčním nebo interferometrickém s využitím laseru (bezdotykové snímání).

Měřicí základnou je buď přesná přímá (nebo tvarová) dráha snímání – snímání absolutní (přednostně dle ČSN EN ISO 4287) nebo dráha generovaná opěrnou patkou klouzající po měřeném povrchu – snímání relativní.

Pohyb snímání hrotu musí být velmi přesný co do přímosti a rovnoměrnosti. Rychlost musí být volena s ohledem na dynamické vlastnosti snímání systému (nepoškození povrchu, věrné snímání nerovnosti). Získaný profil je ovlivňován vlastnostmi snímání systému.

Správnost výsledků měření ovlivňuje:

- poloměr zaoblení snímání hrotu (2 μm , 5 μm , 10 μm),
- vrcholový úhel snímání hrotu (60°, 90°),
- měřicí (přítlačná) síla (cca 0,00075 N),
- rychlost změny měřicí síly,
- poloměr zaoblení kluzné patky snímání (u relativní metody),
- celkové geometrické uspořádání systému snímání.

20.3.2 Kontrola porovnáváním s etalony drsnosti

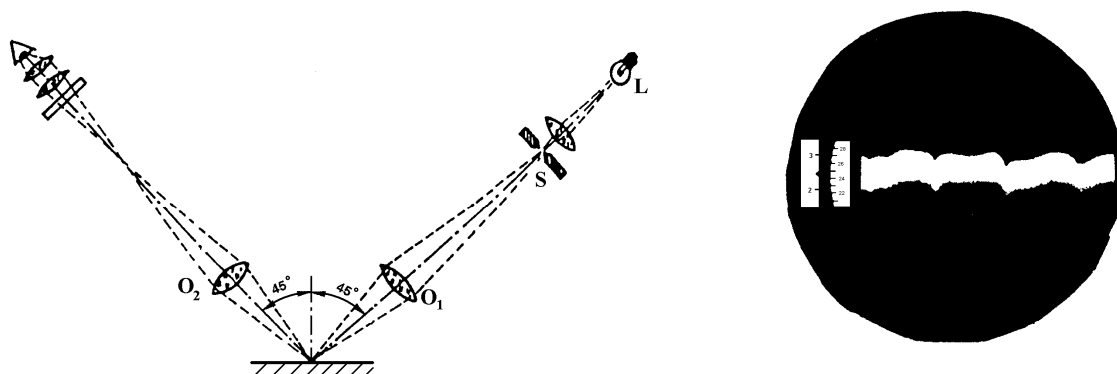
Metoda je založena na porovnávání drsnosti povrchu součásti s drsností etalonů buď pouhým okem nebo pomocí mikroskopu, popř. optického komparátoru. Při měření je nutno dodržet tyto podmínky:

- materiál etalonu a měření součásti by měl být stejný (alespoň co se týče barvy),
- stejný tvar povrchu etalonu a měřené součásti (vypuklý, vydutý, plochý),
- povrch etalonu a součásti byl získán stejnou technologií obrábění,
- stejné podmínky pozorování (osvětlení).

Přesnost této metody je velmi nízká.

20.3.3 Měření metodou světelného řezu

K měření touto metodou se používá nejčastěji dvojitý mikroskop Schmalz. Princip metody viz **obr. 20.11**.



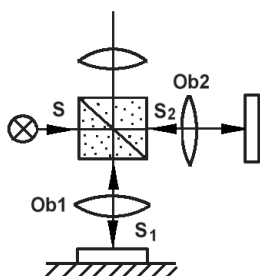
Obr. 20.11 Metoda světelného řezu – princip a obraz v okuláru

Rovnoběžný svazek paprsků omezený štěrbinou do tvaru velmi tenké světelné roviny je promítán optickým systémem pod úhlem 45° na měřený povrch. Pronikem této roviny nerovnostmi povrchu vznikne obraz profilu šikmého řezu nerovnosti plochy, který má většinou tvar světlé zelené stužky ve tmavém poli mikroskopického obrazu (**obr. 20.11**).

Dvojitý mikroskop umožňuje volbu zvětšení výměnou objektivu a okuláru. Rozsah použití těchto měřicích mikroskopů je omezený.

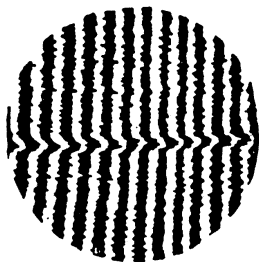
20.3.4 Měření s využitím interference světla

Princip měření klasickým interferenčním mikroskopem viz **obr. 20.12**.



- paprsek S jde ze zdroje světla na polopropustné zrcadlo vytvořené ve skleněném hranolu, kde se rozdělí na dva dílčí paprsky,
- paprsek S_1 jde na povrch měřené součásti a zpět,
- paprsek S_2 jde na odrazné zrcadlo, kde se odráží zpět,
- oba dílčí paprsky se spojí (interferují) a jdou do okuláru mikroskopu,
- jsou kladeny velké požadavky na shodnost obou objektivů Ob_1 , Ob_2 ,
- vzniklé interferenční proužky (**obr.20.13**) je možno sledovat v okuláru přístroje.

Obr. 20.12 Interferenční mikroskop



- ideální rovné plochy vykazují stejnoměrné rovnoběžné proužky,
- je-li na povrchu rýha, projeví se na interferenčním obraze vychýlení proužků v tomto místě,
- vzdálenost proužků odpovídá změně klínové vrstvy o $\lambda/2$ při kolmém dopadu světla a velmi malém úhlu klínu,
- známe-li vychýlení proužků ΔL a vzdálenost interferenčních proužků

$$L \text{ pak velikost nerovnosti určíme dle vztahu: } R = \frac{\Delta L}{L} \cdot \frac{\lambda}{2}$$

kde: λ ... vlnová délka použitého světla

- pro získání ostřejších proužků, používáme víceprávkové interference

Obr. 20.13 Obraz v okuláru přístroje

21. Měřicí stroje

Měřicími stroji je nazývána skupiny měřicích zařízení, u nichž měřicí soustava je založena na absolutních nebo přírůstkových odměřovacích systémech. Měření je prováděno v jednom směru nebo v soustavě souřadnicových rovin nebo prostoru.

Do měřicích strojů se řadí:

- délkoměry (umožňují měření v jednom směru – přesné měření)
- výškoměry (umožňují měření v jednom směru – od určité základny),
- měřicí mikroskopy (umožňují měření ve dvou souřadnicích),
- projektory (umožňují měření ve dvou souřadnicích),
- souřadnicové měřicí stroje (umožňují měření v prostoru v kartézských nebo polárních souřadnicích).

21.1 Délkoměry

Délkoměry slouží k přesnému měření a kontrole větších rozměrů (kontrola kalibrů, odpichů, měřicích přípravků atd.). Měřicí metoda je zpravidla dotyková.

Dle konstrukce je můžeme rozdělit na:

- vertikální,
- horizontální.

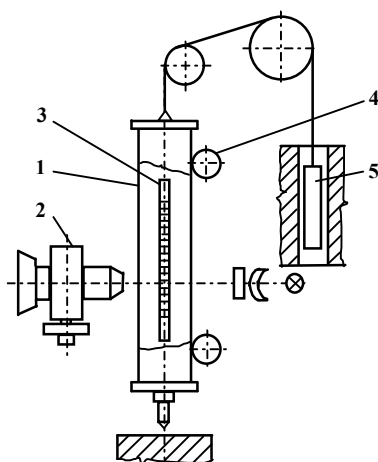
Mohou sloužit jako délkoměry pro měření:

- porovnávací metodou s nastaveným rozměrem,
- přímou metodou.

21.1.1 Abbého délkoměr

Abbého délkoměr:

- jedná se o vertikální délkoměr s absolutním i komparačním způsobem měření (schéma je na **obr. 21.1**),
- na měřicím trnu je připevněno skleněné měřítko o délce 100mm s milimetrovým dělením,
- poloha měřicího trnu se měří pomocí zabudovaného mikroskopu s okulárem, který je proveden jako spirálový - **obr. 21.2** (umožňuje odečítat na $1\mu\text{m}$),
- rychlost s jakou měřicí trn dosedá na stolek měřidla nebo měřenou součást je konstantní díky tlumiči.



- 1 – měřicí pinola
- 2 – spirálový mikroskop
- 3 – skleněná stupnice
- 4 – vedení
- 5 – tlumič

Obr. 21.1 Princip Abbého délkoměru

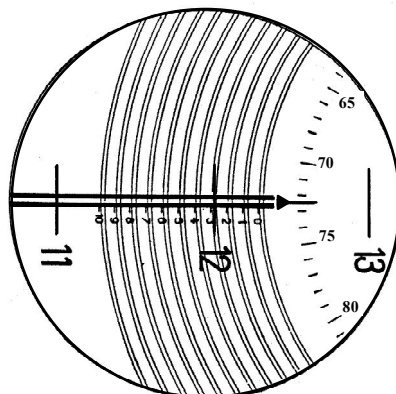
Popis spirálového nonia (obr. 21.2):

- v okuláru je skleněné měřítko s dělením po 0,1mm a otočná destička, která se dá otáčet třecím převodem,
- na otočné skleněné destičce je dvojitou čarou naryta Archimédova spirála se stoupáním 0,1mm,

- destička je na okraji opatřena stupnicí se 100 dílky, takže pootočením destičky o 1 dílek posune se relativní čára spirály na pevném desetinném měřítku o jednu setinu, tj. o $1\mu\text{m}$.

Způsob odečítání (obr. 21.2):

- do okuláru se promítá zvětšené měřítko v celých milimetrech,
- nejprve se odečte hodnota v milimetrech, tj. hodnota, která se nachází v poli spirály nonia (pro náš příklad 12 mm), dále se určí desetiny (pro náš příklad 0,2 mm),
- pak otáčíme noniem tak dlouho, až ryska milimetrového měřítka se nalézá mezi dvojitou čarou spirály, tím jsme otočili noniem o určitý počet dílků na kruhovém měřítku a můžeme určit tisícinovou část naměřené hodnoty (pro náš příklad 0,072(5)mm),
- výsledná hodnota odečtu: 12,272(5) mm.

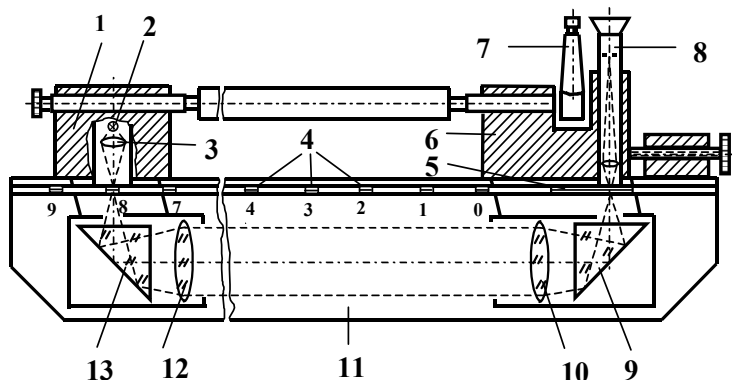


Obr. 21.2 Spirálový nonius

21.1.2 Universální délkový měřicí stroj

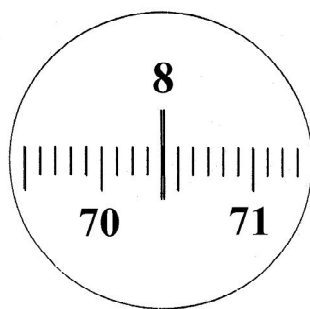
Universální délkový měřicí stroj (obr. 21.3):

- jedná se o vodorovný délkoměr pro přesná měření velkých rozměrů s vyloučením chyby I. řádu (naklápěním),
- na vedení tuhého lože je posuvný koník spojený s optickou soustavou, který se může posouvat po celé délce lože,
- proti koníku je umístěná měřicí hlava s odečítacím mikroskopem a hlavicí optimetru,
- pod měřicí hlavou je v loži umístěna skleněná stupnice s dílky po 0,1 mm na délce 100 mm,
- ve stejné ose v loži ve vzdálenosti 100 mm od sebe jsou umístěné skleněné destičky s vyrytými zdvojenými ryskami,
- paprsky, které procházejí optickým systémem hranolů a objektivů, zobrazí v rovině desetinné stupnice zdvojenou rysku na skleněné destičce včetně jejího čísla, což pozorujeme mikroskopem,
- před odečítáním musí být měřicí hlava nastavena tak, aby zdvojená ryska stupnice v loži souměrně obepínala některou rysku desetinné stupnice a obraz stupnice optimetru nevychází ze zorného pole,
- na obr. 21.4 je zorné pole mikroskopu a optimetru (naměřená hodnota je 870,397),
- nastavnými rameny je možno měřit rovněž vnitřní rozměry,
- měřicí rozsah: 0 – 3000 (6000) mm.

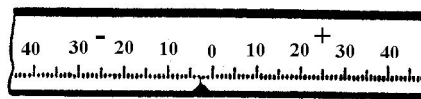


- 1 – koník
- 2 – osvětlovací lampa
- 3, 10, 12 – objektivy
- 4 – skleněné destičky
- 5 – skleněná stupnice
- 6 – odečítací hlavice
- 7 – hlavice optimetru
- 8 – odečítací mikroskop
- 9, 13 – optické hranoly

Obr. 21.3 Universální délkový měřicí stroj



a)



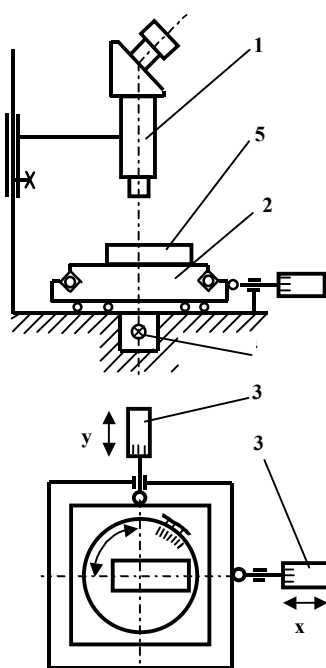
b)

Obr. 21.4 Zorné pole
a) v mikroskopu, b) v optimetru

21.2 Měřicí mikroskopy

Měřicí mikroskopy:

- slouží k přesnému bezdotykovému měření délek, úhlů, např.: ke kontrole tvarových součástí, měřidel, nástrojů atd.,
- stavba mikroskopu – **obr.21.5**,
- možnost práce v procházejícím nebo odraženém světle,



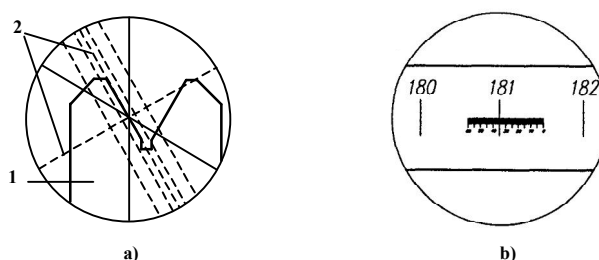
- 1 – okulár
- 2 – měřící stoleček
- 3 – měřící soustava posuvu stolečku
- 4 – osvětlení
- 5 – měřená součást

Obr. 21.5 Stavba mikroskopu

- **využívá se hlavně dvou měřících metod:**
 - měření stínovým obrazem:
 - měřená součást je vložena do svazku paralelních paprsků,
 - stínový obraz je pozorován mikroskopem,
 - měření v osovému řezu:
 - v případě přímkového profilu k němu přisunujeme měřící nožíky s ryskami pro určení roviny, ve které chceme profil měřit,
 - místo na obrys zaměřujeme na přesné rysky nožíku,
 - metoda je podstatně přesnější než metoda stínového obrazu.

Základní vybavení mikroskopů:

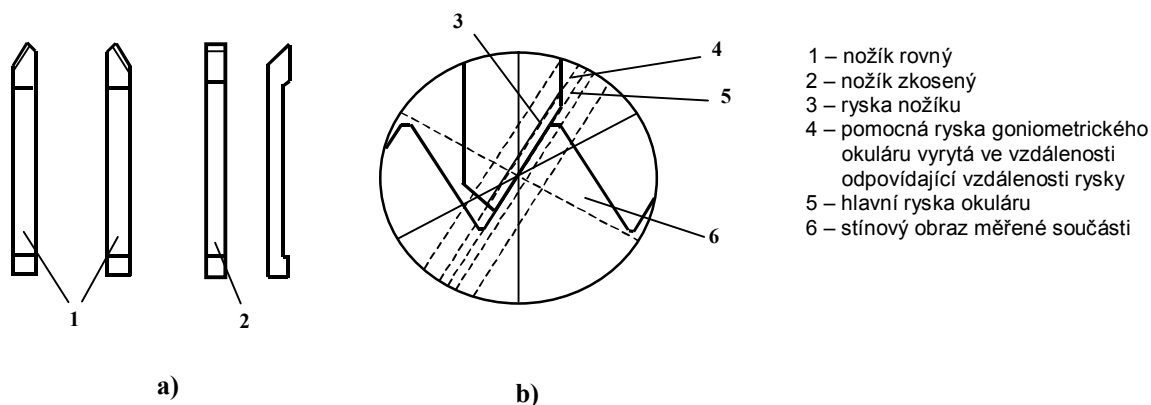
- revolverová hlavice (okulár):
 - na vyměnitelných otočných destičkách jsou vyryty normalizované profily různých druhů a rozměrů závitů, profily oblouků a kružnic o určeném poloměru,
 - slouží ke kontrole závitů, poloměrů, úhlových profilů,
- mikrometrický okulár:
 - používá se ke čtení měřitek a k přesnému měření malých délek,
- hlavice zdvojeného obrazu:
 - používá se hlavně pro měření osové vzdálenosti malých otvorů,
 - optický systém hlavice umožňuje získání dvou obrazů téhož otvoru,
 - pokud se otvor nachází v optické ose mikroskopu, dva obrazy se překrývají,
- hlavice goniometrická (úhlová) (**obr. 21.6**):
 - základním prvkem je otočná skleněná destička s nitkovým křížem, systémem rysek a úhlovou stupnicí,
 - možnost otáčení destičky ulehčuje lokalizaci bodů součásti a hlavně umožňuje měření úhlů,



Obr. 21.6 Goniometrická hlavice

a) obraz v okuláru, b) obraz v okuláru odečítacího mikroskopu

- měřicí nožíky (**obr. 21.7**) – pro měření v osovém řezu:
 - jsou používány hlavně při měření hřídel, kuželů, závitů,
 - usnadňují a zvětšují přesnost optického nastavení,
 - při měření se ztotožňuje pomocná ryska nitkového kříže goniometrické hlavice s ryskou vyrytou na povrchu nožíku (rysky nožíku jsou přesně rovnoběžné s hranou nožíku ve vzdálenosti 0,3 mm nebo 0,9 mm),



Obr. 21.7 Měřicí nožíky

a) vzhled nožíků, b) nastavení při měření

- projekční zařízení
 - umožňuje využití mikroskopu jako projektoru nebo možnost sledování měření více osobami současně.

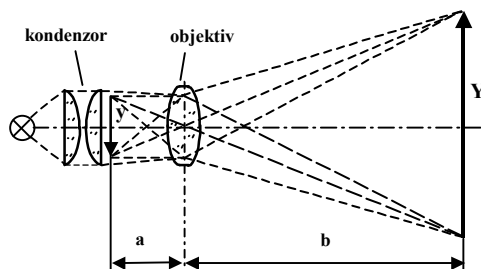
21.3 Projektory (profilprojektory)

Projektory:

- slouží k měření a kontrole složitých tvarových součástí zvláště malých rozměrů,
- jsou založeny na optickém principu.

Princip projektorů (obr. 21.8):

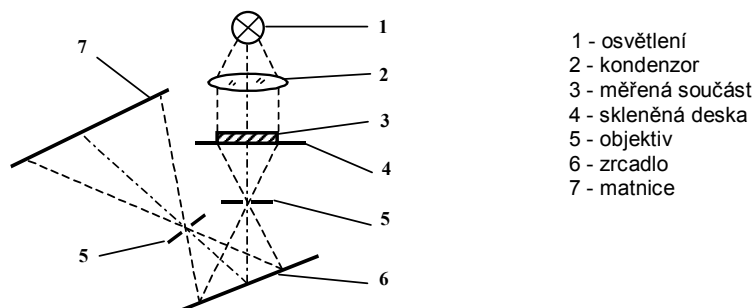
- objektiv projektoru vytváří na matnici reálný zvětšený obraz Y součásti y ,
- správného osvětlení je dosaženo kondenzorem, který přebírá paprsky ze zdroje,
- zvětšení projektoru β většinou bývá: 10x, 20x, 50x, 100x (speciální projektory až 1000x) a je nepřímo úměrné velikosti zorného pole,



Obr. 21.8 Princip projektoru

- chyba zvětšení nepřesahuje 1% měřeného rozměru při diaprojekci a 1,5 % při epiprojekci,
- kontrolovanou součást lze pozorovat v průchozím nebo odraženém světle, popř. kombinace obou.

Pozorování s průchozím světlem (diaprojekce) (obr. 21.9):

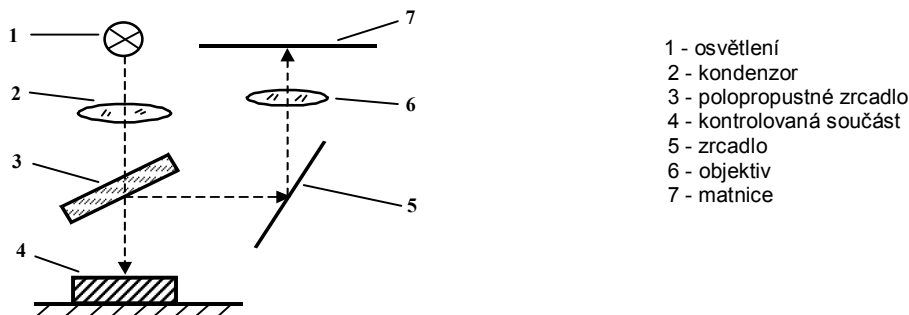


Obr. 21.9 Diaprojekce

- nejčastěji využívaná metoda,
- paprsky vycházející ze zdroje, procházejí kondenzorem a dopadají rovnoběžně na měřenou součást, která leží na skleněné desce,
- paprsky po průchodu objektivem, odrazu od zrcadla a průchodu optickým systémem zobrazí obrys součásti na matnici jako stínový obraz,
- metoda vhodná pro ploché součásti.

Pozorování v odraženém světle (epiprojekce) (obr. 21.10):

- kontrolovanou plochu osvětlujeme silným zdrojem světla ze strany objektivu,
- metoda vhodná pro plochy kolmé k optické ose,
- pozorovaná plocha musí dobře odrážet světlo,
- paprsky ze zdroje procházejí kondenzorem a polopropustným zrcadlem na kontrolovanou součást,
- od kontrolované plochy se odrážejí zpět na polopropustné zrcadlo a opět na další zrcadlo a jdou objektivem na matnici,
- na matnici je vidět světlý obraz zvětšené součásti



Obr. 21.10 Epiprojekce

Pozorování v kombinovaném světle:

- vidíme povrch i obrys kontrolované součásti současně.

22. Souřadnicové měřicí stroje

22.1 Terminologie souřadnicových měření (nejdůležitější pojmy)

Souřadnicová měřicí technika (SMT) – komplex poznatků o měřidlech a metodách, které jsou založeny na principu určitého souřadnicového systému.

Souřadnicový systém souřadnicového měřicího stroje – způsob přiřazení reálných čísel k poloze bodu v rovině (prostoru), vztažený na počátek souřadného systému, zhmotněný v souřadnicovém měřicím stroji.

Transformace souřadnic – způsob převodu souřadnic jednoho systému (souřadnic měřené součásti) do jiného souřadného systému (systému souřadnicového měřicího stroje).

Souřadnicový měřicí přístroj (SMP) – měřidlo, zhmotňující soustavu pravoúhlých, polárních, popř. válcových souřadnic. Způsob snímání souřadnic může být jak dotykový, tak i bezdotykový (optický, ultrazvukový apod.)

Souřadnicový měřicí stroj (SMS) – SMP charakteristické konstrukce, která se vyznačuje mechanickým spojením dvou (tří) pravoúhle uspořádaných přímkových vedení, zpravidla mechanizováním resp. automatizováním některé funkce (např. posuvů) a způsobem odečítání souřadnic na měřeném objektu s pomocí mechanického (optického, elektrokontaktního) doteku.

Snímací systém SMS – soubor mechanických a optoelektronických prvků, které slouží na fixaci polohy měřeného bodu na objektu.

Snímací dotyk SMS – aktivní část snímacího systému SMS, která přichází do kontaktu s měřeným objektem. Dotek má definovaný tvar (koule, válec, kužel) a rozměr.

Měřicí rozsah SMS – oblast stupnice měřicího systému SMS, která je vymezena značkami nejmenší a největší hodnoty stupnice.

Přesnost SMS – souhrnná charakteristika shody údajů indikovaných SMS s pravými hodnotami měřených parametrů (délek, úhlů atd.), které byly získány na výstupu SMS.

Třída přesnosti SMS – kategorizovaný faktor SMS, zvolený podle určité, konvenčně přijaté charakteristiky (např. hodnoty dílků stupnice).

22.2 Koncepce souřadnicových měřicích strojů

Souřadnicové měřicí stroje (SMS) představují jednu z nejvýznamnějších inovací v oblasti měření. Konstrukce souřadnicových měřicích strojů byla vynucena potřebou měření složitých součástí v automobilovém a leteckém průmyslu a v neposlední řadě potřebou kontroly součástí skříňového tvaru vyrobených na NC strojích. Jde o složitý měřicí systém, který realizuje měření v rovině nebo prostoru s možností automatizace měření a vyhodnocování.

Princip měření na souřadnicových měřicích strojích spočívá v tom, že si vhodně stanovíme základní bod v prostoru a polohy ostatních bodů na měřené součásti určujeme ve formě souřadnic těchto bodů v osách souřadného systému X, Y, Z. Možnost volby základního bodu v pracovním prostoru stroje je značnou výhodou SMS oproti konvenčním metodám.

Koncepce SMS vychází ze čtyř základních typů (**obr. 22.1**):

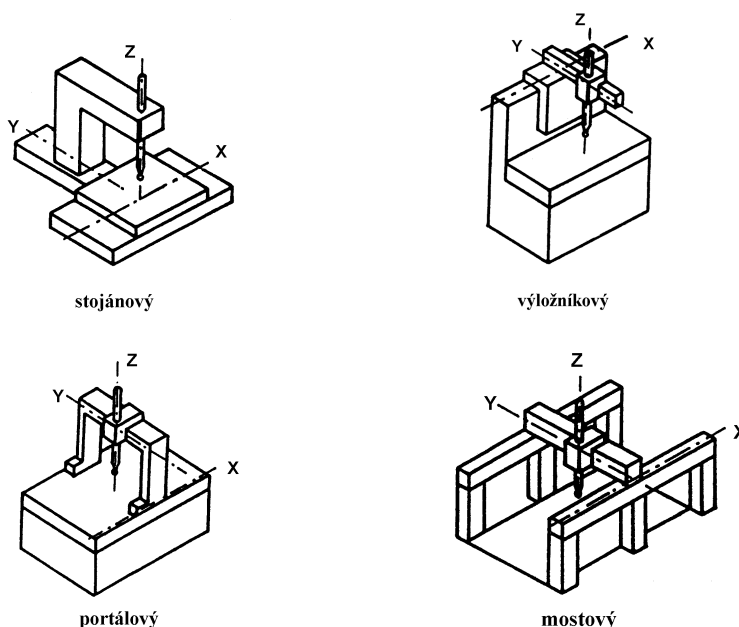
- stojanový,
- výložníkový,
- portálový,
- mostový.

Stojanový typ – vyznačuje se relativně malými rozsahy měření, obvykle jde o laboratorní SMS, kde při dobré přístupnosti k měřenému objektu se dosahuje největší přesnosti. Bývají vybavené dělicími stoly, což umožňuje měření v polárních (válcových) souřadnicích.

Výložníkový typ – vyznačuje se dobrou přístupností k měřenému objektu. Z důvodu tuhosti je osa Y poměrně krátká, proto se hodí hlavně pro měření dlouhých součástí.

Portálový typ – používá se převážně pro střední a velké rozsahy. Vyznačuje se dobrou tuhostí, což zajišťuje relativně vysokou přesnost. Dostupnost k měřenému objektu je omezena konstrukcí. Vyrábí se ve dvou variantách: s pevným portálem (tužší konstrukce – nutný pohyblivý stůl) a pohyblivým portálem.

Mostový typ – používá se pro největší rozsahy měření (např. v ose X až 24 m). Tuhost konstrukce je zaručena mohutně dimenzovanými nosníky a sloupy. Přístupnost k měřenému objektu je dobrá, přesnost měření je nižší. Použití SMS je hlavně v automobilovém a leteckém průmyslu.



Obr. 22.1 Základní typy souřadnicových měřicích strojů

22.3 Základní prvky SMS

K hlavním mechanickým prvkům SMS patří: rám, stůl, stojan, portál, most (dle typu SMS) a pinola.

Rám – obvykle jde o svařenec, který musí splňovat vysoké nároky na tuhost i při dynamickém zatížení. U extrémně velkých SMS rám odpadá a je nahrazen vlastní základovou deskou, která se instaluje do podlahy.

Stůl – tvoří základ pro ustavení měřené součásti (přímo nebo prostřednictvím upínacího přípravku). U moderních SMS jsou vyrobeny ze žuly popř. granitu (umělý kámen). Při výrobě jsou kladeny požadavky na rovinnost funkčních ploch. Materiál tohoto prvku musí splňovat tyto požadavky:

- vysokou životnost a trvanlivost,
- objemovou stálost,
- odolnost proti korozi,
- minimální teplotní roztažnost,
- jednoduchost opravy při případném poškození.

Sloupy, mostní konstrukce, portály – většinou jsou provedeny jako svařence. Důraz je kladen na dostatečnou tuhost, rozměrovou a tvarovou stálost.

Pinola – může být provedena jako vertikální nebo horizontální kruhového nebo čtvercového průřezu z oceli nebo přírodního kamene. V případě horizontální pinoly je nutné dbát na správné dimenzování, vzhledem k možnému průhybu při vyložení od vlastní hmotnosti a hmotnosti snímacích hlavy. Pro kompenzaci případných průhybů jsou potřebná vyvažovací zařízení.

Uložení pohyblivých částí SMS

Požadavky na realizaci pohybu v jednotlivých osách jsou:

- přímost,
- vzájemná kolmost,
- minimální vůle,
- minimální pasivní odpory.

Vzájemné pohyby jednotlivých částí SMS se většinou provádí těmito způsoby:

- kluzné vedení,
 - velký odpor (nutnost neustálého mazání),
 - velká tuhost,
 - jakost vedení se v průběhu používání zlepšuje a tím i přesnost.
- valivá vedení (přesné kladky, kuličková hnízda),
 - nízký valivý odpor,
 - značná odolnost proti opotřebení,
 - vhodné i pro větší zatížení.
- aerostatické vedení (pohyb jednotlivých částí po vzduchovém polštáři tl. cca 4÷8μm),
 - minimální odpory i při vyšších rychlostech,
 - nevzniká trhavý pohyb,
 - značná tuhost,
 - potlačen vliv mikrostruktury.

22.4 Měřicí systémy SMS

Měřicí systémy umožňují získat souřadnice snímaných bodů v kartézských (polárních) souřadnicích v analogovém nebo číslicovém tvaru.

Používají se následující délkové měřicí systémy:

- závitový hřídel s úhlovým převodníkem,
- lineární induktosyn,
- inkrementální délková stupnice,
- laserinterferometr.

Závitový hřídel s úhlovým převodníkem – vyrábí se do délky 1,2 m, mají malé stoupání, pro zajištění tepelné stability jsou uloženy v olejové lázni. Tvar závitu je obvykle lichoběžníkový. Nevýhodou je chyba reverzibility, způsobená vymezením mrtvého chodu mezi šroubem a maticí (při posuvu v opačných směrech).

Lineární induktosyn – základní měřítko je tvořeno vodičem ve tvaru meandru napájeného střídavým proudem. Meandr ve tvaru tištěného spoje je nalepen na izolační vrstvu na kovovém základě. Délka jedné vlny meandru je 2 mm. Po tomto základu se pohybuje jezdec se dvěma smyčkami obdobného meandru, jejichž vzájemná vzdálenost má diferenci 0,5 mm. Na smyčkách se indukují dvě napětí fázově posunutá o 90°. Při pohybu jezdce po základním měřítku vznikne přibližně sinusový průběh, jehož interpolací vychází odměřovací krok 1μm při rozlišení smyslu pohybu. Induktosyn je značně odolný a nevyžaduje zvláštní údržbu.

Inkrementální délková stupnice – jde o nejrozšířenější odměřovací systém SMS. Základní stupnice je nanášena na skleněném (kovovém) podkladě tak, že se střídají pole propouštějící (odrážející) světlo s poli nepropouštějícími (neodrážejícími) světlo. Jezdec má 4 pole, které propouštějí světlo, dvě pole jsou posunuta o ¼ rozteče. Je možno docílit rozlišitelnosti 1μm. Vzdálenost rysek je 0,01÷0,04mm. Jezdec u některých systému je natočen vůči základní stupnici o

nepatrný úhel (interferenci vzniknou proužky moire). Pohyb obrazce je převeden na elektrické signály. Tento způsob zajistí rozlišitelnost až $0,1\mu\text{m}$. Výhodou je snadná kalibrace, která se docílí náklonem jezdce.

Laserinterferometr – u SMS se používá zřídka. Jde o zařízení poměrně drahé a citlivé na dodržení okolních podmínek. S laserinterferometrem se dosahuje rozlišitelnosti $0,01\mu\text{m}$.

22.5 Snímací systémy SMS

Snímání jednotlivých bodů při měření součásti ovlivňuje přesnost a možnosti automatizace měření.

Snímací systémy dělíme na:

- bezdotykové systémy,
- dotykové (kontaktní) systémy.

Bezdotykové systémy – u SMS se prakticky nepoužívají. Používají se u automatických měřicích mikroskopů pracujících v rovině. Pro klasické SMS bylo vyvinuto snímání ve formě laserové měřicí hlavy, řádkové kamery nebo speciálními pneumatickými snímači.

Dotykové (kontaktní) snímače – starší SMS (řízené ručně) mají pevné doteky ve tvaru koule, kužele apod. Řídící počítač na povel obsluhy zaregistruje v okamžiku doteku souřadnice sejmутého bodu a provede výpočet požadovaných geometrických veličin. Nevýhodou je, že při snímání nelze zaručit konstantní měřicí sílu, což může způsobit značné chyby měření.

Nejrozšířenější u současných SMS jsou elektrokotaktní snímací systémy, které dělíme na:

- systémy spínacího typu,
- systémy měřicího typu.

Systémy spínacího typu – hlava funguje tak, že v okamžiku dotyku vyšle signál k zastavení pohybu, odečtení souřadnic a současně se ozve zvukový signál. Systémy pracují v dynamickém režimu, pomocí nich získáváme diskretní hodnoty, není možné spojitě snímání souřadnic, tzv. scanning.

Systémy měřicího typu – konstrukčně složitější. Představují miniaturní SMS, který má vazbu na měřicí systémy jednotlivých souřadnic. Snímací hlava pracuje jak ve statickém (vždy dojde ke stavu, kdy je indukční systém v nulové poloze, ve které je možno snímat správné hodnoty souřadnic), tak i dynamickém režimu (spojité snímání složitých tvarů – scanning). Dotyk je v neustálém kontaktu se součástí, čehož se docílí elektronickou regulací pohonů ve zpětné vazbě na vlastní regulační systém pohybu pinoly.

22.6 Měření na souřadnicových měřicích strojích

Při měření na SMS se získávají potřebné parametry nepřímo z naměřených pravoúhlých (polárních, popř. válcových) souřadnic v rovině nebo prostoru s využitím analytické geometrie.

Prvním krokem je vždy sestavení plánu průběhu měření, ve kterém musí být zahrnuta i dokumentace, přípravy upnutí na stole stroje atd. Plán měření obsahuje tzv. strategii měření, z kterého musí být jasné požadavky na přesnost výsledků měření a hledá se optimální postup k jeho dosažení.

Při sestavování průběhu měření musí operátor SMS dodržovat následující zásady:

- ustavení obrobku stabilním způsobem na co největší plochu,
- měřicí základny by měly korespondovat se základnami konstrukčními,
- pokud je to možné provádět slučování měřicích operací,
- ustavení obrobku tak, aby se dal proměřit při jednom ustavení,
- volby minimálního počtu doteků,
- volba měřicích bodů tak, aby postup byl co nejkratší,
- snímací body mají být rovnoměrně rozloženy na měřeném geometrickém prvku,
- počet snímaných bodů volit o 2 až 3 větší než vyžaduje geometrická definice,
- směr pohybu snímače před dotykem by měl souhlasit se směrem některé osy,
- kruhové a kulové plochy je nutné snímat párovými dvojicemi, tj. diagonálně,
- při statistické interpretaci výsledku měření vyhodnotit minimálně 30 bodů,
- body měřeného geometrického prvku je vhodné znázorňovat graficky, aby bylo možné vyloučit hrubé chyby,

- vyhodnotit dosaženou nejistotu měření a porovnat ji s její požadovanou hodnotou.

22.7 Kontrola přesnosti souřadnicových měřicích strojů

Na přesnost SMS je možno pohlížet jednak z pohledu výrobce (musí sledovat přesnost jednotlivých prvků stroje), jednak z pohledu uživatele (toho zajímá výsledná přesnost celého systému a otázka jejího rychlého a snadného ověření). Z těchto důvodů zkušební metody dělíme na:

- metody analytické,
- metody komplexní.
-

Analytické metody

V rámci těchto metod se kontrolují především tyto základní prvky SMS:

- chyby měřicích systémů v jednotlivých osách,
- chyby polohování v jednotlivých osách (projeví se zde vedle chyb měřicích systémů i chyby přímosti pohybů),
- chyby vzájemné kolmosti jednotlivých os,
- odchylky rovinnosti pracovního stolu,
- chyby snímacích systémů.

Základním měřidlem je laserinterferometr, pomocí kterého lze kontrolovat délky s rozlišitelností $0,1\mu\text{m}$, ale i odchylky přímosti, kolmosti atd. Ke kontrole rovinnosti se nejčastěji používá elektronická libela s citlivostí $1\mu\text{m.m}^{-1}$.

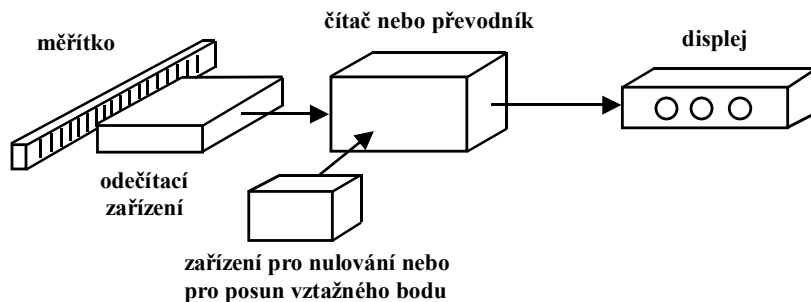
Komplexní metody kontroly SMS

Těmito metodami se získávají komplexní údaje o přesnosti celého systému SMS jako celku, což má zásadní význam pro uživatele. Hlavní výhodou je jednoduchost těchto zkoušek. Tyto metody kontroly jsou založené na použití etalonů a zkušebních těles jako:

- **lineární etalony**
 - koncové měřky samostatné nebo jako sestava o více rozměrech,
- **plošné etalony**
 - desky s koulemi – ballplate nebo desky s otvory – holeplate,
 - kalibrace se provádí ve dvou rovinách horizontálních a dvou rovinách vertikálních,
- **prostorové etalony**
 - úsečkový etalon – dvě přesné koule spojené pevnou tyčí z materiálu s minimální roztažností, které realizují konstantní délku L ,
 - jedna koule je uložena v kuželovém lůžku na stole a druhá v pinole,
 - otáčením koule v pinole se realizuje ideální kružnice o konstantním poloměru R v různých rovinách,
 - SMS vyhodnotí kružnici s určitými odchylkami a pomocí tzv. kruhového testu počítá vyhodnotí potřebné parametry přesnosti SMS).
- **kombinované etalony**.

23. Odměřovací systémy

Obráběcí stroje, SMS jsou vybavovány odměřovacím zařízením, zpravidla s dálkovým přenosem odměřených hodnot na ovládací panel nebo displej, kde je možno pohodlně odečíst všechny zde soustředěné nastavované souřadnice. Vybavení stroj tímto zařízením přináší řadu výhod. Obecné schéma odměřovacího systému je na **obr. 23.1**.



Obr. 23.1 Obecné schéma odměřovacího systému

Odměřovací systémy lze dělit na :

- systémy analogové,
- systémy číslicové.

U **analogových systémů** je měřítko tvořeno proměnným odporem, kapacitou atd., které dávají plynule proměnný signál. Kvůli číslicovému odečítání je u těchto zařízení nutný analogový číslicový převodník, který změní analogový signál na číslicový.

Číslicové systémy používají:

- **kódovaná měřítka**, ze kterých odečítací zařízení snímá souřadnici už v číslicové formě a potom je zde místo čítače **převodník kódu** (většinou z dvojkového na desítkový). Tyto systémy nazýváme také **absolutní**, protože odečítací zařízení odečítá přímo absolutní hodnotu souřadnice, která je na měřítku zakódována ;
- **nekódovaná měřítka**, která dávají v pravidelných vzdálenostech impulsy odečítacímu zařízení, která je převádí do čítače, který impulsy počítá. Součet impulsů odpovídá ujeté dráze a je indikován na displeji. Protože čítač počítá impulsy od toho místa, ve kterém byl vynulován, je toto místo vztažným bodem, od kterého měříme souřadnice. Vynulování můžeme provést v libovolném bodě měřítka, proto systémy s nekódovaným měřítkem nazýváme **relativní** (přírůstkové).

Nekódovaná měřítka mohou mít **hmotné a nehmotné** stupnice.

Hmotnou stupnici rozumíme měřítko, které je opatřeno značkami rovnoměrně od sebe vzdálenými, fyzikálně odlišnými od podkladu (**obr. 23.3a**). **Nehmotná stupnice** je realizována stojatými vlnami, jejichž uzly a kmity zařízení rozeznává.

Podle řady fyzikálních principů, na nichž je založeno snímání údajů z měřítka je možno rozlišovat principy optické, fotoelektrické, elektrické (indukční, kapacitní, magnetické), pneumatické atd.

U snímání údajů z měřítka na fotoelektrickém nebo elektrickém principu odečítací zařízení mění snímaný signál na signál elektrický, který je dále zpracováván v elektronických obvodech (čítačích, převodnících, dekodérech). Indikace je prováděna téměř vždy pomocí číslicových doutnavek. Lze použít i jiné elektricky ovládané číslicové ukazatele.

U pneumatického systému jsou signály z odečítacího zařízení pneumatické a také další zpracování se děje v pneumatických logických obvodech.

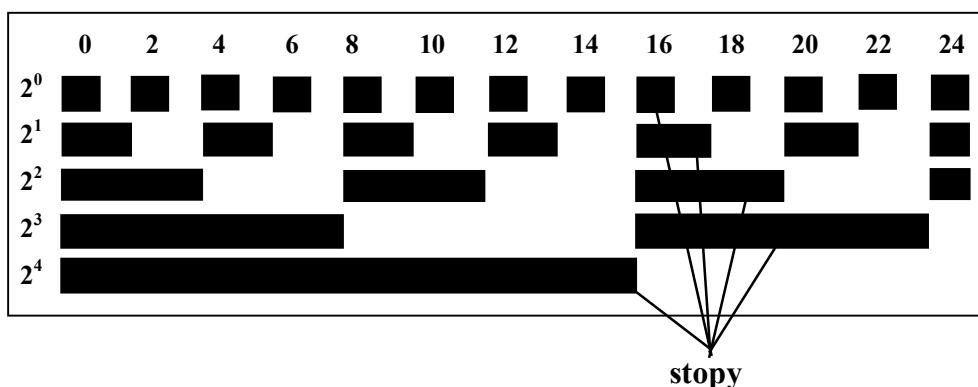
Všechny tyto systémy umožňují dálkový přenos odměřovaných hodnot na ovládací panel nebo displej.

Optické systémy využívající pouze vlastností světelného svazku s přenosem televizní kamerou, dálkové odečítání v libovolném místě neumožňují.

Absolutní kódovací systém s kódovanými měřítky:

- systém pracuje s hmotnou kódovanou stupnicí,
- snímání údajů z měřítka je založeno na fotoelektrickém principu,
- umožňuje určit polohu v každém místě přímo (absolutně) bez závislosti na počítání ujeté dráhy – souřadnice je přímo v daném místě měřítka zakódována,

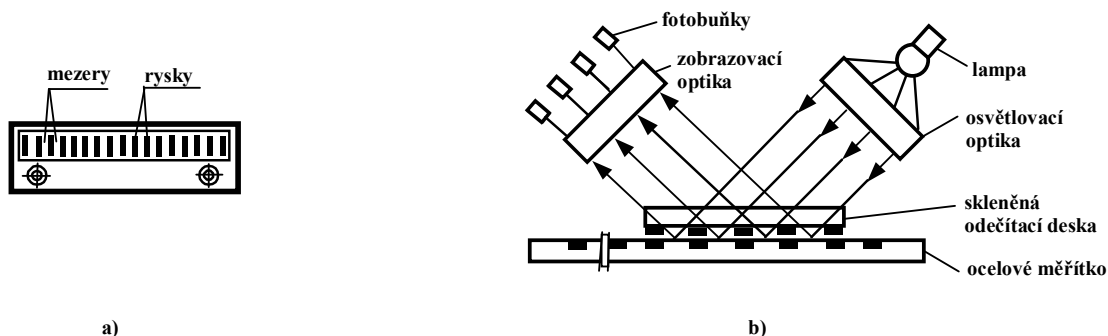
- základní částí je skleněné pravítko a snímací hlava,
- měřítko je kódováno obvykle v binárním kódu a má větší počet stop (příklad měřítka se 24 odečítacími intervaly a 5 stopami - **obr. 23.2**),
- kombinací průhledných a neprůhledných polí na jednotlivých stopách je určena v každém intervalu v kódovaném tvaru příslušná souřadnice,
- měřítko je sledováno fotobuňkami umístěnými ve snímací hlavě, každá fotobuňka snímá jednu stopu,
- např.: souřadnice 227 v binárním kódu:
 - $227 = 1 \times 128 + 1 \times 64 + 1 \times 32 + 0 \times 16 + 0 \times 8 + 0 \times 4 + 1 \times 2 + 1 \times 1 = 1 \times 2^7 + 1 \times 2^6 + 1 \times 2^5 + 0 \times 2^4 + 0 \times 2^3 + 0 \times 2^2 + 1 \times 2^1 + 1 \times 2^0 = 11100011$
 - tedy na měřítku: stopy
 - 2^0 a 2^1 ... průhledná pole
 - $2^2, 2^3, 2^4$... neprůhledná pole
 - $2^5, 2^6, 2^7$... průhledná pole



Obr. 23.2 Kódované měřítko

Relativní odměřovací systém s nekódovaným měřítkem:

- relativní odměřovací systémy jsou přírůstkové systémy,
- jsou opatřeny přesným měřítkem opatřeným ryskami, kde vzdálenost ryska+mezera tvoří elementární krok,
- dělení měřítka je vytvořeno střídavě následujícími ryskami a mezerami stejné šířky (**obr. 23.3a**),
- podkladem dělení je ocelový nerezový pásek, který je na vlastní těleso nalepen.



Obr. 23.3 Relativní odměřovací fotoelektrický systém
a – hmotné nekódované měřítko, b – princip odečítání

Princip odečítání (**obr. 23.3b**):

- skleněná odečítací deska je rozdělena na 4 pole,
- každému poli přísluší jedna fotobuňka,

- odečítací pole je vlastně mřížka s neprůhlednou ryskou a průhlednou mezerou, jejíž dělení se shoduje s dělením měřítka,
- tato 4 pole jsou o čtvrtinu dělicí periody přesazena proti sobě,
- osvětlení fotobuněk posune-li se měřítka tak, že průhledné mezery odečítací desky stojí nad odrážejícími mezerami měřítka, je intenzita osvětlení fotobuněk maximální,
- kryjí-li se naopak neprůhledné rysky odečítacího pole s odrážejícími mezerami měřítka, dosahuje intenzita minima,
- pohybuje-li se měřítka v podélném směru relativně k odečítací hlavě, mění se intenzita světla přicházejícího k fotobuňce neustále od maxima k minimu,
- použitím většího počtu štěrbin v odečítací desce se proti odečítání jen jednou štěrbinou zvýší světelný proud dopadající na fotobuňku a zvýší se přesnost měření, protože náhodné chyby se statisticky vyloučí.

24. Metrologické zajištění výrobního procesu

Těžiště zájmu o kvalitu se přesouvá z následné kontroly na prevenci. Zvyšují se náklady jak na volbu měřidel tak na kontrolní postupy.

Se stoupajícími se nároky na přesnost a složitost výrobních a měřících operací musí být vytvořeny předpoklady pro správné měření již v předvýrobní etapě. Příprava v této etapě je nezbytná jak po stránce technické tak i ekonomické. Ve fázi návrhu výrobku je nutno rozhodnout, které vlastnosti výrobku mají být předmětem měření a sledování, které rozhodující pro konečné posouzení jakosti výrobku.

Požadavky na strojírenskou metrologii v technologickém procesu jsou odvislé od typu výroby. Vliv typu výroby na kontrolu výroby, rozpracovanost měřících operací a volbu měřících prostředků viz **tab. 24.1**.

Tab. 24.1 Vliv typu výroby na kontrolu výroby, rozpracovanost měřících operací a volbu měřících prostředků

		Typ výroby			
		kusová	malosériová	velkosériová	hromadná
typický počet vyráběných součástí jednoho druhu		1 až 50	50 až 100	100 až 5000	5000 a více
způsob kontroly výroby	počet kontrolovaných součástí v dávce	100%	převážně 100% ojediněle výběrová kontrola	výběrová kontrola částečně 100% kontrola	převážně výběrová
	místo kontroly	u velkých součástí na výrobním pracovišti u malých a středních na specializovaném pracovišti	převážně na kontrolních pracovištích	při 100% kontrole na specializovaných pracovištích u výběrové kontroly převážně na výrobním pracovišti	
	z hlediska výrobního postupu	po každé operaci	převážně po každé, částečně po několika operacích	převážně po několika, částečně po každé operaci	po několika operacích
rozpracování kontrolní operace v technologickém postupu		všeobecné pokyny detailní způsob kontroly určuje většinou pracovník technické kontroly		podrobné pokyny kontrolní postup je podrobně rozpracován	velmi podrobné pokyny
kontrolní prostředky		universální	převážně universální omezeně speciální	převážně speciální	výhradně speciální mechanizované, automatizované

Ve stadiu návrhu je nutno rozhodnout, které vlastnosti výrobku mohou působit potíže ve výrobním procesu a které je nutno sledovat. Pro parametry součástí, které mají být sledovány a kontrolovány, je nutno jednoznačně stanovit meze, které daný parametr musí splňovat. Velmi důležitou úlohu při volbě metodiky kontroly hraje ekonomická stránka.

Platí zásada: tam kde je to možné, je dáována přednost těm metodám měření a kontroly, které jsou levnější.

Zavedení kontroly je věcí kompromisu mezi technickými požadavky na výrobek a ekonomickou stránkou (cenou), kterou za zajištění těchto požadavků platíme.

24.1 Technická dokumentace – kontrolní postupy

Měřicí a kontrolní operace zahrnují značnou část výrobního procesu. Podíl měření u běžných typů výrobků při obrábění činí 5 – 10% celkového výrobního času, u obrábění složitých součástí 20 a více procent (u složitých operací, kde je vyžadována velká přesnost, čas na kontrolu je delší než čas výrobní).

Zvýšenou pozornost je nutno věnovat úrovni kontrolní technologie ve výrobní dokumentaci. K hlavním cílům kontroly jakosti ve výrobě patří:

- objektivní posouzení těsnosti shody mezi požadavky a skutečnosti,
- specifikace odhalených neshod,
- zabránění průniku neshodných výrobků nejen až ke spotřebiteli, ale na každý další stupeň zpracování,
- zajištění technologické kázně,
- odhalení neshodných výrobků ve výrobním procesu, které by mohly vést k výrobě nevyhovujících výrobků,
- zpracování výsledků kontroly s cílem odhalit příčiny nevyhovujících výrobků a přijímání a realizace nápravných opatření.

Je nutno si uvědomit, že jakost nelze **vykontrolovat**, ale jakost **musí být vyrobena**. K tomuto faktu je nutno přihlížet při zpracovávání technické přípravy výroby.

Kontrolní postupy

Pro zabezpečení správného a rychlého měření je nezbytné, aby měřicí a kontrolní postupy byly součástí výrobních postupů.

Při tvorbě kontrolních postupů je nutno pečlivě volit:

- metodu měření,
- vlastní měřidlo,
- podmínky měření,
- místo měření,
- četnost měření,
- sled měření,
- způsob vyhodnocení výsledků měření,
- pracovníka provádějícího měření (specializovaný pracovník technické kontroly nebo přímo obsluha výrobního zařízení – samokontrola).

Kontrolní operace se má předepsat vždy:

- po obrobení ploch, které slouží jako základny pro obrobení nebo měření ostatních ploch nebo pro zabezpečení jejich vzájemné polohy,
- za výrobní operace, při nichž může vzniknout deformace (tepelné zpracování),
- za operaci, při níž se obrábí součást podle pokynů technické kontroly,
- za operace, při níž hrozí vznik nevyhovujících výrobků,
- po náročných montážních operacích, kdy je nutno zabezpečit vzájemnou polohu skupin součástí.

Pro stanovení celkové výrobní tolerance je nutno vzít v úvahu:

- chyby výrobní,
- chyby měření.

V kontrolním postupu je nutno:

- jednoznačně uvést, které parametry vyráběné součásti se budou s ohledem na zpětnovazební informační systém kontrolovat,
- zajišťovat reprodukci změřených hodnot fyzikálních a technických veličin do výrobního procesu.

24.2 Výběr měřicích prostředků

Při volbě měřicích prostředků je nutno přihlížet nejen k přesnosti měřidel a kontrolní techniky, ale nezbytným kritériem při výběru je splnění i dalších podmínek a to např.:

- musí být jednoznačně definovaná požadovaná hodnota,
- měřicí zařízení musí dostatečně rychle sledovat měřenou hodnotu, tj. rychlost poskytnuté informace musí umožnit realizovat změnu příslušného parametru.

Jedním z hlavních ukazatelů pro volbu měřicích přístrojů je vztah výrobní tolerance výrobku k přesnosti výrobního zařízení. Mohou nastat tyto případy:

- je-li chyba výrobního zařízení podstatně menší než výrobní tolerance, možno provádět kontrolu běžnými měřidly v pevně stanovených časových intervalech,
- je-li chyba výrobního zařízení přibližně stejná jako požadovaná výrobní tolerance, nutno měřit přímo při obrábění a výsledky měření využívat k řízení výrobního procesu (sledovací měřidla),
- je-li chyba výrobního zařízení větší než požadované výrobní tolerance, musí se provádět výběrová montáž, tj. předpoklad třídění obrobků do skupin dle rozměrů na třídících automatech.

Při volbě přesnosti měřidla se obvykle vychází ze zásady, že přesnost měření má být 5x až 10x větší než kontrolovaná výrobní tolerance. Nelze-li tuto podmínku splnit, je třeba upravit mezní rozměry obrobku pro kontrolu (tzv. redukované tolerance).

Při měření (kontrolě) se mají používat jen ověřená měřidla a měřidla s platnou kalibrací.

24.3 Volba měřicí metody

Při volbě vhodné měřicí metody a podmínek měření se musí technolog řídit hledisky technickými i ekonomickými. Náklady na kontrolní operace jsou jedním z důležitých kritérií při volbě kontrolní metody. Náklady spojené s kontrolou se skládají z nákladů na:

- pořízení měřicího zařízení
- odpisy měřicího zařízení,
- údržbu měřicího zařízení,
- mzdy obsluhujícího personálu,
- režie laboratoře atd.

Velmi důležitou úlohu hraje správná volba počtu měření a ohledem na přípustnou nejistotu měření a přesnost použitého měřicího zařízení. Pro každé měření je nutno stanovit nejistotu měření **U**. Pokud se měří jen jedenkrát, musí se dbát na to, aby maximální chyba **3σ** nepřekročila přípustnou nejistotu **U** (**$U \geq 3\sigma$**).

Vychází se z podmínky, že přípustná nepřesnost by neměla být větší než 1/10 až 1/5 tolerance měřeného rozměru. V případě, že přípustná nepřesnost je tak malá, že se daným způsobem nedá zjistit, je nutno měření opakovat n-krát. Minimální počet měření je možno určit ze vztahu:

$$n \geq \left(\frac{2 \cdot \alpha \cdot s(x)}{U} \right)^2$$

kde: n ... počet měření,
σ ... směrodatná odchylka jednotlivého měření,
α ... hladina významnosti,
U ... přípustná nejistota měření.

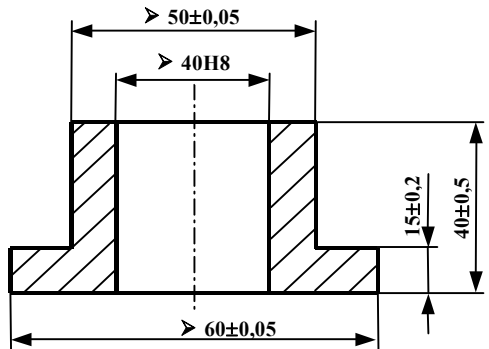
V technické praxi se za minimální počet považuje $n=3$, za maximální počet měření se považuje $n=10$. Pokud vyjde počet měření větší, je nutno volit jinou přesnější metodu měření, popř. přesnější měřicí zařízení.

Každou naměřenou hodnotu je nutno korigovat o případnou systematickou chybu, hlavně zohlednit vliv teploty. Teplota v průběhu měření nesmí kolísat více, než je dovoleno pro dosažení požadované přesnosti. Před měřením je nutno zajistit vyrovnaní teplot měřené součásti a měřidla.

Sestavení kontrolních postupů slouží k zajištění všech potřebných měření, určení metody a k její dokumentaci. Kontrolní listy je nutno vypracovat pro každou jednotlivou součást. Jde-li o složité a nákladné součásti, u nichž je nutná mezioperační kontrola, vypracovávají se kontrolní listy i pro každou nutnou kontrolní operaci. Každý kontrolní list musí obsahovat:

- náčrt součásti (ve stavu, v němž je v okamžiku měření) se všemi rozměry a jejich tolerancemi, které se mají měřit,
- seznam kontrolních úkonů v pořadí, v němž se budou realizovat,
- seznam měřidel a měřicích přístrojů s jejich označením, předepsaných pro požadované kontrolní úkony,
- měří-li se nepřímou metodou, je nutno nakreslit schéma měření a uvést všechny potřebné matematické vztahy,
- stanovení podmínek měření, které je nutno dodržet, aby se dosáhlo potřebné přesnosti měření,
- popis metody měření (není nutno popisovat obecně známé způsoby měření, stačí jen stručný popis zvláštnosti předepsané metody).

Vzor kontrolního listu viz **obr. 24.1**.

Kontrolní list		Číslo kontrolního listu
Číslo výkresu	Název součásti	List č.
01-01	Příruba	1
Náčrt měřené součásti: 		
Měřený rozměr	Měřidlo	Číslo výkresu
→ 60±0,05	třmenový mikrometr	
→ 50±0,05	třmenový mikrometr	
→ 40H8	válečkový kalibr	
40±0,5	posuvné měřítko	
15±0,2	posuvné měřítko	
Podmínky měření: 1. Před měřením je nutno zajistit vyrovnaní teplot obrobku a měřidla 2. Vnější průměry měřit ve dvou vzájemně kolmých směrech		

Obr. 24.1 Vzor kontrolního listu

25. Metrologické laboratoře

Modernizace výroby a zavádění nových technologií klade vysoké nároky nejen na přístrojové vybavení metrologických laboratoří, ale rovněž na jejich stavební řešení a pomocné technické vybavení.

Metrologické laboratoře musí splňovat řadu náročných požadavků, které je možno rozdělit do těchto oblastí:

- pracovní prostory,
- přístrojové a další technické vybavení,
- personální obsazení a kvalifikace pracovníků,
- akreditační kritéria,
- organizační a materiální zabezpečení,
- právní postavení a legislativní zabezpečení,
- technická způsobilost.

25.1 Požadavky na pracovní prostory

Požadavky na pracovní prostory závisí na stupni akreditace a na přesnosti měření prováděných v laboratoři. Předpoklady spolehlivého přesného a správného měření v oboru měření délek jsou tyto:

- teplota: $(20 \pm 0,5) ^\circ\text{C}$, pro nejpřesnější měření: $(20 \pm 0,1) ^\circ\text{C}$,
- relativní vlhkost: $(55 \div 60) \%$,
- intenzita umělého osvětlení: 800 lx, pro zvlášť náročná měření až 1200 lx,
- přípustná hluchnost: max. 55 dB,
- bezprašnost (u zvlášť náročných měření je definován počet zrn prachu v 1 cm^3 v ovzduší),
- prostředí bez vibrací, elektromagnetických poruch nebo rušení,
- dostatek prostoru,
- klid a pohoda pro soustředěnou práci,
- estetické prostředí.

25.2 Přístrojové vybavení

Přístrojové vybavení musí trvale splňovat všechny parametry požadované při akreditaci. Norma ČSN EN 45001 předepisuje povinnost pravidelné údržby a současně podrobnou evidenci všech měřidel s uvedením základních dat, oprav, kalibrací, ověření atd. Veškerá činnost v oblasti přístrojového vybavení musí být v souladu se zněním zákona č. 119/2000 Sb. – o metrologii a příslušných dalších ustanovení. Při kalibracích musí být respektována návaznost na státní (popř. mezinárodní) etalony příslušné veličiny.

Referenční materiály, které jsou v metrologické laboratoři, musí být používány výhradně ke kalibracím (ověřování) a ne pro jiné účely.

25.3 Technická způsobilost

Technická způsobilost musí být zajištěna v těchto oblastech:

- řízení a organizace,
- personální obsazení dostatečným počtem kvalifikovaných pracovníků s osobní zodpovědností,
- prostory a zařízení,
- pracovní postupy – metrologické laboratoře musí používat metody a postupy tak, jak to požadují technické specifikace, podle kterých se kontroluje.

Systém jakosti musí být specifikován v příručce jakosti. Účelem příručky jakosti, která představuje vrcholný pracovní dokument zabezpečující jakost ve smyslu ČSN EN ISO 9001, je:

- popis a uplatňování efektivního systému jakosti,
- prezentování systému jakosti společnosti pro externí účely,
- poukazování na soulad systému jakosti s požadavky na jakost ve smluvních vztazích.

25.4 Požadavky na stavební provedení metrologických laboratoří

Mechanické vlivy

Pokud jde o mechanické vlivy je potřebné, aby byly metrologické laboratoře dostatečně vzdáleny od těžkých provozů, silnic, železničních tratí a pod. V případě, že to dislokace metrologické laboratoře neumožňuje, je nutno je od těchto vlivů stavebně oddělit. V případě podzemních spojovacích chodeb (např.: u pavilonové výstavby většího metrologického areálu) ke zvláště náročným metrologickým laboratořím, lze do stěn chodeb zabudovat izolační spáry.

Metrologické laboratoře pro přesná měření nemají být umístovány ve vyšších podlažích, protože s výškou budovy se mohou zvyšovat i případné vibrace přenášené přes její základy. Otřesy mohou vzniknout u vyšších budov umístěných v relativně klidném prostředí také nárazy a tlakem větru. Písčité podloží budov je vhodné, protože zrnitá struktura dobře tlumí vnější mechanické vlny. V některých případech toto nepevné podloží však může způsobit časem změnu polohy budovy, která může mít negativní vliv na přesnou metrologickou práci. Naklonění nebo snížení budovy zapříčiní změnu horizontální polohy zabudovaných měřicích zařízení, které jsou na tuto změnu polohy citlivá.

Základy budovy uložené na skále jsou výhodné pro stálost budovy, mohou ale přenášet i vzdálené otřesy a vibrace. Umístění budovy se musí zvlášť pečlivě posuzovat také z hlediska přirozených otřesů půdy. V takovém případě lze otřesy vyloučit zvláštními bezotřesovými stěnami a podlahami přímo v metrologické laboratoři. Není-li možno toto opatření provést (např. u starších budov) doporučuje se bezotřesovost určitého místa v metrologické laboratoře, na kterém je umístěn citlivý měřicí prostředek, zajistit pružným uložením na konzolách nebo jeho postavením do pískové vany. Pro snížení otřesů se používá také zařízení vybavené gumovými tlumiči.

Nejlepší konstrukce je zděná s dostatečně silnými obvodovými zdmi. Stěny musí mít dobré tepelně izolační vlastnosti a přitom velkou tepelnou setrvačnost.

Podlaha nejpresnější části laboratoře se musí odizolovat od konstrukce základů budovy. Stavebně se to řeší samostatným monoblokem z prostého betonu, který je uložen v betonové vaně, od které je odizolován vrstvou korku. Celá podlaha laboratoře musí být tepelně izolována, pokrytá bezprašnou krytinou (gumou, PVC).

Bezprašnost

Pro většinu metrologických prací se vyžaduje bezprašnost, která se zajistí nátěrem stěn a bezprašnou podlahou. To je možné zajistit mimo jiné mimořádnou čistotou, přezouváním obuvi, převlékáním oděvů a dalšími hygienickými opatřeními. Někdy k těmto opatřením vedou i jiné požadavky a předpisy.

U spojovacích chodeb, které jsou mnohdy vedeny v podzemí, je nutné vyloučit schody, kromě osobních komunikací s jiným podlažím, aby bylo možno veškerou dopravu uskutečnit speciálními vozíčky. Spojení s jinými podlažími je možno realizovat i výtahy.

Podlahy

Podlaha metrologické laboratoře má být izolována od stěn, aby se nepřenášelo do místnosti případné chvění nebo otřesy. Měřicí prostředky mají být uloženy na podložkách z pružného materiálu. Těžší a rozměrnější měřicí prostředky mají vlastní základy (např. betonové desky, v odůvodněných případech kamenné desky, uložené na silných pružinách). Rozměry a vlastnosti těchto základů určuje většinou přímo výrobce měřicího zařízení.

Osvětlení

Osvětlení se provádí zářivkami nebo jinými svítidly s minimálním vývinem tepla. Světlo má mít dostatečnou intenzitu, ale nesmí oslňovat. Pro přesné práce se používá navíc lokální bodové osvětlení. Osvětlení u přístrojů je vhodné v rozmezí od 500 do 600 luxů, ve zvláště náročných případech až 1200 luxů.

Teplota

Teplotní vlivy je možno rozdělit na vnější a vnitřní. Vnější vlivy představuje především ozařování budov metrologické laboratoře sluncem. Metrologické laboratoře se mají proto umísťovat okna k severu. Není-li možno vlivy vnějšího záření plně vyloučit, lze použít termální skla. Okna se dále

stíní žaluziemi, které musí být vně oken nebo u zdvojených oken mezi skly. Aby se vnější teplotní vlivy téměř vyloučily, projektují se náročnější metrologické laboratoře bez oken a u podélných budov se umísťují do osy budovy.

U osvětlení je nutno rovněž počítat s průvodním oteplováním (teplotní vlivy vnitřní). Oteplení zapříčiňují i pracovníci metrologické laboratoře. Řádově je možno uvažovat u jednoho pracovníka s příkonem asi 100W.

Klimatizace

Klimatizační zařízení musí zajistit stálou teplotu 20°C s dovoleným kolísáním, vlhkost (55÷60)%. Vzduch, který prochází okruhem se navíc filtruje. Úbytek kyslíku spotřebovaný personálem se doplňuje přísáváním čerstvého vzduchu zvenčí, který se filtruje, vlhčí, ohřívá nebo chladí. Klimatizaci lze v celé budově provést centrálně nebo pro jednu až dvě metrologické laboratoře společně klimatizačními skříněmi. Klimatizace se provádí jako přetlaková, aby se zabránilo nasávání prachu zvenčí.

Ochrana před elektromagnetickým zářením

V případě, že je třeba odstínit laboratoř od zdroje elektromagnetického záření, umístí se do prostoru tzv. Faradayovy klece. Klec je konstrukčně provedena z vodivé husté sítě nebo kovových fólií, vodivě propojených kolem celého prostoru, včetně podlahy, oken a dveří.

Rozvody energií

V laboratoři je třeba provést hustou síť zásuvek 220 V po stěnách, případně přímo v laboratorních stolech.

Do prostoru, kde se předpokládá umístění souřadnicových měřicích strojů, se zavádí stlačený vzduch 0,6 MPa, který se používá pro vzduchové polštáře přesných vedení pohybových částí těchto strojů, popř. jako zdroj stlačeného vzduchu pro pneumatická měření.

Literatura

- [1] ADAMCZAK, Stanisław. *Možnosti vývoja relativných metód odchýliek kruhovitosti*. Doktorská disertačná práca. Žilina: ŽU Žilina, 1993. 214 s.
- [2] ADAMCZAK, Stanisław. *Odniesieniowe metody pomiaru zarysów okrągłości części maszyn*. Kielce: Politechnika Świętokrzyska Kielce, 1998. 181 s. PL ISSN 0239-4979
- [3] MLČOCH, Lubomír; SLIMÁK, Ivan. *Řízení kvality a strojírenská metrologie*. Praha: SNTL/ALFA Praha, 1987. 330 s.
- [4] HUMIENNY, Zbigniew; BIAŁAS, Sławomir; OSANNA, Peter Herbert; TAMRE, Mart; WECKENMANN, Albert; BLUNT, Liam; JAKUBIEC, Władysław a kol. *Specyfikacje Geometrii Wyrobów (GPS)*. Warszawa Bielsko-Biala: Politechnika Warszawska Warszawa, 2001. 310 s. ISBN 83-912190-7-0
- [5] BREZINA, Ivan. *Súradnicové meracie stroje*. Praha: Vydavatelství Úřadu pro normalizaci a měření, 1987. 150s., 59-099-86
- [6] BREZINA, Ivan. *Základy metrologie úhlů*. Praha: SNTL Praha. 1982. 208 s.
- [7] PERNIKÁŘ, Jiří; TYKAL, Miroslav; VAČKÁŘ, Josef. *Jakost a metrologie*. Brno: Brno-CERM, 2001. 151s. ISBN 80-214-1997-0
- [8] ČECH, Jaroslav; PERNIKÁŘ, Jiří; BENEŠ, Milan. *Strojírenská metrologie*. Brno: VUT Brno, 1994. 165 s. ISBN 80-214-0557-0
- [9] BATORA, Bohumil; VASILKO, Karol. *Obrobené povrchy – technologická dedičnosť funkčnosť*. Trenčín: Trenčianska univerzita, 2000. 183 s. ISBN 80-88914-19-1
- [10] VRBA, Vladimír. *Vybrané kapitoly z metrologie II*. Ostrava: VŠB-TU Ostrava, 1997. 37 s.
- [11] PALENČÁR, Rudolf a kol. *Metrologické zabezpečenie systémov kvality*. Bratislava: STU Bratislava, 1998. s.38-65. 74-80 98-106
- [12] ŠINDELÁŘ, Václav°; TŮMA, Zdeněk. *Metrologie – její vývoj a současnost*. Praha: Česká metrologická společnost Praha, 2002. 384 s..
- [13] NENÁHLO, Čeněk. *Příručka pro kontrolory ve strojírenství*. Praha: SNTL Praha, 1970, 655 s.
- [14] WARNECKE, Hans-Jürgen; DUTSCHKE, Wolfgang. *Handbuch für Industrie und Wissenschaft*. Berlin: Springer Berlin, 1984. 812 s. ISBN 3-540-11784-9
- [15] OBMAŠČÍK, Michal. *Metrologia chyb a nejistôt merania a meradiel dĺžok*. Žilina: MASM Žilina, 62 s., ISBN 80-85348-40-3
- [16] TICHÁ Šárka. *Využití korelačního výpočtu k porovnávání profilů kruhovitosti*. Doktorská disertační práce. Ostrava. 1999. 123 s.
- [17] APOLENÍKOVÁ, Slávka. *Kvalita metrologických činností*. Doktorská dizertační práce. Žilina. 2003
- [18] TICHÁ, Šárka. *Strojírenská metrologie – část 1*. Ostrava 2004: VŠB-TU Ostrava. 112s., ISBN 80-248-0672-X
- [19] Zákon č. 119/2000 Sb. – o metrologii. 2000
- [20] ČSN 01 0115: 1996: Mezinárodní slovník základních a všeobecných termínů v metrologii. Praha: Český normalizační institut Praha. 1996.
- [21] ČSN ISO 1328-1 (014682): Čelní ozubená kola – Soustava přesnosti ISO-část 1: Definice a mezní úchytky vztažené na stejnohlé boky zubů ozubeného kola. Praha: Český normalizační institut Praha. 1997
- [22] ČSN EN ISO 4287: Geometrické požadavky na výrobky (GPS) – Struktura povrchu: Profilová metoda – termíny, definice a parametry struktury povrchu. (01 4450). Praha: Český normalizační institut Praha. 1999.
- [23] ČSN EN ISO 3650: Geometrické požadavky na výrobky (GPS) – Etalony délek – koncové měrky. (25 3308). Praha: Český normalizační institut Praha. 2000.
- [24] ČSN 01 4001: Závit. Terminologie. Praha: Český normalizační institut Praha. 1994.
- [25] ČSN 01 4013: Jednotná soustava tolerancí a uložení. Metrické závit. Základní rozměry. Praha: Úřad pro normalizaci a měření Praha. 1978.
- [26] ČSN 25 1964: Měřidla. Měřicí úhelníky pro měření kolmosti. Praha: Úřad pro normalizaci a měření Praha. 1970.

- [27] ČSN EN ISO 10360-2: Geometrické požadavky na výrobky (GPS) - Přejímací a periodické zkoušky souřadnicových měřicích strojů (CMM) - Část 2: Souřadnicové měřicí stroje používané pro měření lineárních rozměrů. Praha: Český normalizační institut Praha. 2002.
- [28] ČSN 01 4401: Základní pravidla zaměnitelnosti. Tolerance tvaru a polohy. Základní pojmy a definice. Praha: Úřad pro normalizaci a měření Praha. 1981.
- [29] ČSN EN ISO 5458: Geometrické požadavky na výrobky (GPS) - Geometrické tolerování - Tolerování polohy. Praha: Český normalizační institut Praha. 2000.
- [30] ČSN ISO 4291: Metody hodnocení úchylek kruhovitosti. Měření změn poloměru. Praha: Český normalizační institut Praha. 1994.
- [31] ČSN ISO 4292: Metody. Hodnocení úchylek kruhovitosti. Měření dvou a tříbodovou metodou Praha: Český normalizační institut Praha. 1994.
- [32] ČSN 25 3100 Kalibry hladké pro díry a hřídele. Druhy. Praha: Úřad pro normalizaci a měření. Praha. 1983.