



EVROPSKÁ UNIE  
Evropské strukturální a investiční fondy  
Operační program Výzkum, vývoj a vzdělávání



Vysoká škola báňská – Technická univerzita Ostrava

Fakulta strojní

Katedra obrábění, montáže a strojírenské metrologie

VŠB TECHNICKÁ | FAKULTA | KATEDRA OBRÁBĚNÍ, MONTÁŽE  
UNIVERZITA | STROJNÍ | A STROJÍRENSKÉ METROLOGIE  
OSTRAVA

# Strojírenská metrologie 1

**Ing. Lenka Čepová, Ph.D.**

**Ing. Ondřej Mizera, Ph.D.**

**Ing. Tomáš Zlámal, Ph.D.**

Ostrava 2022

## Obsah

1	Kontrola závitů .....	5
1.1.	Metody kontroly závitů.....	5
1.2.	Kontrola vnějších závitů .....	5
1.2.1.	Komplexní kontrola .....	5
1.2.2.	Měření (kontrola) rozteče (stoupání) P .....	6
1.2.3.	Měření (kontrola) středního průměru závitů.....	8
1.2.4.	Třídrátková metoda .....	8
1.2.5.	Kontrola (měření) vrcholového úhlu závitů .....	11
1.3.	Kontrola vnitřních závitů .....	13
1.3.1.	Komplexní kontrola .....	13
1.3.2.	Měření rozteče (stoupání) .....	14
1.3.3.	Kontrola středního průměru.....	14
1.3.4.	Kontrola vrcholového uhlu .....	15
2	Drsnost povrchu .....	16
2.1	Profilové parametry .....	18
2.1.1	Požadavky na měření.....	31
2.1.2	Kontrola drsnosti povrchu.....	33
	Metody kvalitativní.....	33
	Metody kvantitativní.....	33
2.2	Plošné parametry .....	36
2.2.1	Filtrace povrchu.....	38
2.2.2	Termíny geometrického prvku .....	40
3	Souřadnicová měřicí technika.....	51
	Typy konstrukcí CMM.....	53
	Základní prvky mechanického systému .....	57
	Uložení pohyblivých částí .....	58
	Komplexní měřicí systémy.....	59
	Odměřovací systémy na CMM .....	65
	Snímací systémy .....	69
3.1.1	Řídicí systém.....	77
3.1.2	Princip souřadnicového měření .....	77

Metody měření na CMM .....	79
3.1.3 Programy pro obsluhu a hodnocení měření na CMM .....	80
3.1.4 Dotykové snímací systémy .....	81
3.1.5 Bezdotykové systémy .....	84
4 Optické bezkontaktní metody měření .....	90
4.1 Optické měřicí systémy .....	91
4.1.1 Aktivní .....	91
4.1.2 Pasivní .....	92
4.2 Strukturované světlo .....	92
4.2.1 Temporální kodifikace .....	94
4.2.2 Prostorová kodifikace .....	96
4.2.3 Přímá kodifikace .....	97
4.3 Optické zařízení pro rozměrové měření .....	98
4.3.1 3D skenery .....	98
4.3.2 Handyscan .....	100
4.3.3 Zdroje chyb při měření .....	106
4.3.4 Kontrola přesnosti snímacích hlav .....	107
4.3.5 Ovlivnění přesnosti měřicí sondy .....	108
4.3.6 Ovlivnění přesnosti vlivem opotřebení kuličky dotyku .....	108
4.3.7 Ovlivnění přesnosti vlivem přepočtu souřadnic měřeného bodu .....	109
4.3.8 Přesnost a kontrola CMM .....	110
4.3.9 Vliv chyb na výsledek měření .....	111
4.3.10 Chyby snímání u CMM .....	113
5 Požadavky na metrologické laboratoře .....	114
5.1 Pracovní prostory .....	114
5.2 Přístrojové vybavení .....	114
5.3 Technická způsobilost .....	115
5.4 Stavební realizace metrologických laboratoří .....	115
5.4.1 Mechanické vlivy .....	115
5.4.2 Bezprašnost .....	116
5.4.3 Podlahy .....	116
5.4.4 Osvětlení .....	116

5.4.5	Teplota .....	116
5.4.6	Klimatizace.....	117
5.4.7	Ochrana před elektromagnetickým zářením .....	117
5.4.8	Rozvody energie .....	117
6	Řízení kvality v metrologii.....	118
6.1	Definice kvality .....	118
6.2	Systém řízení měření a zařízení na monitorování měření.....	119
6.3	MSA – Measurement System Analysis.....	120
6.3.1	Variabilita polohy:.....	121
6.3.2	Variabilita rozptylu:.....	122
6.3.3	Variabilita systému: .....	124
7	Použitá literatura: .....	126

# 1 Kontrola závitů

Pro kontrolu závitů vnějších i vnitřních byla vyvinuta řada metod měření a s tím související řada různých mechanických, optických, popř. kombinovaných měřících přístrojů.

Základní parametry závitů jsou (velká písmena platí pro závit vnitřní):

d, D – velký průměr

d<sub>2</sub>, D<sub>2</sub> – střední průměr

d<sub>1</sub>, D<sub>1</sub> – malý průměr

$\alpha$  - úhel profilu

P – rozteč

Nepřesnosti provedení závitů měříme buď komplexně (souhrnně) nebo jednotlivé parametry (díličí kontrola). V sériové a hromadné výrobě kontrolujeme závity nejčastěji komplexně, kdy zjišťujeme, zda skutečné parametry závitu se nacházejí v tolerančním poli závitu. K této kontrole používáme závitové kalibry.

## 1.1. Metody kontroly závitů

Metody kontroly závitů dělíme:

- kontrola komplexní (souhrnná – závit je kontrolován jako celek). Tato kontrola se používá v sériové a hromadné výrobě, kde závity kontrolujeme komplexně, kdy zjišťujeme, či se skutečné parametry závitu a nacházejí v tolerančním poli. K této kontrole používáme závitové kalibry.
- kontrola parametrická (díličí kontrola) – jednotlivé parametry závitu jsou kontrolovány samostatně.

Vzhledem k prostorové dispozici závitu rozlišujeme kontrolu:

- šroubů – vnějších závitů,
- matic – vnitřních závitů.

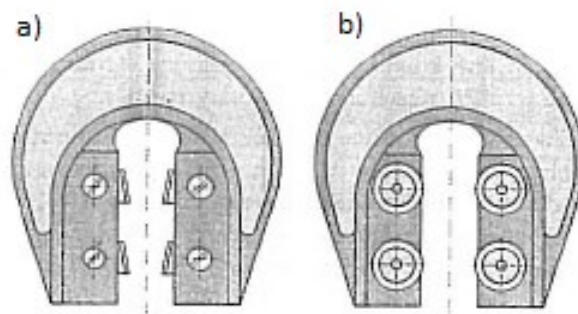
Pro kontrolu závitů vnějších a vnitřních byla vyvinutá řada metod měření a s tím související řada různých mechanických, optických, popřípadě kombinovaných měřících přístrojů.

## 1.2. Kontrola vnějších závitů

### 1.2.1. Komplexní kontrola

Kontrola se uskutečňuje za pomoci:

- pevných závitových kroužků – dobrá strana (DS) závitového kroužku se musí lehce šroubovat,
- třmenových kalibrů (obr. 20) – dobrá strana (DS) závitového třmenového kalibru, musí lehce projít vlastní hmotností kontrolovaného závitu.



Obr. 1 Mezní závitové třmenové kalibry a) hřebíkový b) rolničkový kalibr

Splněním podmínek se zaručí, že střední průměr závitu  $d_2$  nepřekročí horní mezní rozměr (HMR), a chyby stoupání  $P$  a úhlu boku závitu  $\alpha$  jsou vyrovnané s příslušným zmenšením  $d_2$ .

### 1.2.2. Měření (kontrola) rozteče (stoupání) $P$

Měření rozteče je důležitá veličina a to z pohledu výroby a z hlediska přesnosti některých zařízení. Stoupání závitu je definováno jako axiální pohyb středu boku závitu vztahovaný na osu závitu a odpovídající jedné celé otáčce tohoto boku. Měří se na profilu závitu od jednoho boku závitu ke druhému o stejné orientaci, nebo od středu ke středu závitové drážky.

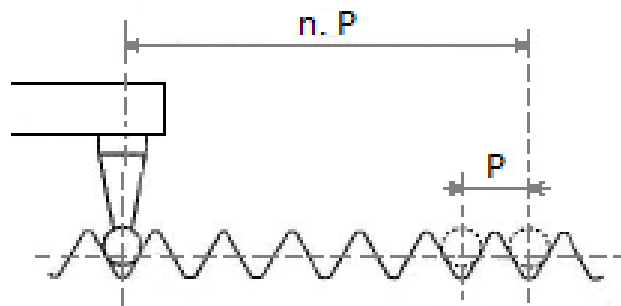
Pro kontrolu rozteče používáme následující měřicí přístroje:

**Hřebíkové šablony** – je to rychlá kontrola informativního charakteru (přiložením hřebíkové šablony na šroub), viz obr. 21. Jsou vhodné pro dílenský provoz a umožňují rychlou kontrolu během výroby.



Obr. 2 Hřebíkové šablony pro kontrolu stoupání závitu

**Standardní přístroje** - na měření délek, vybavené kuličkovými dotyky, které používáme pro přesnější měření (obr. 22).



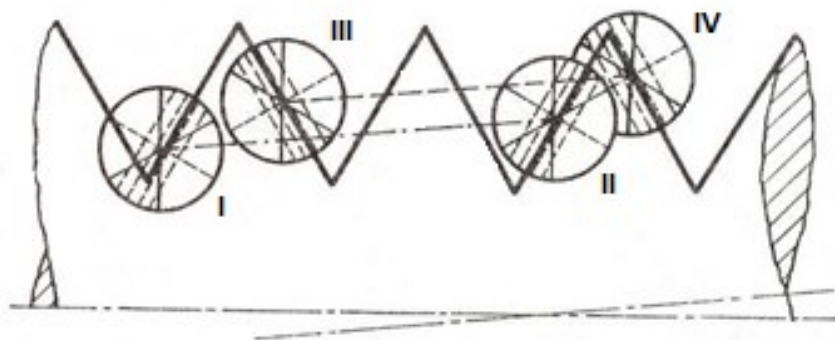
Obr. 3 Schéma měření stoupání na délkovém měřidle pomocí kuličkových měřicích dotyků

**Dílenský (univerzální) mikroskop** – používá se pro přesné měření rozteče závitů, které se provádí na mikroskopu s použitím úhlového okuláru.

Kontrola měření pomocí metod:

- **světelného řezu** - v mikroskopu se nastaví stínový obraz závitů. Měření je možno provést na sousedních bocích (1 rozteč), nebo je možno měřit přes několik závitů a výslednou hodnotu podělit jejich počtem,
- **osového řezu**, princip odměřování je stejný, s tím rozdílem že se na boky závitů přiřkládají měřicí nožíčky.

**Princip měření:** - vychází se ze základní polohy nitkového kříže, kde jeho střed se nastaví na jeden závit a odčítá se jeho příslušná hodnota v podélném směru, stínový obraz se přesune na druhý bok a odčítá se naměřená hodnota kontrolovaného závitů. Naměřené hodnoty se odčítají na podélných saních. Výsledná naměřená hodnota je průměrná hodnota ze všech měření.



Obr. 4 Schéma měření rozteče (stoupání) metodou stínového obrazu

Vztahy pro výpočet rozteče [mm]:

$$P_{(levé)} = II - I \quad (\text{levá strana boku závitů})$$

$$P_{(pravé)} = IV - III \quad (\text{pravá strana boku závitu})$$

Výsledná naměřená hodnota (měření se provede přes 2 závity, viz schéma měření):

$$P = \frac{P_{(levé)} - P_{(pravé)}}{4} \quad [mm]$$

nebo:

$$2P = \frac{(II - I) + (IV - III)}{2} \quad [mm]$$

Nejistota měření metodou stínového obrazu:

dílenský mikroskop:  $U \cong \pm \left(7 + \frac{3P}{100}\right) \quad [\mu m]$

univerzální mikroskop:  $U \cong \pm \left(4 + \frac{3P}{100}\right) \quad [\mu m]$

### 1.2.3. Měření (kontrola) středního průměru závitu

Střední průměr závitu se kontroluje měřidly, podle požadované přesnosti:

- **mikrometrickými** – na měření se využívají speciálně upravené dotyky ve formě vyměnitelných závitových čelistí, které jsou odstupňované podle stoupání, nebo použitím měřicích drátků,
- **délkoměry** – použitím měřicích drátků,
- **mikroskopy** – měření na mikroskopech se uskutečňuje ve formě světelného, nebo osového řezu za pomoci uhlového okuláru.

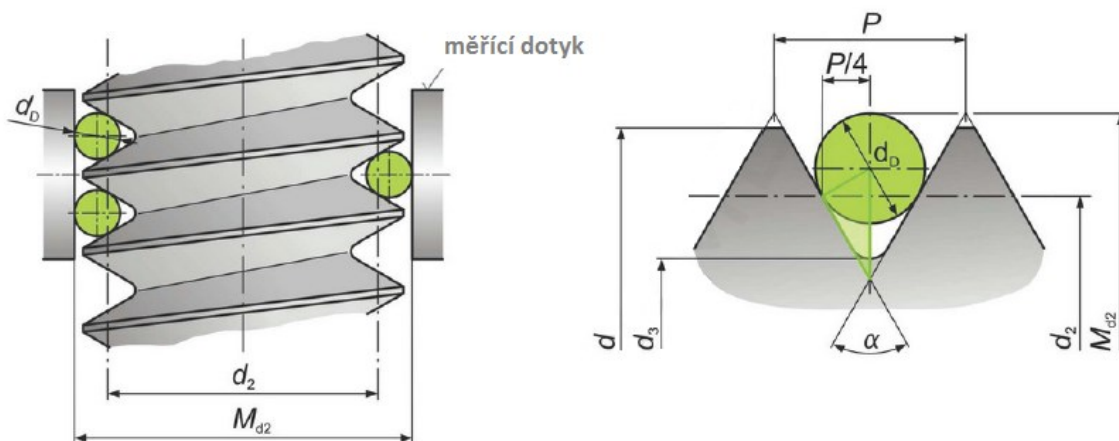
### 1.2.4. Třídrátková metoda

Je definovaná jako nepřímé měření, při kterém se zjišťuje střední průměr závitu za pomoci tří drátků - tzv. rozměr přes drátky (obr. 24). Jedná se o normalizovanou metodu.

Kontrola měřidly (závisí od požadované přesnosti):

- mikrometrem - který je přizpůsoben k měření na stojánku, schéma měření je zobrazena na obr. 25,
- univerzálním délkoměrem – schéma měření je uvedeno na obr. 26.

**Princip měření:** Pro daný typ závitu na základě rozteče se vyberou příslušné drátky o průměru  $d_d$  (hodnoty jsou tabulkové), potom se délkovým měřidlem (mikrometrem nebo univerzálním délkoměrem) změří rozměr přes drátky  $Md_2$  a vypočítáme střední průměr závitu  $d_2$ .



Obr. 5 Schéma měření středního průměru metrického závitu trojdrátkovou metodou

Vztah pro výpočet průměru drátku:

$$d_d = \frac{P}{2 \cos(\alpha/2)} \quad [mm]$$

Teoretický rozměr přes drátky se určí ze vztahu :

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

kde:

$k_1$  – korekce zohledňující úhel stoupání šroubovice ( $k_1 = 1 \div 2 \cdot m$ ),

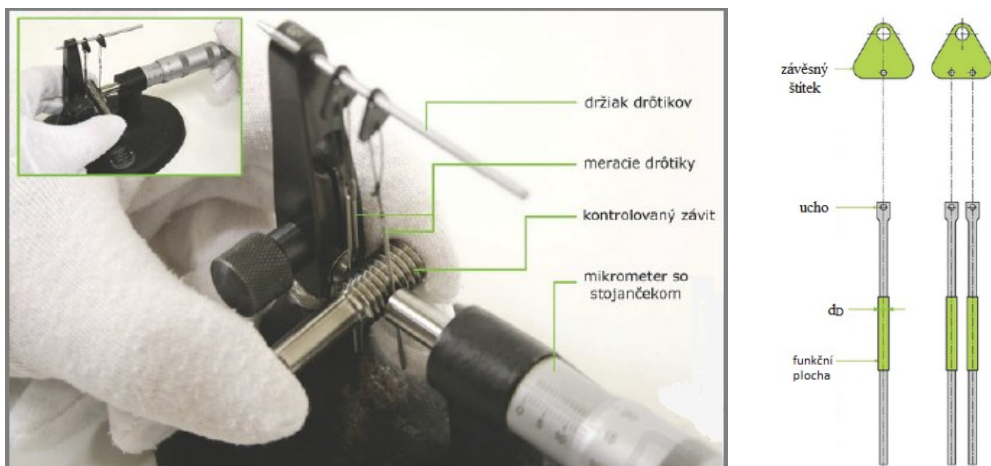
$k_2$  – korekce zohledňující měřicí tlak (hodnoty jsou tabulkové).

Vztah pro výpočet metrického závitu:

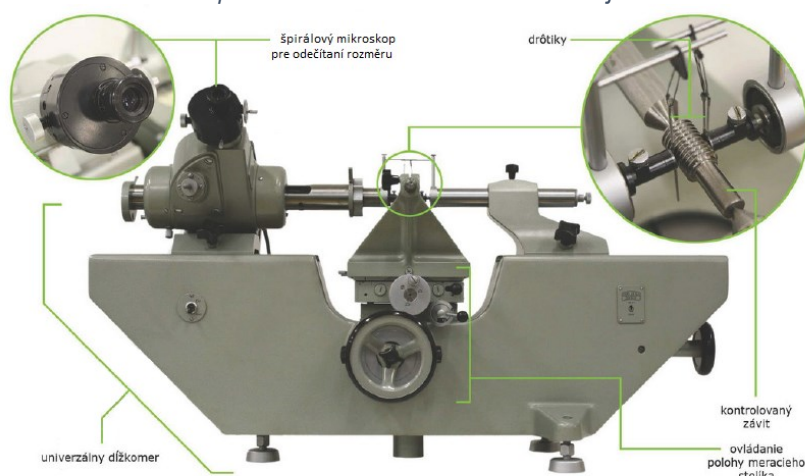
$$d_2 = Md_2 - 2x \quad [mm]$$

kde:

hodnota  $2x$  je vypočítaná z geometrických vztahů a je udaná v tabulce.



Obr. 6 Měření středního průměru závitu na mikrometru se stojánkem sada měřících drátků

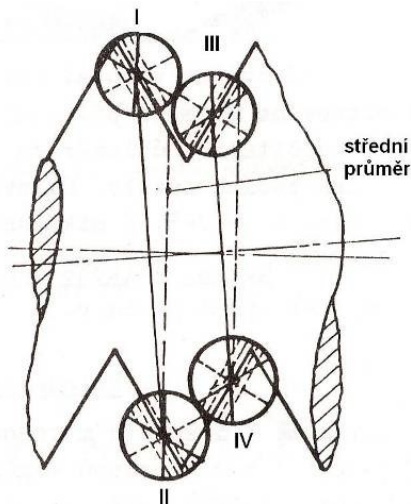


Obr. 7 Měření středního průměru závitu na univerzálním dĺžkoměru ZEISS ULM 450

### Kontrola pomocí dílenského (univerzálního) mikroskopu:

- metoda stínového odrazu - schéma měření je na obr. 27,
- metoda osového řezu za pomoci závitových nožíků.

**Princip měření:** spočívá, v tom že se nastaví průsečík nitkového kříže mikroskopu na dva proti sobě ležící boky závitu a odečítají se naměřené hodnoty. Rozdíl posunutí v příčném směru je přímo střední průměr závitu. Abychom eliminovali případnou chybu kolmosti směru měření (příčného posuvu) k ose závitu, provádíme vždy měření i na opačných bocích závitu stejným způsobem. Při tomto způsobu měření je možno vidět i vznik chyby měření.



Obr. 8 Schéma měření středního průměru závitu za pomoci mikroskopu

Vztahy pro výpočet středního průměru [mm]:

$$d_2(\text{levé}) = II - I \quad (\text{levá strana boku})$$

$$d_2(\text{pravé}) = IV - III \quad (\text{pravá strana boku})$$

Výsledná naměřená hodnota:

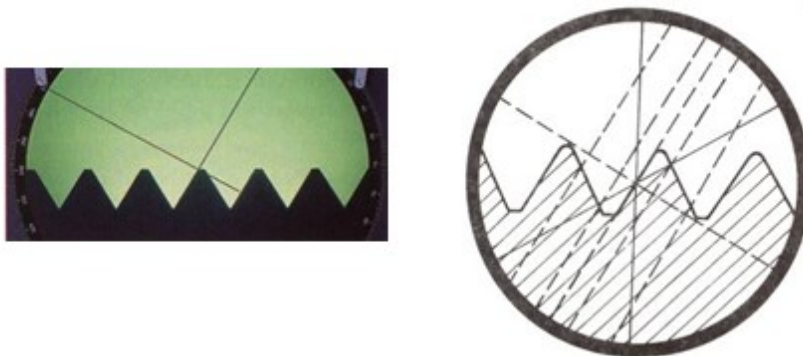
$$d_2 = \frac{d_2(\text{levé}) - d_2(\text{pravé})}{2} \quad [\text{mm}]$$

nebo:

$$d_2 = \frac{(II - I) + (IV - III)}{2} \quad [\text{mm}]$$

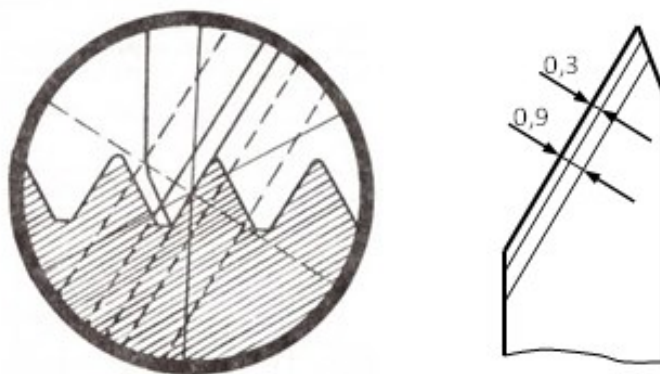
### 1.2.5. Kontrola (měření) vrcholového úhlu závitu

**Pomocí dílenského (univerzálního) mikroskopu** - při měření vrcholového úhlu se používá hlavice mikroskopu s pomocným (úhlovým) okulárem (odečítáme úhlové stupně a minuty). V případě že použijeme mikroskop s revolverovou hlavicí, kde na skleněné destičce jsou vyryty přesné profily závitu metrického, Whitworthova, úhly 30° a 40° ke kontrole lichoběžníkového závitu, můžeme kontrolovat rovněž zaoblení (poloměr), sražení apod.



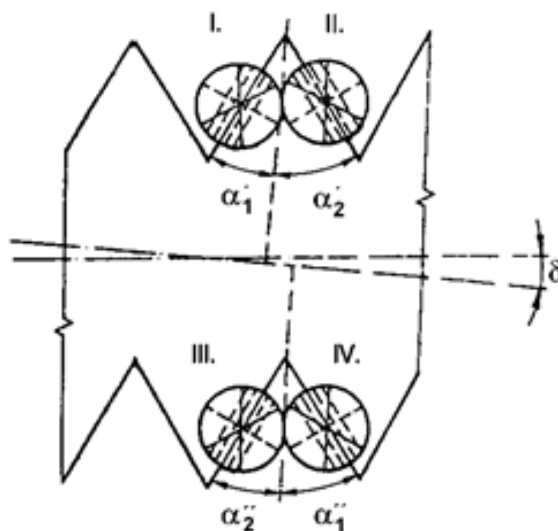
Obr. 9 Obraz závitu v okuláru mikroskopu

**Metoda za pomoci závitových nožíků v osovém řezu** – nožíky se nechávají dolehnout na bok závitů. Nožíky mají na čelní ploše vyryté přesné rysky (ve vzdálenosti 0,3 nebo 0,9 mm), které se ztotožňují s ryskami, které jsou v okuláru mikroskopu. Nožíky se dodávají levé, pravé a s čelním břitem pro přesná měření např. hladkých průměrů. Vlastní měření parametrů závitů se provádí stejnými postupy jako u metody stínového obrazu.



Obr. 10 *Obraz závitů v okuláru osového řezu a jeho měřicí nožík*

**Princip měření stínového odrazu** – do zorného pole hlavního okuláru se nastaví stínový obraz závitů, kde jedna ryska v tomto obrazu se ztotožní s bokem závitů. Při měření úhlů musí být osa středících důlků totožná s osou závitů, za které je vzorek uchycen v hrotech měřicího přístroje. Musí se tedy vyjít vždy z nulové polohy úhlového okuláru (musí být nastaven na  $0^\circ 0'$ ). Chyba nesprávného nastavení os se vyloučí měřením úhlů rovněž na protější straně závitů (obr. 30).



Obr. 11 *Schéma měření vrcholového úhlu za pomoci*

Vztahy pro výpočet vrcholového úhlu:

$$\alpha_1 = \frac{\alpha_1' + \alpha_1''}{2} \quad [^\circ]$$

$$\alpha_2 = \frac{\alpha_2' + \alpha_2''}{2} \quad [^\circ]$$

$$\alpha = \alpha_1 + \alpha_2 \quad [^\circ]$$

U závitu s větším úhlem stoupání šroubovice nevidíme z důvodu prostorového zakřivení šroubové plochy ostrý obraz měřeného závitu. Pro vyloučení této nepřesnosti je potřebné vyklonit měřicí hlavici o střední úhel šroubovice  $\beta$ , který je vyjádřený vztahem:

$$\beta = 18,25 \frac{P}{d_2} \quad [^\circ]$$

kde:

P - rozteč závitu [mm],

d<sub>2</sub> - střední průměr měřeného závitu [mm].

Nepřesnost měření metodou stínového obrazu:

$$U = \pm \left( 5 + \frac{3}{\sin \frac{\alpha}{2}} + \frac{L}{4} \right) \quad [\mu m]$$

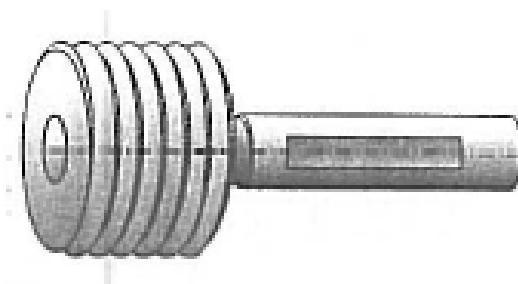
kde:

L - měřená délka [mm].

### 1.3. Kontrola vnitřních závitů

#### 1.3.1. Komplexní kontrola

Kontrola se uskutečňuje za pomoci mezního závitového válečkového kalibru (obr. 31), který má oddělenou dobrou stranu (DS) a zmetkovou stranu (ZS).



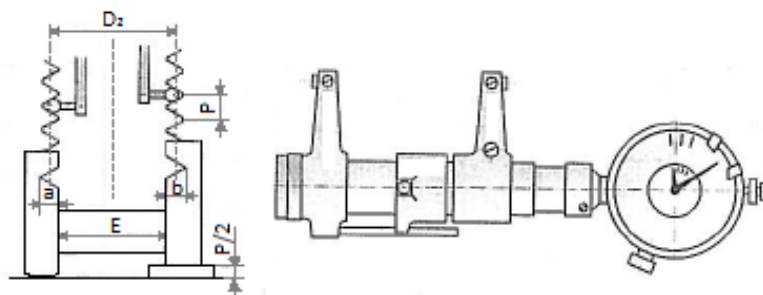
Obr. 12 Mezní jednostranný závitový válečkový kalibr

### 1.3.2. Měření rozteče (stoupání)

V závislosti od jmenovitého průměru a přesnosti měření rozeznáváme více metod:

**Pomocí kuličkových dotyků** (obr. 32) – kuličkové dotyky musí dosedat v závitové mezeře na roztečném průměru závitu. Příklad je potřeba nastavit na žádanou hodnotu pomocí základních koncových měrek.

$$E = D_2 + 0,86603P - (a + b)$$



Obr. 13 Měření stoupání a průměru vnitřního závitu pomocí kuličkových dotyků

**Za pomoci měřicích mikroskopů (u větších průměrů)** – možno uskutečnit pomocí upravené hlavice a to tak, že optická osa tvoří 90°, přičemž kontrolovaný závit se promítá v zorném poli okuláru a osa vložené části vsunutá do závitové části, musí být rovnoběžná s osou měřeného závitu,

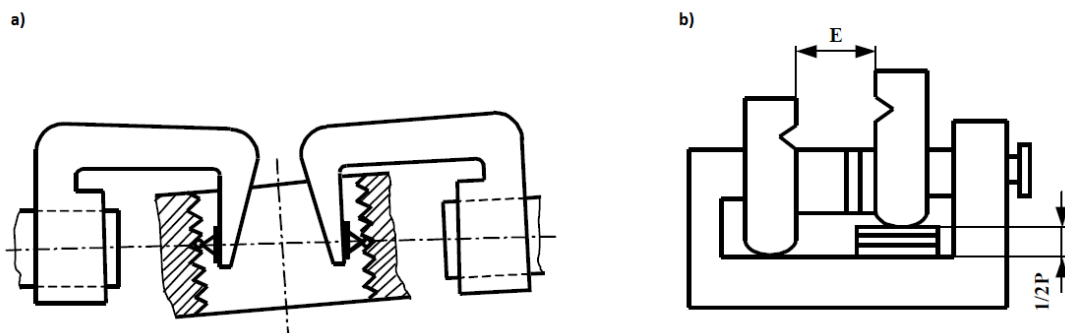
**Za pomoci souřadnicových měřicích strojů (CMM)** – číselné vyhodnocení měření vychází z konvenční třídrátkové metody. Výhodou CMM je jeho univerzálnost a možnost měřit různé druhy závitů (válcové, kuželové, symetrické, nesymetrické, vnější, vnitřní).

### 1.3.3. Kontrola středního průměru

Provádí se na univerzálním délkoměru – je to přesnější kontrola, kde se nastaví ramena na vnitřní měření s vyměnitelnými kuličkovými dotyky.

**Princip měření:** Součástka je volně uložena na pohyblivém stolíku, kdy ramena se nastaví na požadovaný rozměr za pomoci přípravku (koncových měrek a šablon s profilem kontrolovaného závitu), potom se určí podle tabulky vzdálenost  $E$  a nastaví se za pomoci koncových měrek (KM). Na tuto vzdálenost se pomocí PC nastaví počáteční poloha měřeného dotyku, která odpovídá střednímu průměru  $D_2$ .

Při kontrole větších průměrů se používají mikrometrické odpichy opatřené závitovými vložkami.



Obr. 14 *Kontrola středního průměru matice*  
 a) *princip kontroly* b) *nastavení ramen*

#### 1.3.4. Kontrola vrcholového uhlu

Lze provádět na optickém mikroskopu – možno provést obdobně jako u měření rozteče, kde se speciálně upraví hlavice mikroskopu.

Měření je možno provádět:

- přímo – je velmi obtížné,
- nepřímo – možno provádět obtiskovou metodou (kontrola se provede na otisku kontrolovaného závitu).

## 2 Drsnost povrchu

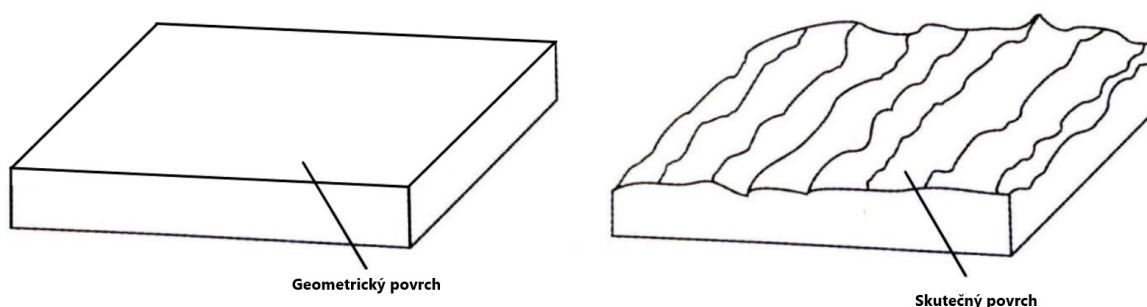
Základním zdrojem pro posuzování struktury povrchu je profil povrchu, který se získá vhodným umístěním v rovině rezu zkoumané topografie obrobenej plochy. Strukturu povrchu charakterizuje norma ČSN EN ISO 4287 „Geometrické požadavky na výrobky (GPS) – struktura povrchu: Profilová metoda – Termíny, definice a parametry struktury povrchu“.

Povrch představuje hranici jednoho objektu od objektu druhého, popř. od prostředí.

**Geometrický povrch** – je ideálním povrchem, jehož rozměry, tvar a geometrické vlastnosti předepisuje výkres, nebo jiná technická dokumentace.

**Skutečný povrch** – je povrch, který ohraničuje těleso a odděluje ho od okolního prostředí. Jeho strukturu posuzujeme podle **profilu povrchu**, který vzniká jako průsečnice skutečného povrchu a vhodně zvolené roviny, přičemž v praxi se obvykle volí rovina kolmá k rovině rovnoběžné se skutečným povrchem ve vhodném směru (viz. Obr. 15).

Na Obr. 15 je zobrazeno srovnání geometrického a skutečného povrchu.



Obr. 15 Srovnání geometrického (vlevo) a skutečného povrchu (vpravo)

**Základní povrch** – je skutečný povrch, naměřený měřicím zařízením. Rozdíl mezi základním povrchem a skutečným povrchem je ten, že ani měřicí zařízení nejsou dokonale přesná, a tedy nejsou schopny dokonale naměřit skutečný povrch. Z toho důvodu je zaveden pojem základní povrch.

**Periodický povrch** – je povrch s výrazným směrem nerovností. Vzniká tak, že výrobní nástroj vytváří v povrchu obráběné součásti stopy v určitém směru, např. při soustružení, frézování, broušení atd. Aby bylo možné správně změřit charakteristiku takového povrchu, je nutné měřit kolmo ke směru nerovností. V případě zvolení chybného směru měření je rozsah naměřený hodnoty z pravidla menší a povrch je tedy vyhodnocen jako přesnější, než ve skutečnosti je.

**Aperiodický povrch** – je povrch s nevýrazným směrem nerovností. Výrobní nástroj v povrchu obráběné součásti nevytváří nerovností s význačným směrem. Vzniká např. při odlévání, kování atd. Na rozdíl od periodického povrchu zde není důležitý směr snímání,

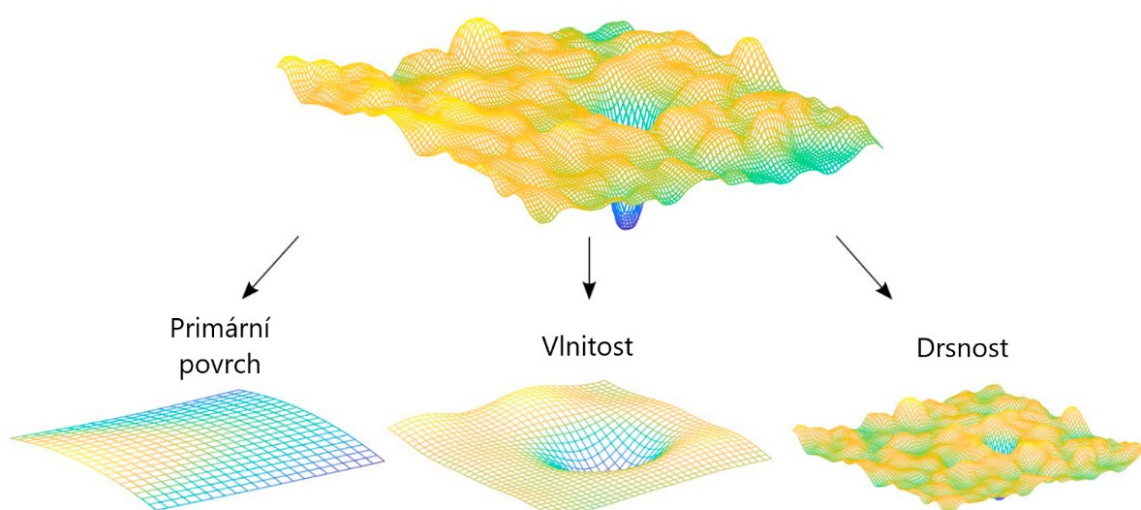
protože nerovnosti jsou nahodilé a neuspořádané. Periodický a aperiodický povrch je znázorněn na obr. 15.

Žádný opracovaný povrch není geometricky dokonalý. Obrobený povrch obsahuje řadu nerovností, které vytváří strukturu povrchu. Jednotlivé nerovnosti se od sebe odlišují např. rozdílnými roztečemi, vlivem na funkci povrchu a velikostí. Dle velikosti lze nerovnosti dělit na mikronerovnosti a makronerovnosti.

**Mikronerovností** je myšlena jemná nerovnost, která je dána stopami po řezném nástroji, popř. brusivu. Příkladem mikronerovnosti je drsnost.

**Makronerovností** je myšlena rozlehlejší periodická nerovnost, která je způsobena např. vibrací či chvěním soustavy stroj-nástroj-obrobek-prostředí, nepřesností uložení, nedostatečnou tuhostí atd. Příkladem makronerovnosti je vlnitost. Kromě drsnosti a vlnitosti se do nerovností řadí také úchyly tvaru.

Ve skutečnosti se všechny tyto nerovnosti obrobeného povrchu překrývají. Vady materiálu ve formě trhlin a pórů, popř. vady poškození náhodného charakteru ve formě rýh se nezahrnují do struktury povrchu.

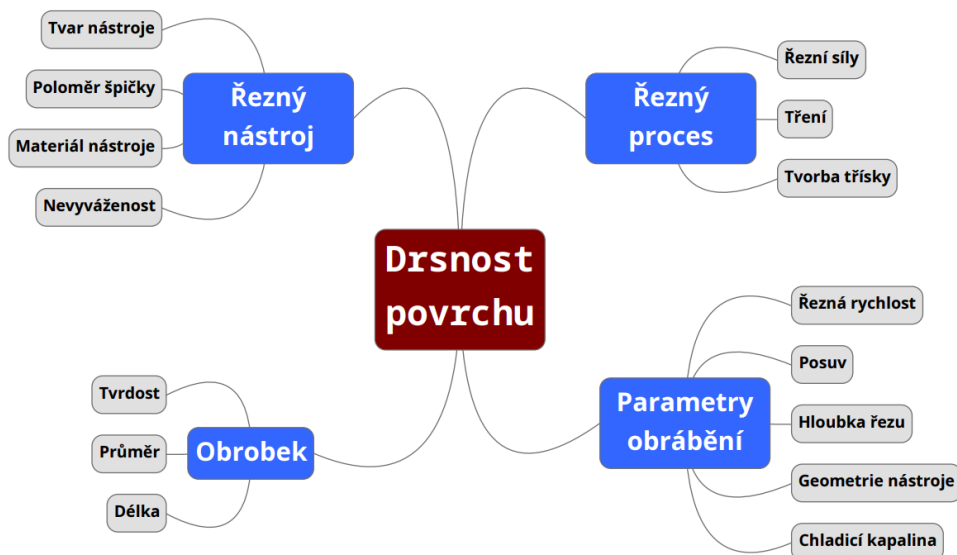


Obr. 16 Zobrazení struktury povrchu

**Drsnost** – je nejmenší nerovností, která vzniká při procesu výroby vzájemným působením relativního pohybu mezi nástrojem a obrobkem. Tento vzájemný pohyb a působení řezných si zanechává na povrchu stopy, které mohou mít periodický, nebo aperiodický tvar. Kromě vzájemného pohybu ovlivňuje povrch tak mechanismus tvorby třísky. Ten se může projevit například vytrháváním části materiálu. Příklad parametrů ovlivňující drsnost je uveden na obr. 16.

**Vlnitost** – je oproti drsnosti rozměrnější nerovností. Na této nerovnosti je superponována drsnost. Vlnitost je považována spíše za vliv působena výrobního stroje na obráběnou součást. Srovnání vlnitosti a drsnosti je zobrazeno na obr. 16.

**Primární povrch** – tvar plochy je skutečný povrch při vyloučení drsnosti a vlnitosti. Úchylka primárního povrchu může být způsobena např. teplem vzniklým v průběhu výrobního procesu, nízkou tuhostí, špatnou přímostí vodících ploch atd.



Obr. 17 Příklad parametrů ovlivňujících drsnost

Drsnost povrchu lze označit jako jeden z nejdůležitějších parametrů tzv. integrity povrchu. Názvem integrita povrchu je nazýván soubor vlastností povrchové vrstvy, která byla změněna technologickým procesem a má rozdílné vlastnosti vzhledem k základnímu materiálu. Na drsnosti povrchu do značné míry závisí přesnost chodu strojních součástí, jejich hlučnost, doba záběru, ztráty třením, elektrická vodivost, přestup tepla, únavová pevnost, odolnost proti opotřebení, korozi a další vlastnosti. Základním předpokladem pro jakoukoliv klasifikaci povrchu nebo předpověď funkčního chování při daném způsobu zatěžování je tedy co nejpresnější a nejúplnější popis jeho mikrogeometrie.

## 2.1 Profilové parametry

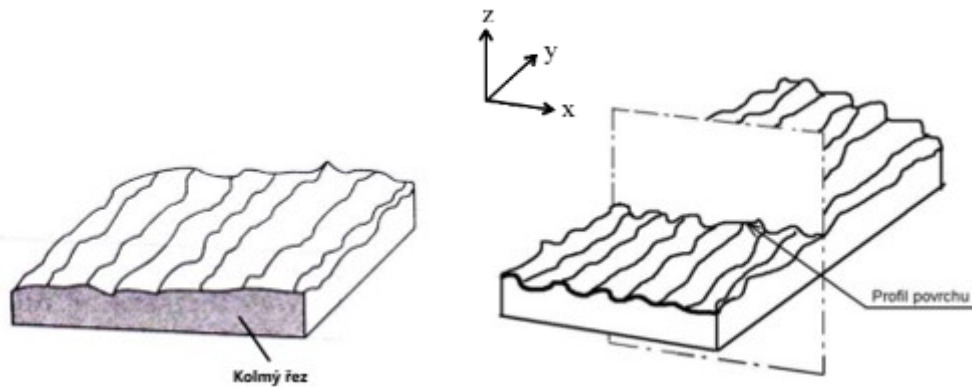
Při hodnocení charakteru profilu vychází normy z profilové metody, tzn. hodnotí povrch z profilu povrchu, tzn. z čáry, která vznikne řezem skutečného povrchu definovanou plochou. V praxi se obvykle vybere rovina, jejíž normále je rovnoběžná se skutečným povrchem a má vhodný směr. Vhodný směr je ten, v němž je možné zjistit větší hodnoty parametrů charakteru povrchu (příčný profil).

**Kolmý řez** – je řez kolmý k základnímu profilu

**Šikmý řez** – je řez skloněný vůči základnímu profilu

**Profil povrchu** – průsečnice povrchu s rovinou řezu

**Skutečný profil** – průsečnice skutečného profilu s rovinou řezu

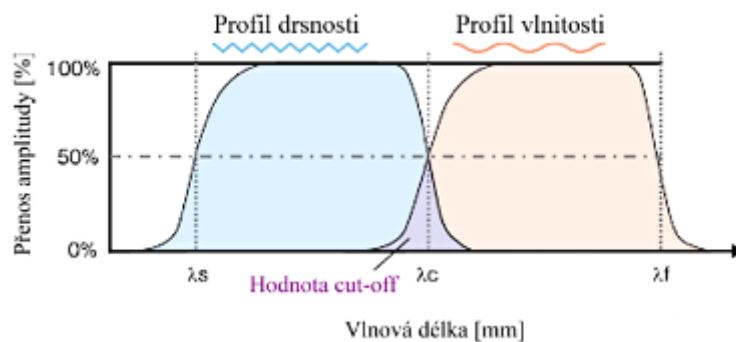


Obr. 18 Profil povrchu.

Analýza profilu povrchu se provádí separací jednotlivých složek filtrování. Filtr profilu rozděljuje na profily na dlouhovlnné a krátkovlnné složky. Norma ČSN ISO 16610-21 specifikuje metrologické charakteristiky Gaussova filtru pro filtraci, tzv. jak oddělit dlouhé a krátké vlny složky profilu povrchu.

Definujeme tři filtry profilu, které jsou opsané v normě ČSN EN ISO 4287

- **$\lambda_s$  filtr profilu** pro rozhraní mezi drsností a kratšími složkami vln přítomnými na povrchu,
- **$\lambda_c$  filtr profilu** pro rozhraní mezi složkami drsnosti a vlnitostí,
- **$\lambda_l$  filtr profilu** pro rozhraní mezi vlnitostí a delšími složkami vln přítomných na povrchu.



Obr. 19 Přenosová charakteristika profilu drsnosti a vlnitosti

Filtry slouží k oddělení frekvenčních složek nerovností profilu povrchu. Pomocí filtru  $\lambda_s$  se odfiltrují od naměřeného profilu složky s kratší vlnovou délkou. Při aplikaci krátkovlnného filtru  $\lambda_s$  na skutečný profil vznikne **primární (základní) profil**.

Pro získání profilu drsnosti (roughness profile) je zapotřebí použít filtry  $\lambda_s$  a  $\lambda_c$ , následně je potřeba stanovit střední čáru profilu drsnosti. A norma ČSN EN ISO 3274 udává vztah mezi mezní vlnovou délkou (cut-off) drsnosti  $\lambda_c$ ,  $\lambda_s$  a největší roztečí bodů (viz tab. 1).

Profil vlnitosti (waviness profile) – vzniká ze základního profilu potlačením krátkovlnných složek filtrem  $\lambda_c$  a dlouhovlnných složek filtrem  $\lambda_f$ , přičemž před aplikací dlouhovlnného filtru  $\lambda_f$  je zapotřebí odstranit jmenovitý tvar analyzovaného povrchu.

Tab. 1 Vztah mezi mezní vlnovou délkou drsnosti (cut-off)  $\lambda_c$ ,  $\lambda_s$  a roztečí snímaných bodů profilu.

$\lambda_c$ [ $\mu\text{m}$ ]	$\lambda_s$ [ $\mu\text{m}$ ]	Největší rozteč bodů profilu [ $\mu\text{m}$ ]
0,08	2,5	0,5
0,25	2,5	0,5
0,8	2,5	0,5
2,5	8	1,5
8	25	5

Pro analýzu povrchu je zapotřebí stanovit střední čáru pro jednotlivé profily.

**Střední čára drsnosti povrchu** – je čára odpovídající dlouhovlnné složce profilu potlačené filtrem profilu  $\lambda_c$ .

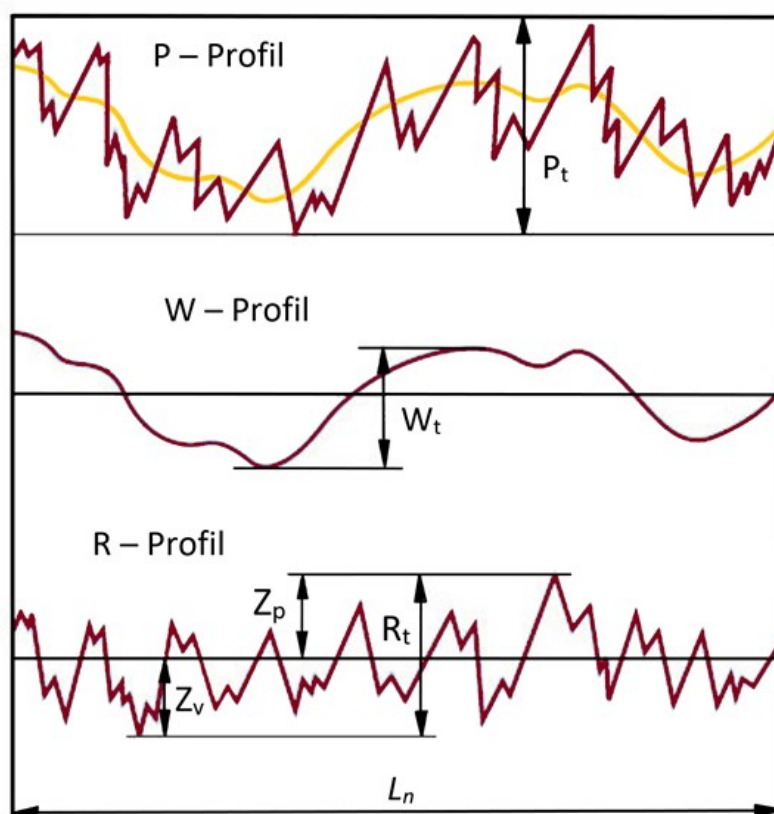
**Střední čára vlnitosti** – je pro profil vlnitosti a představuje dlouhovlnné složky profilu potlačené filtrem profilu  $\lambda_f$ .

**Střední čára základního profilu** - je čára nejmenších čtverců přiléhající jmenovitému tvaru základního profilu.

Rozteč příslušných nerovností charakterizuje strukturu povrchu a dělí ji na složky. Složka s nejmenší roztečí tvoří drsnost povrchu, dále existuje složka nazvaná vlnitost povrchu a největší rozteč nerovností určuje základní profil.

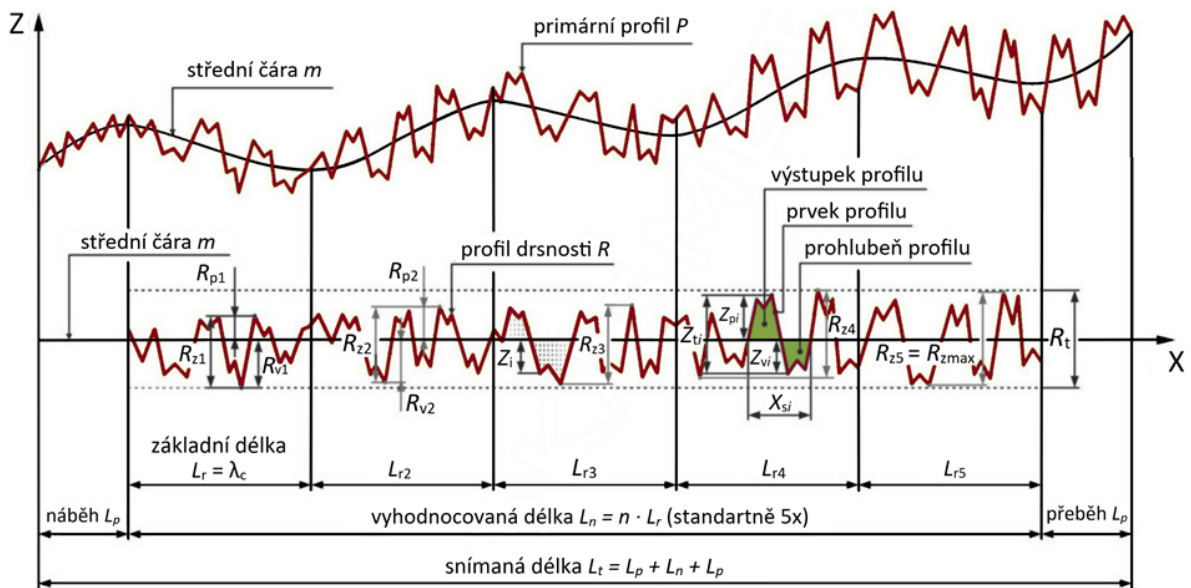
Parametre profilu povrchu zajišťují kvantifikovanou formu popisu vlastností topografie povrchu. Mezi parametre povrchu zařadujeme (viz Obr.20):

- ***P* – parametr** vypočítaný z primárního (základního) profilu,
- ***R* – parametr** vypočítaný z profilu drsnosti,
- ***W* – parametr** vypočítaný z profilu vlnitosti.



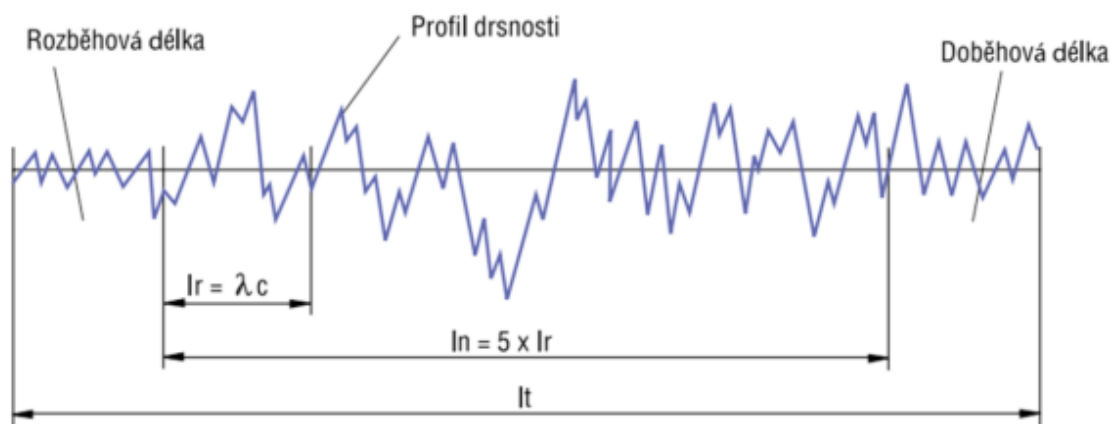
Obr. 20 Profily

U měřidel na měření drsnosti se používají tři délky: snímaná délka, vyhodnocovaná délka a základní délka. Snímaná délka je celková délka pohybu snímacího dotyku po měřeném povrchu. Na výpočet statistických parametrů se používají údaje, které jsou obsaženy ve vyhodnocované délce, která může obsahovat jednu anebo několik základních délek (obvykle pět).



Obrázek 21 Snímaná, vyhodnocovaná a základní délka

Norma ČSN EN ISO 4288 specifikuje pravidla a postupy pro posuzování struktury povrchu. Norma stanovuje základní délku drsnosti  $l_r$  a potřebnou vyhodnocovanou délku  $l_n$  drsnosti (viz. obr.22) pro měření R-parametrů periodických i neperiodických povrchů.



Obr. 22 Profil drsnosti a vztah mezi délkovými parametry

**Základní délka  $l_r$**  (sampling length) – délka základní čáry ve směru osy x, používaná na oddělení nerovností charakterizujících vyhodnocovaný profil. Měří se v hlavním směru profilu. Základní délka  $l_r$  primárního profilu odpovídá mezní vlnové délce  $\lambda_c$ .

**Vyhodnocovaná délka  $l_n$**  (evaluation length) – délka ve směru osy x, použitá pro posouzení vyhodnocovaného profilu.

**Celková délka  $l_t$**  – délka pohybu snímače, během kterého se snímají úchytky tvaru plochy.

### Parametry drsnosti vztahované na prvek profilu:

$Z_{pi}$  – výška největšího výstupku,

$Z_{vi}$  – hloubka nejnižší prohlubně,

$Z_{ti}$  – výška prvku profilu,

$X_{si}$  – šířka prvku profilu.

### Parametry drsnosti vztahované na základní délku:

$R_{pi}$  – Největší výška výstupku profilu,

$R_{vi}$  – Největší hloubka prohlubně profilu,

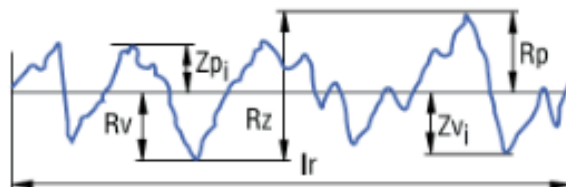
$R_{zi}$  – Největší výška profilu,

$R_c$  – průměrná výška profilu.

### Výškové parametry:

#### Výškové parametry (výstupky a prohlubně):

**Největší výška výstupku profilu  $R_p$**  (maximum profile peak height) - výška  $Z_p$  nejvyššího výstupku profilu v rozsahu základní délky  $l_r$  (viz. Obr. 23)

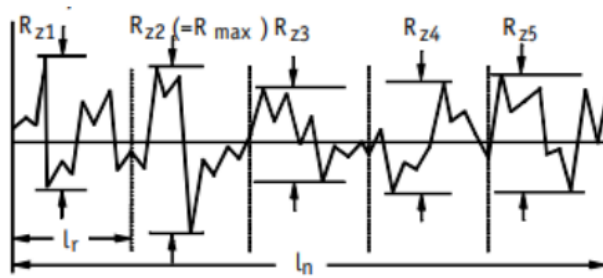


Obr. 23 Výškové parametry profilu drsnosti

**Největší hloubka prohlubně profilu  $R_v$**  (maximum profile valley depth) – hloubka  $Z_v$  nejnižší prohlubně profilu v rozsahu základní délky  $l_r$  (viz. obr.23)

**Největší výška profilu  $R_z$**  (maximum height of profile) - je definované jako součet výšky  $Z_p$  nejvyššího výstupku profilu a hloubky  $Z_v$  nejnižší prohlubně profilu v rozsahu základní délky  $l_r$  (viz obr. 23)

$$R_z \doteq \frac{1}{n} \cdot \sum_{i=1}^n R_{zi}$$



Obr. 24 Největší výška profilu Rz

$$Rz = Zp + Zv$$

Kde:  $Zp$  – výška největšího výstupku v rozsahu základní délky  $l_r$  [ $\mu\text{m}$ ];

$Zv$  – hloubka nejnižší prohlubně v rozsahu základní délky  $l_r$  [ $\mu\text{m}$ ].

**Průměrná výška profilu  $R_c$**  (mean height of profile elements) – je definováno jako průměrná hodnota výšek  $Z_t$  prvků profilu v rozsahu základní délky  $l_r$ .

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

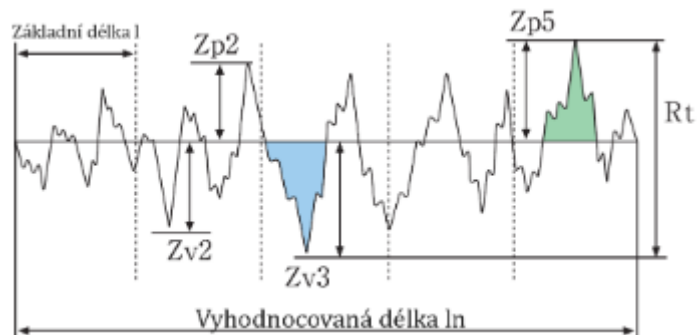


Obr. 25 Průměrné výšky prvků  $R_c$  na profilu drsnosti

- U tohoto parametru je vyžadováno minimální omezení výšky a délky a obě tato omezení musí být splněna. Výškové omezení<sup>3</sup> je reprezentováno parametry  $R_z$ , pro které se udává minimální omezení 1%. Omezení délky musí být nejméně 10% ze základní délky.

**Celková výška profilu  $R_t$**  (total height of profile) – je definováno jako součet výšky  $Z_p$  nejvyššího výstupku profilu a hloubky  $Z_v$  nejnižší prohlubně profilu v rozsahu vyhodnocované délky  $l_n$ .

$$R_t = \max(Z_{pi}) + \max(Z_{vi})$$



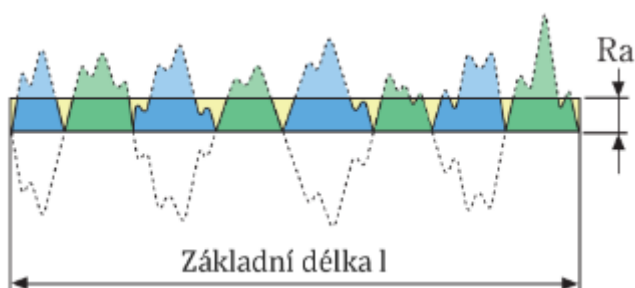
Obr. 26 Celková výška profilu  $R_t$  na profilu drsnosti

- V podstatě se jedná o stejný parametr jako je největší výška profilu  $R_z$ . Narozdíl od ní se celková výška profilu nevyhodnocuje na základě délce, ale na délce vyhodnocované, tj. že hodnoty parametru celkové výšky profilu budou vždy stejné nebo vyšší (viz Obr.26)

**Výškové parametry (průměrné hodnoty souřadnic):**

**Průměrná aritmetická odchylka profilu  $R_a$**  (arimetical mean deviation of the assessed profile) – je difonované jako aritmetický průměr absolutních hodnot souřadnic  $Z(x)$  v rozsahu základní délky  $l_r$ . Patří mezi nejčastěji používané charakteristiky drsnosti povrchu ve strojírenské praxi, i když vypovídací schopnost parametru  $R_a$  je nízká, jelikož nereaguje citlivě na extrémní výšky hrotů profilu a hloubky rýh profilu.

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

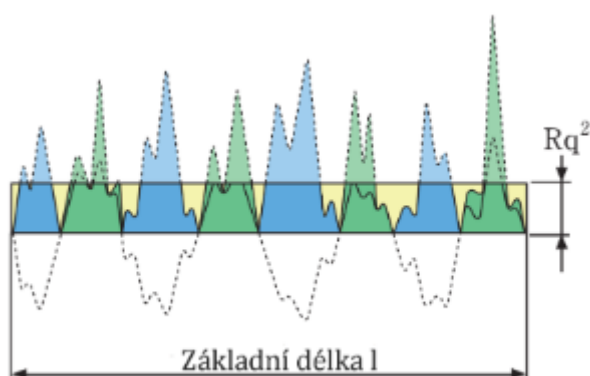


Obr. 27 Průměrná aritmetická odchylka profilu  $R_a$

Parametr  $R_a$  se jedná o statistickou hodnotu, a proto nemusí být vždy efektivní při hodnocení drsnosti povrchu. Například dva povrchy se stejnou hodnotou  $R_a$ , mohou mít zcela odlišný tvar profilu povrchu a také mohou mít rozdílné chování z hlediska funkčnosti, případně životnosti součásti. Je to způsobeno tím, že dle definice se při stanovení parametru  $R_a$  nerozlišuje mezi výstupky a prohlubněmi. Přesto je tento parametr jedním z nejpoužívanějších pro hodnocení drsnosti povrchu. Jeho měření je poměrně snadné a získané hodnoty vykazují značnou přesnost při opakovaném měření.

**Průměrná kvadratická odchylka profilu  $R_q$**  (root mean square deviation -RMS) podle vztahu je definována jako kvadratický průměr souřadnic  $Z(x)$  v rozsahu základní délky  $l_r$ . Hodnota  $R_q$  je citlivější na nežádoucí výstupky a prohlubně kontrolovaného povrchu, a proto zpravidla ukazuje vyšší hodnoty než parametr  $R_a$ .

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



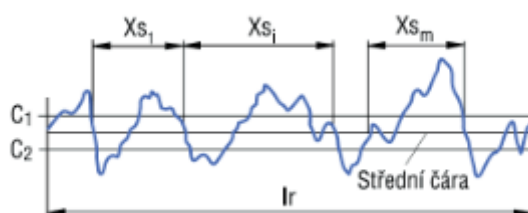
Obr. 28 Průměrná kvadratická odchylka profilu posuzovaného profilu na povrchu drsnosti

## Délkové parametry

**Průměrná šířka prvku profilu  $R_{sm}$  (mean width of the profile elements)** – je definována jako aritmetický průměr šířek  $X_{si}$  prvků profilu v rozsahu základní délky  $l_r$ .

- Parametr  $R_{sm}$  vyžaduje výškové (zadání hladiny řezu  $C_1$  a  $C_2$ ) a délkové omezení (viz Obr. 29). Není-li určeno jinak, omezení výšky je 10%  $R_z$  a omezení roztečí je 1% základní délky. Obě podmínky musí být splněny. Dle normy ČSN EN ISO 4288 je možné určit mezní vlnovou délku cut-off.

$$R_{sm} = \frac{1}{m} \sum_{i=1}^m X_{si}$$



Obr. 29 Grafické znázornění průměrné šířky prvků profilu

**Průměrný kvadratický sklon posuzovaného profilu  $R\Delta q$**  – jedná se o kvadratický průměr sklonu souřadnic  $dZ/dX$  v rozsahu základní délky  $l$ . Hodnota parametrů závisí jak na výšce profilu, tak na jeho šířce, jde tedy o hybridní parametr.

$$R\Delta q = \sqrt{\frac{1}{l} \int_0^l \left( \frac{d}{dx} Z(x) \right)^2 dx}$$

Kde:  $l$  – je v rozsahu základní délky  $l$



Obr.30 Grafické znázornění sklonu profilu

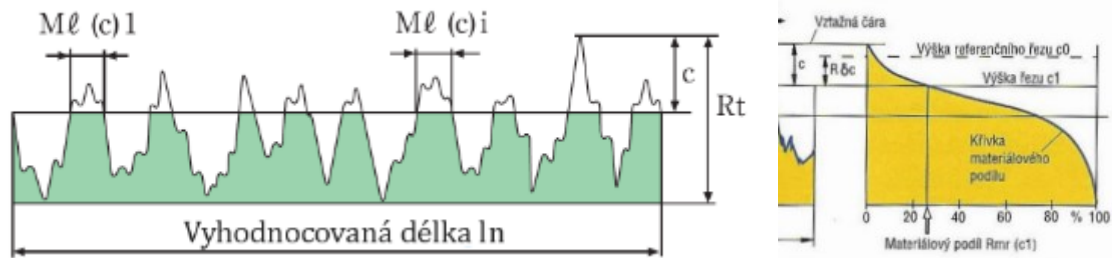
- 
- Sklon profilu lze popsat, jako úhel, který je svírán s rovnoběžkou střední čáry (viz. Obr. 30) Pokud se sklon profilu zprůměruje ve všech bodech základního profilu vznikne průměrný sklon. Za pomoci průměrného sklonu lze zjistit skutečnou délku profilu. Čím větší je průměrný sklon profilu, tím delší bude skutečná délka profilu oproti základní délce.
- V praxi je tato délky využívána např. při povlakování nebo lakování, popřípadě podle hodnoty sklonu profilu se dá zjistit odrážení světla povrchu (čím menší, tím povrch bude lesklejší).

### Tvarové parametry

**Materiálový poměr profilu (nosný podíl) –  $R_{mr}(c)$**  - je definován jako poměr nosné délky materiálu prvků profilu  $Ml(c)$  na dané úrovni  $c$ , vztažený k vyhodnocované délce  $ln$  (viz Obr. 31).

- Tento parametr vyjadřuje procentuální podíl délky profilu vymezeného rovnoběžkou se střední čarou a vyhodnocované délky. Pokud rovnoběžka leží na úrovni nejvyššího vrcholu profilu je hodnota materiálového poměru profilu rovná nule. Naopak pokud by rovnoběžka ležela na úrovni dna nejhlubší prohlubně byla by hodnota parametru rovná 100%.

$$R_{mr}(c) = \frac{100}{ln} \sum_{i=1}^m Ml_i(c) = \frac{Ml(c)i}{ln}$$



Obr. 31 Materiálový poměr profilu

Kde:  $Ml$  – nosní délka profilu

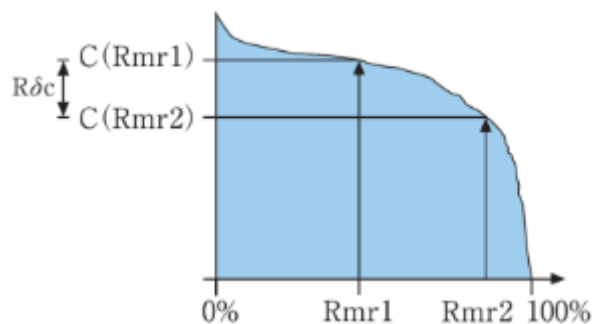
### Křivka materiálového podílu (nosná křivka) Abbott Firestonova křivka

- Křivka představuje materiálový poměr profilu v závislosti na výšce úrovně  $c$ .
- V praxi má nosná křivka velké uplatnění při určování parametrů stratifikovaných povrchů.

**Rozdíl výšky úseku profilu  $R\delta c$**  – parametr je definovaný normou jako svislá vzdálenost mezi úrovněmi dvou úseků daného materiálového poměru (viz Obr. 32)

$$R\delta c = c(Rmr1) - c(Rmr2)$$

- Podmínka:  $Rmr1 < Rmr2$

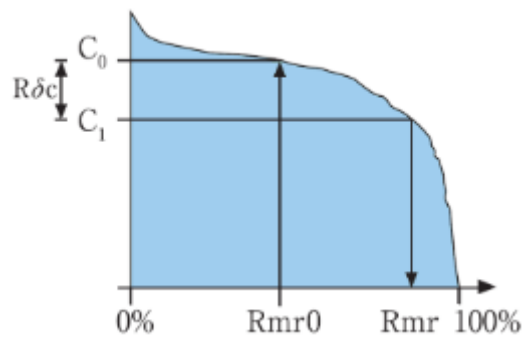


Obr. 32 Rozdíl výšky úseku profilu na povrchu profilu drsnosti

**Vzájemný materiálový poměr  $Rmr$**  – jedná se o materiálový poměr určený na úrovni části profilu  $R\delta c$ , vztahený k úrovni  $C_0$ .

$$Rmr = Rmr(C_1)$$

$$C_1 = C_0 - R\delta c, \quad C_0 = C(Rmr0)$$



Obr. 33 Vzájemný materiálový poměr

**Veličiny nosného podílu ( $R_k$ ,  $R_{pk}$ ,  $R_{vk}$ ,  $Mr_1$ ,  $Mr_2$ )** – jsou definované normou ČSN EN ISO 13565 určené jsou normozpůsob filtrace s potlačením rýh.

- Na Abbott-Firestonove křivce speciální vyrovnávací přímka rozděluje tento podíl na tři rozsahy, díky nimž se zjistí určité parametry.

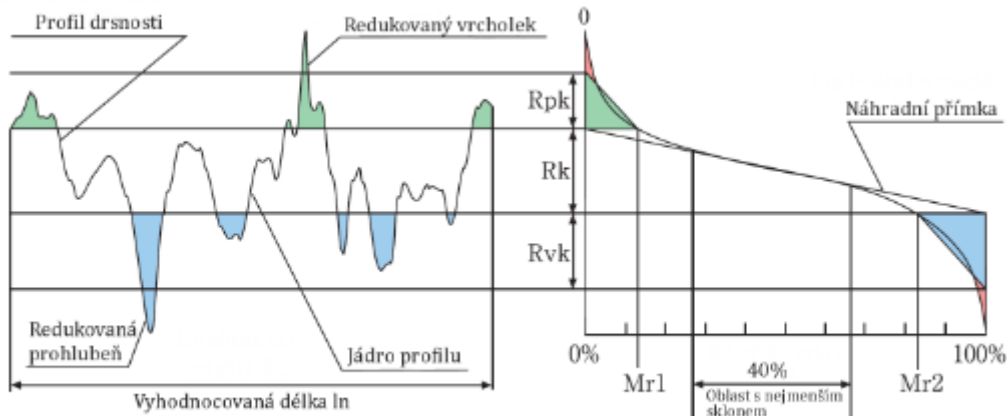
**Jádrová hloubka drsnosti  $R_k$**  – je hloubka jádrového profilu drsnosti.

**Redukovaná výška výstupku  $R_{pk}$**  – je definovaná jako výška výstupku vyčnívajících nad jádrem profilu drsnosti.

**Redukovaná hloubka prohlubní  $R_{vk}$**  – je definována jako průměrná hloubka prohlubní pod jádrem profilu drsnosti.

**$Mr_1$  a  $Mr_2$**  – označují nejmenší a největší materiálový podíl jádrového profilu drsnosti – jsou určený průsečíky přímky odřezávající nahodile hluboké prohlubně od jádra profilu drsnosti (označení  $Mr_2$ ).

Podle obr. 34 křivky materiálového poměru se stanoví hloubka  $Mr_1$  a  $Mr_2$  pomocí náhradní přímky, redukovaná výška výstupků  $R_{pk}$  a redukovaná hloubka prohlubní  $R_{vk}$ , a to jako výška trojúhelníku.



Obr. 34 Grafický záznam křivky materiálového poměru (Abbottova křivka)

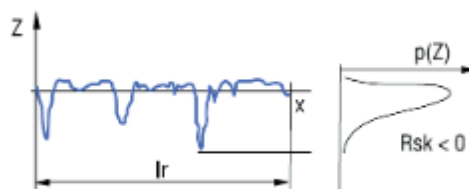
**Šikmost posuzovaného profilu  $R_{sk}$**  (skewness) – je definované podílem průměrné hodnoty třetích mocnin souřadnic  $Z(x)$  a třetí mocniny hodnoty  $R_q$  v rozsahu základní délky  $l_r$ .

$$R_{sk} = \frac{1}{R_q^3} \cdot \left[ \frac{1}{l_r} \int_0^{l_r} |Z^3(x)| dx \right]$$

$R_{sk}$  - Je tzv. hodnota asymetrie hustoty amplitudové křivky. Záporný sklon označuje povrch s výbornou nosností. Parametr sklonu bude hodně ovlivněn špičkami a rýhami. Díky tomu bude jeho praktický význam snižován.

Šikmost posuzovaného profilu udává posunutí funkce hustoty pravděpodobnosti oproti Gaussovu normálnímu rozložení a umožňuje tak lépe rozlišit povrchy se stejnou hodnotou  $R_a$  z hlediska tvaru profilu.

Pokud je vrchol této funkce posunut směrem k výstupkům nerovností ( $R_{sk} < 0$ ), vypovídá to o větších a hlubších prohlubních na povrchu (viz. obr. 35), zatím co je-li vrchol posunut směrem k prohlubním ( $R_{sk} > 0$ ), ukazuje to na povrch s více výstupky. Negativní odchylka parametru  $R_{sk}$  odpovídá dobrým vlastnostem nosnosti profilu.

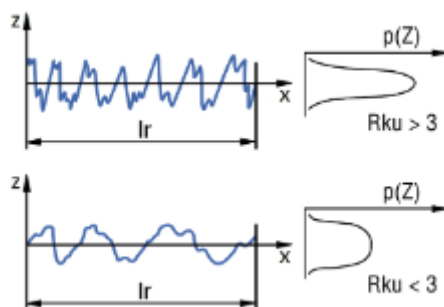


Obr. 35 – Šikmost posuzovaného profilu  $R_{sk}$

**Špičatost posuzovaného profilu  $R_{ku}$**  (kurtosis) – je daná podílem průměrné hodnoty čtvrtých mocnin souřadnic  $Z(x)$  a čtvrté mocniny hodnoty  $R_q$  v rozsahu základní délky  $l_r$ .

Špičatost posuzovaného profilu udává rozšíření nebo zúžení funkce hustoty pravděpodobnosti proti Gaussovu normálnímu rozložení souřadnic profilu, kdy parametr  $Rku = 3$  (viz Obr. 36). Pro profil s ostřejšími výstupky a rýhami je  $Rku > 3$  a naopak u profilu s oblými a méně častými výstupky je  $Rku < 3$ .

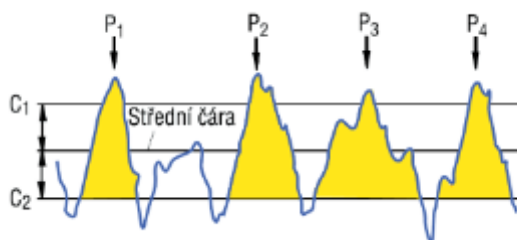
$$Rku = \frac{1}{Rq^4} \cdot \left[ \frac{1}{lr} \int_0^{lr} |Z^4(x)| dx \right]$$



Obr. 36 Špičatost posuzovaného profilu  $Rku$

**Výsledný počet výstupků  $RPc$  (peak count number)** – dle vztahu je definováno, jako kopočet průměrných šířek elementů profilu ( $RSm$ ) v rozsahu referenční délky  $L$  (viz Obr. 37). Není-li specifikováno jinak, je doporučena referenční délka 10 mm. Pro výpočet výsledného počtu výstupků v rozsahu pásma  $RSm$  je doporučen mezní rozdíl jejich výšky  $\pm 0,5 \mu m$ .

$$RPc = \frac{L}{RSm}$$



Obr. 37 Počet výstupků  $RPc$

Parametre je využíván při kontrole povlaku k povrchu, dále je doporučován pro hodnocení charakteristik ohybu, tváření, připravenosti povrchu pro nátěry nebo laminování při výrobě ocelových plechů.

## 2.1.1 Požadavky na měření

### Vyhodnocován délka

- Vyhodnocovaná délka = min. 5x základní délka = min. 5x cut off viz obr. 37
- Pokud není splněno je nutný přepočít

### Základní délka

- Podle požadavku výkresu nebo dokumentace
- Pokud není předepsáno, řídí se dle ISO 4288

### Směr a místo měření

- Pokud není specifikován směr měření, měří se ve směru největších výšek parametrů drsnosti
- Měření má být provedeno v místě očekávaných kritických hodnot

### Příprava k měření

- Odhadne se parametr RSm nebo Ra, popřípadě Rz
- Pro odhadnutý parametr se volí doporučená nebo stanovená hodnota cut-off
- Pokud hodnota parametru RSm, Ra nebo Rz neodpovídá správné hodnotě cut-off provede se měření s jinou hodnotou cut-off
- Pokud hodnota parametru RSm, Ra nebo Rz odpovídá správné hodnotě cut-off – provádí se měření

### Vlastní měření

Pokud hodnota parametru **neobsahuje** index „max“ povrch bude akceptován v případě že:

1. První měřená hodnota nepřesáhne 70% specifikované hodnoty
2. První tři měřené hodnoty nepřesáhnou specifikovanou hodnotu
3. Ne více než jedna z prvních 6ti měření přesáhne specifikovanou hodnotu
4. Ne více než z prvních 12ti měření přesáhne specifikovanou hodnotu

Pokud hodnota parametru **obsahuje** index „max“ povrch bude akceptován v případě že:

1. Alespoň 3 hodnoty nepřesáhnou specifikovanou hodnotu

### Pravidlo 16%

Pokud je hodnota parametru specifikována jako horní mez parametru, povrch bude akceptován v případě, že **ne více než 16% všech naměřených hodnot vybraných parametrů přesahuje specifikovanou hodnotu.**

## 2.1.2 Kontrola drsnosti povrchu

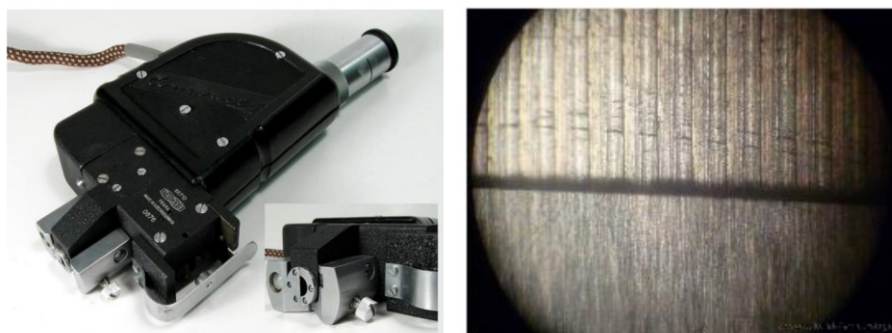
Při kontrole drsnosti povrchu se využívají metody, které je možné rozdělit na metody kvalitativní a kvantitativní

### Metody kvalitativní

Jsou založené na subjektivním porovnání kontrolovaného povrchu s povrchem referenčním, který má známou drsnost. Porovnání je možné pouze v případě, že byly povrchy opracovány stejným, nebo podobným způsobem. Porovnáním je zjištěno, zda je kontrolovaná plocha hladší anebo drsnější než referenční povrch popřípadě že je drsnost v rozmezí dvou referenčních povrchů. Na porovnání se využívají vzorkovnic drsnosti povrchu (obr. 38). Jsou to obvykle série vzorků seřazené do jednotlivých kolekcí obsahující etalony ploch obrobené různými způsoby jako např. frézováním, soustružením, broušením apod. Jednotlivé etalony jsou odstupňovány od jemných drsností až po hrubé. Porovnání se provádí zrakem a hmatem. Hmat umožňuje obvykle lepší rozpoznatelnost a přesnější rozlišení dvou drsností. Pro porovnání zrakem je možné použít lupu, popřípadě jiné zařízení umožňující přiblížení a následné porovnání dvou drsností jako například mikroskop Comparex (obr. 39).



Obr. 38 Příklad vzorkovnice a jednotlivé vzorky drsnosti



Obr. 39 Mikroskop comparex (vlevo); optické porovnání dvou povrchů (vpravo)

### Metody kvantitativní

Vyjadřují drsnost povrchu číselně pomocí některého z parametrů definovaných na obr. 4. Přístroje, kterými se tyto parametry zjišťují jsou založené buď na optickém anebo na dotykovém způsobu měření.

### Dotyková měřicí metoda

Při dotykovém způsobu měření drsnosti povrchu se po povrchu pohybuje **měřící dotyk** s malým poloměrem hrotu (obvykle 2 $\mu$ m až 10 $\mu$ m), který je součástí snímače. Snímač bývá založen na principu piezoelektrickém, magnetoelektrickém nebo indukčním. Pochyb měřícího dotyku je motorický.

Vychylování měřícího dotyku vyvolává signály, které snímač zachytává a zpracovává do vyhodnocovacích jednotek. Snímač následně vyhodnotí parametry drsnosti.

Při určování drsnosti povrchu nějaké plochy je důležitý směr měření drsnosti. Jak není předepsáno jinak, směr měření drsnosti se volí kolmo na stopy po opracování. V případě, že není možno určit směr stop po opracování, volí se dvě měření kolmo na sebe. Vyšší naměřená drsnost je považována za rozhodující.

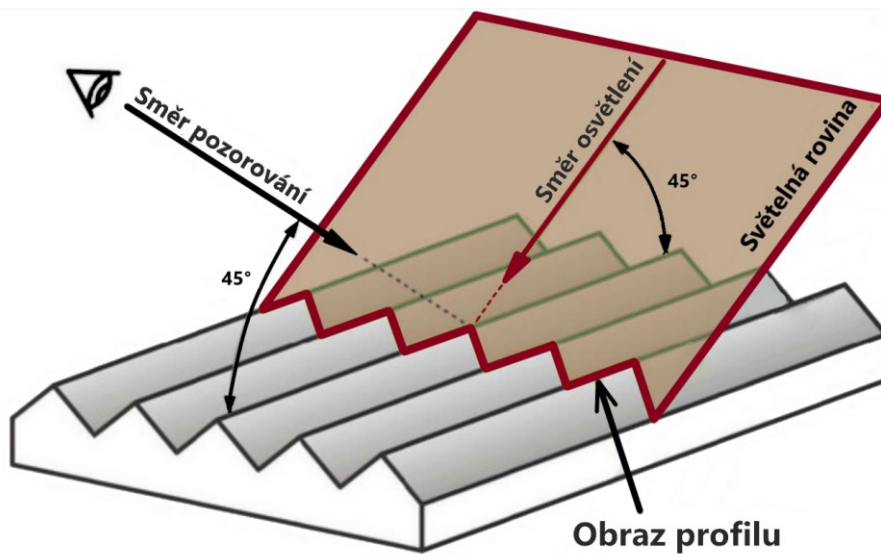
### **Bezdotyková metoda – metoda světelného řezu**

K měření touto metodou se používá nejčastěji dvojitého mikroskopu. Příkladem takového mikroskopu je mikroskop Schmaltz (obr. 41).

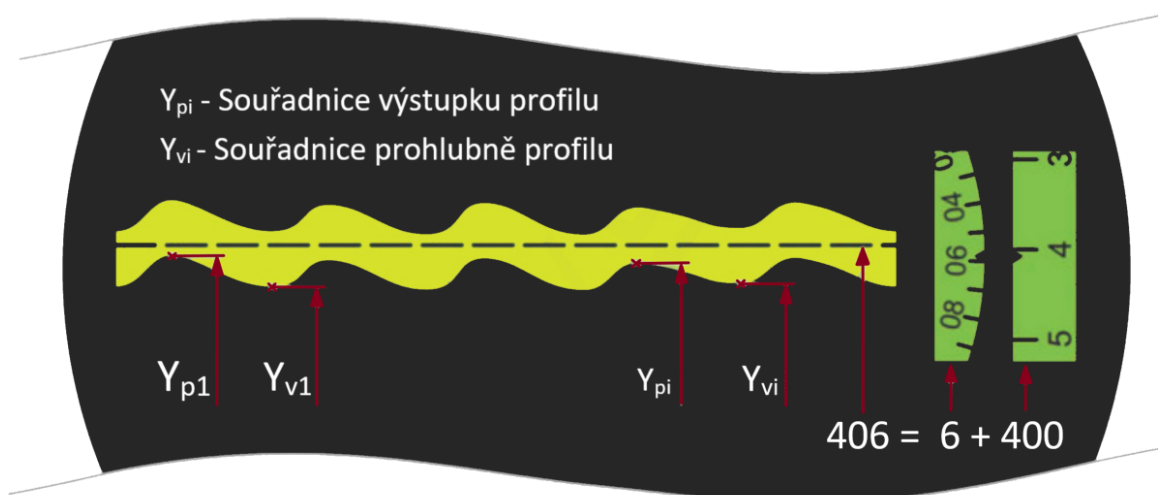
Metoda světelného řezu využívá rovnoběžného svazku světelných paprsků, které jsou poslány skrz tenkou štěrbinu. Tenká štěrbinu vytvoří ze světelného svazku velmi tenkou světelnou rovinu, která je poslána na měřený povrch. Průnikem světelné roviny a měřeného povrchu vznikne obraz nerovností profilu, který je možné sledovat kolmo na světelnou rovinu. Z toho vyplývá, že světelný řez tvořený světelnou rovinou je kolmý na optický systém mikroskopu (obr. 42) a díky tomu je možné pozorovat profil měřeného povrchu.



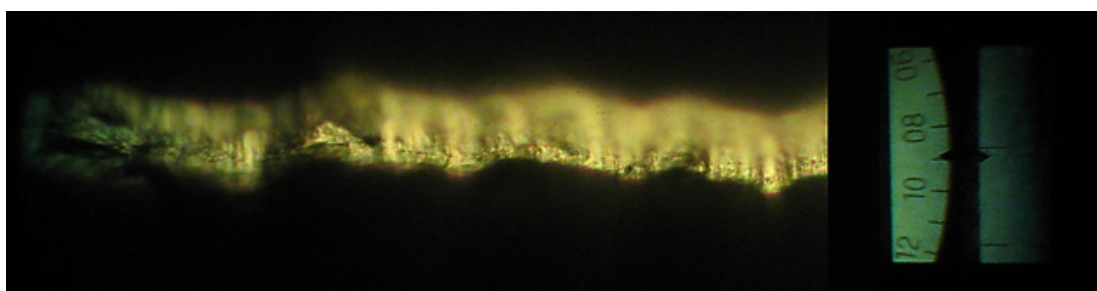
Obr. 41 Schmalz mikroskop



Obr. 42 Princip měření metodou světelného řezu



Obr. 43 Pohled do okuláru mikroskopu pro světelný řez – ilustrační



Obr. 44 Pohled do okuláru mikroskopu pro světelný řez – reálný

Tab. 2 Volba vhodného zvětšení a příslušné optické parametry

Zvětšení objektivu z	7x	14x	30x	60x
Celkové zvětšení z <sub>c</sub>	60x	120x	260x	520x
Velikost zorného pole d <sub>sv</sub> (mm)	2,5	1,3	0,6	0,3
Optimální měřicí rozsah Ra (μm)	3,75 - 12,5	1,25 - 3,75	0,375 - 1,25	0,125 - 0,375
Konstanta objektivu k (μm)	1,27	0,64	0,29	0,15

Pro nejvyšší výšku nerovnosti profilu na vyhodnocované délce platí

$$R_t = |\max\{y_{pi}\} - \min\{y_{vi}\}| \cdot k$$

Pro výšku nerovnosti profilu z deseti hodnot platí

$$R_{(10)} = \frac{\sum_{i=1}^5 y_{pi(max)} - \sum_{i=1}^5 y_{vi(min)}}{5} \cdot k$$

Pro střední aritmetickou odchylku profilu platí přibližný vztah

$$R_a \approx \frac{1}{4} \cdot R_{(10)}$$

Pro všechny způsoby obrábění platí přesnější vztah, z kterého je možné Ra vyjádřit

$$\log(R_{(10)}) = 0,65 + 0,97 \cdot \log(R_a)$$

Kde:

y<sub>pi</sub> je souřadnice výstupku profilu

y<sub>vi</sub> je souřadnice prohlubně profilu

y<sub>pi(max)</sub> je itá maximální souřadnice výstupku profilu

y<sub>vi(min)</sub> je ita minimální souřadnice prohlubně profilu

k je konstanta objektivu ( z tab na základě odhadnuto drsnosti kontrolovaného profilu)

Pro maximální dovolenou chybu přístroje platí

$$z_{max} = \pm(0,03 \cdot R_{(10)} + 0,07)\mu m$$

## 2.2 Plošné parametry

Díky vyspělé počítačové technice a speciálních softwarů lze pro měření drsnosti využívat kromě klasického měření profilu (2D), také metodu plošného měření (3D).

Trojrozměrné hodnocení textury povrchu využívá poznatky z dvojrozměrné analýzy profilu (17 parametrů profilu), které rozšiřují o nové využitelné poznatky charakteristiky profilu plochy (více než 40 parametrů plochy)

Plošné (3D parametry) jsou definovány normou ČSN EN ISO 25 178-2. Podle normy se rozlišují dva druhy plošných parametrů na parametr pole a parametr prvku. Tyto dvě veličiny jsou nejvýznamnějšími změnami v metodice hodnocení povrchu, protože představují v současnosti významný trend v metrologii povrchu a tykají se aktuálních problémů.

Podstatná část normy obsahuje definici souborových parametrů pro prostorové hodnocení textury povrchu. Každý parametr je označený symbolem a stručně charakterizován včetně určení rozsahu využitelnosti. Soubor parametrů je členem a definován v následujících skupinách.

- a) Výškové prostorové,
- b) Hybridní,
- c) Funkční (objemové, fraktální a jiné).

Plošná charakteristika textury povrchu (3D) otevírá nové možnosti pro komplexní hodnocení struktury povrchu. Namísto tří souborů parametrů pro nefiltrovaný profil, profil drsnosti a vlnitosti, je plocha hodnocená pomocí jednoho parametru pro daný povrch omezený stupnicí. Tyto plošné analýzy struktury povrchu přinášejí kromě číselného hodnocení i grafické zobrazení kontrolovaného profilu formou axonometrického pohledu, záznamy intenzity souřadnic a topografické mapy.

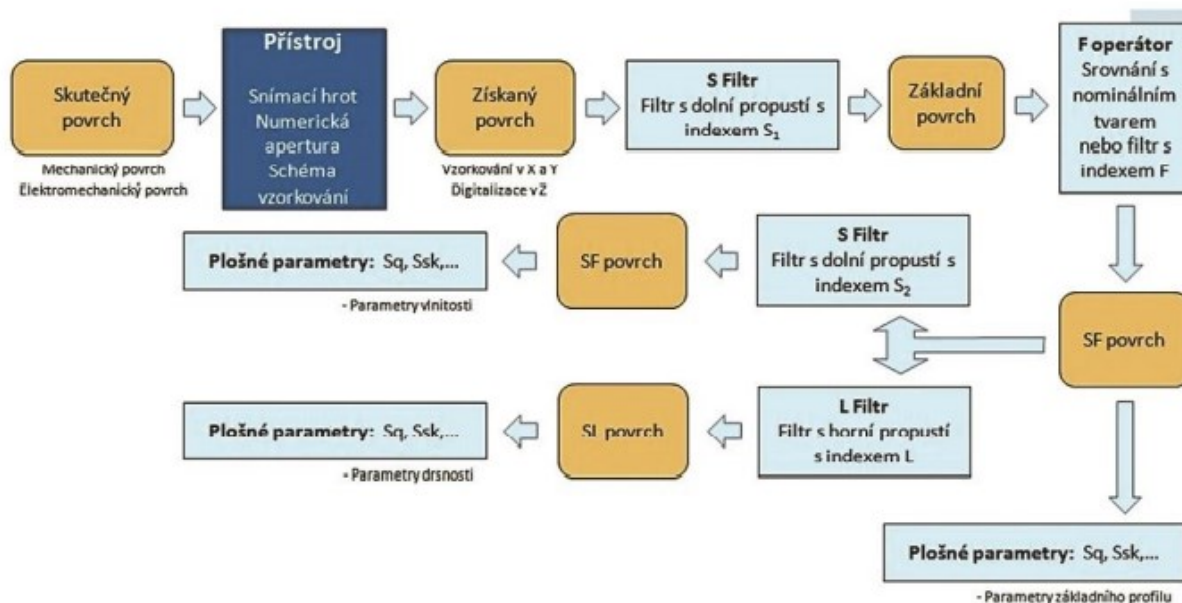
Jednotlivé prostorové parametry textury jsou stanoveny z podstatně většího množství neměřených dat s mnohem vyšší spolehlivostí, také získaná hodnota parametru je věrohodnější. Samotná prostorová analýza přináší víc informací o charakteristice povrchu plochy, např. počet, velikost a tvar rozložení výstupku a prohlubní profilu, výrazně zvyšují objektivnost hodnoceného povrchu. Tyto informace lze využít pro odhad vlastností funkčně zatíženého povrchu a jejich změn v průběhu provozu. Takové hodnocení, mimo prostorového (3D) zobrazení, charakterizuje i menší nebezpečí ze zanedbání vlivu některých z důležitých funkčních vlastností povrchu.

Díky prostorové analýze lze hodnotit strukturu povrchu novými možnostmi, které byly dvojrozměrným měřením nedosažitelné. Využití prostorového popisu povrchu lze využít pro posuzování funkčních vlastností, jako např. tření, mazání, únavové vlastnosti, opotřebení nebo vhodnosti povrchu pro nátěry.

Pro získání plošných 3D parametrů drsnosti anebo vlnitosti je nutné profil povrchu nejdříve filtrovat potřebným filtrem a až potom je možné stanovit jednotlivé hodnoty parametrů.

Nejprve je na naměřený povrch aplikován S – filtr, pomocí kterého se odstraní z povrchu prvky s velmi krátkou prostorovou vlnou. Při použití S-filtru vznikne potom primární povrch. Dále je na prvním povrchu aplikována matematická operace a na základě metody nejmenších čtverců vyřadí vliv tvaru z primárního povrchu jako F-operace. Po aplikaci S-filtru a F-operace

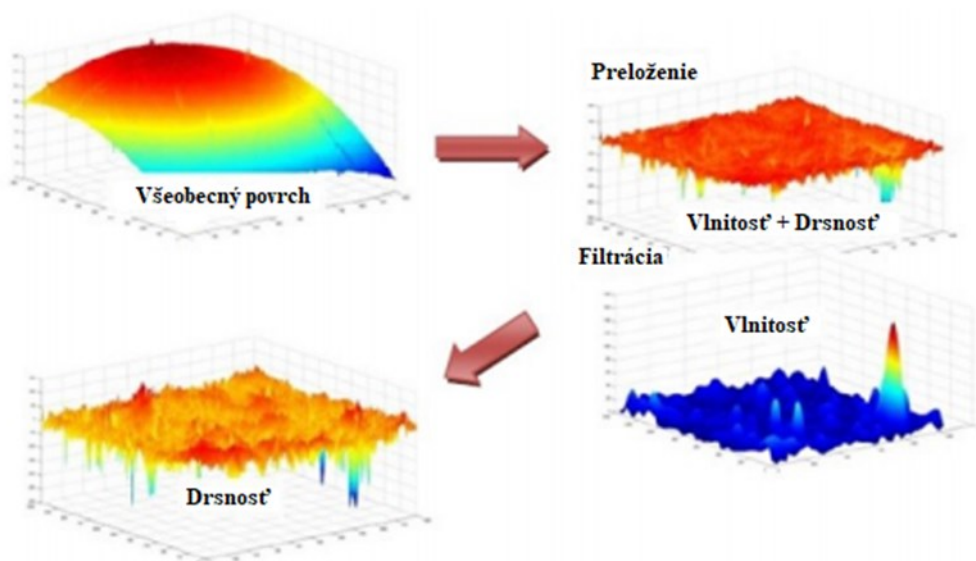
vznikne S-F povrch. Na tento povrch se aplikuje L-filtr sloužící k odstranění z povrchu prvky s dlouhou prostorovou vlnovou délkou a vznikne S-L povrch. Znázornění postupu filtrace povrchu pro získání plošných (3D) parametrů drsnosti je na Obr. 45.



Obr. 45 Schéma postupu při měření a hodnocení plochy

### 2.2.1 Filtrace povrchu

Obrobený povrch lze definovat jako soubor nerovností, které tvoří strukturu povrchu. A právě pro získání znalostí o tomto vytvořeném povrchu je důležitá filtrace, jejíž hlavním vlastností je oddělení krátkovlnných a dlouhovlnných složek profilu povrchu, což umožňuje oddělit jednotlivé složky struktury povrchu. Při analýze textury povrchu je podstatný správný výběr nastavení filtrů. Postup filtrace pro získání jednotlivých složek struktury povrchu je uveden na (Obr. 46.).

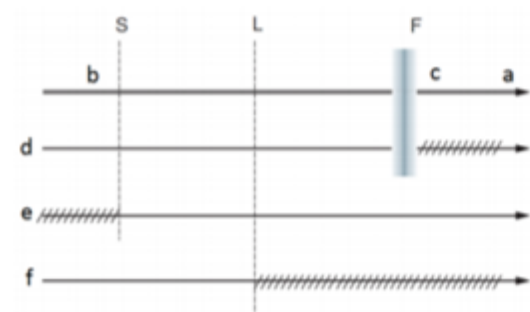


Obr. 46 Filtrace povrchu

Základním cílem použití filtrů je zabránit velkým změnám výstupního signálu pro správné zobrazení zkoumaného profilu. Použití filtrace při analýze povrchu má řadu využití. Filtrací se např. odstraňují odlehlé výstupky při čištění změřených dat optickým snímačem. Vhodně zvolený filtr lze také použít ke korekci vlivu snímacího hrotu na nezpracovaná data změřených pomocí kontaktního profilometru.

Filtry povrchu rozdělujeme dle ČSN EN ISO 25 178-2 na:

- **S-filtr** - jedná se o filtr povrchu, který slouží k odstranění malé laterální stupnice z povrchu, což je předpoklad pro dosažení primárního povrchu (viz Obr. 47).
- **L-filtr** - jedná se o filtr povrchu, která slouží k odstranění velké laterální stupnice z primárního anebo S-F povrchu (viz Obr. 47).
- **F – operace** - operace, která slouží k vyloučení vlivu tvaru z povrchu primárního, některé mají velmi rozdílné akce filtrace, prostřednictvím které může dojít k omezení velké laterální stupnice povrchu. Velký počet L – filtrů citlivých na tvar a požaduje se nejdříve F – operace jako předfiltr před samotným použitím L – filtru (viz Obr. 47).
- **S-F povrch** - jedná se o povrch, který je odvozený z primárního povrchu, a to pomocí vyloučení vlivu tvaru využitím F – operace (viz Obr. 47).
- **S-L povrch** - jedná se o povrch odvozený od S - F povrchu pomocí vyloučení vlivu velké stupnice při použití L – filtru (viz Obr. 47).



Rozsah vlnových délek povrchů omezených stupnicí



Legenda:

- a - osa stupnice (vlnová délka prvků na povrchu),
- b - část stupnice s prvky s velmi krátkou vlnovou délkou,
- c - část stupnice s prvky s velmi dlouhou vlnovou délkou,
- d - omezení stupnice po aplikaci F - operátoru,
- e - omezení stupnice po aplikaci S - filtru,
- f - omezení stupnice po aplikaci L - filtru.

Obr.47 Grafické znázornění plošných filtračních operátorů a její vazby mezi S-filtrem, L-filtrem, F-operací a S-F a S-L povrchy

Na Obr. 47 je možnost vidět označení malé stupnice (a), velké stupnice (b), osy stupnice (c), F – filtr (d), S – filtr (e), L – filtr (f).

S-L a S-F povrchy se nazývají povrchy omezené stupnicí (scale-limited surfaces) – konkrétní filtry jsou specifikované v normě ČSn EN ISO 25 178-3

Norma ČSN EN ISO 25178-3 nám říká, jak všeobecně postupovat při filtrování povrchu. Normě jsou tabulky, které slouží k určení S a F-filtru a F-operací, záleží, na tom, jakou metodu měření při snímání povrchu se použije. Při měříme optickou metodou pro povrchy se používá tabulka 3 (str.11) v normě ČSV EN ISO 25 178-3.

Z normy se vybírá i maximální laterální perioda hranice, na jejímž základě je dále určena maximální vzdálenost vzorkování, a tím je zajištěna hodnota S – filtru indexu vložení. Pokud je známá hodnota S – filtru indexu vnoření, lze hodnotu F – filtru nebo L – filtru určit pomocí tabulky 1. v normě EN ISO 25 178-3. Správná volba filtru je důležitým předpokladem pro získání skutečných hodnot plošných parametrů.

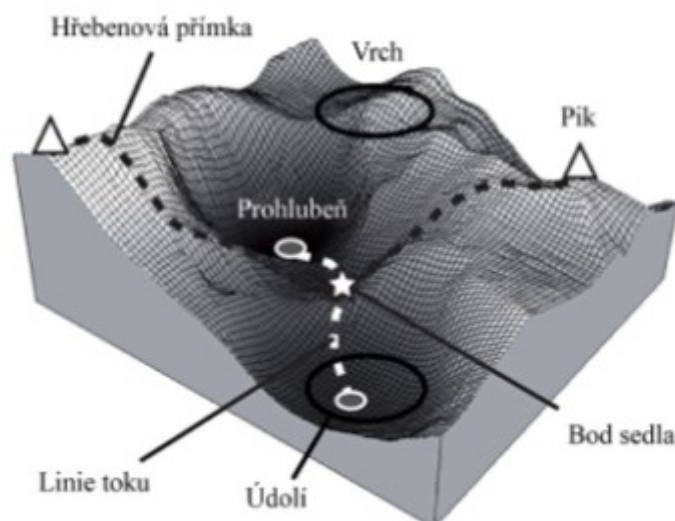
## 2.2.2 Termíny geometrického prvku

Norma EN ISO 25178-2 zavádí řadu nových pojmů, které je třeba definovat před výběrem sledovaných parametrů. Vybrané geometrické prvky jsou znázorněny na obr. 48.

Mezi termíny geometrického prvku, mezi které patří:

- Pik (peak) – bod na povrchu, který je vyšší než všechny ostatní body v jeho okolí.
- Vrch (hill) – oblast okolo píku taková, že směr všech maximálních cest končí v píku.
- Prohlubeň (pit) – nejnižší bod na povrchu, který je nižší než všechny body v jeho okolí.

- Údolí (dále) – oblast okolo prohlubně taková, že směr všech maximálních cest končí v prohlubni.
- Sedlo (saddle) – sada bodů na omezené stupnici povrchu, kde se kříží hřebenové přímky a přímky kurzu.
- Hřebenová přímka (ridge line) – křivka oddělující přilehlá údolí.
- Bod sedla (saddle point) – jeden bod příslušného sedla.
- Topografický povrch (topographic feature) – plocha, přímka nebo bod prvku vymezující stupnici povrchu.
- Obrysová přímka (contour line) – přímka na povrchu sestávající z bodů stejné výšky.
- Segmentace (segmentation) – metoda, která odděluje omezenou stupnici povrchu od odlišných oblastí.
- Výška piku (peak height) – výška piku.
- Hloubka prohlubně (pit height) – hloubka prohlubně.



Obr. 48 Geometrické prvky povrchu

## Parametry pole

Existuje několik způsobů rozdělení parametrů pole, které jsou rozděleny do pěti nebo dvou skupin. Podle normy EN ISO 25 178-2 a literatury, je klasifikace parametrů rozdělena do pěti skupin:

- Výškové parametry,
- Prostorové parametry,
- Hybridní parametry,
- Funkční a související parametry,
- Smíšené parametry.

Druhé nejčastěji používané rozčlenění parametrů pole je založené na analýze plochy (S) a objemu (V). Mezi V-parametry (objemové parametry) jsou řazeny i parametry označené jako S-parametry. Jde o parametry plošné charakteristiky, které jsou řazeny i parametry označené jako S-parametry. Jde o parametry plošné charakteristiky, které jsou vyhodnocované na základě objemu materiálu.

S-parametry popisují povrch na základě amplitudy i rozteče struktury povrchu. V-parametry poskytují stěžejní objemové informace získané z křivky materiálového poměru.

### **S – parametry**

Plošné parametry jsou z velké části odvozeny z parametrů profilu definovaných normou ČSN EN ISO 4287. Soubor plošných S – parametrů obsahuje 12 parametrů.

#### **S<sub>a</sub> – aritmetický průměr výšky omezené stupnice povrchu** (arithmetical mean height of the scale limited surface)

Parametr definován jako aritmetický průměr absolutních hodnot koordinace uvnitř určené plochy (A).

$$S_a = \frac{1}{A} \iint_A |z(x, y)| dx dy$$

Jedná se o trojrozměrné rozšíření běžně používaného parametru Ra. Parametr S<sub>a</sub> patří mezi nejpoužívanější parametry pro hodnocení drsnosti povrchu, v tomto případě tedy ve 3D. Tento parametr poskytuje poměrně stabilní výsledky, jelikož není nepříznivě ovlivněn škrábanci či znečištěním měřeného povrchu. Na druhou stranu, tento parametr je zřídka citlivý při rozlišování výrazných vrchů či údolí a z hlediska funkčnosti povrchu tedy neposkytuje charakteristické údaje.

#### **S<sub>q</sub> – základ průměrné výšky čtvercem omezené stupnice povrchu** (root mean square height of the scale-limited surface)

Parametr definován jako vymezení průměrné hodnoty čtverce hodnot koordinace uvnitř plochy definice (A).

$$S_q = \sqrt{\frac{1}{A} \iint_A z^2(x, y) dx dy}$$

Tento parametr má obdobné vlastnosti jako parametr S<sub>a</sub>, což je zřejmé z obrázku 2.9. Parametr S<sub>q</sub> rovněž poskytuje stabilní výsledky, ale též nerozlišuje vrchy a údolí na hodnocené ploše. Rozdíl mezi tímto parametrem od S<sub>a</sub> spočívá ve větší citlivosti a statistické významnosti pro méně drsné povrchy. Zároveň jeho hodnota slouží k určování dalších výškových parametrů plošné drsnosti povrchu S<sub>sk</sub> a S<sub>ku</sub>

#### **S<sub>sk</sub> – šikmost omezené stupnice povrchu** (skewness of the scale-limited surface)

Parametr definován jako kvocient průměrné hodnoty koordinační krychle a hodnot a krychle  $S_q$  uvnitř určené plochy.

$$S_{sk} = \frac{1}{S_q^3} \left[ \frac{1}{A} \iint_A z^3(x, y) dx dy \right]$$

Šikmost posuzované plochy  $S_{sk}$  představuje míru symetrie hodnot od střední roviny. Je-li hodnota parametru kladná, převažují výšky vrchů nad hloubkami údolí. V opačném případě, je-li tedy hodnota tohoto parametru záporná, převažují hloubky údolí nad výškami vrchů.

Například, srovná-li se soustružený a lapovaný povrch, bude dosaženo odlišných výsledků. Soustružení totiž způsobuje povrch s výraznějšími vrcholy a tomu i odpovídá kladná hodnota šikmosti. V porovnání, lapovaný povrch představuje povrch, který má výrazná dna, a v tomto případě bude mít tedy parametr  $S_{sk}$  zápornou hodnotu. V jiném případě, hodnota parametru  $S_{sk}$  pro elektroerozivní obrábění je výrazně závislá na obráběném materiálu, nikoliv nastavenými pracovními podmínkami a ve výsledku může nabírat kladných i záporných hodnot.

#### **Sku – špičatost omezené stupnice povrchu** (kurtosis of the scale-limited surface)

Parametr definován jako kvocient průměrné čtvrté mocniny hodnoty koordinace a hodnoty čtvrté mocniny  $S_q$  uvnitř určené plochy (A).

$$S_{ku} = \frac{1}{S_q^4} \left[ \frac{1}{A} \iint_A z^4(x, y) dx dy \right]$$

Špičatost omezené stupnice povrchu, označované jako  $S_{ku}$  představuje srovnání stupně koncentrace hodnot výškových souřadnic bodů s prostřední koncentrací ostatních, méně výškově významných hodnot.

Opět lze srovnat soustružený a lapovaný povrch. V tomto případě je ovšem u obou vzorků větší stupeň koncentrace prostředních hodnot výškových souřadnic ve srovnání s četností všech ostatních hodnot. Jak již bylo uvedeno, soustružený povrch má výrazné vrcholy a lapovaný vzorek má výrazná dna. Jelikož stupeň koncentrace prostředních hodnot ve srovnání s výškovými souřadnicemi u obou povrchů jsou téměř totožné, budou hodnoty parametru  $S_{ku}$  u obou vzorků podobné. To neplatí pro elektroerozivní obrábění. U této nekonvenční technologie obrábění hodnoty parametru  $S_{ku}$  nabývají výrazných kladných čísel a jedná se tedy o povrch s převažující četností špičkových hodnot.

#### **Sp – maximální výška piku omezené stupnice povrchu** (maximum peak height of the scale limited surface)

Parametr definován jako největší hodnota výšky píku uvnitř určené plochy.

$$S_p = \max(z_p(x, y))$$

Hodnota parametru  $S_p$  je obdobná parametru profilové drsnosti  $R_p$ . V praxi, může hodnota tohoto parametru  $S_p$  může přinášet nejlepší identifikaci vzhledem k provozním změnám povrchu.

**$S_v$  – maximální hloubka prohlubně omezené stupnice povrchu** (maximum height of the scale-limited surface)

Parametr definován jako hloubka prohlubně uvnitř určené plochy zmenšená o její nejmenší hodnotu.

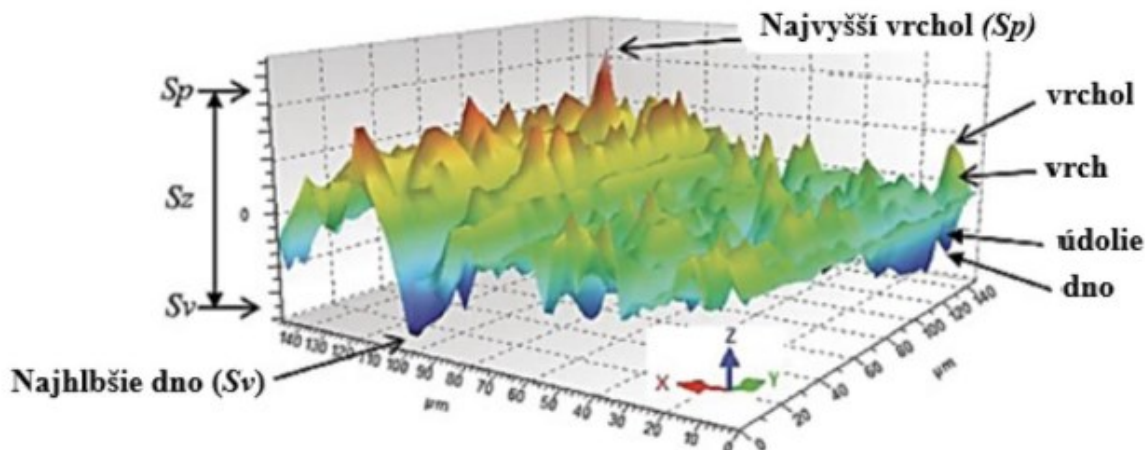
$$S_v = \max (|z_v(x, y)|)$$

Z hlediska charakterizace jedinečné funkčnosti povrchu, jako například z hlediska hodnocení únavové pevnosti, jsou důležité informace o odlišných povrchových strukturách. Takové rozdíly může charakterizovat právě parametr  $S_v$ .

**$S_z$  – maximální výška omezené stupnice povrchu** (maximum height of the scale-limited surface) (viz Obr. 49)

Parametr definován jako součet maximální hodnoty výšky píku a maximální hodnoty hloubky prohlubně uvnitř určené plochy

$$S_z = S_p + S_v$$



Obr. 49 Grafické znázornění plošných parametrů  $S_p$ ,  $S_v$ , a  $S_z$

Přestože se tento parametr často používá pro hodnocení funkčnosti povrchu, je významně ovlivněn škrábanci či znečištěním, v důsledku využití špičkových hodnot. Podobně jako výškové parametry  $S_p$  a  $S_v$  charakterizuje hodnoty pouze konkrétních dvou bodů na povrchu.

Použití plošných výškových parametrů je velmi podobné jako u profilových výškových parametrů. Pro analýzu povrchu lze tedy využít profilové i plošné parametry a následně provést jejich porovnání.

## V – Parametry

Jedná se o funkční a související parametry, které se používají k hodnocení topografických vlastností povrchů pomocí analýzy objemu materiálu a neplatného objemu (objem tvořený prázdným prostorem mezi texturou povrchu) omezené stupnice povrchu.

V - parametry jsou rozděleny do čtyř podskupin:

- plošné parametry,
- objem materiálu,
- neplatný objem,
- ostatní.

Parametry v těchto skupinách jsou vztaženy ke třem pásmům, které jsou rozdělena podle výšky na křivce materiálového poměru.

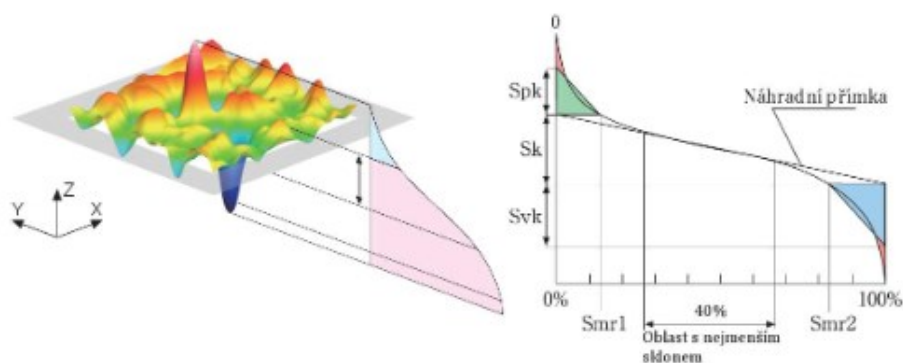
Pásma se dělí na:

- **Pásmo píku** - je nejvyšší pásmo, toto pásmo se vyznačuje nejrychlejším opotřebením a důsledkem je úbytek materiálu. Uskutečňuje se při počátečním uvedení součásti do provozu.
- **Pásmo jádra** – je prostřední pásmo, které je postupně opotřebovává po celou dobu životnosti součásti.
- **Pásmo údolí** – je nejnižší pásmo, které určuje schopnost povrchu zadržovat mazivo nebo jiné tekutiny.

## V – parametry plošné

Parametry z plošné skupiny slouží k popisu vlastnosti stratifikovaných povrchů, tedy povrchů používaných především u mechanicky velmi zatěžovaných součástí v automobilovém průmyslu např. u válců motorů. Všechny parametry mají své profilové ekvivalenty a vycházejí z norem ČSN EN ISO 13 565-2 a ČSN EN ISO 13 565-3 a jejich parametry, které patří do této skupiny jsou uvedené v tab. 3.

**Parametry Sk, Spk, Svk, Smr1 a Smr2** (viz. obr. 50) - jsou vyhodnocovány na základě křivky poměru materiálu plochy (neboli Abbott-Firestoneovy křivky plochy) získané z omezené stupnice povrchu za využití robustního Gaussova filtru.



Obr. 50 Abott-Firestoneova křivka určená z plochy – znázornění parametrů  $Spk$ ,  $Sk$ ,  $Svk$ ,  $Smr1$  a  $Smr2$

**Parametry  $Spq$ ,  $Svq$ ,  $Smq$**  (viz Obr. 50) – vychází z křivky pravděpodobnosti plochy materiálu.

Postup vyhodnocování parametrů je totožný jako u profilových parametrů a lineární křivky materiálového poměru.

Tab. 3 Přehled V - plošných parametrů včetně jejich definic.

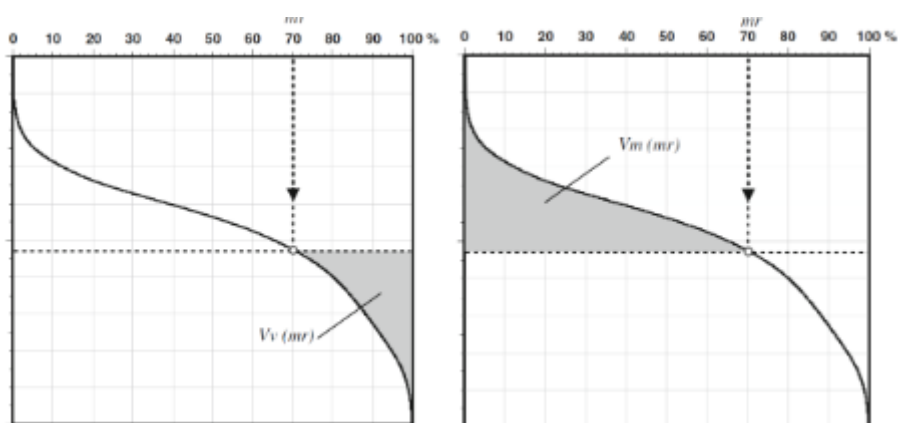
Plošné parametry		
Název parametru		Definice
$Sk$	Výška jádra (core hight)	Vzdálenost mezi nejvyšší a nejnižší úrovní povrchu jádra.
$Spk$	Redukovaná výška píku (reduced peak height)	Průměrná výška vystupujících píků nad povrch jádra.
$Svk$	Redukovaná hloubka údolí (Reduced dále height)	Průměrná hloubka vystupujících údolí pod povrch jádra
$Smr1$	Poměr materiálu (Material ratio) - (vymezený průsečíkem křivky na rozhraní vrchů a jádra)	Poměr plochy materiálu v průsečíku přímky, která odděluje vystupující vrchy od jádra povrchu k ploše hodnocení.
$Smr2$	Poměr materiálu (Material ratio) - (vymezený průsečíkem křivky na rozhraní jádra a údolí)	Poměr plochy řezu materiálu vymezený přímkou, která odděluje vystupující údolí od jádra povrchu, k hodnocené ploše.
$Spq$	Základ průměrné odchylky čtverců plošiny (Plateau root mean square deviation)	Sklon lineární regrese provedený přes oblast údolí.
$Svq$	Základ průměrné odchylky čtverců údolí (Dále root mean square deviation)	Sklon lineární regrese provedený přes oblast plošiny.
$Smq$	Poměr materiálu (Material ratio)	Poměr materiálu plochy v průsečíku plošina-údolí.

**Neplatný objem  $V_v(p)$**  – je definovaný jako objem neplatné jednotkové plochy v daném poměru materiálu vypočtený z poměru materiálu plochy křivky.

$$V_v(p) = \frac{K}{100\%} \int_p^{100\%} [S_{mc}(p) - S_{mc}(q)] dq$$

Kde: K – konstanta (slouží k přepočtu objemu do požadovaných jednotek)

Výsledná hodnota se může uvádět např. v  $[\mu\text{m}^3/\text{mm}^2]$ ,  $[\text{ml}/\text{m}^2]$ , nebo graficky zobrazena na křivce poměru materiálu plochy (viz Obr. 51). Z obrázku níže lze konstatovat pokud se hodnota poměru materiálu  $p$  rovnala 100%, tak by se velikost neplatného objemu rovnala nule a naopak pokud se  $p$  rovnala 0%, tak potom velikost neplatného objemu by byla maximální.



Obr. 51 Parametre neplatného objemu  $V_v$  a parametr objemu materiálu  $V_m$

**Objem materiálu  $V_m(p)$**  – jde o objem materiálu vztažený na jednotku plochy pro danou úroveň materiálového poměru plochy  $p = mr$ .

$$V_m(p) = \frac{K}{100\%} \int_{0\%}^p [S_{mc}(p) - S_{mc}(q)] dq$$

- Vztah vypadá velmi podobně jako u neplatného objemu s tím rozdílem, že integrovaný objem je z vrchu ohraničen povrchem a zespod horizontální rovinou ve výšce  $c$ , která je opět daná  $S_{mc}(mr) = S_{mc}(p)$  (viz obr. 50).

**Neplatný objem údolí omezené stupnice povrchu  $V_{vv}$**  – je definován jako objem údolí a poměru materiálu  $p$ . Jde o parametr neplatného objemu, při kterém je definovaný normou ČSN EN ISO 25178-3 materiálový poměr  $mr = p$ . Výchozí hodnota je stanovena na  $p = 80\%$  (viz obr. 51)

$$V_{vv} = V_p(p)$$

**Neplatný objem jádra omezené stupnice povrchu  $V_{vc}$**  – je určený rozdílem v neplatném objemu mezi poměrem materiálu  $mr_1 = p$  a  $mr_2 = q$ . Výchozí hodnoty pro poměry materiálu jsou opět uvedeny v normě ČSN EN ISO 25178-3. Pro poměr  $p$  je hodnota 10% a pro poměr  $q$  80%. Parametr neplatného objemu jádra je zobrazen na obr. 52.

$$V_{vc} = V_v(p) - V_c(q)$$

Parametry  $V_{vv}$  určuje schopnost povrchu zadržovat mazivo. Společně s parametrem  $V_{vc}$  představují objem, který je povrch schopný pojmout pro určité rozmezí materiálového poměru (důležité pro správné nastavení různých procesů např. mazání nebo povlakování).

**Parametry  $V_{vc}$ ,  $V_{vv}$ ,  $V_{mp}$ ,  $V_{mc}$**  se používají k přesnému popisu vlastností povrchu. Jsou zobrazené v tab. 4 včetně definic a jsou definované normou ČSN EN ISO 25178-2. Z hlediska funkčnosti povrchu mohou mít tyto parametry velký význam. Nejčastěji se využívají pro mechanické součásti, které jsou silně zatížené

**Pík objemu materiálu omezené stupnici povrchu  $V_{mp}$**  – určuje objem materiálu na dané úrovni materiálového poměru  $mr = p$ .

- Výchozí hodnota  $p$  je stanovena normou a činí 10%. určený objem představuje materiál, který se nachází na vrcholech povrchu.

$$V_{mp} = V_m(p)$$

- Při uvedení součásti do provozu je tento objem materiálu z povrchu opotřebován jako první. Dle velikosti výsledné hodnoty parametru lze určit schopnost povrchu odolávat opotřebování.

**Jádro objemu materiálu omezené stupnice povrchu  $V_{mc}$**  (viz Obr. 52) – jde o rozdíl objemů materiálu, které jsou určeny materiálovými poměry  $mr_1 = p$  a  $mr_2 = q$ . Pro materiálové poměry  $p$  a  $q$  jsou normou stanoveny výchozí hodnoty  $p = 10\%$  a  $q = 80\%$ .

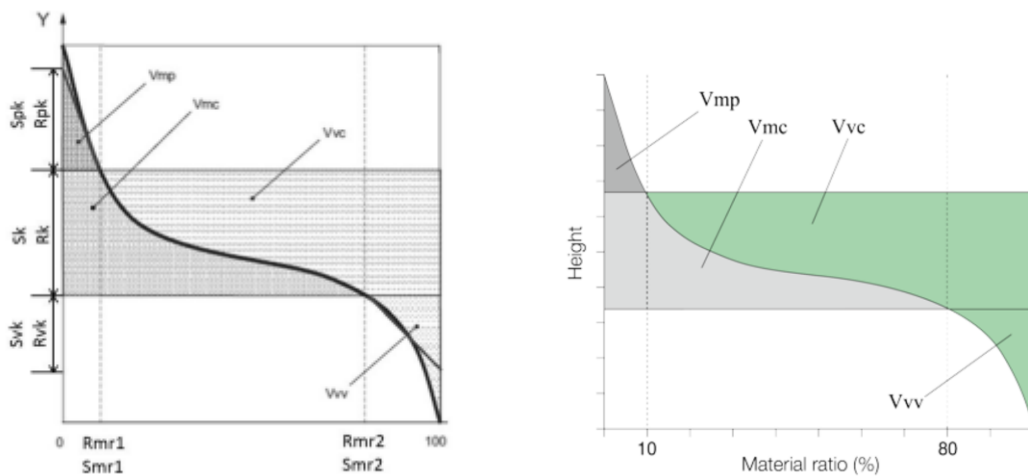
$$V_{mc} = V_m(q) - V_m(p)$$

- Parametr  $V_{mc}$  společně s parametrem  $V_{vc}$  je vhodný pro predikci vlastností povrchu součásti po určité době v provozu. Vzhledem k tomu, že nejvyšší vrcholy povrchu se při zátěži deformují nebo opotřebovávají a svým materiálem zanášejí údolí povrchu, tak právě tyto parametry dokážou vdaný okamžik popsat objem povrchu nejuvěrněji.

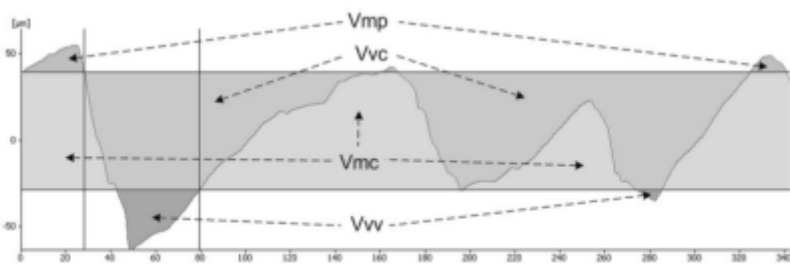
Tab. 4 Přehled  $V$  – parametrů neplatného objemu a objemu materiálu

Parametre neplatného objemu (Void volume parameters)	
Název parametru	Definice

Vvv	Neplatný objem údolí omezené stupnicí povrchu (Dále void volume of the scale-limited surface)	Objem údolí a poměru materiálu p
Vvc	Neplatný objem jádra omezené stupnice povrchu (Core void volume of the scale-limited surface)	Rozdíl v neplatném objemu mezi poměrem materiálu $mr_1=p$ a $mr_2=q$
<b>Parametry objemu materiálu (Material volume parameters)</b>		
<b>Název parametru</b>		<b>Definice</b>
Vmp	Pik objemu materiálu omezené stupnice povrchu (Peak materiál volume of the scale-limited surface)	Objem materiálu vztažený na jednotku plochy pro danou úroveň materiálového poměru plochy $p = mr$ .
Vmc	Jádro objemu materiálu omezené stupnice povrchu (Core materiál volume of the scale-limited surface)	Rozdíl objemů materiálu, které jsou určeny materiálovými poměry $mr_1=p$ a $mr_2=q$ .
<b>Další parametry</b>		
Sxp	Extremní výška piku (Peak extreme height)	Rozdíl ve výšce mezi poměrem materiálu p a q.



Obr. 52 Křivka nosného podílu pro objemové parametry Vvv, Vvc, Vmp, Vmc na Abbott-Firestoneově křivce



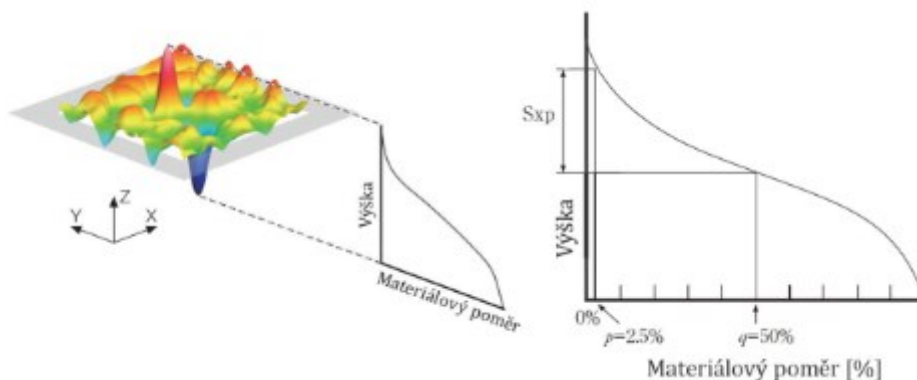
Obr. 53 Znázornění souvislosti objemových parametrů křivky nosného podílu s povrchem

Parametry neplatného objemu a materiálu popsaného výše nahradily indexy únosti, udržení kapaliny v jádře a udržení kapaliny v prohlubních, které v sadě Birminghamových parametrů měli funkci predikovat schopnost odolnosti povrchu proti opotřebení a schopnosti povrchu zadržovat kapalinu.

**Extrémní výška píku  $S_{xp}$**  – jedná se o rozdíl ve výšce mezi poměrem materiálu  $p$  a  $q$  (viz. Obr. 54)

$$S_{xp} = S_{mc}(p) - S_{mc}(q)$$

- Parametr popisuje horní část křivky poměru materiálu plochy ohraničenou střední rovinou a vrcholy povrchu. Norma ČSN EN ISO 25178-3 stanovuje výchozí hodnotu pro poměr materiálu  $p = 2,5\%$  a  $q = 50\%$ . Cílem tohoto omezení je odfiltrout nejvyšší píky, které mohou ovlivnit výsledky parametru, ale na funkci povrchu zásadní vliv nemají.



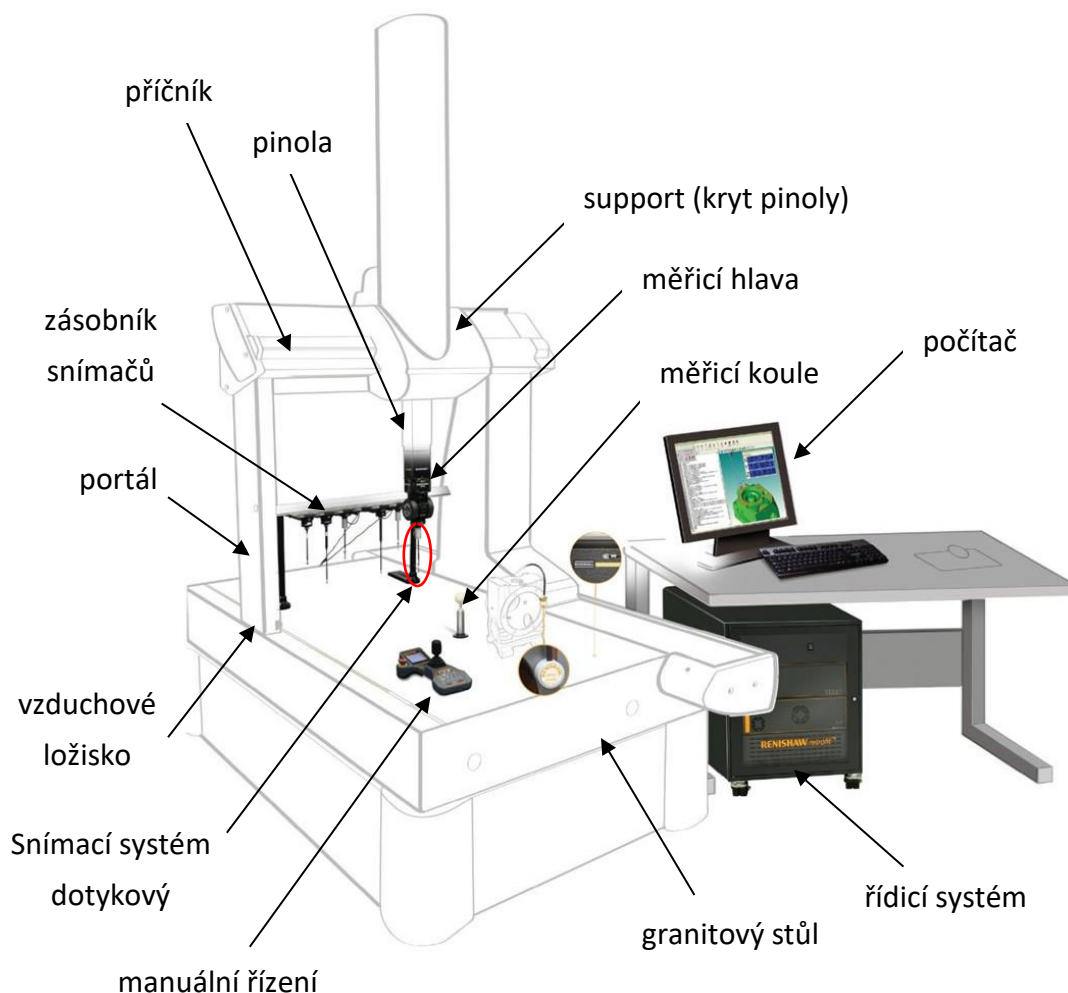
Obr. 54 Grafické znázornění extrémní výšky píku  $S_{xp}$

### 3 Souřadnicová měřicí technika

#### Terminologie souřadnicových měření (základní pojmy)

**Souřadnicová měřicí technika (SMT)** – komplex poznatků o měřidlech a metodách, které jsou založeny na principu souřadného systému.

Souřadnicové měřicí stroje v současní době sehrávají důležitou úlohu v oblasti průmyslových odvětvích, letectví, automobilového průmyslu, elektroniky, zdravotnictví apod. a jsou neoddělitelnou součástí výrobního procesu. Díky své univerzálnosti a flexibilitě souřadnicové měřicí stroje (CMM - Coordinate Measuring Machine), našly svoje místo hlavně v oblasti strojírenské výrobě. CMM ponoukají univerzální využití při kontrole tvarově složitých součástí. Výhodou CMM (obr. 55) je možné rychle a přesně zachytit délkové rozměry, uhly, nebo vyhodnocovat odchylky tvaru a polohy, za pomoci dotykových a bezdotykových snímacích systémů (obr. 55).



Obr. 55 Popis základních částí souřadnicového měřicího stroje

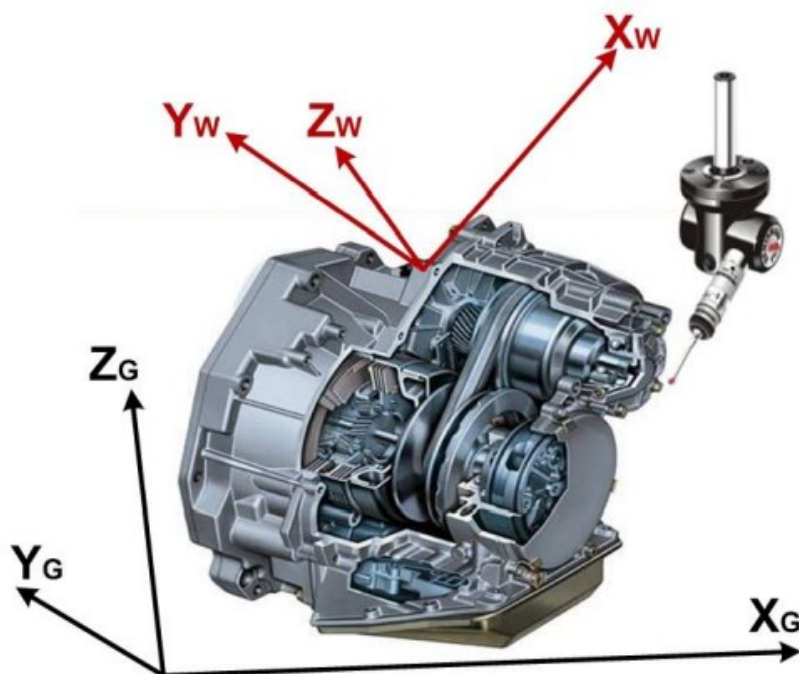
### Třísouřadnicové měřicí zařízení

V současné době se moderní souřadnicová technika využívá nejme v oblasti strojírenství nebo automobilové výrobě, která poskytuje univerzální využití při kontrole tvarově složitých součástek.

Souřadnicový měřicí stroj je počítačem kontrované zařízení, které má složitý měřicí systém a je schopný měřit v rovině nebo v prostoru dané souřadné soustavy.

CMM pracuje s dvěma souřadnicovými systémy viz obr. 56:

- souřadnicový systém stroje,
- souřadnicový systém měřené součásti.



Obr. 56 Souřadnicový systém stroje a součástky

Pokud se měří délka na konkrétní součástce, souřadnicový systém součástky se vytváří změřením referenčních prvků po obvodě součástky (obr. 56). Musíme však rozlišovat mezi souřadnicovým systémem přístroje ( $X_G, Y_G, Z_G$ ) a souřadnicovým systémem součástky ( $X_W, Y_W, Z_W$ ). Na měřené součástce může být několik souřadnicových systémů.

Každý CMM se skládá z dílčích, navzájem propojených subsystémů (obr. 56), které jsou navzájem propojené:

- pohonný systém (mechanická část),
- odměřovací systém,
- snímací systém včetně systému pro výměnu snímačů,

- řídicí systém,
- počítač,
- software.

Ve všeobecnosti se od nich očekává:

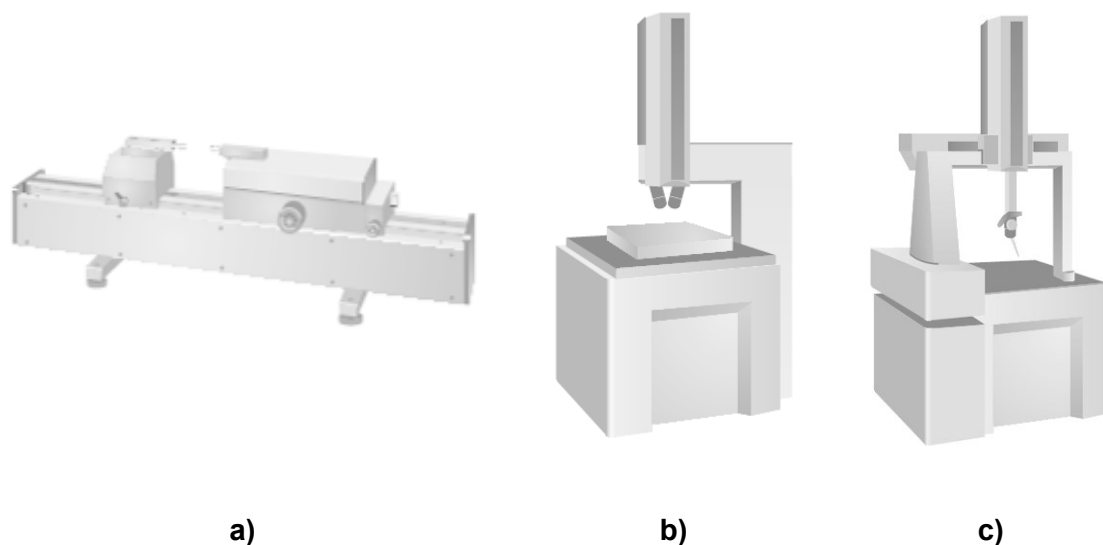
- absolutní a inkrementální měření (měření rozměru po jednotlivých krocích) měření rozměru ve směru os x, y a z,
- měření vzdálenosti mezi definovanými body,
- určení obrysové křivky z naměřených bodů,
- generování křivek chyb,
- určení geometrických odchylek tvaru a polohy,
- automatické porovnání požadované a skutečné hodnoty,
- kontrola sdružených součástí,
- výpočet průsečíků os,
- výpočet středů a průměrů děr různými metodami,
- zjištění sklonu osy díry,
- zjištění středu oblouku,
- automatické nastavování naměřených objektů,
- automatická korekce na dotyk,
- transformace souřadnic (kartézské – polární).

## Typy konstrukcí CMM

Výrobci CMM strojů nabízejí celou řadu od malých stolních přístrojů až po velké mostové systémy. Používají se hlavně ke kontrole rozměrů, tvaru a polohy běžných geometrických útvarů, které se vyskytují na výrobcích.

Podle konstrukce se souřadnicové měřicí stroje rozdělují na tři základní skupiny:

- **Jednosouřadnicové měřicí stroje** (obr. 57 a) - umožňují měřit rozměr jen v jedné ose x. Pomocí nich se dá dosáhnout velmi malá chyba měřidla 0,6 až 6  $\mu\text{m}$  v celém rozsahu, a to i při měření velkých rozměrů.
- **Dvousouřadnicové měřicí stroje** (obr. 57 b) – umožňují měřit rozměry ve dvou navzájem kolmých osách „x“ a „y“, v jedné rovině. Při měření v 2D využíváme mikroskopy, profilprojektory, laserové interferometry a skenery.
- Mikroskopy jsou počítačem podporované a obvykle mají optoelektronický odměřovací systém, okulár s nitkovým křížem nebo CCD kameru.
- **Třísouřadnicové měřicí stroje** (obr. 57 c) – umožňují měřit rozměry ve třech navzájem kolmých osách „x“, „y“ a „z“, teda v prostoru. Představují vrchol techniky měření geometrických veličin. Na jedno upnutí umožňují složité rozměrové měření ve třech navzájem kolmých souřadnicích.



Obr. 57 Typy CMM podle konstrukce: a) jednosouřadnicový CMM, b) dvousouřadnicový CMM, c) třísouřadnicový CMM

V současnosti existuje velké množství CMM vyznačující se různými stupni automatizace od manuálních, až na některé výjimky, všechny využívají konstrukční řešení s polohováním v kartézské (polární) souřadnicové soustavě.

Podle normy ČSN EN ISO 10 360 – 1 se CMM zařazujeme do čtyř základních geometrických uspořádání:

- stojanový typ,
- výložníkový typ,
- portálový typ,
- mostový typ.

#### **Stojanový (sloupový) typ (obr. 58 a)**

Měřený předmět se upíná na stůl, který se pohybuje ve směru osy „x“ a „y“ a měřicí pinola se pohybuje ve směru osy „z“. Stroje tohoto typu se řadí mezi nejpřesnější a jsou vhodné pro malé rozsahy měření, můžou být vybavené kruhovým stolem s úhlovou stupnicí. Jejich charakteristickými znaky jsou:

- tuhá úhlová konstrukce,
- dobrý přístup k měřenému předmětu.

#### **Výložníkový typ (obr. 58 b)**

Měřený předmět se upíná na stůl, přičemž měřicí pinola na výložníku se pohybuje ve směru osy „y“ a kolmo v ose „x“, v ose „y“ se mění vyložení pinoly od vodící plochy, proto je nutné vyvažování. Jejich charakteristickými znaky jsou:

- z důvodu tuhosti je osa „y“ poměrně krátká,
- dobrý přístup k měřenému předmětu – vhodný pro dlouhé úzké součásti.

### Portálový typ (obr. 58 c)

Patří k nejrozšířenějším CMM pro střední a velké rozsahy měření. Jejich charakteristickými znaky jsou:

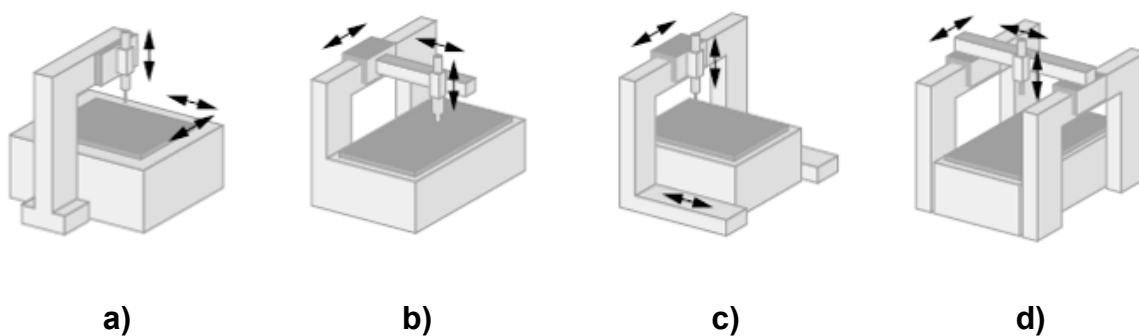
- velká tuhost (umožňuje vysokou přesnost měření).

Může být ve dvojnásobném provedení:

- pohyblivý portál (obr. 58 a) – portál se pohybuje nad pevným stolem, přístup do měřicího prostoru je omezený konstrukcí stroje,
- pevný portál (obr. 58 b) – je pevný, vyžaduje pohyblivý stůl, který se pohybuje v ose „X“.

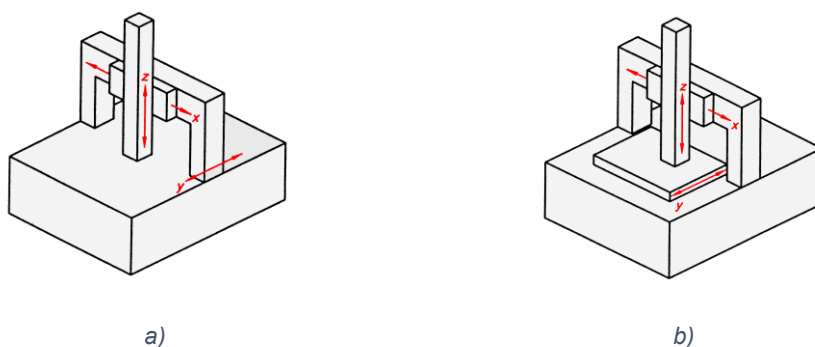
### Mostový typ (obr. 58 d)

Je charakteristický svou velikostí a má největší rozsahy měření. Měřicí rozsah v ose „x“ je až 24 m a více. Používá se na měření nadrozměrných součástek, nejčastější využití je v automobilovém a leteckém průmyslu.



Obr. 58 Typy souřadnicových měřicích strojů

a) stojanový typ, b) výložníkový typ, c) portálový typ, d) mostový typ



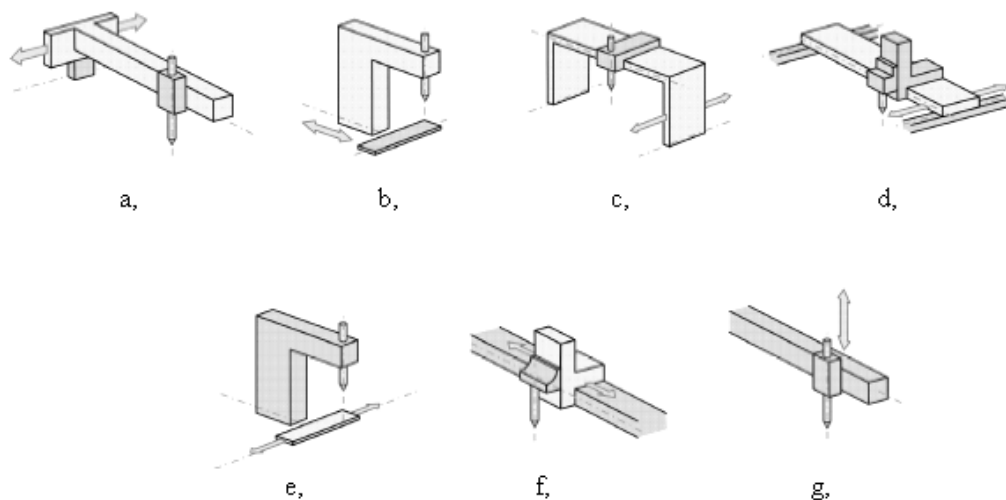
Obr. 59 Portálový CMM

a) pohyblivý portál – s pevným stolem, b) pevný portál – s pohyblivým stolem

Podle hmotnosti obrobků jsou vyráběny CMM:

- s pohyblivým stolem,
- s pevným stolem,
- s pevnou deskou v úrovni podlahy.

Pro CMM jsou typické tyto části, které jsou typické i pro výrobní stroje (obr. vv).



Obr. 60 Části souřadnicových měřicích strojů

a) výložník, b) stojan, c) most, d) portál, e) posuvný stůl, f) suport, g) smýkadlo

### Multisenzorové CMM

U CMM tohoto typu se používají různé kombinace měřicích sond (např. optická sonda, skenovací sonda, mikrosonda, mechanický snímač apod.). Ze základních vlastností sond vyplývá, pro jaký účel se budou používat, přičemž důležitými rozlišovacími znaky jsou:

- velikost měřeného obrobku (součástky),
- druh měřených geometrických prvků,
- vhodnost rychlého zachování velkého množství bodů (skenováním).

Pro komplexní řešení měřicích úloh je potřebné používat v průběhu jednoho měření více typů měřicích sond. Většinou mohou být ve dvou provedeních:

- stacionární (např. videocheck, tomograf),
- mobilní (např. FARO).

### Počítačová tomografie (metrotomografia)

Počítačová tomografia (metrotomografia) Medzi najnovšie spôsoby merania v praxi patrí i metrotomografia (obr. 61). Súradnicové meracie stroje, ktoré využívajú túto technológiu sú väčšinou konštruované ako multisenzorové stroje. Zvyčajne primárna sonda (röntgen) býva doplnená o kombináciu ďalších sond (kontaktná sonda, laserová sonda).



Obr. 61 Werth Tomoscope – 3D rentgenový měřicí přístroj

### Princip tomografu:

Systém tomografu pracuje tak, že měřený obrobek (součást) je umístěn na otočném stole v takové poloze, aby ležel v paprscích vycházejících z RTG zářiče. Jeho profil je zachycen na detektoru, který ho přepočítá z RTG obrazu do digitálního 2D obrazu pro další zpracování. Trojrozměrný obraz vzniká otáčením obrobku o 360° okolo vlastní osy (na otočném stole zařízení. Tímto způsobem se získané údaje přepočítají na 3D objemový model součásti.

### Typické aplikace měření na tomografu:

- získání kompletní geometrie měřeného obrobku (součásti) v jedné měřicí sekvenci,
- měření vnitřních geometrií obrobku ve špatně přístupných místech,
- 3D porovnávání nominálních a aktuálních údajů, např. 3D zobrazení odchylek sítě bodů vůči 3D CAD modelu,
- Reverse Engineering, apod.

### Základní prvky mechanického systému

K mechanickým prvkům CMM patří:

- rám,
- stůl,
- stojan (sloup),
- portál,
- most,
- pinola.

**Rám** - jedná se o svařovanou konstrukci co největší tuhosti (nese ostatní části mechanického systému). U mostových typů CMM je rám nahrazen deskou v podlaze.

**Stůl** - tvoří základnu pro osazení a upnutí měřené součásti (přímo, nebo za pomoci upínacího přípravku).

U CMM jsou stoly nejčastěji z přírodního kamene (žula), nebo z umělého kamene (granit), alternativně litinového odlitku. Pracovní deska je ustavena na čtyřech základních podpěrách. Horní plocha pracovní desky je broušená (při výrobě jsou kladené vysoké požadavky na rovinnost funkčních ploch). V pracovní ploše jsou otvory se závity. Pomocí těchto závitů, šroubů a upínek se připevňuje k pracovní ploše měřený kus. Na koncích desky je upevněno seřiditelné vedení, po kterém pojíždí most.

K základním požadovaným vlastnostem materiálu patří:

- vysoká životnost,
- objemová stálost,
- minimální tepelná roztažnost,
- odolnost proti korozi,
- možnost opravy při případném poškození.

**Sloupy, portály a mostové konstrukce** - u jednotlivých typů CMM jsou konstruované jako svařence. Důraz je kladen na dostatečnou tuhost, rozměrovou a tvarovou stálost. Portál CMM je konstruovaný na minimální průhyb při posunu pinoly v příčném směru. Při některých typech CMM je konstrukce portálu zhotovena ze žuly nebo granitu.

**Most** - složená uzavřená konstrukce, jejíž stojny tvoří profily normy ČSN 42 6936, přičemž překlad mostu tvoří vedení příčných saní.

**Pinola** - je tyč kruhového profilu H (litinová, duralová, z přírodního kamene nebo keramická), nebo čtvercového průřezu. Může být koncipovaná, jako vertikální nebo horizontální.

*Nevýhody:* v horizontální poloze je pinola zatížená na ohyb od vlastní hmotnosti a hmotnosti snímací hlavy. Pro kompenzování vodorovné polohy pinoly slouží vyvažovací zařízení (vyvažování pinoly je mechanické, pomocí dvou souměrných závaží), které minimalizují chyby způsobené rozdílnou délkou vysunutí pinoly.

## **Uložení pohyblivých částí**

Požadavky na realizaci pohybu v jednotlivých osách jsou:

- přímočarost,
- vzájemná kolmost,
- stálost rozměrů,
- minimální vůle,
- minimální pasivní odpory.

Konstrukční řešení vzájemných pohybů jednotlivých částí (stůl, pinola, portál atd.) se většinou provádí následujícími způsoby:

**Kluzné uložení** – na kovových plochách při CMM malých rozměrů a vyšších tříd přesnosti.

*Nevýhody:* velký odpor – jen pro malé rychlosti posuvů, vyžaduje neustále mazání.

*Výhody:* velká tuhost, kvalita vedení se v průběhu používání zvyšuje, čímž se zvyšuje i přesnost.

**Valivé uložení** – vyznačuje se nízkým valivým odporem a značnou odolností proti opotřebení. Nejjednodušší řešení realizují přesné kladky. Dokonalejší jsou tzv. valivá hnízda, při kterých se vylučuje vliv mikrone rovností. Vyhovují i při velkém zatížení.

**Aerostatické uložení** – umožňuje vzájemný pohyb jednotlivých částí CMM bez tření po vzduchovém polštáři, šířka 4 až 8  $\mu\text{m}$ .

*Výhody:*

- minimální odpor (i při vyšších rychlostech),
- nevzniká trhavý pohyb (známý při kluzném uložení),
- značná tuhost,
- potlačený vliv nepřesnosti povrchu.

### **Komplexní měřicí systémy**

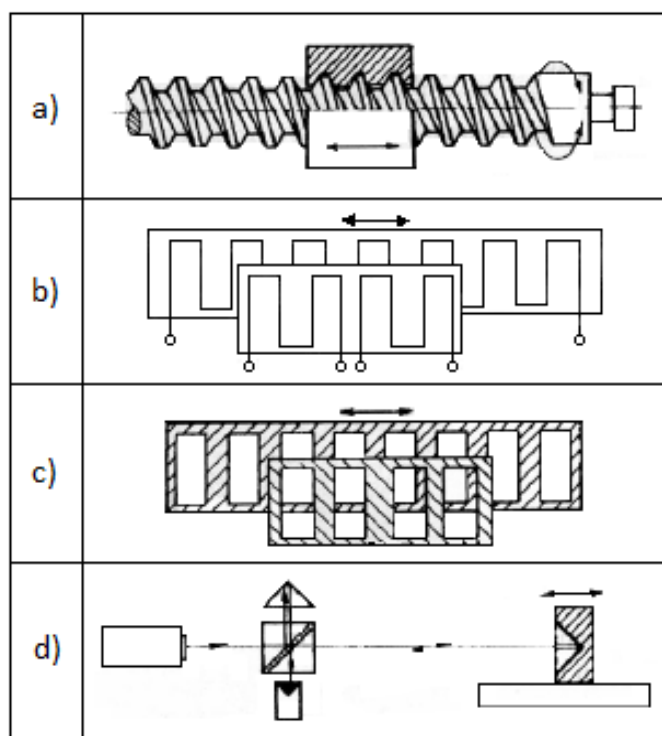
Souřadnicové měřicí stroje a optoelektronické měřicí systémy se v současnosti staly hlavními reprezentanty měřidel pro komplexní hodnocení geometrických charakteristik součástí.

Základ měření na CMM tvoří měřicí systém, který umožňuje získat souřadnice ze snímaných bodů v kartézských (polárních) souřadnicích, které mohou být zapsané v analogovém nebo číslicovém tvaru.

U CMM se nejčastěji používají:

#### **Délkové měřicí systémy (obr. 62)**

- závitový hřídel s úhlovým převodníkem,
- lineární induktosyn,
- inkrementální délková stupnice,
- laserinterferometr.



Obr. 62 Měřicí systémy CMM

*závitová hřídel; b) indukčosyn; c) inkrementální délková stupnice; d) laserinterferenční systém.*

### Závitový hřídel s úhlovým převodníkem

Vyrábí se do délky 1,2 m, mají malé stoupání, pro zajištění tepelné stability jsou uloženy v olejové lázni. Úhlový převodník má rozlišitelnost 1“.

*Nevýhoda:* chyba reverzibility, způsobená vůlí mezi šroubem a maticí (při posuvu v opačných směrech).

### Indukčosyn

Je fázové odměřovací zařízení, které informuje řídicí systém spojený s ovládaným strojem o poloze, v níž řízená souřadnice je. Rozhoduje o výsledné přesnosti číslicového řízení. Indukčosyn může být:

- lineární,
- rotační.

U CMM se využívá lineární indukčosyn.

### Lineární indukčosyn

Jedná se o měřítko zhotovené formou vodivého plošného spoje na nevodivé fólii (může být ve tvaru desky nebo pásky), která se lepí na ocelovou podložku z vyrostlého materiálu, s koeficientem tepelné roztažnosti stejným jako má materiál stroje. Plošný spoj, má tvar

pravoúhlého meandru, který je napájený střídavým proudem. Délka jedné vlny meandru je 2 mm. Proti měřítku je ve vzdálenosti cca 0,1 mm umístěn jezdec, na kterém jsou opět formou plošného spoje vytvořeny vedle sebe dvě smyčky (plošné vinutí) obdobného meandru se stoupáním 2 mm, jejichž vzájemná vzdálenost má diferenci  $k/4 = 0,5$  mm. Na smyčkách se indukují dvě napětí, fázově posunutá o  $90^\circ$ . Při pohybu jezdce po základním měřítku vznikne přibližně sinusový průběh napětí, jehož interpolací vychází odměřovací krok 1  $\mu\text{m}$ , přičemž je provedeno rozlišení smyslu pohybu.

*Výhody:* Induktosyn je značně odolný, který závisí na kvalitě vyhodnocovací elektroniky a může být až 0,0005 mm.

*Nevýhody:* K odměřování vedou dva a nevyžaduje prakticky žádnou údržbu. U tohoto typu odměřování je velká rozlišitelnost kabely. Jeden k měřítku, druhý k jezdcí. Další nevýhodou je, že s délkou měřítka se zvyšuje jeho ohmický odpor a tudíž i budící výkon. Rovněž malá vzdálenost mezi měřítkem a jezdcem zvyšuje nebezpečí vniknutí třísek do mezery a tím poškození měřítka. Ochrana tenkou nemagnetickou fólií zase zvyšuje vzdálenost mezi měřítkem a jezdcem, nároky na přesnost montáže a tedy i cenu instalačních prací. Nedokonalé nalepení pásky na podložku rovněž ovlivňuje velikost vzduchové mezery a tím i velikost signálu a přesnost. Lepení na broušenou podložku výrazně zvyšuje cenu a prodražuje montáž, obdobně i krytování měřítka.

### **Inkrementální délková stupnice**

Jedná se o nejpoužívanější odměřovací systém CMM pro odměřování délek. Rozlišitelnost je 1  $\mu\text{m}$ , základní stupnice je na skleněném (kovovém) podkladě a střídavě propouštějí světlo a to tak, že střídají pole propouštějící (odrážející) světlo s poli nepropouštějícími (neodrážejícími) světlo (obr. 62 c). Jezdec má 4 pole, která propouštějí světlo. Dvě pole jsou posunuta o  $1/4$  rozteče. Vzdálenost rysek je  $0,01 \div 0,04$  mm.

Dá se docílit rozlišitelnost až 0,1  $\mu\text{m}$  a to tak, že jezdec u některého systému je natočen vůči základní stupnici o nepatrný úhel (interferencí – vzniknou proužky „moiré“) a pohyb obrazce je převeden na elektrické signály.

*Výhoda:* snadná kalibrace, která se docílí náklonem jezdce.

### **Laserinterferometr**

Laserinterferometry se používají zřídka u CMM, používají se pro kontrolu přesnosti CMM, jedná se o poměrně drahé a citlivé zařízení s rozlišitelností až 0,01  $\mu\text{m}$ .

Základní princip této metody se převzal od optického interferometru, který byl pojmenovaný podle fyzika A. A. Michelsona (1852 – 1932), ten se proslavil díky svému přístroji z roku 1893 (obr. 62).

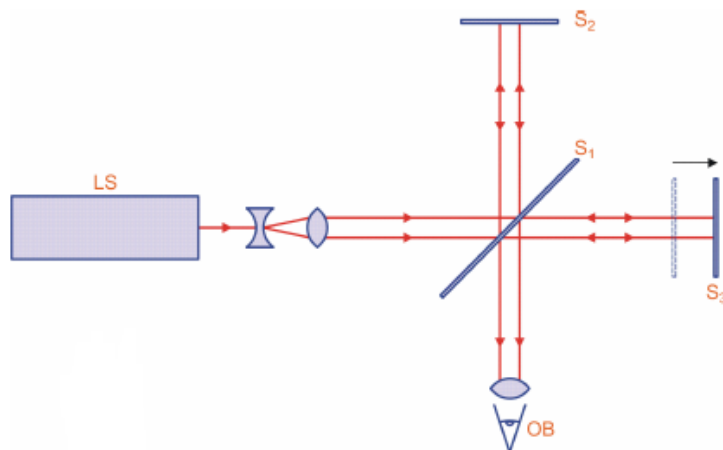
*Princip:* Zdroj světla vyzařuje světelný paprsek, který se na polopropustném zrcadle S1 rozkládá do dvou paprsků, které se namíří na dvě úplná odrazová zrcadla S2, a S3, od kterých se odráží na polopropustné zrcadlo S1 a zároveň se na něm opět spojí, což způsobí interferenci.

Jak se zrcadlo S2 pohybuje, změna jeho vzdálenosti způsobuje střídavé vzájemné zesilování a zeslabování světelné intenzity spojujících se v paprsek. Fotodetektor na místě pozorovatele vytváří periodický vlnový signál, při kterém se spočítá počet vln, kde délka světelné vlny odpovídá změně velikosti signálu a počet vln je úměrný skutečnému přemístění pohyblivého zrcadla.

Na zabezpečení stability světelného zdroje se musí využít laser. Pro zabezpečení délkového měření o přesnosti 0,00001 mm/m a více je třeba kompenzovat vliv prostředí, mezi které zařazujeme teplotu, vlhkost, tlak vzduchu a obsah oxidu uhličitého.

Ve většině případů skoro všechny interferometry, pracují na heterodynamickém principu (obr. 63). V tomto případě se délka posunutí měřicího zrcadla určuje z frekvenčního posuvu

laserového světla v důsledku Dopplerova jevu. Poloha odrazového zrcadla se získá integrací míry posunutí za čas.



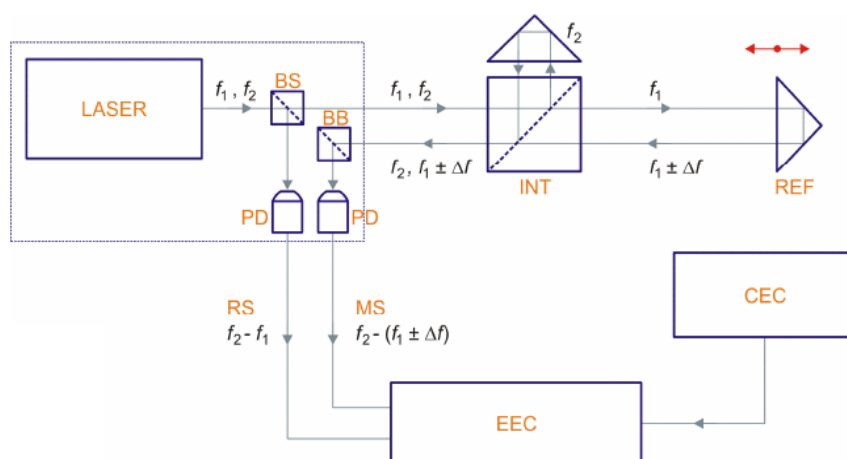
Obr. 63 Michelsonov interferometer

(LS - zdroj světla, OB – pozorovatel, S1 – polopropustné zrcadlo, S2, S3 – odrazová zrcadla)

### Heterodynní interferometry

Využívají laser, kde na základě fyzikálního Zemannova jevu vyzařuje dvě frekvence, které jsou vzdálené o 1,8 MHz a navzájem se kruhově opačně polarizují. Pohyb obrazového zrcadla způsobuje frekvenční posun (obr. 64), který umožňuje výpočet posunutí odrazového zrcadla.

*Výhody:* rozlišení směru pohybu zrcadla a malá citlivost na nastavení a ovlivňující jevy.



Obr. 64 Heterodynní laserový interferometer (dvojfrequenční interferometer)

*(BS – dělič paprsku, BB – lampač paprsku, INT – interferometer, REF – odrazové zrcadlo, PD – fotodetektor,  
RS – referenční signál, MS – měřicí signál, CEC – kompenzace: podmínky okolí, EEC – vyhodnocovací  
elektronika a počítač)*

### **Optoelektronické měřicí systémy**

Pro měření rozměrů a geometrických charakteristik objektů využíváme různé typy optoelektronických metod (obr. 65).

Posledních 30 roků se používají světelné a bariérové snímače, které jsou levné, robustní, rychlé a efektivní zařízení. Vývoj měřicích metod se ubírá k jednorozměrným a vícerozměrným systémům, ale růstem komplexnosti narůstá jejich cena, proto se trojrozměrné metody velmi často nepoužívají.

Mezi trojrozměrné metody zařazujeme:

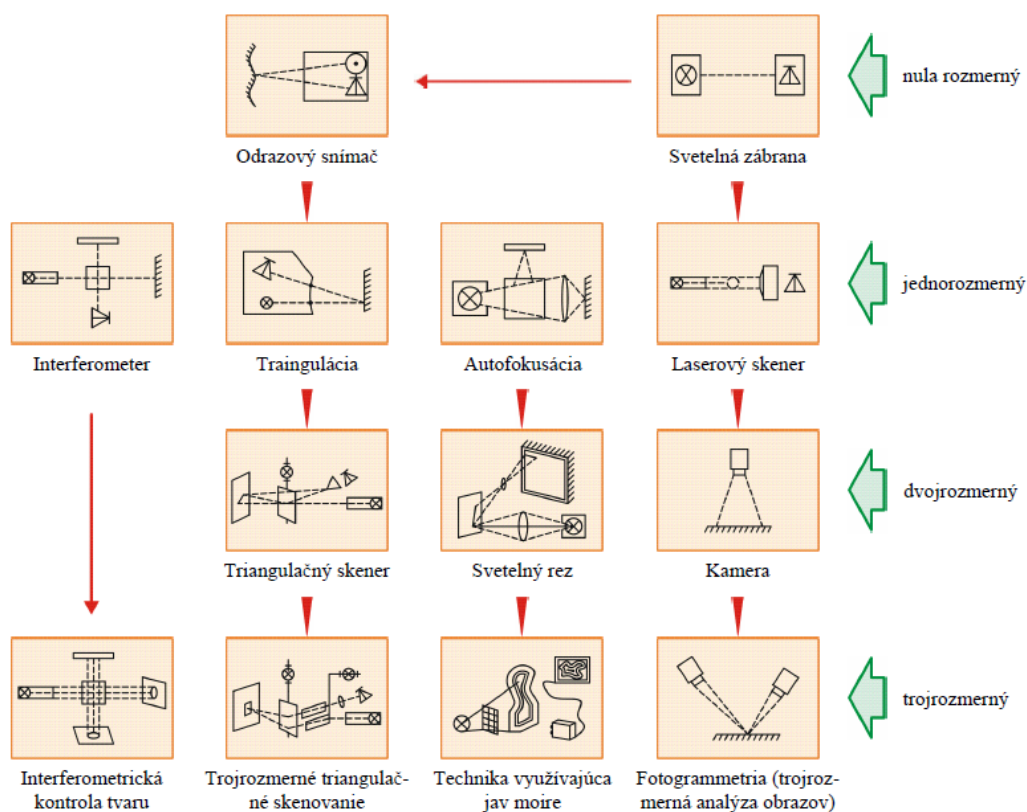
- interferometre,
- laserové skenování,
- různé optické systémy.

Z hlediska spolehlivosti, reprodukovatelnosti a efektivity optoelektronických měřicích zařízení je poznat jejich hranice použitelnosti a veličiny, které ovlivňují jejich metrologické vlastnosti.

Před měřením je třeba přezkoumat proměnlivost:

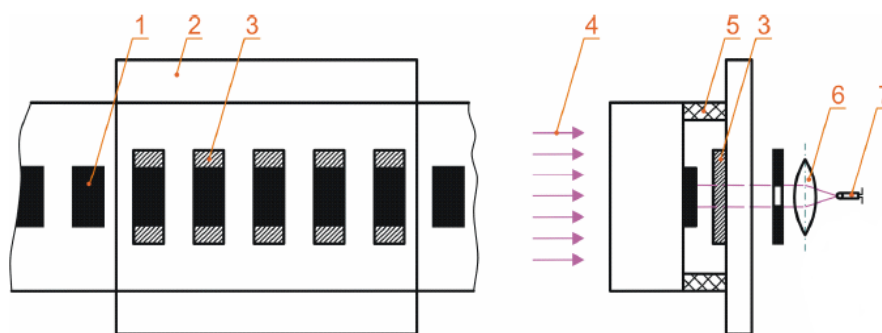
- čistoty,
- barvy,
- kvality povrchu měřených objektů.

Na kalibraci a referenční měření se používají dotykové metody.



Obr. 65 Přehled optoelektronických měřících systémů

Pro automatické měření délky a polohy se používají optoelektrická délková měřítka s číslicovým odčítáváním. Princip optoelektrického měřítka je znázorněný (obr. 66).



Obr. 66 Princip optoelektrického měřítka

(1 – mřížka, 2 – pravoúhlá skleněná šablona, 3 – snímací šablona, 4 – rovnoběžné osvětlení, 5 – distanční mezikus, 6 – spojná čočka, 7 – fototranzistor)

## Odměřovací systémy na CMM

Odměřovací systém tvoří důležitou část u CMM, protože do určité míry ovlivňuje výslednou přesnost měření. Výsledek měření ovlivňuje rozlišovací schopnost a periodickou chybu měřítka v závislosti na měřené délce. U dělení měřítka se chyba projevuje jako chyba s dlouhou periodou (u skládaných měřítek).

Odměřovací systém umožňuje:

- přesné polohování mechanických částí stroje,
- zpětnou vazbu měřicímu softwaru.

Induktosynového odměřování – vedle periodické chyby se přesnost měření ovlivňuje rychlost pohybu odměřovacího systému.

Laserinterferometrové odměřování – má chybu v celém rozsahu konstantní, ale v závislosti odstranění vlivu prostředí korekčním zařízením.

Odměřovací zařízení je možné dělit podle principu jejich práce na:

- analogové systémy,
- číslicové (digitální) systémy.

Druhé hledisko je založené na charakteru informací, které předávají na zařízení:

- s přírůstkovým (inkrementálním) odměřováním,
- s absolutním odměřováním,
- s cyklicky absolutním odměřováním.

### Analogové systémy

Měřítka je tvořeno proměnným odporem, kapacitou atd., které dávají plynule proměnný signál. Kvůli číslicovému odečítání je potřebný analogový číslicový převodník, který změní analogový signál na číslicový.

Analogové odměřovací zařízení se od číslicového (digitálního) odměřovacího zařízení liší tím, že převádí měřenou délku a úhlové pootočení na fyzikální veličiny (jako jsou napětí, fázový posun apod.).

Řadíme sem selsyn a induktosyn.

### Číslicové (digitální) systémy

Mezi číslicové systémy zařazujeme:

- kódovaná měřítka,
- nekódovaná měřítka.

**Kódovaná měřítka** - tyto systémy s kódovaným měřítkem, můžeme nazvat jako absolutní systémy, protože odečítací zařízení dokáže odečítat absolutní (číslcovou) hodnotu souřadnice, která je na měřítku zakódovaná.

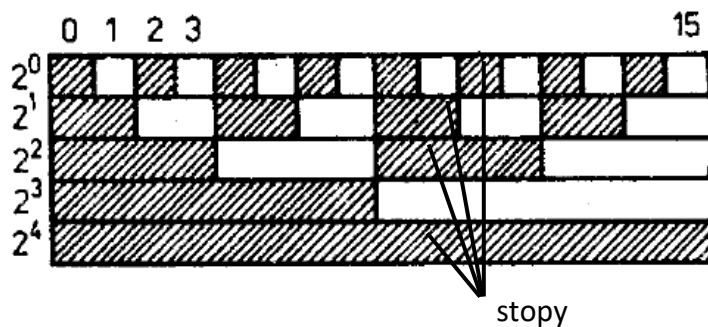
Princip: Snímané souřadnice se odečítají z kódovaného měřítka už v číselné formě a převedou se do převodníku kódu (většinou se používá binární kód (dvojkový) – dvojkového na desítkový), který je místo čítače.

#### **Absolutní kódovací systém s kódovanými měřítky:**

- systém pracuje s hmotnou kódovanou stupnicí,

- snímání údajů je založeno na fotoelektrickém principu,
- v každém místě – přímo (absolutně) umožňuje určit polohu nezávisle na počítání ujeté dráhy – souřadnice jsou v daném místě měřítka zakódované,
- základní částí systému je skleněné pravítko a snímací hlava,
- měřítko je sledováno fotobuňkami umístěnými ve snímací hlavě, každá fotobuňka snímá jednu stopu a přiřazuje k ní příslušné porovnávací zařízení, které musí zpracovat nejen jednotlivé impulzy, ale i celé číslo,
- kombinací přehledných a nepřehledných polí na jednotlivých stopách je určena v každém intervalu v kódovaném tvaru příslušná souřadnice.

Na obr. 67 je znázorněné binární měřidlo, které tvoří řadu inkrementálních měřidel umístěných nad sebou (obvykle 12 až 20). Měřidla jsou dvojkově odstupňovaná.



Obr. 67 Uspořádání měřidla pro přímé číslicové absolutní odměřování

Pro velké odměřovací dráhy a jemné dělení je výroba lineárních měřidel nákladná, a proto se používání velmi nerozšířilo, na základě toho se střetáváme s tvarem kotoučů pro nepřímé odměřování.

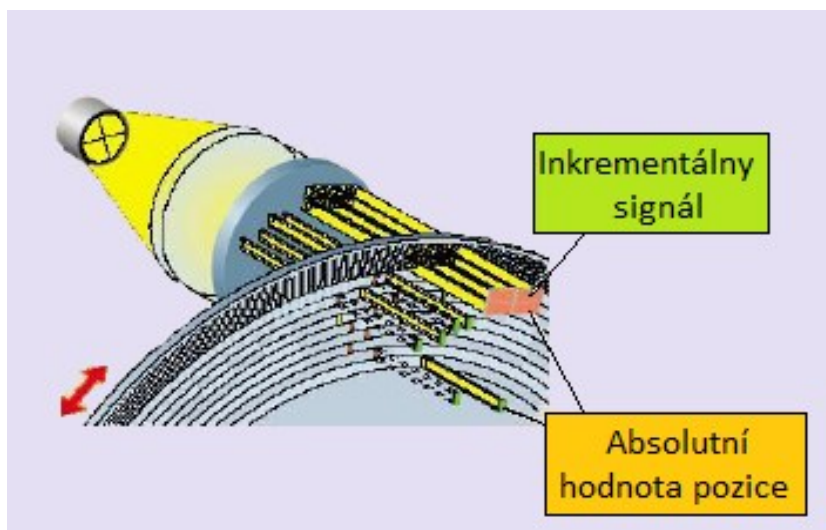
*Výhoda* absolutního odměřování polohy:

- eliminace ztráty polohové informace při poruchách přívodu energie,
- odpadá nutnost naběhnutí do referenčních bodů po každém zapnutí stroje,
- měřidlo má větší počet referenčních značek umístěných v narůstajících vzdálenostech, stačí pohyb mezi těmito značkami a absolutní poloha je známa (obr. 67).

Hodnota polohy se získává z enkoderu ihned po zapnutí a může být vyvolána kdykoliv vyhodnocovací elektronikou, není potřebné pohybovou osu hledat referenční polohou (synchropoloha). Absolutní hodnota polohy je načítaná z disku dělení, který obsahuje samostatnou stopu paralelního dělení (obr. 67).

Při metodě s **absolutním odměřováním**, se hodnota polohy získává z enkóderu ihned po zapnutí a může být vyvolána kdykoliv vyhodnocovací elektronikou. Absolutní hodnota polohy je odečítána z disku dělení, který obsahuje samotnou stopu paralelního dělení (obr. 68). Stopa

s přesným dělením je interpolována na hodnotu polohy a současně se používá vygenerovaný přírůstkový signál. V jednootáčkovém enkóderu se informace o absolutní poloze opakuje s každou otáčkou a víceotáčkový enkóder rozlišuje mezi otáčkami.



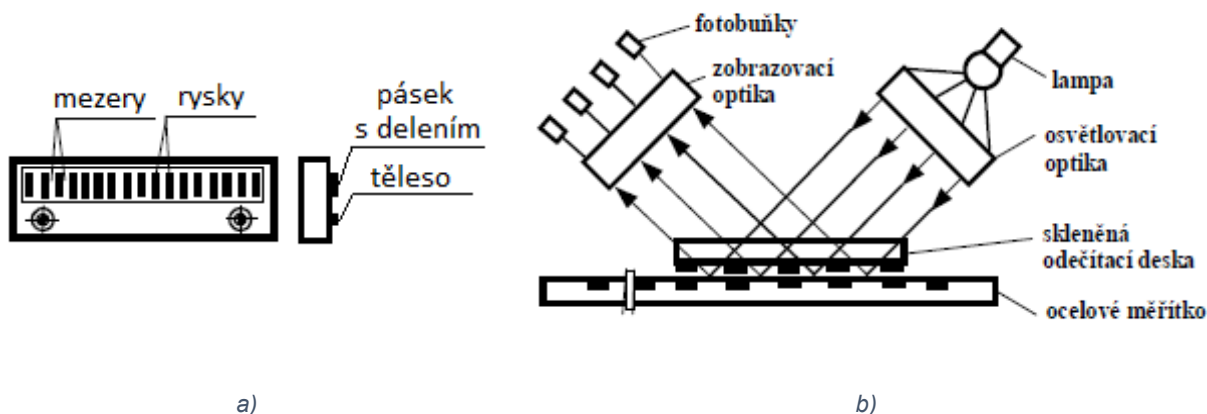
Obr. 68 Princip a stavba absolutního snímače (enkóderu)  
fy Heidenhain

**Nekódované měřítka** – tyto systémy s nekódovaným měřítkem nazýváme **relativní (přírůstkové) systémy**, protože počítač počítá impulsy od toho místa, ve kterém byl vynulovaný. Nazýváme ho vztažným bodem, od kterého měříme souřadnice. Vynulování můžeme uskutečnit v kterémkoliv bodě měřítka.

Princip: Z nekódovaného měřítka se v pravidelných vzdálenostech posílají impulsy do odečítacího zařízení, které je převede do počítače. Počítač impulsy sečte, přičemž součet impulsů odpovídá ujeté dráze a je indikován na displeji.

**Relativní (přírůstkový) odměřovací systém s nekódovaným měřítkem:**

- je opatřený přesným měřítkem a ryskami, kde vzdálenost rysky + mezera tvoří elementární krok,
- dělení měřítka je vytvořené střídavě ryskami s mezerami o stejné šířce (obr. 69 a),
- podkladem dělení je ocelový nerezový pásek, který je na vlastní těleso nalepen.



a) hmotné nekódované měřítko, b) princip rovnoběžné mřížky LIDA firmy Heidenhein

Princip odečítání fotoelektrického systému (obr.69x b):

- skleněná odečítací deska je rozdělená na 4 pole,
- každému poli je přiřazena jedna fotobuňka,
- odečítací pole je mřížka s neprůhlednou rýskou a průhlednou mezerou, jejich dělení se shoduje s dělením měřítka,
- tyto 4 pole jsou o  $\frac{1}{4}$  dělicí periody přesazené proti sobě,
- intenzita osvětlení je maximální, když se měřítko osvětlených fotobuněk posune tak, že průhledné mezery odečítací desky stojí nad odrážejícími mezerami měřítka,
- intenzita osvětlení je minimální, když se kryjí neprůhledné rysky odečítacího pole s odrážejícími mezerami měřítka,
- když se měřítko pohybuje v podélném směru, relativně k odečítací hlavě, mění se intenzita přicházejícího světla k fotobuňce od maxima k minimu,
- použitím většího počtu štěrbin v odečítací desce se zvýší světelný proud dopadající na fotobuňku a tím se zvýší přesnost měření, protože náhodné chyby se statisticky vyloučí.

**Nekódovaná měřítko**, podle stupnice mohou být:

- hmotné,
- nehmotné.

**Hmotná stupnice** (obr. 69 a) - rozumíme měřítko, které je rovnoměrně od sebe vzdálené, fyzikálně odlišné od podkladu (je opatřené značkami).

**Nehmotná stupnice** – rozumíme měřítko, které je realizováno stojatými vlnami, u kterých uzly a kmity rozeznává zařízení.

Fyzikální principy, na kterých je postavené snímání údajů z měřítka, můžeme řadit:

- optické, fotoelektrické (obr. 69), elektrické (indukční, kapacitní, magnetické), pneumatické apod. odměřovací systémy.

### **Fotoelektrický nebo elektrický odměřovací systém**

U fotoelektrického nebo elektrického odměřovacího systému se odečítací zařízení mění ze snímaného signálu na elektrický signál, který je zpracovaný v elektronických obvodech (počítadlech, převodnicích, dekodérech). Indikace je skoro stále prováděna za pomoci číslicových doutnavek, ale zároveň je možnost použít i jiné elektricky ovládané číslicové ukazatele.

### **Pneumatický odměřovací systém**

U pneumatického odměřovacího systému, signály z odečítacího zařízení, pneumatické i další zpracování je v pneumatických logických obvodech.

Všechny tyto systémy umožňují dálkový přenos odměřovaných hodnot a zobrazovat je na ovládací panel nebo displej přístroje.

### **Optický odměřovací systém**

Optický odměřovací systém pracuje pouze s vlastností světelného svazku s přenosem televizní kamerou. Zde se neumožňuje dálkové odečítání v libovolném místě.

### **Optoelektronický odměřovací systém**

Funkce optoelektronického odměřovacího systému:

- na pevných částech stroje jsou nalepena pravítka (pásky) s reflexní vrstvou,
- pravítka mají dělení např.: po 0,02 mm
- nad pravítkem se pohybuje snímací hlavička, spojená s pohyblivou částí stroje,
- hlavička má schopnost počítat dílky pravítka, přes které prošla, dokáže vyhledat dělení až na 0,1 mm,
- měřicí software dostává informaci z hlaviček o každém pohybu stroje, který je větší než 0,1mm,

Vlastnosti pravítek odměřovacího systému:

- teplotní délková roztažnost musí být co nejmenší,
- při změně teploty dochází (vlivem tepelné roztažnosti) ke změně rozteče dílků nacházejících se v konstantní vzdálenosti a tím dochází ke zkreslení vypočtené vzdálenosti.

Podmínku min. roztažnosti splňují pravítka ze skla, nebo ze speciální keramiky (označované jako zerodur). Taková pravítka se nemusí teplotně kompenzovat. Hlídat se musí jen teplota měřeného dílu.

*Nevýhodou* je neskladnost a omezená délka daná křehkostí skla.

Dále existují ohybná pravítka – základem je ocelový pásek (pásek je namotaný na cívce a je možné ho odstříhnout podle potřeby).

Postup: pásek se nalepí na nástroj, který se chová stejně jako podklad na kterém je nalepený (umožňuje teplotní kompenzaci – neuvažuje se o součiniteli roztažnosti oceli, ale jen o součiniteli roztažnosti materiálu osy stroje.

*Nevýhody* – páska může být příčinou nepřesnosti, při lepení je potřeba použít aplikátor, který zajišťuje konstantní napnutí pásky (může dojít k protažení, nebo zkrácení) – vznikají tak nelineární chyby a korigují se softwarově (metoda kompenzace 21 chyb).

### **Snímací systémy**

Jednou z částí CMM je snímací systém, který slouží ke snímání bodů. Za pomoci měřícího programu vyhodnotíme a získáme numerickou informaci o měřené veličině.

Snímací systém je spojený s pinolou a skládá se ze:

- snímací hlavy,
- prodloužení snímací hlavy,
- systému výměny snímací hlavy,
- snímacího dotyku,
- systému výměny snímacího dotyku,
- prodloužení snímacího dotyku.

## Hlavice snímacího systému

Rozlišujeme dva typy hlavic:

- pevné hlavice,
- indexovatelné (polohovatelné, natáčecí) hlavice.

**Pevné hlavice** (obr. 70) – nedají se v prostoru natáčet, ale dosahují vyšší přesnosti než indexovatelné hlavice.

**Indexovatelné hlavice** (obr. 70) – slouží na přesné polohování snímacích sond v pracovním prostoru stroje. Umožňuje natáčet sondu v jednotlivých osách a zajistit ji v požadované poloze.

Rozeznáváme dva typy indexovatelných hlavic:

- motorické hlavice,
- manuální hlavice.

**Motorické hlavice** - jsou určeny k polohování sondy, takže snímání je možné provádět v mnohých úhlech. Opakovatelnost hlavice umožňuje vyvolat tyto polohy bez nutnosti rekvalifikace, což šetří čas obsluhy a aplikuje sondu k povrchu v nejlepším úhlu k dosažení co nejpřesnějšího výsledku.

Využívají se i motorické hlavy se servopohonem, které zajišťují neomezené úhlové polohování a jsou ideální pro CMM s horizontálním ramenem.

**Manuální hlavice** (obr. 70) – jsou to ručně nastavitelné hlavice umožňující flexibilní měření i složitých tvarů na povrchu kontrolovaných součástek.

Způsoby snímání jednotlivých bodů při měření obrobku (součásti) ovlivňuje přesnost a automatizaci měření.

Snímací systémy rozdělujeme na:

- **dotykové (kontaktní) snímací systémy** – využívají se dotykové senzory,
- **bezdotykové systémy** – využívají se optické senzory apod.



Obr. 70 Pevná snímací hlavice



Obr. 71 Indexovatelná snímací hlavice



Obr. 72 Manuální hlavice

## Dotykové snímací systémy

U starších typů CMM (při ručním řízení) se používají pevné dotyky (ve tvaru koule, kužele, válce apod.) V okamžiku nasnímání bodu, řídicí software dá povel řídicí obsluze zaregistrovat všechny souřadnice a po ukončení měření software vypočítá požadované geometrické veličiny (např. průměr kružnice, souřadnice středu, osová vzdálenost, apod.).

U CMM s CNC řízením jsou nejrozšířenější **elektrokontaktní snímací systémy**.

Elektrokontaktní snímací systémy rozdělujeme:

- systém (sondy) spínacího typu (kontaktní sonda),
- systém (sondy) snímacího typu (skenující sonda).

Detailnějšímu zpracování této tematiky je věnována kapitola „Přehled měřicích systémů.“

## Bezdotykové systémy

Typickým představitelem tohoto měření jsou optické systémy, které jsou použité u dvousouřadnicových strojů v automatických měřicích mikroskopech, které pracují v rovině, jako dvousé měřicí systémy. Na podobném principu pracuje snímání 3D digitalizace, jako jsou CMM a Multisenorové souřadnicové stroje (stacionární a mobilní), které používají optické senzory. Multisenzorové měřicí stroje – např. počítačová tomografie.

U CMM bylo vyvinuto snímání ve formě laserové hlavy, řádkovací hlavy a speciálních pneumatických snímačů (obr. 73).

### Laserové systémy

U laserových systémů se využívají dva různoběžné laserové paprsky, které se protínají v přesně definované vzdálenosti. Když dojde na měřeném objektu k průniku těchto paprsků, tak vyhodnocovací jednotka stroje zaregistruje dotyk. Laser umožňuje skenovat v jedné nebo ve třech rovinách.

### Kamerové systémy

U kamerových (optických) systémů se prostřednictvím optické kamery přeneše opticky signál na digitální obraz, který se použije k výpočtu měřených bodů ve vyhodnocovacím programu.

V současnosti se rozvíjí nový způsob bezdotykového měření tzv. počítačová tomografie.



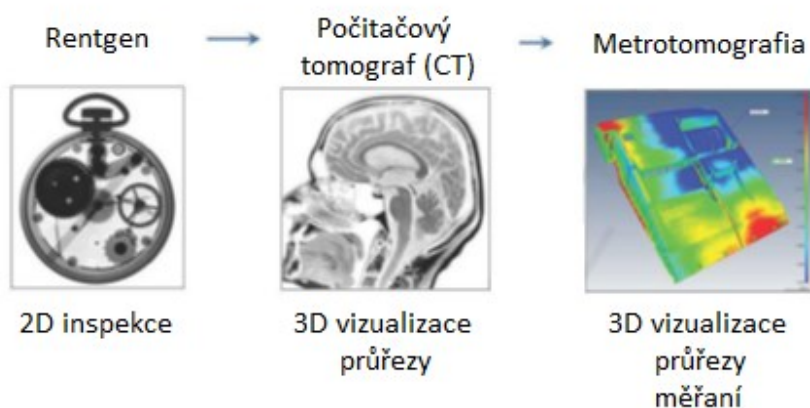
Obr. 73 Typy systémů měřicí hlavy.

(a) 2D optický kamerový (Zeiss RDS ViSCAN), b) optický bodový (Zeiss RDS DTS), c) laserový čárový (Zeiss RDS Line SCAN)

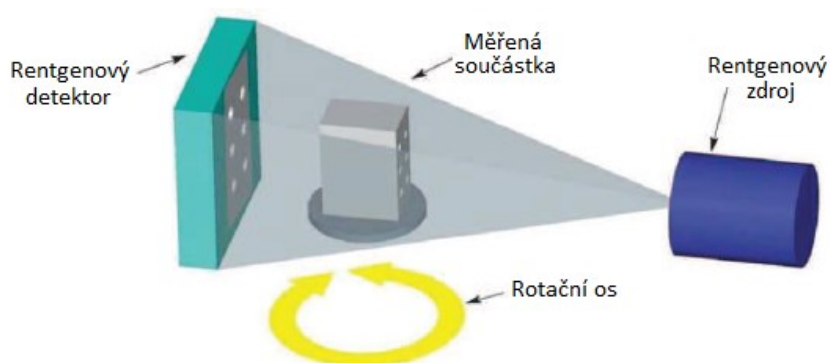
## Počítačová tomografie (CT - Computed Tomography)

Počítačová tomografie (obr. 73) je inspekční metoda, která se využívá v oblasti medicíny na diagnostiku vnitřních orgánů, ale rozšířila se i v oblasti strojírenství a dalších jiných oblastech. Tato metoda je založená na nedestruktivním způsobu získávání informací měřeného modulu.

Princip počítačové tomografie (obr. 74) – mezi zdrojem rentgenového záření a detektorem, který přeměňuje záření na elektrický signál, rotuje měřená součástka okolo svislé osy. Během její rotace se v jednotlivých krocích snímání rentgenují rentgenové obrazy, tzv. rentgenogramy. Z těchto obrazů se za pomoci daného softwaru vytvoří virtuální trojrozměrný model reálné součásti. Výstupem ze snímání jsou mračka bodů (tzv. voxely – odvozené od pojmu prostorový bod – volume pixel). Je to hustá síť uspořádaných bodů v prostoru, kde každý bod nese informaci o tom, jakou propustnost záření (hustotu materiálu) měl objekt v daném místě. Podle této složky můžeme oddělit jednotlivé složky (např. vzduch, plasty, kovy apod.) a pracovat samostatně s jednotlivými prvky.



Obr. 74 Počítačová tomografie (CT)

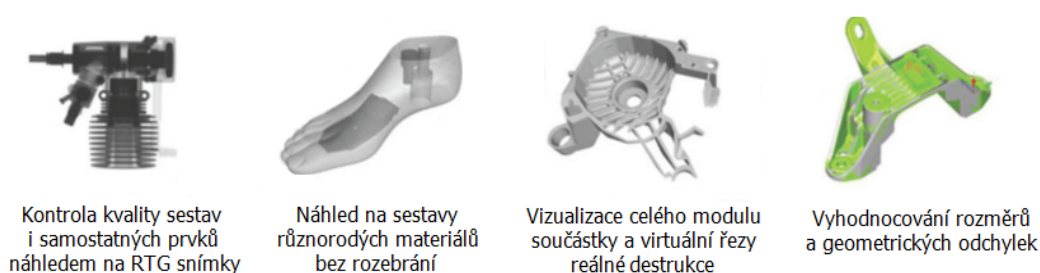


Obr. 75 Princip počítačové tomografie

Počítačová tomografie se využívá v oblasti strojírenství (automobilový, letecký průmysl), medicíny, elektrotechniky a mnoha dalších oblastech

Průmyslová tomografie ve všeobecnosti poskytuje tyto možnosti využití (obr. 75):

- Testování
  - kvalita spojů v sestavách,
  - analýza pórovitosti,
  - analýza poruch a defektů,
  - inspekce materiálu,
- Měření rozměrů vnějších a vnitřních geometrických prvků,
- RE - Reverse Engineering,
- Porovnávání celkové jmenovité geometrie s reálnou (zesnímanou) součástí.



Obr. 76 Možnosti využití počítačové tomografie

**Výhody:**

- vysoká přesnost snímání,
- možnost kontroly tvarově velmi komplikovaných součástí,
- možnost vyhodnotit libovolné délkové rozměry, úhly, odchylky tvaru, odchylky polohy i ve skrytých oblastech.

**Nevýhody:**

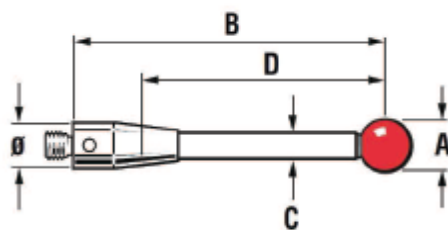
- omezené měření v závislosti od velikosti měřené součástky,
- vysoká pořizovací cena měřicího tomografu, proti jiným měřicím zařízením.

Detailnějšímu zpracování této tématiky je věnovaná kapitola „Přehled měřicích systémů.“

### **Měřicí dotyky**

Snímací dotyky jsou součástí měřicího systému, který zprostředkovává kontakt mezi kontrolovanou součástí a modulem sondy a způsobuje sepnutí v mechanismu sondy. Signál, který je přitom generovaný, umožňuje zaznamenat souřadnice nasnímaného bodu.

Typ a rozměr dotyku (obr. 77) závisí na snímaném prvku. Nejdůležitějšími vlastnostmi dotyku je tuhost dotyku a dokonalý tvar měřicí kuličky.



- A – průměr kuličky,
- B – celková délka,
- C – průměr dřívku,
- D – efektivní činná délka (EWL).

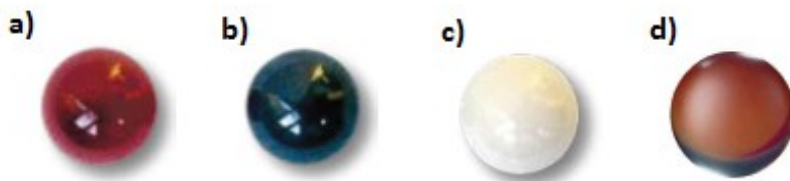
Obr.77 Rozměry doteku

Zásady a pravidla pro výběr dotyku a měření (pro dosažení co nejvyšší přesnosti):

- volit co nejkratší dotyk (aby nedocházelo k průhybu),
- volit co nejmenší počet prodlužovacích nástavců (každý spoj dotyku je zdrojem nepřesností),
- volit co největší průměr kuličky (volbou větší kuličky se volí větší průměr stopky dotyku a tím se zvýší tuhost dotyku).

**Materiálem kuličky (obr. 78) může být:**

- **rubín** - nejpoužívanější u převážné většiny měřicích aplikací. Existují však dva případy, kdy se doporučují kuličky vyrobené z jiných materiálů:
  - prvním je použití výkonných skenovacích aplikací na hliníkové materiály. Tady může docházet k fenoménu nazývanému adhezní otěr, kdy se na povrchu kuličky usazuje hliník. V tomto případě je lépe použít nitrid křemíku,
  - druhým případem jsou náročné aplikace při skenování litinových povrchů. Vzájemné působení obou materiálů může u rubínové kuličky způsobit opotřebení povrchu otěrem. V těchto případech se doporučují kuličky z oxidu zirkoničitého,
- **nitrid křemíku** - má hodně společných vlastností s rubínem. Jde o velmi tvrdý materiál, odolný proti opotřebení. Nitrid křemíku vykazuje značnou míru opotřebení otěrem při kontaktu s ocelovými povrchy,
- **oxid zirkoničitý** - je velmi pevný keramický materiál s podobnou tvrdostí a opotřebením jako rubín. Díky vlastnostem povrchu je ideálním materiálem pro agresivní aplikace u litinových součástek,
- **diamant** - překonává konvenční materiály po všech stránkách a poskytuje nejpřesnější a nejekonomičtější měření. Extrémní tvrdost a hladký povrch diamantové kuličky udržuje opotřebení tření na minimální hranici. Diamantové kuličky jsou vhodné téměř pro všechny měřicí aplikace, včetně velkého zatížení při skenování hliníkových dílů.

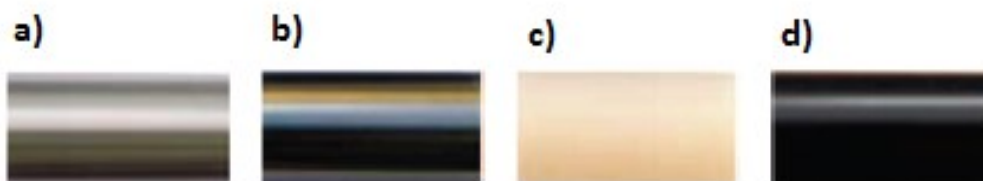


Obr. 78 Materiály kuliček  
a) rubín, b) nitrid křemíku, c) oxid zirkoničitý, d) diamant

### Materiál stopky (dřívku) měřicího dotyku

Materiálem stopky (obr. 79) může být:

- **ocel** - stopky vyrobené z nemagnetické nerezavějící oceli jsou využívané materiály pro dotyky s kuličkou, nebo hrotem s průměrem 2 mm, nebo větším a délky do 30 mm (v tomto rozmezí poskytují optimální poměr tuhosti a hmotnosti stopky),
- **karbid wolframu** - stopky vyrobené z tohoto materiálu jsou optimálním řešením pro max. tuhost a min. průměr stopky (tyto parametry vyžadované pro průměr kuličky pod 1 mm a délky do 50 mm),
- **keramika** - keramické stopky dotyků zajišťují dostatečnou ochranu sondy proti havárii (v případě kolize se dotyk roztříští). Při průměru kuličky nad 3 mm a délce nad 30 mm poskytují stopky tuhost porovnatelnou s ocelí,
- **uhlíková vlákna** – ideální řešení pro stopky určené pro vysoce přesné sondy založené na tenzometrickém principu (vykazuje vynikající charakteristiku tlumení vibrací a zanedbatelný koeficient tepelné roztažnosti).

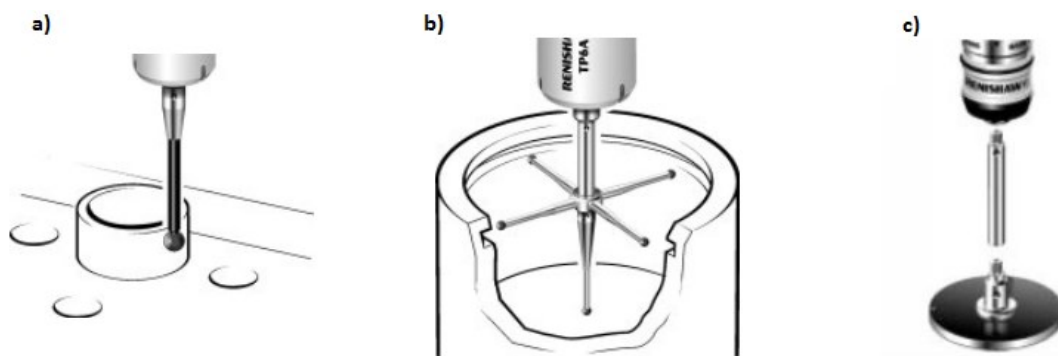


Obr. 79 Materiály pro stopky dotyků  
(a) ocel, b) karbid wolframu, c) keramika, d) uhlíková vlákna)

### Typy dotyků

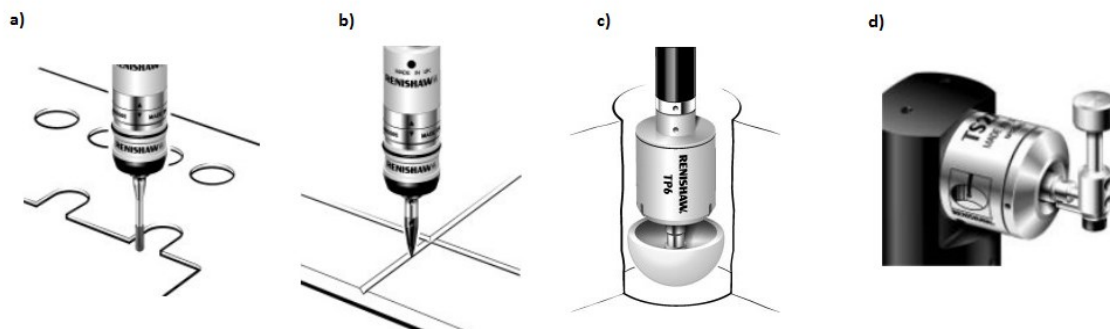
Z konstrukčního hlediska rozdělujeme typy dotyků (obr. 80):

- **přímé** – jde o nejjednodušší tvar, který se skládá z přesné kuličky a stopky,
- **hvězdicové** – díky konfiguraci dotyků umožňuje snímání složitých prvků, nebo otvorů, přičemž kuličky se čtyřmi, nebo pěti kuličkami jsou pevně připevněny ke střednímu dílu,
- **diskové** – používají se ke snímání zápichů a drážek, kde se nedá použít hvězdicový dotyk. Způsob měření je podobný k měření s dotykem o velkém průměru, ale je využita malá část povrchu pro kontakt.
- **dotyky pro speciální účely** (obr. 81) – řadíme sem:
  - válcový dotyk,
  - špička,
  - dutá keramická polokoule,
  - dotyk na ustavení nástrojů.



Obr. 80 Základní typy dotyků

a) přímý dotyk, b) hvězdicový dotyk, c) diskový dotyk



Obr. 81 Dotyky pro speciální účely

a) válcový dotyk, b) špička, c) dutá keramická polokoule, d) dotyk na ustavení nástrojů

## Prodloužení dotyku

Použitím prodlužovacích nástavců se sníží tuhost dotyku a tím se sníží přesnost sondy (neplatí to u tenzometrického měření).

Nadstavením dotyku lze lehčeji proniknout do otvorů, např. u válců motorů.

### 3.1.1 Řídicí systém

Řídicí systém tvoří mozek celého CMM. Mezi jeho úlohy patří koordinace pohybů pohyblivých částí CMM, jako je pohyb sondy, suportu pinoly a dalších pohyblivých částí. Tato úloha je velmi složitá, protože se musí zabezpečit plynulý a jemný pohyb. Při kontaktu měřicího dotyku se součástí se musí odměřit okamžité souřadnice bodu dotyku při konstantní síle měření.

Ovládání řídicích pohybů CMM může být:

- manuální,
- manuální s podporou počítače (řídicího programu),
- motorizované s podporou počítače (řídicího programu),
- automatické (přímo kontrolované počítačem - DCC).

Podle způsobu vedení dotyku se způsoby řízení rozdělují na:

- řízení od bodu k bodu,
- dráhové řízení,
- tvarové řízení,
- vektorové řízení.

Řídicí systém, mimo řízení pohybů stroje, zpracovává i údaje z měřicích sond a formuje výstupy před odesláním do měřicího softwaru, jako jsou např.: Metrolog GP, Calypso, Virtual DMIS, PCDMIS, Metrosoft, Camio a jiné.

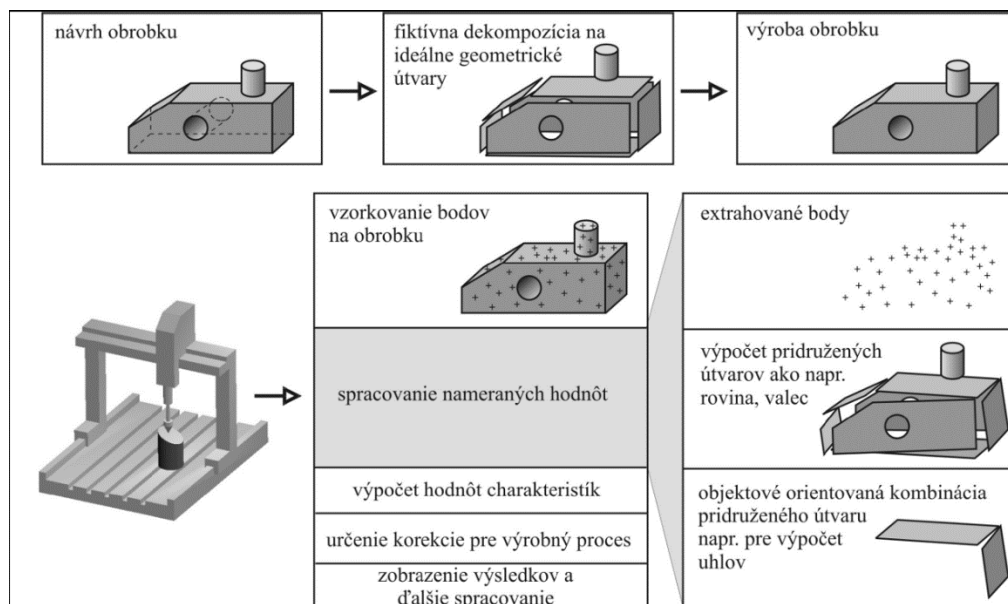
### 3.1.2 Princip souřadnicového měření

Princip souřadnicového měření spočívá v nasnímání bodu a určení jeho koordináty (polohy os x, y, z) vůči počátku souřadnicového systému CMM.

Postup měření na souřadnicových CMM lze obecně rozdělit do následujících kroků:

1. Prostudovat si výkresovou dokumentaci.
2. Určit příslušný souřadný systém, ve kterém se realizuje plán měření (kartézský nebo polární),
3. Rozložit si měřenou součástku na základní geometrické elementy – každému elementu odpovídá minimální počet nasnímaných bodů (obr. 82).
4. Navrhnout vhodnou metodu základního vyrovnání součástky (např. metoda 3-2-1, RPS, MPA apod.) - odeberou šest stupňů volnosti měřené součástce.
5. Změřit vybrané geometrické elementy pro základní vyrovnání a následně na nich aplikovat jednu z výše uvedených metod vyrovnání. Po aplikaci vhodné metody se přenesou souřadný systém stroje automaticky na měřenou součástku.
6. Změřit ostatní geometrické elementy (na základě vztahů mezi elementy se vyhodnocují např. rozměry, geometrické odchylky tvaru a polohy ...),
7. Interpretace výsledků v měřicím protokolu.

Parametry, ktoré popisujú skutočný povrch obrobku v ideálnom tvare, sa vypočítávajú pomocou softwaru z naměřených hodnôt súradníc. Tieto parametre sa môžu použiť pre kontrolu obrobku, alebo zda daný geometrický tvar vyrobeného obrobku vyhovuje daným konštrukčným požiadavkám (obr. 82).



Obr. 82 Princíp súradnicového mērení

Útvary	Príklady a popisujúce parametre	Minimálny počet bodov pre definovanie	Príklady v praxi
Bod	pozičný vektor	1	roh hranola (priesečník troch pravouhlých rovín)
Priamka	bod smer	2	hrana hranola (priesečník dvoch pravouhlých rovín)
Rovina	bod kolmica	3	rovina hranola
Kružnica	bod kolmica polomer	3	vzťažná kružnica dier
Guľa	bod polomer	4	upínanie privesného vozíka
Válec	bod smer polomer	5	hriadeľ
Kužeľ	bod smer uhol kužeľa	6	upínací kužeľ vŕtačky
Anuloid	bod, smer polomer prstenca polomer vodiča	7	zaoblenie na válci

Obr. 83 Základní geometrické útvary

Při CMM je potřeba pochopit postupnost tvorby měřicího programu, na základě jehož se odvíjí celkové měření.

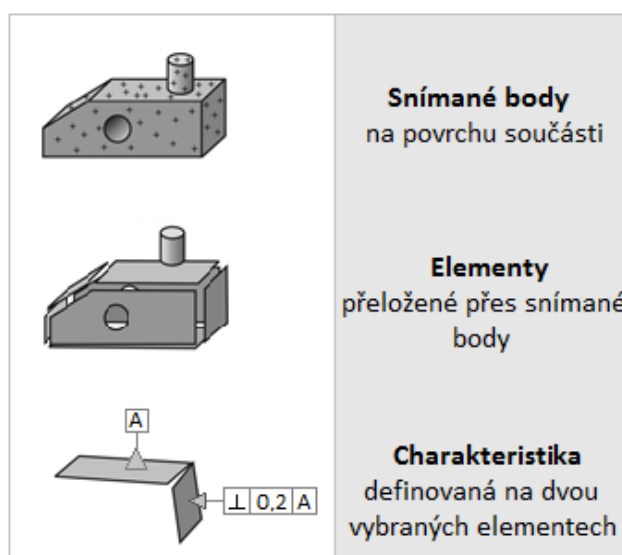
### Postup tvorby měřicího programu

Každá měřená součástka je složená z elementů – teoretických geometrických útvarů (prvků – bod, přímka, rovina, kružnice, válec, koule a anuloid), viz. obr. 84. Na základě těchto elementů můžeme vyhodnotit několik parametrů, tzv. charakteristik.

**Charakteristiky popisují jeden element** (průměr, délka souřadnice polohy, odchylka přímosti, kruhovitosti, apod.) nebo definují vztah mezi elementy (vzdálenost, odchylka kolmosti, úhel, apod.). Příklad definování elementů pro odchylku kolmosti je na obr. 84.

Pro některé elementy se může vztahovat vícero charakteristik, např. pro kružnici se vztahuje: průměr, souřadnice středu, odchylka kruhovitosti, souměrnosti, sousostnosti apod., nebo pro více elementů (např. 2 roviny) se definuje jedna společná charakteristika (např. úhel mezi nimi nebo odchylka kolmosti, atd.).

**Elementy** – při souřadnicové měřicí technice jsou definovány jako teoretické prvky (geometrické tvary) proložené přes snímané body, např. k definování roviny jsou potřebné 3 snímané body (tedy 9 kartézských souřadnic), přes které umíme proložit rovinu. Popřípadě pokud máme nasnímaných více bodů reálného rovinného povrchu, tak některé softwary proloží rovinu bodů jako regresní prvek (nejčastěji metodou nejmenších čtverců FEM).



Obr. 84 Definice elementů a charakteristik

### Metody měření na CMM

Při měření na CMM se potřebné parametry (rozměrů, tvarů a polohy) získávají nepřímo z naměřených kartézských (polárních, popř. válcových) souřadnic v rovině nebo v prostoru.

Přesnost hodnoty výsledné veličiny je tedy závislá na řadě vstupních veličin.

Prvním krokem je (vždy) sestavení plánu průběhu měření. Ten obsahuje tzv. „strategii měření“, ve které se přesně formulují předepsané požadavky na přesnost výsledků měření a hledá se optimální postup k jeho dosažení.

Každý operátor CMM musí být dokonale seznámen s možnostmi daného stroje. Při sestavování průběhu měření musí operátor CMM dodržovat základní zásady:

- osazení obrobku stabilním způsobem - na co největší plochu,

- měřicí základny by měly korespondovat se základnami konstrukčními,
- v co největší míře provádět slučování měřicích operací,
- osazení obrobku tak, aby se dal proměřit v jedné poloze,
- volba minimálního počtu dotyků,
- volba měřicích bodů tak, aby byl postup co nejkratší,
- snímací body mají být rovnoměrně rozloženy na měřeném geometrickém prvku, nejlépe síťovým způsobem,
- počet snímaných bodů volit o 2 až 3 více, než vyžaduje geometrická definice,
- směr pohybu snímače před dotykem by měl souhlasit se směrem některé z os,
- kruhové nebo kulové tvary je potřeba snímat párovými dvojicemi – diametrálně,
- při statistické interpretaci výsledku měření vyhodnotit minimálně 30 bodů,
- body měřeného geometrického prvku je vhodné znázornit graficky, aby bylo možné vyloučit hrubé chyby,
- vyhodnotit dosaženou nejistotu měření a porovnat ji s požadovanou hodnotou nejistoty.

### 3.1.3 Programy pro obsluhu a hodnocení měření na CMM

Metrologické programy sehrávají důležitou úlohu v procesu zpracování a vyhodnocování naměřených údajů součástí na CMM a 2D měřicích přístrojích.

Nejběžnější požadavky na měřicí software jsou:

- možnost exportu údajů do tabulek MS Excel,
- možnost importu údajů pro měření podle CAD modelu,
- následná možnost exportu naměřených údajů pro potřeby reverzního inženýrství (RE) a použitelnost pro různé operační systémy např. Windows, Linux,
- a mnoho dalších.

Moderní metrologické softwary umožňují:

- jednoduché vytváření měřicích programů přes objektově orientované programování, vybírají se stejné elementy, jako v konstrukčních výkresech,
- flexibilita softwaru a sensoriky: od snímání jednotlivých bodů přes skenování až po optické měření,
- přizpůsobení výstupů měření našim potřebám, protokoly je možné jednoduše vytvořit v individuálních formátech.

Moderní softwary obsahují:

- snímání jednotlivých bodů nebo skenování,
- měření manuální, nebo pomocí CNC režimu, kde se připravuje přímo na měřicím stroji, off-line programování,
- snímání dotykové nebo optické,
- měření známých geometrických tvarů nebo obecných ploch.

Dále dokážou přesně určit naměřené rozdíly známé součástky, stejně jako dokážou digitalizovat neznámý model. Toto vše umožňuje jeden software.

V praxi se používají nejrůznější programy, každý program je v něčem specifický.

K neznámějším programům pro CMM patří:

- METROSOFT CM (firma WENZEL),
- CALYPSO, Holos (firma Zeiss),
- INCA 3D (od firmy MORA),
- METROLOG GP (firma Thome Präzision),
- MCOSMOS (firma Mitutoyo),
- PC – DMIS (firma Dea),
- a další.

### 3.1.4 Dotykové snímací systémy

Dotykové snímací systémy jsou dnes v praxi nejvíce používané. Společnou vlastností všech dotykových snímacích systémů je, že na získání informací o tvaru a rozměrech dílců je potřebný fyzický kontakt dotyku s měřenou součástí.

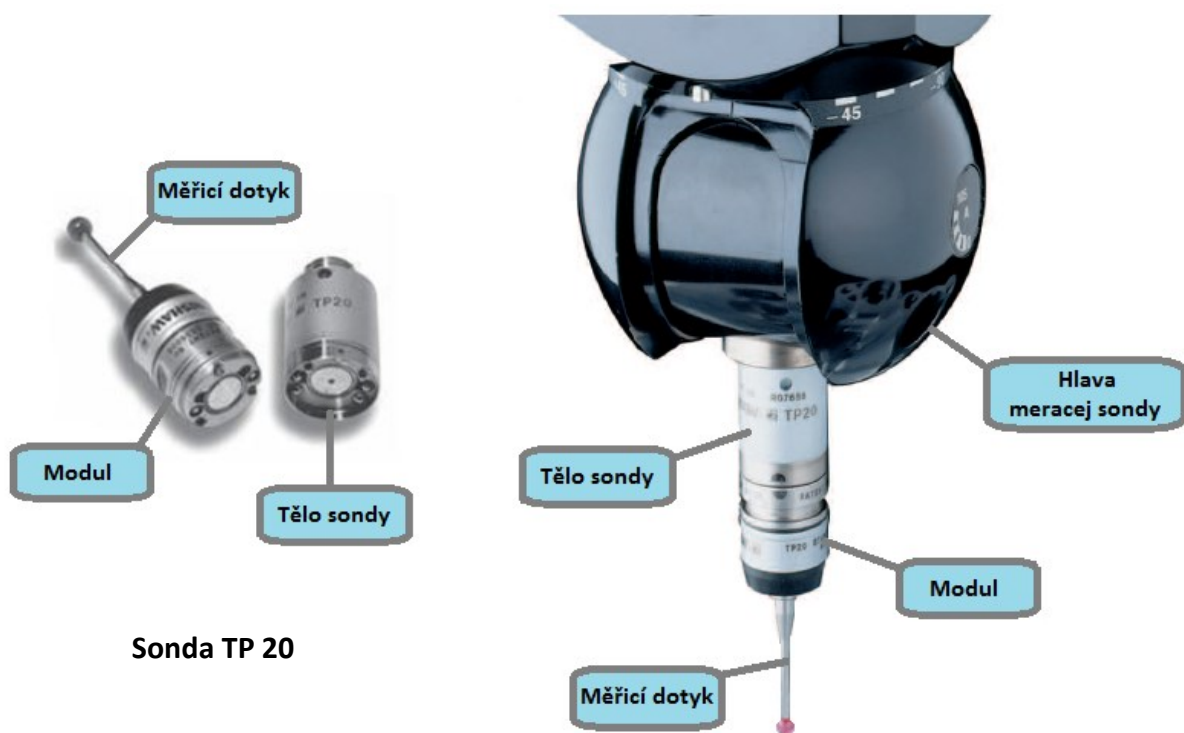
#### *Systém spínacího typu*

Funkce spínací sondy funguje tak, že v okamžiku, kdy se dotyk dotkne měřeného kusu, spínací sonda vydá signál, dojde k okamžitému zastavení pohybu a následně k odečtení aktuálních souřadnic z odměřovacího systému stroje. Existují dva způsoby, jako toho docílit:

- elektromechanicky,
- piezoelektricky.

**Spínací sonda** (obr. 37) - se skládá z následujících částí – tělo sondy, modulu a dotyku, kde tělo sondy je zašroubováno do hlavice. Modul je k tělu přichycen magneticky, což umožňuje automatickou výměnu modulu, nebo měřicího dotyku a zároveň chrání měřicí sondu před poškozením (např. při nárazu). Dosedací plochy modulu a těla sondy jsou opatřeny třemi klínovými drážkami a výstupky, které zajišťují přesné dosednutí modulu na tělo sondy.

Tyto systémy spínacích sond pracují v dynamickém režimu, pomocí nich se získávají **diskrétní hodnoty**, takže hovoříme o **kontaktním diskrétním snímání** (není možné spojitě snímání souřadnic – tzv. skenování).



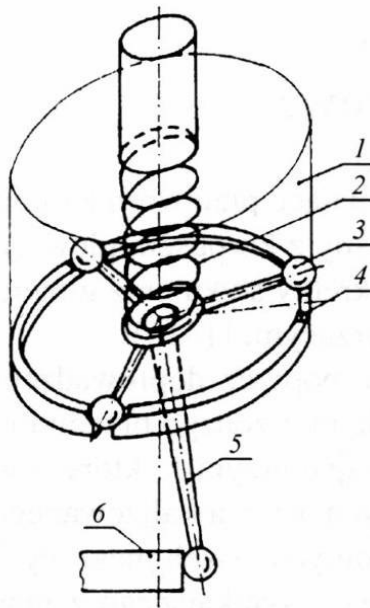
Sonda TP 20

Obr. 85 Dotyková spínací sonda TP20 firmy RENISHAW a jej popis

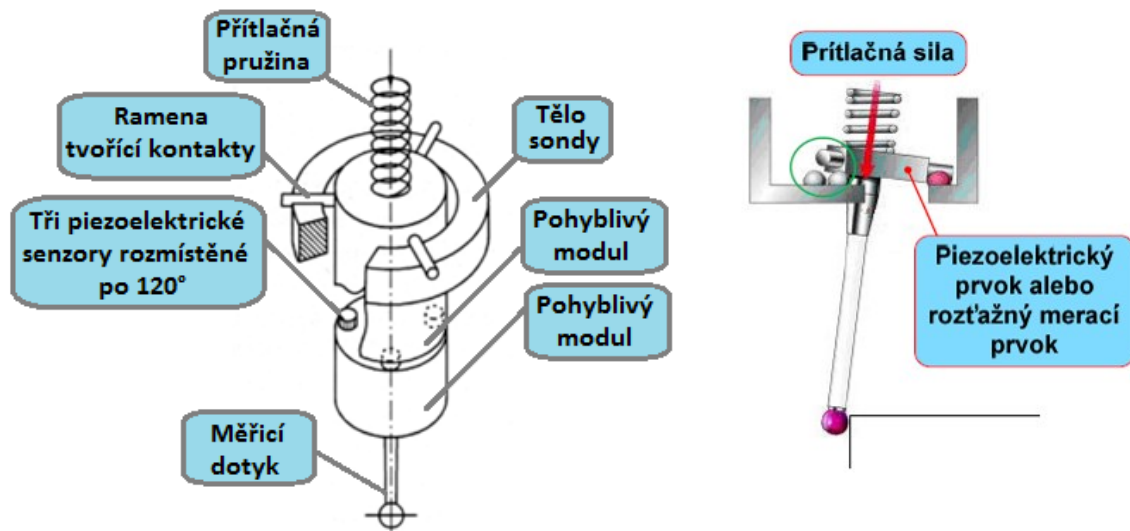
### Elektromechanická sonda

Uvnitř modulu **elektromechanické** sondy je elektrický (obr. 38) obvod obsahující součást ve tvaru hvězdice, rozpínací kontakty vzájemně pootočené o 120°. Měřicí dotyk je na druhém konci opatřen prstencem, který v klidovém stavu propojuje všechny kontakty. V okamžiku vychýlení měřicího dotyku ze základní polohy dojde k rozpojení jednoho z kontaktů a tím k odečtení polohy stroje.

Kontakty jsou tvořené kulovými plochami, aby při odpojení kontaktu docházelo vždy ke stejné výchylce dotyku. I napříč tomu se dopouštíme drobné chyby, která je způsobena tím, že než se kontakt rozpojí, dojde k malému vychýlení měřicího dotyku sondy a zároveň dojde k posunu osy stroje oproti okamžiku, kdy se dotyk skutečně dotkl povrchu měřené součásti. Těto chyby se můžeme vyvarovat, pokud použijeme piezoelektrickou sondu.



Obr. 86 Kinematické schéma kontaktní sondy s elektrokontaktním snímačem pracujícím ve třech směrech



Obr. 87 Schéma spínací dotykové piezoelektrické sondy a její princip

Některé firmy používají u spínacích sond piezoelektrické prvky, které při zatížení udají signál pro odečítání hodnot souřadnic.

**Piezoelektrické sondy** (resp. tenzometrické), viz. obr. 39

Mají dvojí indikaci měřeného bodu:

- první způsob indikace – **piezokrystaly** (při malém vychýlení se deformují piezokrystaly ve vnitř sondy a vydávají elektrické impulsy pro odečtení a dočasné uložení souřadnic),

- druhý způsob indikace – **elektromechanický** (při větším vychýlení dojde k rozpojení elektrického kontaktu – naměřený impulz se potvrdí a dočasně uloží souřadnice a dojde k zastavení pohybu stroje).

Piezelektrické senzory jsou tak citlivé zařízení, že mohou vydat signál při náhodném zachvění stroje, proto je potřebné jejich signál potvrdovat.

Tyto typy sond mají schopnost nést až 5 různých dotyků současně, přičemž koncovka s dotyky se mění podle potřeby v automatickém režimu.

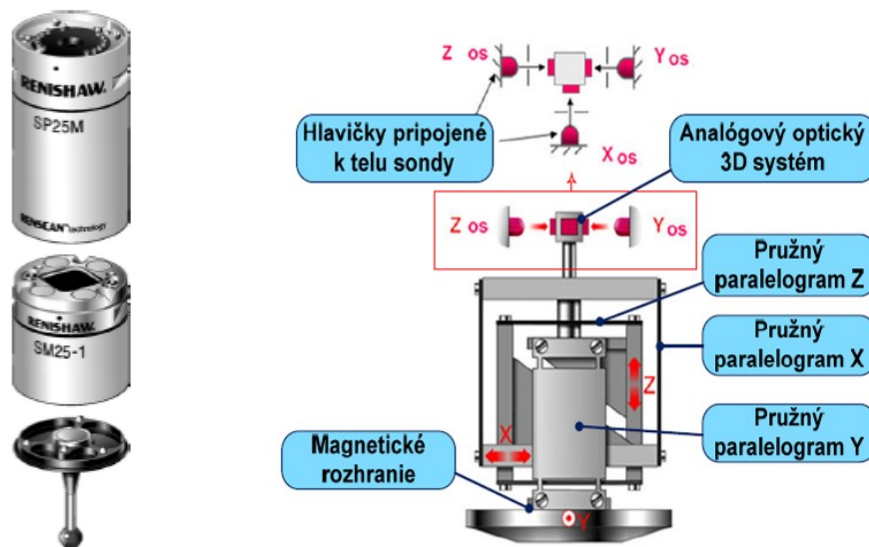
#### *Systém snímáního typu (skenující sonda)*

Systém snímáního typu (tzv. skenující sonda), viz. obr. 40 se skládá z těla sondy, které je v pouzdře snímáního hlavy a je uložené v dvojitě nebo trojitě paralelogramu.

Funkce skenující sondy je následující: Měřící hrot pracuje v režimu, při kterém je v neustálém kontaktu s měřeným objektem. Během procesu měření řídicí systém v okamžiku, kdy zaznamená kontakt hrotu s měřeným objektem, vypne přítlak, který vyvozuje nastavenou měřící sílu a zapne pohony pro příslušné osy. Tímto způsobem se zabezpečí trvalý kontakt hrotu s měřeným předmětem.

Skenující sonda může pracovat ve dvou režimech:

- ve statickém režimu – pokud je indukční měřící systém v „0“ poloze je možnost snímání správných hodnot souřadnic, jedná se o tzv. diskretní snímání,
- v dynamickém režimu – možnost spojitěho snímání, tzv. skenování složitých tvarů.



Obr. 88 Kontaktní snímání (skenující) sonda

### 3.1.5 Bezdotykové systémy

U bezdotykových snímačů se využívají různé fyzikální principy snímání. Nejčastěji používané jsou optické, ale ve specifických aplikacích se využívají i principy indukční (princip vířivých proudů), kapacitní, ultrazvukové, magnetické atd. Jejich nasazení závisí od typu měřených předmětů a navrhuje se většinou jednocelově.

Typickým představitelem tohoto měření jsou optické systémy, které jsou u dvousouřadnicových měřicích strojů aplikované v automatických měřicích mikroskopech (pracují v rovině jako dvojosé měřicí systémy). U CMM a multisenzorových měřicích strojů (stacionárních a mobilních) používají optické senzory, které pracují na principu bezdotykového snímání „3D digitalizací“. Bezdotykové systémy pro 3D měření můžeme jinak nazvat jako skenery (digitalizéry). Bezdotykové skenery nevyžadují fyzický kontakt s povrchem předmětu.

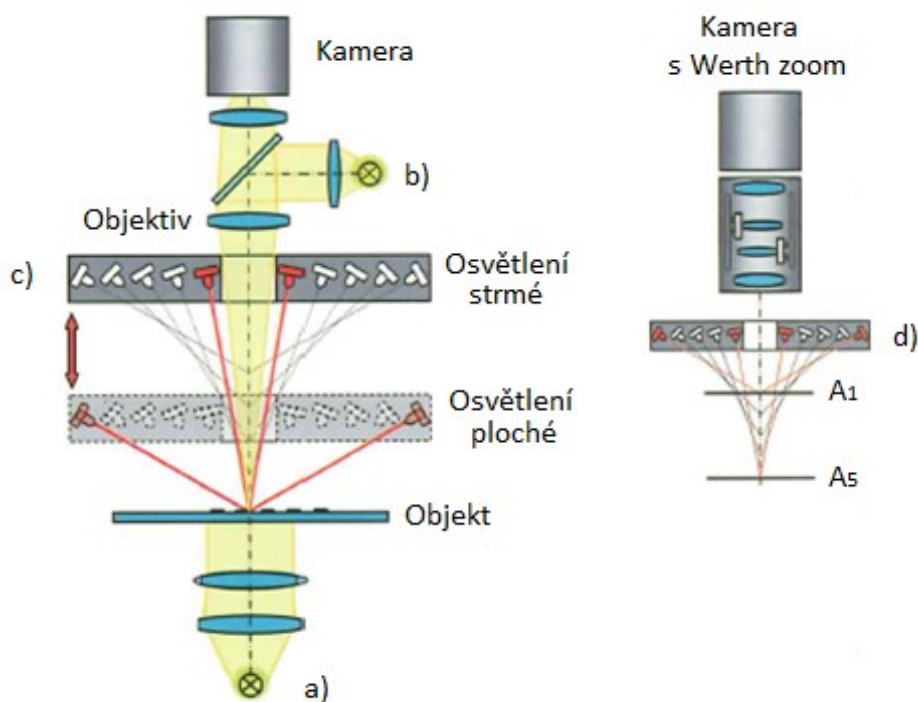
*Výhody:* kvalitnější výstupy, menší časová náročnost skenování a lepší schopnost vytvoření hustějších bodů v místech, kde se měřicí dotyk těžko dostane.

#### Princip pro měření 2D objektu

Na optický senzor se přenáší informace o poloze měřeného bodu pomocí světla – z toho lze stanovit příslušné souřadnice. Následující senzory, je možné provozovat jenom v rovinách.

#### Vizuální senzory

Vizuální senzory jsou takové, které mají za základ alespoň 2D zobrazení měřeného objektu. Senzor zachytí a vyhodnotí rozdělení intenzity tohoto optického obrazu, přičemž výsledky měření závisí na obsluze stroje. Vizuální snímání se používá při špatné viditelnosti měřeného povrchu a geometrické prvky je možné snímat jen intuitivně.



Obr. 89 Druhy osvětlení pro vizuální senzory:

- a) procházející světlo, b) nasvícení světlých polí, c) nasvícení tmavých polí, d) nasvícení tmavých polí s kombinací se zoomem

## Hranolový senzor

Hranolový senzor se využívá pro projektory.

Princip: Světelný signál je zachycen tenkým skleněným vláknem a je veden na fotomultiplikátor. Každá hrana při měření vytvoří přechod světlá-tmavá, popř. tmavá-světlá. Nízké kontrasty, jaké se většinou vyskytují v dopadajícím světle, mohou vést k chybám měření, jelikož bodový senzor nepřipouští téměř vůbec strategie k rozlišení mezi znečištěním, povrchovými vadami a skutečnými snímanými geometrickými prvky.

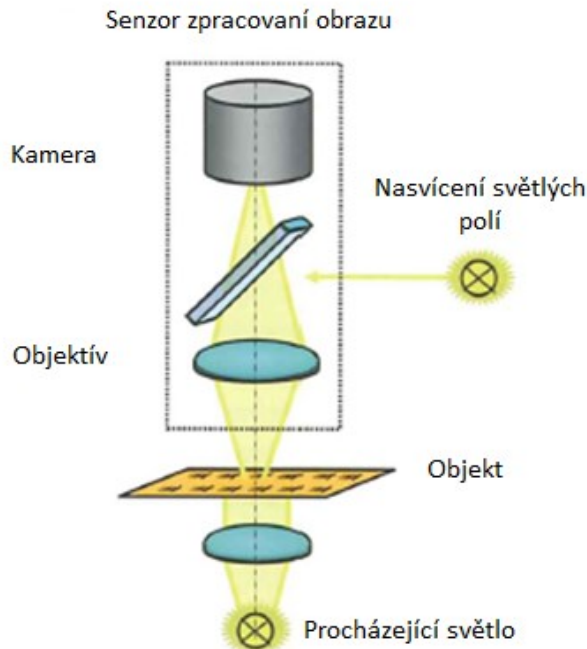
## Senzor zpracování obrazu

Senzor zpracování obrazu (obr. 42) se zařazuje mezi vizuální senzory.

Princip: Měřený objekt se přes objektiv zobrazí na maticové kameře, následně elektronika kamery převede optické signály na digitální obraz, který se použije pro výpočet měřených bodů ve vyhodnocovacím počítači s odpovídajícím softwarem pro zpracování obrazu.

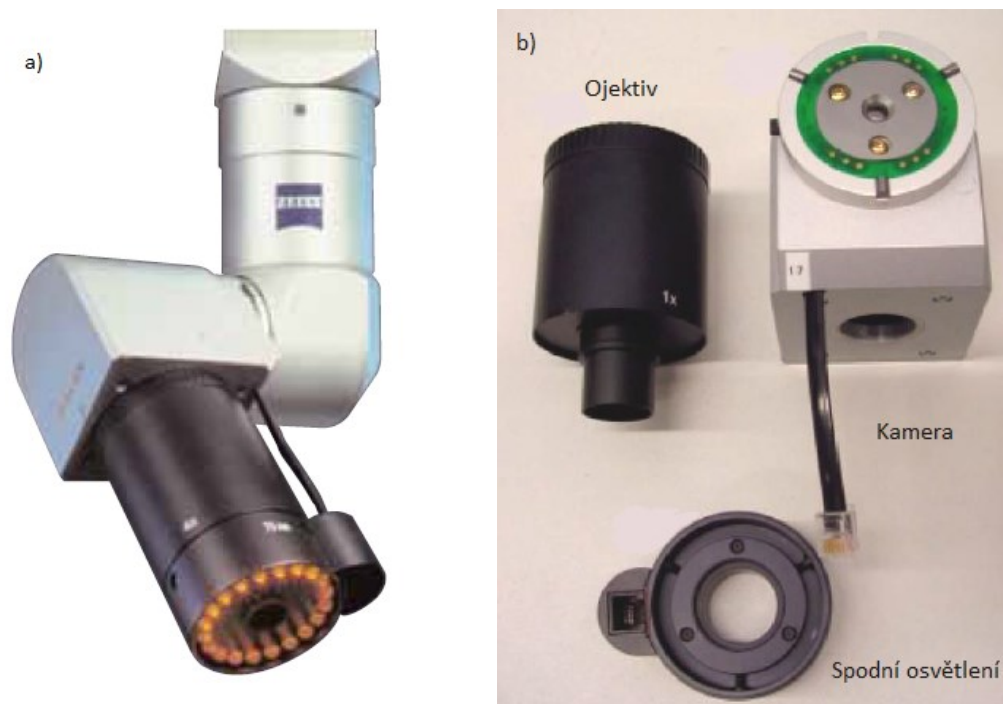
Na výkonnost těchto senzorů mají rozhodující vliv různé jednotlivé součásti optického měřicího stroje, jako např. osvětlení, optika, čip senzoru, elektronika a algoritmus pro výpočet. Nejlepších výsledků, co se týká nejistoty měření, lze dosáhnout telecentrickými objektivy.

Z technického a uživatelského pohledu je účelné navzájem kombinovat velké a malé zvětšení. Největší flexibilita se dosáhne použitím zoomovací optiky.



Obr. 90 Princip konstrukce senzoru na zpracování obrazu s osvětlením procházejícím a dopadajícím světlem

Moderní náhradou měřicích mikroskopů nebo CMM jsou **kamerové systémy** (obr. 43), u kterých je obraz snímán pomocí CCD kamery, případně CMOS snímačem. U CMM se používají s osazenou kamerovou hlavou.



Obr. 91 Optický kamerový systém  
a) 2D kamerová snímací hlava (Zeiss RDS ViSCAN), b) Konstrukce hlavy ViSCAN

Výhodou kamerové snímací hlavy ViScan firmy Carl Zeiss je možnost jejího osazení na rotační RDS hlavu a tím získání možnosti natočit snímač do téměř libovolné pozice.

### CCD kamera (Charge-Coupled Device)

Slouží k digitalizaci obrazu a za pomoci vyhodnocovacího softwaru se používají pro zachycení obrazu (Frame-Grabber-Boards nebo rozhraní Firewire).

Princip měření: Obraz snímán pomocí CCD kamery nebo CMOS snímače, nahrazuje oko operátora, kde obraz je digitalizovaný a následně je zpracovaný a to buď manuálně operátorem, nebo automaticky za pomoci využití vyhodnocovacího softwaru.

Výhodou CCD kamery oproti konkurenčnímu snímači CMOS je dobrá metrologická kvalita. Obzvláště lineární vztah mezi vstupním signálem (intenzita světla) a digitálním výstupním signálem je potřebný pro přesné měření. Dost velkou úlohu hraje i software, kterým se zjišťují měřené body z digitalizovaných dat obrazu, ovlivňuje významně kvalitu výsledků měření sensorů zpracováním obrazu.

V zásadě se rozlišují dvě koncepce software:

- „Edge Finder“ (vyhledávač hran),

- Zpracování obrysového obrazu.

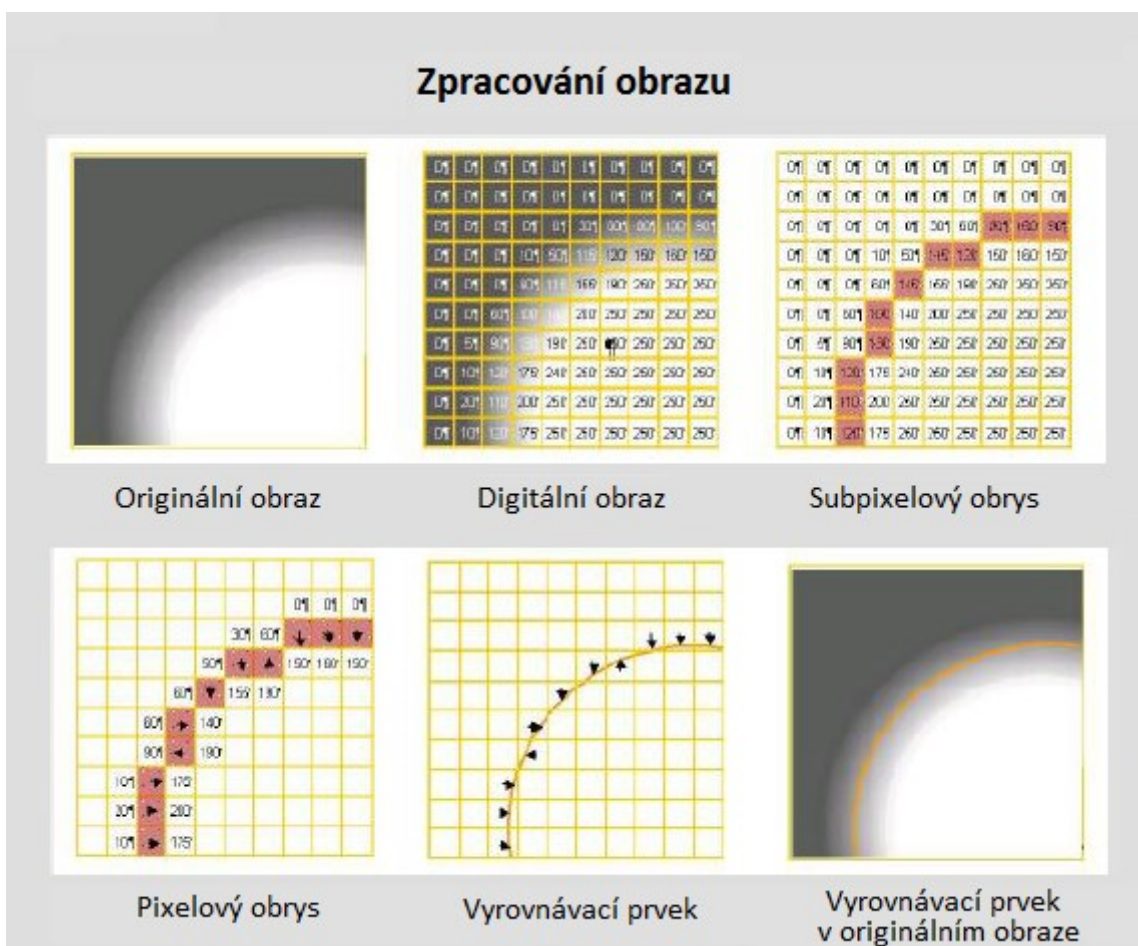
## Edge Finder

Pomocí Edge Finder se zjišťují průsečíky předem definovaných přímek v obraze s viditelnými obrysy objektu. Toto se postupně opakuje na mnoha místech předem určené vyhodnocovací oblasti. Tak vznikne množství měřených bodů, které jsou sloučeny do skupiny. Pro každé určení jednotlivého bodu proběhne však samostatné jednorozměrné vyhodnocení. Rozsáhlá dvojrozměrná informace obsažená v obraze se tak nezohlední. To vede, obzvláště při měření v dopadajícím světle, k problémům. Rušivé obrysy způsobené povrchovými strukturami, vylomením a znečištěním lze rozpoznat a kompenzovat jen podmíněně.

## Zpracování obrysového obrazu

Při zpracování obrysového obrazu (obr. 44) se obraz bere v rámci vyhodnocovacího okna jako plošný celek. V tomto obraze se vhodnými matematickými algoritmy (operátory) extrahují obrysy. Každému obrazovému bodu (pixel = prvek obrazu) obrysu se potom přiřadí měřený bod. Měřené body se řadí za sebou, to dává možnost zjistit rušivé vlivy při měření a odfiltrovat je bez toho, že by se změnil tvar. Uvnitř zachycené oblasti může být více různých obrysů. To je důležité pro použití v praxi.

Rozlišením, nebo nejistotou měření je přímo omezená vzdáleností pixelů.



Obr. 93 Zpracování obrysového obrazu

## **Senzory měřící vzdálenost**

Všemi předchozími vizuálními senzory je možné provádět měření jen v rovinách, tím je možné pouze měření ve 2D popřípadě (2½D) objektů. Pro 3D měření objektu je potřebná doplňková metoda k měření v třetí souřadnici. Řadíme sem senzory na měření vzdálenosti, které zjišťují vzdálenost mezi senzorem a povrchem měřeného objektu.

Přídavnou funkcí senzorů měřících vzdálenosti je autofokus.

## **Autofokusová metoda**

Princip zachycení povrchu součástky se provádí autofokusovou metodou s pohyblivou kamerou pro všechny body obrazu současně. Jedním přechodem požadované oblasti měření ve směru optické osy se nasnímá za několik sekund velké množství naměřených bodů.

Výhoda je, že mimo standartního senzoru zpracování obrazu není potřebný žádný doplňkový hardware.

Mezi plošné senzory se řadí např. laserový senzor Werth 3D-Patch, který umožňuje jednoduché a rychlé 3D zachycení povrchu.

## **Principy pro 3D měření objektu**

Řadíme sem optická zařízení, která jsou založena na bezkontaktním způsobu snímání „3D digitalizace“. Bezdotykové systémy měření se považují za skenery (digitizéry). Digitální 3D podoba reálného objektu se získá měřením třetí souřadnice, použitím optické metody triangulace a interference světla (tyto metody využívají několik CCD kamer, laserové zařízení a další pomocná zařízení).

Rozdělení skenerů podle konstrukce:

- stacionární (pevné),
- mobilní (přenosné).

**Stacionární skenery** – jsou vázány na jedno místo a skenovaný předmět je nutné dopravit k nim.

**Mobilní skenery** – dají se lehce přenášet a dopravit ke skenovanému předmětu. Mají malé rozměry, a jsou rychle smontovatelné a lehké na převoz.

Způsoby skenování předmětu:

- otáčející se,
- stojící (nehybné).

**Otáčející se předmět** – zařízení stojí a otáčí se předmět.

**Stojící (nehybný) předmět** - měřený předmět stojí a otáčí se zařízení (případně se přesune na další stanoviště).

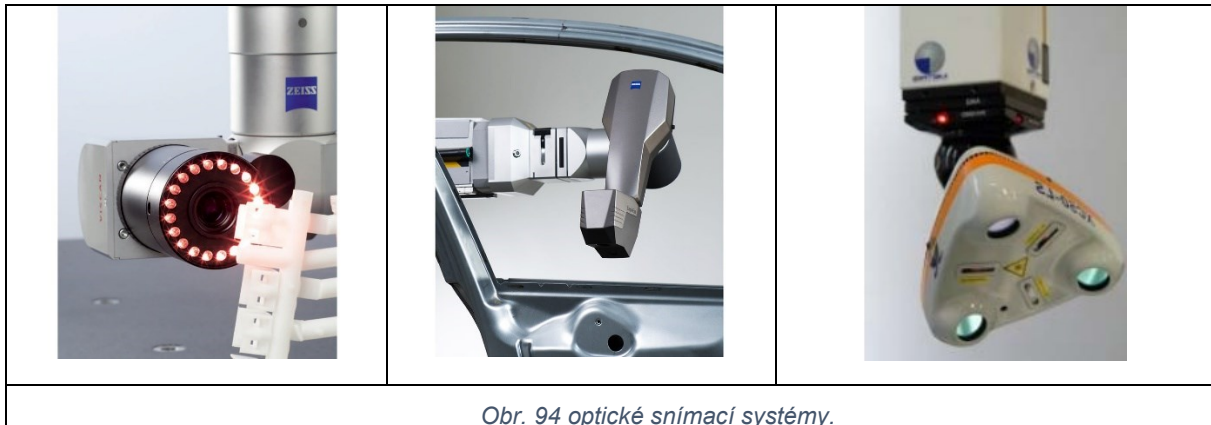
Výhodou těchto přístrojů je, že mají značnou produktivitu a vytvářejí po nasnímání bodů hustou síť bodů. Přístroje jsou vhodné pro snímání venkovní geometrie, ale existují i systémy pro snímání vnitřní geometrie.

Podle použité technologie snímání rozdělujeme bezdotykové skenery na:

- optické skenery,
- laserové skenery,
- mechanické skenery,
- destruktivní skenery,
- ultrazvukové skenery,
- rentgenové skenery.

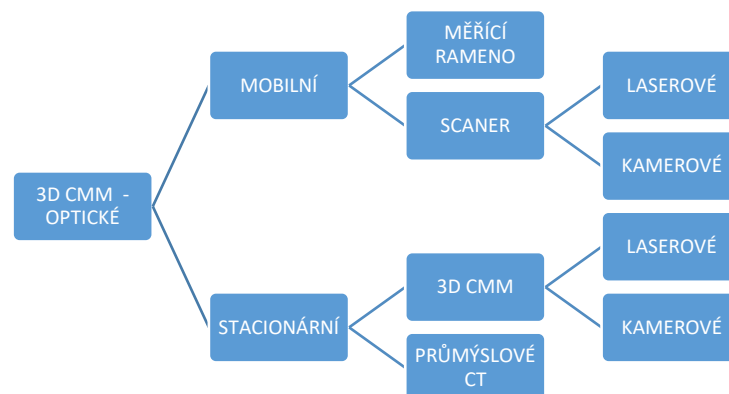
## 4 Optické bezkontaktní metody měření

Nahrazují běžné kontaktní snímací systémy, především v aplikacích, kde je zapotřebí nasnímat komplexní povrch např. formy pro lití, výlisky, atd... vyhodnocovat geometrické tolerance tvaru, polohy a směru, nebo pro vyšší rychlost měření a zpracovně nasnímaných dat. Tyto systémy jsou podstatně rychlejší a shromažďují velké množství datových bodů.



Optické souřadnicové měřicí stroje (CMM) a optické snímače jsou založené na bezkontaktním měření pro 2D a 3D pracovní prostředí. Získávají rozměrové informace jako laterální senzory pro 2D měření (kolmo k optické ose v úrovni předmětu), nebo jako axiální senzory (podélně po optické ose při ostření). Další možností jsou laserové systémy.

Optické měřicí stroje rozdělujeme dle konstrukce:



Konstrukce mobilních 3D CMM:

- 3D skenování do CAD softwaru.
- Podklady pro CAD úpravy modelů.
- Úprava návrhu designu.
- Návrh a design vozidel.
- Konečný a tvářecí design.
- Digitální modely a makety.
- Digitalizace hliněných modelů.

- Rapid prototyping / 3D tisk.
- Analýza metodou konečných prvků.
- Údržba, opravy a repasování dílů.
- Kontrola odlitků, výstupních dílů, prvního kusu výroby.
- Ochrana, obnova a digitální archivace.
- 3D skenování pro výzkum a publikování.

#### 4.1 Optické měřicí systémy

Optické měřicí systémy, v širším smyslu možnost optického získávání údajů o tvaru a ploše s další možností rozboru dnes nazýváme průmyslu 4.0. digitalizace a automatizace. Výrobních společností zabývajících se 3D optickými systémy je velmi mnoho a každý výrobce definuje optické systémy dle svého určení.

Např.

- *Společnost DEOM* – 3D optické měřicí systémy slouží pro rozměrovou kontrolu vyráběných kusů. Princip systému je v kamerovém nasnímání dané oblasti na součásti s odměřením až na nasnímaném obrazu.
- *Společnost Mitutoyo* – chápe optické měřicí systémy jako nejúčinnější metodu měření, přičemž lze posuzovat mnoho typů vyráběných součástí.

Podstata optického měření je softwarová analýza snímaného obrazu, který musí být vhodně nasnímaný tak, aby usnadnil programu automatické vyhodnocení kontrastní hrany.

Optické měření má dvě základní metody snímání, a to aktivní a pasivní. Každá metoda má své konkrétní užití v praxi, tedy vhodnost použití pro dané měření.

##### 4.1.1 Aktivní

Je zde zahrnutý zdroj osvětlení, přičemž princip spočívá ve fotogrammetrické rekonstrukci snímáčiho objektu. Na měřenou součást je vedeno světlo ze zdroje a současně je snímáno CCD snímačem. Kombinace okruhu: CCD snímače, zdroj světla a osvětlovaný bod nebo linie tvoří tzv. triangulační trojúhelník.

Aktivní triangulaci lze dělit podle typu snímání:

- Světelný paprsek (1D triangulace).
- Světelný pruh (2D triangulace).
- Strukturovaný světelný svazek (3D triangulace).

Aktivní metody snímání oproti pasivním metodám vysílají na měřený povrch určitý druh elektromagnetického vlnění, tím je myšleno např: křížový infračervený paprsek nebo viditelný laserový paprsek, atd. přes který se tento obraz přenáší za pomoci příslušného snímače. Zdrojem světla jsou lasery, diody a projektory.

Patří zde:

- Liniové lasery
- Optické skenery

Optické skenery mají tři možnosti principu užití.

- Čas doby letu signálu
- Aktivní triangulace
- Fázový posun

#### 4.1.2 Pasivní

Není zde zahrnutý zdroj osvětlení, neuvažuje se s přesným umístěním světelného zdroje v systému, systém paprsky pouze přímá ale nikoli vysílá. Metoda pracuje na zachycení dvou a více snímků z různých pohledů. Snímky mohou být zachyceny:

- Jednou kamerou s rotující hlavou.
- Jednou kamerou pevně zafixovanou s otočným stolem (rotující součást před kamerou).
- Více kamerami se samokalibrací.

Základní rozdělení pasivních metod měření:

- Tvar ze strany zaostření
- Tvar z textury
- Tvar siluety
- Stereoidění

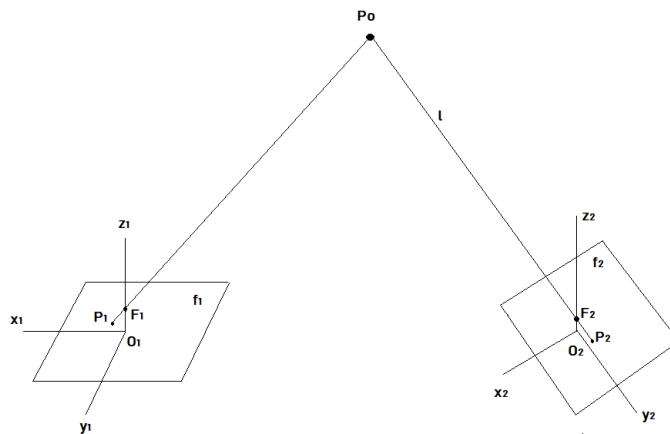
V současnosti se jedná o nejrozšířenější metodu stereoidění. Tento systém používá dvě kamery k zachycení obrazu z rozdílných úhlu s podmínkou dodržení stejné vzdálenosti ohniskové vzdálenosti. Každá snímací kamera vytvoří 2D obraz z daného úhlu a při spojení – po spojení dvou a více obrazu vzniká výsledná geometrie skutečného tělesa. Problémy vznikají u nevýrazných textur a hran, kde dochází ke špatné korespondenci souhlasných bodů v obraze. Tento problém se často řeší za použití aktivních metod. Pasivní metody jsou nízkonákladové a jejich užití se doporučuje pro méně přesná měření nebo menší požadavky na kvalitu scanu.

## 4.2 Strukturované světlo

V posledních letech se strukturované světlo stalo nejpoužívanější projekcí, díky rychlosti snímání dat měřeného objektu pro vytvoření celoplošné trojrozměrné rekonstrukce objektu. Přístroj s využitím strukturovaného světla se skládá se 3 hlavních částí:

- Projekční jednotka
- Jednotka pro získání záznamu (CCD kamera)
- Procesní analyzační jednotky

Metoda spočívá v principu triangulace, tedy v známá vzdálenost mezi dvěma body (kamery) a úhel přímky mezi oběma kamerami viz obr. 95












Obr. 95 Princip triangulace

Nevýhodou užití strukturovaného světla je skenování lesklých a transparentních povrchů. Tyto povrchy mají špatné zachycování strukturovaného světla, z důvodu odrazivosti a světelného šumu, který vzniká kolem měřeného mračna bodů. Měřicí plocha by měla být zajištěna adekvátní difuzní odrazivostí. Ta se u lesklých materiálu dosahuje za pomoci zmatňovacích prostředků jako je křídový sprej nebo titanový prášek. Vždy se nanáší co nejtenčí vrstva aby nedocházelo ke zkreslení povrchu rozměru.

### Typ strukturovaného světla

Každý z níže uvedených vzorů má své klady, zápory a vhodnosti využití. Přičemž vzor je složen ze skupiny pixelů s odlišnými kódovacími znaky. Ty jsou odlišné dle barevného spektra, případně úrovně šedi a geometrie povrchu.

Přesnost měření je zde chápáno jako množstvím promítaných vzorů na plochu a její složitosti. Tedy čím více promítaných vzorů, tím přesněji lze definovat tvar a plochu.

Temporální kodifikace	Prostorová kodifikace	Přímá kodifikace
Binární kódy 	Neformální kódování 	Vzory s úrovní šedě 
N-ární kódy 	De Bruij sekvence 	Barevné vzory 
Kombinace šedého kódu a fázového posuvu 	M-pole (maticová pole) 	
Hybridní metody 		

Obr. 96 Rozdělení vzorů strukturovaného světla.

### 4.2.1 Temporální kodifikace

Vlivem sekvenční projekce vzorů se tvoří v temporální kodifikaci k posloupnému přiřazení hodnot ke kódovaným bodům. Výsledkem je že se proužky mění v závislosti na čase svou šířku.

#### Výhody:

- vysoce přesný,
- vysokou rozlišitelnosti vzoru.

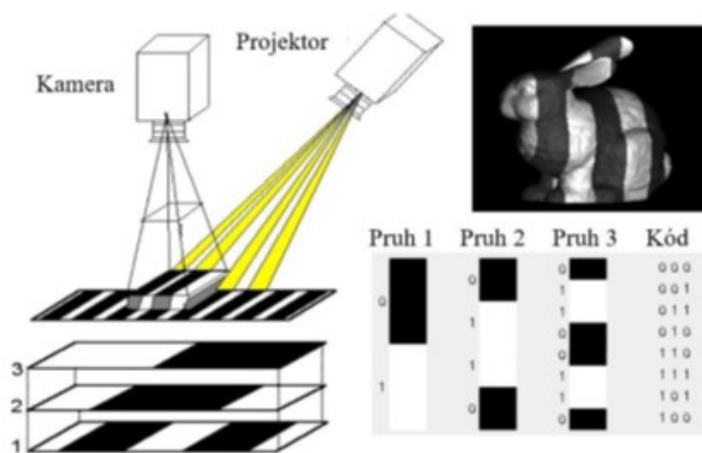
#### Nevýhoda:

- nevhodná pro detailní skenování, prodloužení času měření,
- neschopnost měřit pohyblivé díly.

### Vzory s binárním kódem

Vychází ze sekvenčních vzorů tedy černobílých pruhů promítaných pouze v jednom směru (vertikálně nebo horizontálně). Každý zaznamenaný vzor má své přiřazené kódovací slovo skládající se z jedniček a nul převzaty ze snímací kamery.

Každá oblast je kódována svým originálním popisovým polem – udávají rozlišovací schopnost projektoru v pixelech a nikoli měřící přesnost.



Obr. 97 Princip binárního kódování

V roce 2001 došlo k inovaci přenosu černobílých pruhů na projekci modrých a červených pruhů se zelenou hranicí mezi jednotlivými pruhy.

#### Výhoda:

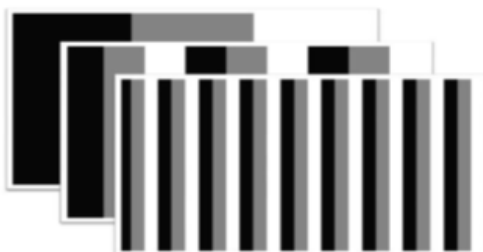
- Velké množství snímaných dat pro detail.

#### Nevýhoda:

- Náročnost na software a PC.

### Vzory s n-árním kódem

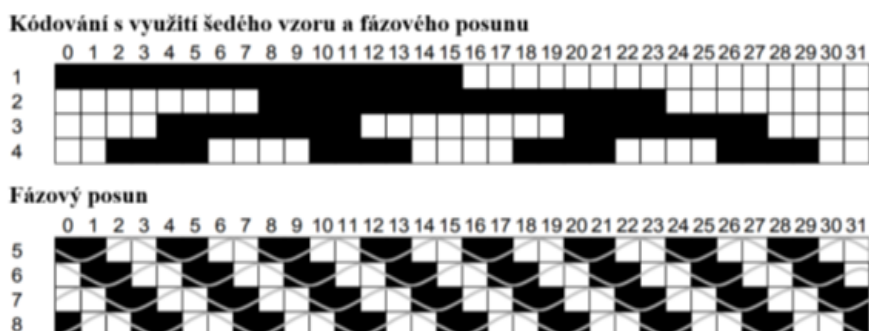
Vzory s n-nárním kódem vznikly pro snížení počtu promítaných vzorů u binárního kódování. Došlo k rozšíření šedých kodů o abecedu s „n“ symboly. Nyní symboly v abecedě mají přidělenou danou barevnou stopu z RGB modelu. Využívají se Hilbertovy a Peanovy křivky pro definování kódu symbolu na úrovni šedi.



Obr. 98 Vzory n-árního kódování

### Kombinace šedého kódu a fázového posunu

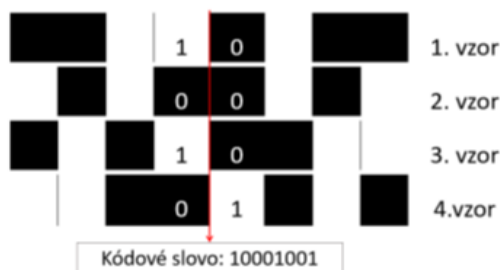
Tato metoda se využívá pro lepší rozlišovací přesnosti snímacích kamer. Využívá k tomu sinusové vzory pro zvýšení rozlišovacích schopností v jednotkách sub pixelů. Výhodou je eliminace dvojznačnosti a zvýšení počtu promítaných vzorů.



Obr. 99 Kombinace šedého kódu a fázového posunu

### Hybridní metody

Při použití temporální kodifikace u hybridní metody je použito nejméně promítaných vzorů, jsou zde využívány 4 vzory. Měření je tzv. hraniční, a to v lokalizaci gradientní intenzity světla.



#### 4.2.2 Prostorová kodifikace

Prostorová kodifikace využívá pouze jeden snímek, v němž je více promítaných vzorů. Dynamickou scénu lze změřit jen s podmínkou prostorové kodifikace (dosáhnutí určité rozlišovací schopnosti). Využívá se sousední prostor jednotlivých pixelů, to vychází z informací o barvě a intenzitě pixelu z okolí. V praxi to znamená že, umístění všech kódovacích systémů do jednoho svazku.

##### Výhody:

- Zaznamenávat pohybující se objekty v prostoru.

##### Nevýhody:

- Nižší rozlišení než temporální kodifikace
- U více barev je komplikované dekódování
- Nespojité oblasti snímaného povrchu vytváří chyby ve skenování.

#### Neformální kodifikace

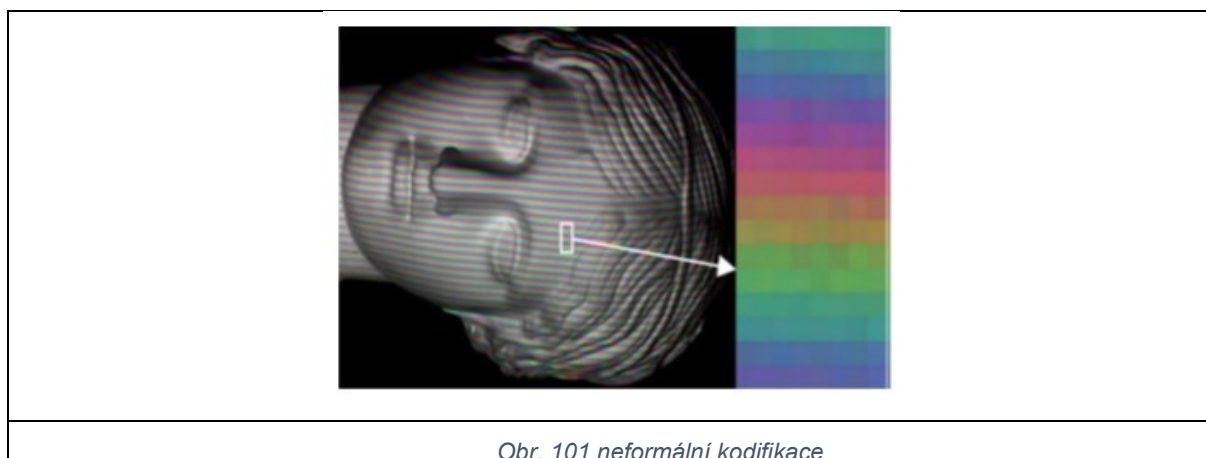
Neformálních kodifikací se zabývalo několik vědců a každý přišel s vlastním a odlišným kódováním. Využití neformální kodifikace je pouze pro krátké vzdálenosti z důvodu zvětšování přerušovaných čar v přímé závislosti na oddalování od snímaného objektu.

Kódování BGW - promítání černých (B), šedých (G) a bílých (W) horizontálních pruhů.

Další část neformální kodifikace se zabývá využitím vertikálních barevných pruhů (zelená, modrá, červená). Každá podoblast má své přesné stanovení počtu barevných pruhu.

##### Nevýhoda:

- Vznikají zde nepřesnosti u více zbarvených povrchů, kde dochází ke špatné lokalizaci barvy.



#### De Bruinovy vzory

Jedná se o neformální kodifikaci z De Bruinovy posloupnosti, která předpokládá, že jednotlivá kódová slova jsou řazená určitým algoritmem, že se nemohou nikdy opakovat v daném vzoru viz obr.

#### 4.2.3 Přímá kodifikace

Přímá kodifikace se vyznačuje osobitým kódováním každého pixelu vlastní barvou nebo intenzitou. Z toho důvodu mají skládané vzory širokou škálu barev a intenzitu při jedno-snímkovém skenování. Postřehnutelné barvy nezávisí pouze na promítaných barvách, ale zároveň na barvě snímaného povrchu. Je zapotřebí vždy identifikovat celé spektrum barev.

##### Výhody:

- Vysoké rozlišení snímku.
- Snížení počtu promítaných vzorů.

##### Nevýhody:

- Nevhodné pro pohyblivé objekty
- Speciální zařízení (kamery, projektory).
- Malá přesnost.
- Náchylnost na odlesky skenovaných ploch.

Využívají se dvě skupiny přímé kodifikace:

a) kodifikace založená na úrovních šedi – ke kódování bodů vzoru se používá spektrum úrovní šedé:

- Do roku 2000 se využíval snímač hloubky poměru intenzity, který byl velmi citlivý na nelinearity a šum. Dosahovalo se špatných přesností se střední chybou kolem 1 cm.
- Od roku 2000 inovovali hloubkový snímač poměru intenzity za LCD projektory a 3CCD kamery. Zajistilo se přesnější měření. Inovace spočívala v úpravě RGB kamery a to tak, že tyto kamery byly zpracovány samostatně pro všechny světelné frekvence kanálu. Odrazivost povrchu není konstantní.

b) kodifikace založená na barvě – tyto techniky využívají výhody velkého spektra barev.

- Je využity velký soubor úzkých štěrbin se zakódovanými vlnovými délkami s použitím barevných pixelů místo dřívější úrovní šedi. Promítáno je rozhraní od modré až po červenou.
- Dvoje obrazové scény jsou snímány rozdílnými barevnými filtry. Následným výpočtem poměru mezi oběma obrazovými scénami lze získat index pro jednotlivé pixely.
- V současnosti je barevná kodifikace vylepšená CCD kamerami a použitím filtrů s lineární proměnou vlnovou délkou.

## 4.3 Optické zařízení pro rozměrové měření

### 4.3.1 3D skenery

Rozdělujeme na dva základní celky:

- Pruhový projektor.
- Digitální fotoaparát.

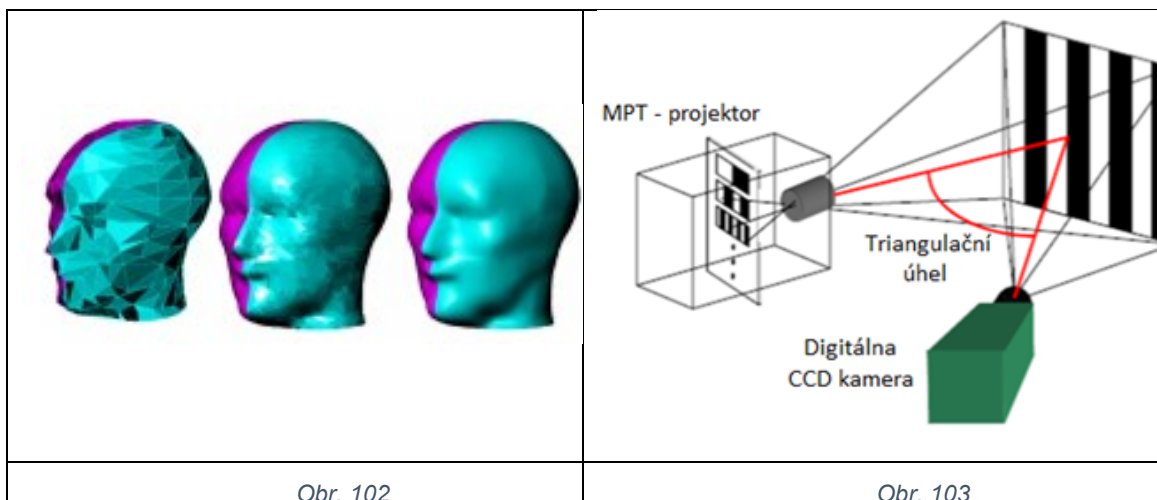
**Pruhový projektor** – pracuje na principu 3D aktivní triangulační metody. Pruhový projektor na snímání objektu promítá proužky světla, zaznamenává a zachytává je za použití digitálních kamer. U digitálních fotoaparátů je snímání prvků snímáno z určité vzdálenosti a za pomoci metody triangulace je 2D obraz převeden do 3D (prostorové) podoby.

**Pruhová projekce** – Skenovaný objekt je snímán skenerem z několika úhlů, pro sestavení modelu je za potřebí nalepit poziční značky na měřený objekt, polepením součástí se určuje jeho poloha a umístění v prostoru. Skener musí vždy vidět minimálně 3 poziční značky, aby znal polohu snímáných dat neboli „mash – množina bodů“. Pomocí nichž systém vypočítá pozici měřených kamer a přesněji sestaví 3D model. Je potřeba vytvořit co nejvíce kontrastní pozadí se snímáním objektem, aby nedocházelo k rozostřování snímáných dat neboli k nasnímání odlesků a šumu.

**Použití** - pro ověření správnosti povrchových tvarů, formy, odlitky, tvorba CAD modelu, komparační měření, atd..

Nejčastěji skenery vytvářejí tvarové plochy za použitím:

- Snímané body (mrak bodů).
- Hranový model.
- Plošný model.
- Polygony, křivky typu T- spline.
- Standartní geometrické entity.



**Práce se zařízením:**

- Reflexní značky (umístění na podložce, nebo na snímání součásti).
- Kamery – stály vizuální kontakt min. 3 referenční body, snímá síť množin bodu z povrchu pomocí referenčních značek.
- Pomocí automatického polohování – skener snímá vnitřní a vnější části.
- Z nasnímané množiny dat se sestavuje polygonová síť, která je daná třemi vrcholy trojúhelníka a směrem normály.

### Liniové senzory

Princip 2D aktivní triangulace. Laserový paprsek se uvede do pohybu pomocí pohyblivého zrcadla integrovaného v hlavě senzoru, kde se vyhodnocení uskuteční pomocí maticové kamery, takže se získá výsledek měření ve formě mnoha bodů zjištěných pomocí triangulace a tím se změřila linie (světelný řez) na povrchu měřeného

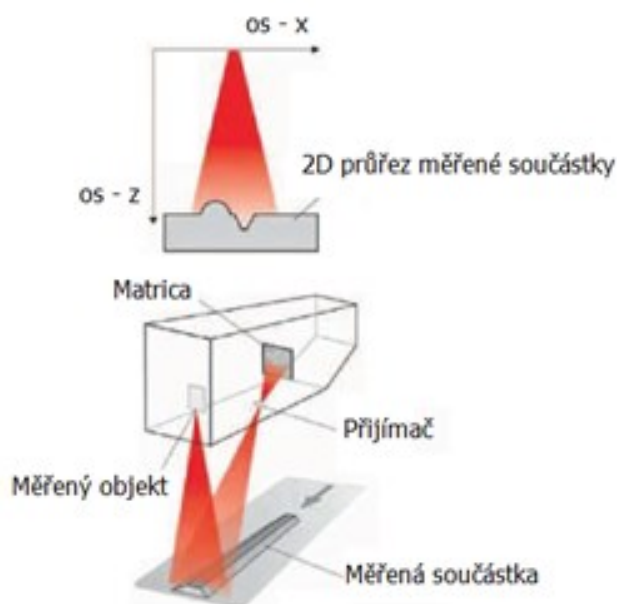
objektu. Při měření 3D povrchu se pohybuje CMM kolmo k rovině řezu.

získá výsledek měření ve formě mnoha bodů zjištěných pomocí triangulace a tím se změřila linie (světelný řez) na povrchu měřeného

objektu. Při měření 3D povrchu se pohybuje CMM kolmo k rovině řezu.



Obr. 104 Handyscan



Obr. 105 Princip snímání 2D laseru

#### 4.3.2 Handyscan

Je mobilní skenovací zařízení určené pro tvorbu CAD modelu a inspekci vyrobených součástí s porovnáním s nominálním CAD modelem. Handyscan je řazen do skupiny měřících bezkontaktních laserových zařízení s určením prostorových souřadnic. Snímané objekty jsou zobrazeny v množině bodů nebo polygonové síti, která se za pomoci triangulace přetvoří na plochu tedy CAD model.

##### Využití:

- Kontrola tvarové a rozměrové přesnosti,
- Inspekce za pomoci termografické mapy,
- Reverzní inženýrství,
- Snímání nadrozměrných ploch (vagony, letadla, budovy),

##### Princip:

Laser je z fyzikálního hlediska kvantově elektronický zesilovač elektromagnetického záření nejčastěji v oblasti viditelného světelného spektra a přílehlých vlnových délek. Laser je založen na stimulované emisi fotonů v aktivním prostředí. Aktivní prostředí laseru je tvořeno atomy, ionty, nebo molekulami. Ty se za normálních podmínek nachází v nejnižším energetickém stavu. Pokud však jsou tyto částice excitovány do vyšších energetických stavů vnějším zdrojem energie, při návratu do původního stavu budou vyzařovat nekoherentní světelné záření. Jusková, K. (Metoda Laserové skenování, 2011. In: Land management. [Online]. [cit. 2016-02- 23]. Dostupné z: <http://www.la-ma.cz/?p=88>)

Laserovým skenerem se získává obrovské množství bodů, které je potom filtrováno na trojúhelníkovou síť, která se dá použít např. pro pevnostní výpočty součásti.

Ve všeobecnosti se dá laserové skenování využít:

- RE – Reverse Engineering,
- komplexní porovnání naskenované součástky s jejím CAD modelem,
- měření poddajných součástek.

*Nevýhodou* laseru je citlivost na lesklé plochy.

Do kategorie mobilních laserových 3D skenerů, můžeme zařadit:

- MINOLTA Vivid VI-900 (obr. 50),
- HandyScan 3D,
- Laserový Tracker.

### **Mobilní laserový 3D skener - MINOLTA VI-900**

Je založený na principu 2D triangulace.

Použití: pro ověření správnosti a tvarovou inspekci vnějších obráběných dílů, zápusťek, odlitků, lisovaných částí a prototypů.



Obr. 106 3D Laserový skener Minolta Vivid VI-900

### **Laser tracker**

Zařazujeme k mobilním měřícím systémům, které sledují polohu odrazového systému z určité vzdálenosti. K měření snímaného objektu využívají laserový měřič vzdálenosti typu TOF (Time of Flight) o dvou přesných úhlových senzorech polohy (enkóдеры) a softwaru pro výpočet, ukládání a zobrazení polohy odrazového systému (reflektoru).

Princip – Laserový paprsek vycházející z vysílače se ovládá podle pohybu reflektoru dvěma servomotory, které natáčí laserovou hlavu. Sledovaný obraz laserového pulzu na reflektoru je aktualizovaný 1000 krát za sekundu, zajišťuje přesnost a opakovatelnost. Reflektor je vedený ručně nebo automaticky na objekty připravené k měření.

Postup měření – Nejprve se změří body na povrchu, přímky, oblouky, kružnice pro zavedení souřadnicového systému. Úhlové senzory zaznamenají směr a výškový úhel reflektoru (obr.

52) (to je dostačující při přesném nalezení středu reflektoru), v případě že paprsek narazí mimo střed reflektoru, tak dopadne mimo střed senzoru citlivosti PSD (Position Sensing Detector) a systém zahlásí chybu signálem.

Při měření vzdálenosti laserovým interferometrem se rozdělí paprsek do dvou svazků. Jeden svazek se vrátí zpět do interferometru a druhý dopadne na elektrický obvod, kde se počítá vzdálenost reflektoru od trackeru na základě cyklické změny vlnové délky.



Obr. 107 Laser tracker a jeho schéma určení pozice reflektoru

## Ruční 3D skenery

Ruční skenery jsou dotykové skenery. Jejich konstrukce připomíná tvar lidské ruky. Skládají se ze základny, měřicího hrotu a několika ramen spojenými klouby.

Princip skenování – na ručním 3D skeneru spočívá v tom, že za pomoci kontaktní sondy naskenujeme objekt, který je umístěný na mechanickém ramenu (obr. 53) nebo na pevném rameni, když se jedná o přesné stacionárně souřadnicové měřicí zařízení (obr. 53).

Jestliže se jedná o mechanické rameno, tak rameno má v každém kloubu senzor, zaznamenávající polohu a natočení každého ramene v tom místě. Pomocí těchto senzorů systém rozpozná polohu každého nasnímaného bodu.

Postup skenování:

- příprava skenovaného objektu,
- vyznačení bodů (pro lepší vystihnoutí tvaru objektu, kde počet a umístění bodů je úměrné tvarové členitosti povrchu),
- výstup snímání (body a křivky dané souřadnicemi  $(x, y, z)$  – pomocí nich se vytvoří virtuální model skenované součástky v podobě mračna bodů).

Virtuální model je připravený na další měření nebo aplikace Reverse Engineering.

**Nevýhoda:**

- menší přesnost při měření (cca desetiny milimetrů),
- delší čas skenování procesu (kvůli manuálnímu skenování),

- nepodává informaci o textuře povrchu.

*Výhoda:*

- nižší cena oproti skenerům založených na jiných způsobech snímání,
- podává informaci o tvaru,
- vhodné pro měření složitých těles (jako např. dutin, tak i nerovnoměrných povrchů).

*Využití:*

- v designu
- ve filmovém průmyslu (při animacích a tvorbě počítačových her),
- apod.



*Obr. 108 Ruční skener Microscribe MX*

Na obrázku je mechanický skener, který je napojený na sériový port počítače a dokáže nasnímat až 1000 bodů za sekundu.

### Destruktivní skenery

Destruktivní skenery (obr. 54) – jsou skenery, které během skenování zničí skenovaný předmět.

Destruktivní skener dokáže skenovat:

- vnější i vnitřní geometrii předmětu,
- umožňuje digitalizovat složité tvary i dutinu vevnitř skenované součástky.

Postup používání destruktivního skeneru:

- před použitím se předmět zalije speciálním materiálem,

- speciální materiál zabezpečí vysoký kontrast barvy materiálu s předmětem a vyplní všechny dutiny,
- připravený blok se vloží do skeneru a připevní se k frézce,
- fréza odfrézuje velmi tenkou vrstvu zalitého předmětu (průběh následuje automaticky),
- skenovací systém nasnímá novu vzniklý povrch,
- celý postup pokračuje tímto způsobem, než se neodfrézuje celý zalitý blok (obsahující předmět),
- poslední krok spočívá v transformaci 2D nasnímaných údajů jednotlivých vrstev do 3D modelu.

*Výhoda:* destruktivní skener dokáže digitalizovat i vnitřní část předmětů (oproti optickým, laserovým, mechanickým skenerům).

*Nevýhoda:* zničení celé součástky.



Obr. 109 Destruktivní skener CCS-3000

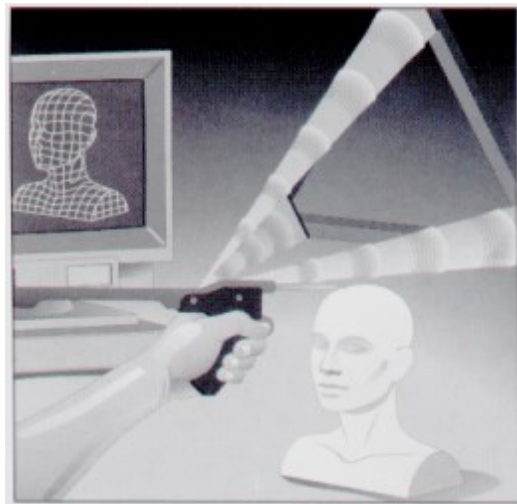
### Ultrazvukové skenery

Zařazujeme je mezi nedestruktivní mobilní skenery. Tento způsob 3D digitalizace funguje na principu bezkontaktního snímání povrchu objektu ultrazvukovou sondou. Skenování se provádí manuálně ultrazvukovou sondou, která má tvar pistole s kovovým hrotem, který přikládáme ke skenovanému povrchu, kde stisknutím páčky (spouště) dojde k vyslání signálu. Tento signál se dekóduje za pomoci ultrazvukových čidel do prostorových souřadnic, které se můžou vyslat do CAD systému.

*Výhoda:* nejnižší cena.

*Nevýhoda:* malá přesnost (pohybuje se v rozmezích 0,3 – 0,5 mm).

Využití: v oblasti filmu, reklamy a animací.



Obr. 110 Ultrazvukový skener Freepoint

## Rentgenové skenery

Zařezujeme mezi nedestruktivní skenery, fungující na principu bezkontaktního snímání. Rentgenové skenery pracují na stejném principu jako klasické rentgeny.

Technologie skenování je založená na principu získávání informací o vnitřní geometrii součástek použitím rentgenového záření, tak jako to je u klasických rentgenů, jako jsou používané ve zdravotnictví, ale s tím rozdílem, že při tomto je používaná intenzita záření mnohem vyšší.

Zařízení mohou být:

- mobilní (využívané při kontrole potrubí, kotlů nebo jiných uzavřených nádob),
- kombinované (obr. 56) - se zařízením CT (Computed Tomography).

Skenování objektů pomocí rentgenů bývá často zaměnitelné s tzv. defektoskopií, kde se záření využívá k odhalení skrytých vad materiálu, jako např. v metalurgii.



Obr. 111 Kombinovaný rentgenový skener CT & X-Ray firmy Metris, typ XT H 225 a příklady skenovaných objektů

**Výhoda:** možnost snímat i vnitřní předměty (na rozdíl od ostatních typů skenerů), ale oproti destruktivnímu skeneru se nezničí předmět.

**Nevýhoda:** nedokáže zachytit barvu objektu.

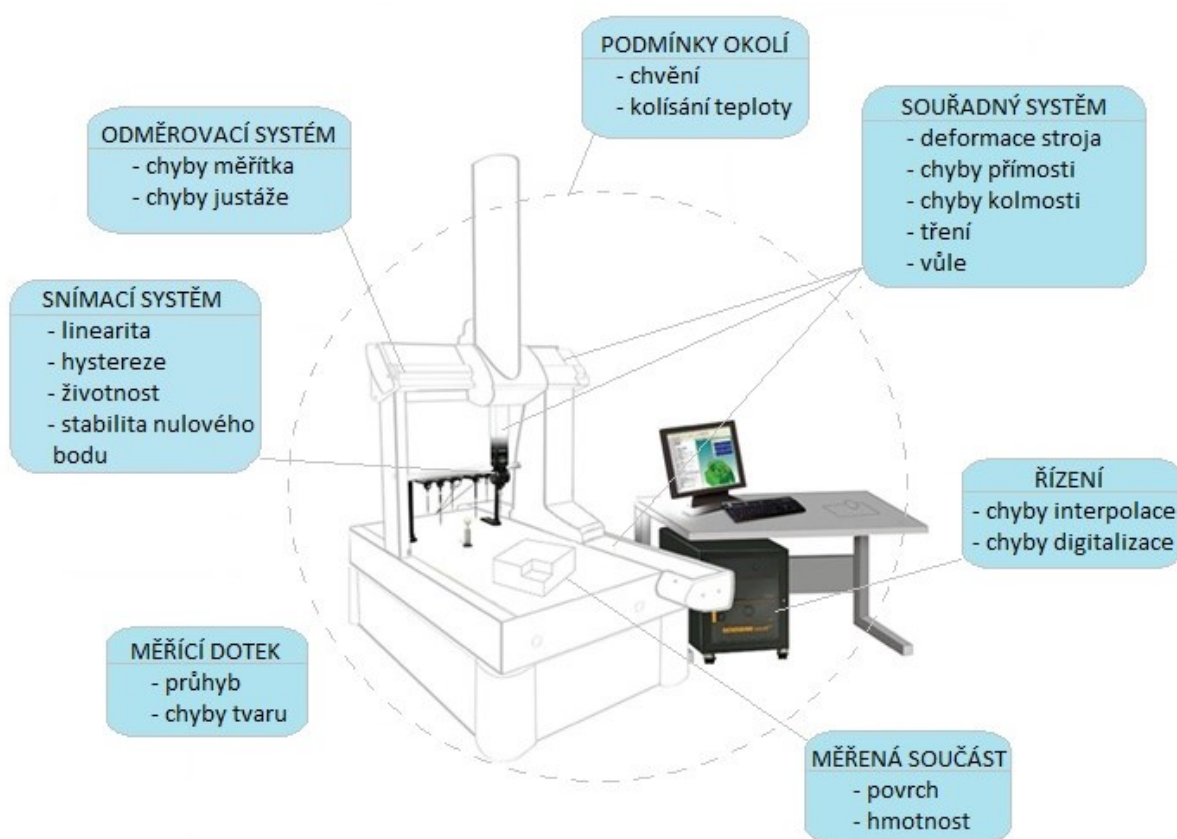
**Použití:** při kontrole uzavřených nádob, potrubí, kotlů apod.

### 4.3.3 Zdroje chyb při měření

CMM je složitý systém, který se skládá z velkého množství konstrukčních dílců, a ty mohou být zdrojem parciální chyby měření (obr. 64). Na obr. 65 jsou znázorněné nejvýznamnější zdroje chyb, které se vyskytují při měření.

Faktory, které nejvíce ovlivňují přesnost měření, patří především vliv roztažnosti materiálu měřeného objektu a vliv atmosférických podmínek. Pro názornost můžeme uvést, že chyba 1 $\mu$ m pro měřku L = 1000 mm způsobí změna jednoho z těchto parametrů o následující hodnotu:

- teplota materiálu  $\Delta\theta = 0,10$  K (při  $\alpha = 10 \cdot 10^{-6}$ ),
- teplota vzduchu  $\Delta T = 1,11$  K,
- barometrický tlak  $\Delta p = 3,33$  hPa,
- relativní vlhkost  $\Delta\Phi = 10$  %.



Obr. 112 Zdroje chyb při měření  
(Justáž – je seřízení měřidla na referenční hodnoty)

#### 4.3.4 Kontrola přesnosti snímacích hlav

Snímací hlava elektrokontaktního typu se rozumí výměnné snímací zařízení, které se upíná do pinoly CMM, včetně napájecí a vyhodnocovací elektronické části. Hlava nemá vlastní měřicí systém a výstupní signál je jen pouze změna stavu.

Popis jednotlivých zkoušek:

Měření sil:

- osová síla  $F_o$  působí ve směru osy hlavy,
- měřící síla  $F_m$  působící kolmo k ose.

Velikost měřící síly se zjišťuje v okamžiku generování signálu snímací hlavy.

Měření dráhových charakteristik:

Všechny charakteristiky přesností jsou zjišťovány ve směru dráhy snímacího předmětu.

Necitlivost snímací hlavy:

Necitlivost snímací hlavy je vyjádřena dráhou, kterou musí snímací předmět přejít od okamžiku dotyku, po okamžik generování signálu snímací hlavy.

Stabilita referenčního bodu:

Referenční bod - je poloha středu snímacího předmětu vzhledem k pevné části snímací hlavy v klidném stavu.

Stabilita referenčního bodu – je rozdíl poloh středu snímacího předmětu v klidovém stavu po předcházejícím vychýlení snímacího dotyku a jeho samovolným vrácením do klidového stavu.

Pro kontrolu dráhových charakteristik se používá laserinterferometr, ale při měření musí být splněný Abbého princip.

Celková přesnost snímací hlavy:

Celková přesnost snímací hlavy je vyjádřena nejistotou snímání a je vyjádřena vztahem:

$$N_T = \Delta k \pm \sqrt{s_s + s_n + s_r},$$

kde:

$\Delta k$  – úchylka kruhovitosti snímacího předmětu,

$s_s$  – střední směrodatná úchylka stability referenčního bodu,

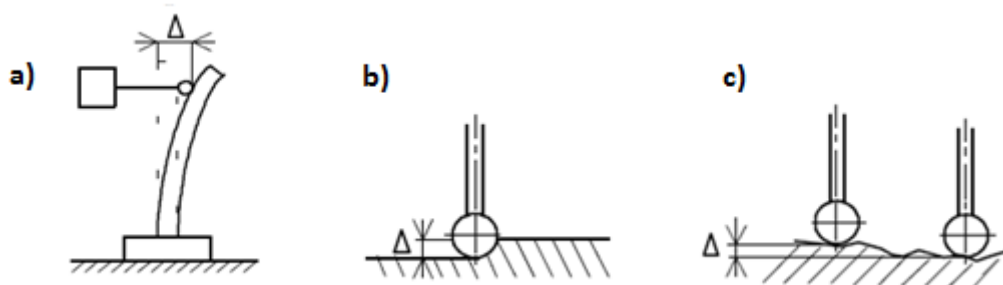
$s_n$  – střední směrodatná úchylka stability referenčního bodu,

$s_r$  – střední směrodatná úchylka stability referenčního bodu.

#### 4.3.5 Ovlivnění přesnosti měřicí sondy

Na přesnost měření má vliv i charakter měřeného objektu. Na obr. 65 jsou znázorněné chyby, které vznikají při měření:

- poddajných součástek,
- součástek, které mají poddajný povrch,
- s velkou tvarovou úchylkou kontrolovaného povrchu.

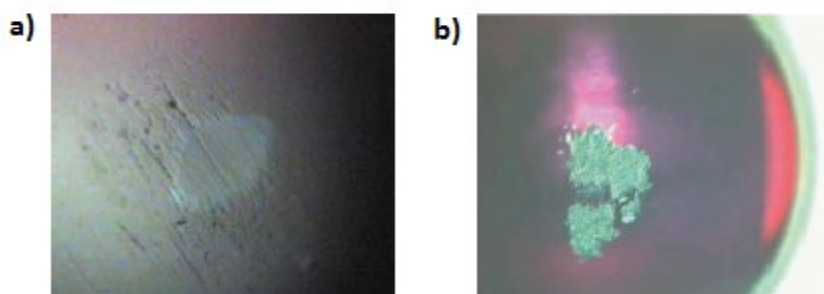


Obr. 113 Chyby vznikající při měření  
a) deformace poddajných součástí, b) poddajnost povrchu součástí, c) tvarová úchylka kontrolovaného povrchu

#### 4.3.6 Ovlivnění přesnosti vlivem opotřebení kuličky dotyku

Opotřebení kuličky (obr. 66) má za následek vznik chyb při měření.

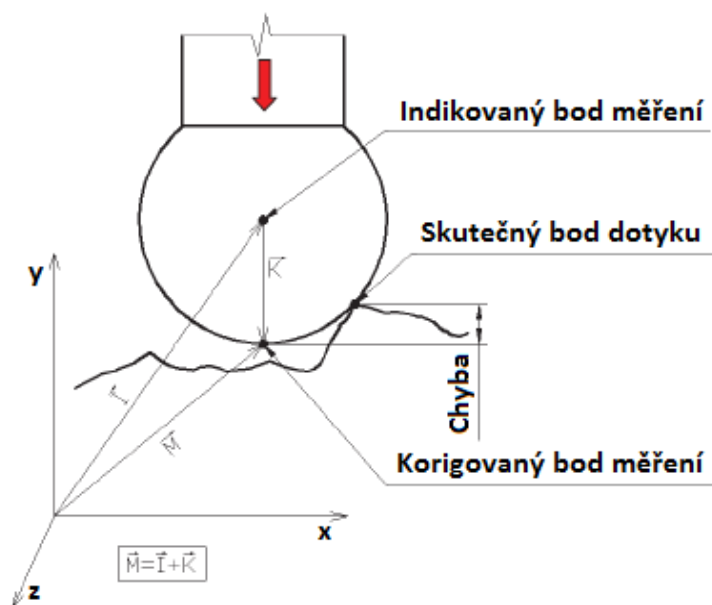
Když dojde ke styku snímací kuličky se součástí v místě opotřebení, tak vznikají systematické chyby měření (skutečný rozměr snímací kuličky má v místě opotřebení jinou hodnotu, než je hodnota, se kterou CMM počítá).



Obr. 114 Opatřebení kuličky dotyku  
 a) Opatřebení otěrem, b) Usazování hliníku na povrchu kuličky

#### 4.3.7 Ovlivnění přesnosti vlivem přepočtu souřadnic měřeného bodu

Způsob jakým CMM přepočítává souřadnice měřeného bodu, se dá dobře vysvětlit na obr. 67. V okamžiku rozpojení kontaktu snímací sondy dojde k zaznamenání prostorových souřadnic indikovaného bodu měření, který se nachází ve středu snímací koule. Po jeho zaznamenání CMM přepočítá souřadnice do korigovaného bodu měření, který je předpokládaným bodem na povrchu měřeného objektu. Problém je v tom, že není vždy korigovaný bod měření totožný se skutečným bodem dotyku, a proto vzniká chyba měření. Korekční vektor se rovná poloměru snímací koule a je doplněný o korekci systematické chyby, která vzniká při měření.



Obr. 115 Přepočet souřadnic ze snímaného bodu

#### 4.3.8 Přesnost a kontrola CMM

Dosud neexistuje jednotný systém vyjadřování přesnosti měření na CMM a to nejen mezi výrobci, ale ani v ISO nebo ČSN.

Praxe potvrzuje, že otázka přesnosti měření na CMM je velmi složitá, dá se povědět, že výsledná přesnost se mění, a to případ od případu, a dá se konkrétně zjistit a prokázat jen jako pravděpodobnou chybu měření aritmetického průměru řady opakovaných měření, jako výsledek určitého měření zadaného měřeného objektu a zvolené měřicí metody:

- opakovatelnost – je schopnost CMM pokaždé dávat při opakovaném měření stejný výsledek,
- výkonnost – je podíl času, po který stroj měří daný rozměr v rámci svých mezí přesnosti.

Na přesnost CMM stroje se podílejí všechny prvky celého systému, ale obzvlášť se na kontrolu přesnosti stroje dívá výrobce a taktéž uživatel.

Výrobce musí důkladně sledovat přesnost jednotlivých prvků stroje, přičemž uživatele zase zajímá výsledná přesnost celého systému a otázka jeho rychlého a snadného ověření. Z tohoto důvodu rozdělujeme zkušební metody do dvou základních skupin:

- analytické metody (po komponentech),
- metody globální (pomocí etalonu a zkušebních těles).

##### **Analytické metody zkoušení CMM**

Tyto metody samostatně hodnotí tyto základní prvky CMM:

- chyby měřicích systémů v jednotlivých osách,
- chyby polohování v jednotlivých osách, ve kterých se projeví chyby měřicího systému a přímosti pohybu,
- chyby vzájemné kolmosti jednotlivých os,
- úchyly rovinnosti pracovního stolu,
- chyby snímacího systému.

Jedním se základních měřidel pro kontrolu CMM je laserinterferometr pro měření délky s rozlišením 0,1  $\mu\text{m}$ , ale tytéž slouží pro kontrolu úchylek přímosti, kolmosti, rychlosti apod.

Pro kontrolu rovinnosti se používá elektronická libela (na délce 1 m má citlivost 1  $\mu\text{m}$ ).

##### **Globální metody zkoušení CMM**

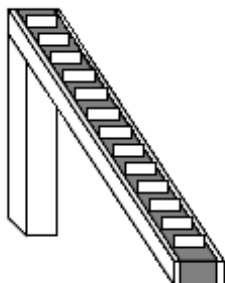
V globálních metodách se získávají globální údaje o přesnosti celého systému CMM jako celku a pro uživatele mají zásadní význam.

Výhoda: jednoduchost a krátkost zkoušek (uživatel může vykonávat sám).

Metody jsou založené na použití etalonu a zkušebních těles:

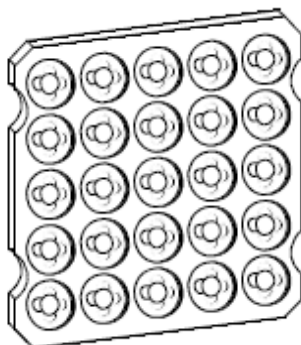
- lineární etalony,
- plošné etalony,
- prostorové etalony,
- kombinované etalony.

**Lineární etalony** – zařazujeme sem koncové měrky, které je možné použít samostatně, nebo jako sestavu o více rozměrech. U CMM se pro kontrolu odměřování v jednotlivých osách, nabízejí etalony s přesně odstupňovanými vzdálenostmi (obr. 68).



Obr. 116 Lineární etalon – stupňová měrka

**Plošné etalony** – jsou vyráběné jako desky s koulí (ballplate) (obr. 69) nebo desky s otvory (holeplate), za pomoci těchto desek se provádí kalibrace CMM a to ve dvou rovinách horizontálních a dvou rovinách vertikálních.



Obr. 117 Plošný etalon – ballplate

**Prostorové etalony** – různé tvary mají tu nevýhodu, že jejich kalibrace, při kterých je potřebná preventivní kontrola se může provádět jen na nejpreciznějších CMM a zároveň je velmi drahá a náročná.

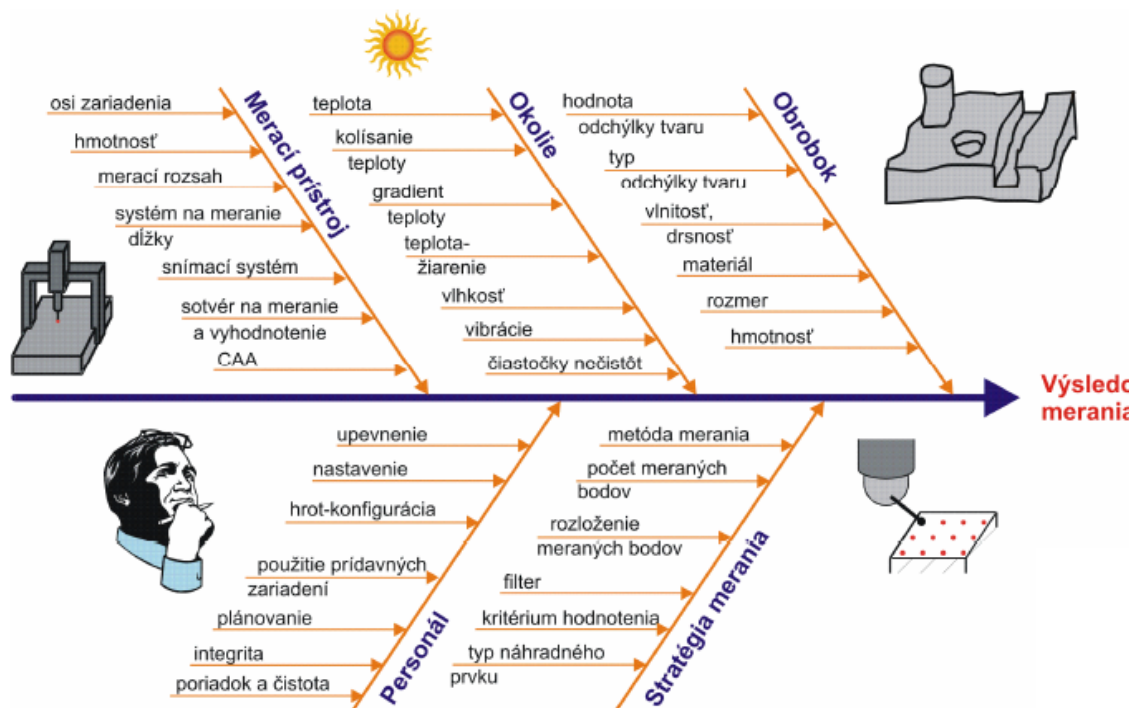
#### 4.3.9 Vliv chyb na výsledek měření

Faktory ovlivňující měření na CMM (obr. 70), které přispívají k nejistotě měření. Jejich jednotlivé složky můžeme rozdělit do následujících skupin:

- měřicí přístroj,
- okolí,
- obrobek (objekt měření),
- personál (obsluha měřicího stroje),

- strategie měření.

Tyto skupiny (obr. 70) způsobují různý stupeň odchylky výsledku měření od skutečné hodnoty. Vliv měřeného předmětu se nedá zveřejnit, protože do značné míry je ovlivněný způsobem výroby a také do určité míry ovlivněný od okolí.



Obr. 118 Faktory ovlivňující výsledek měření

**Vliv měřicího přístroje** – při každém měřicím zařízení se berou v úvahu jeho vnitřní nedostatky a zohledňují se při udávání přesnosti konkrétního měřicího zařízení, jako je:

- nepřesnost výroby jednotlivých funkčních elementů,
- nepřesnost montáže převodových systémů a mechanismů,
- deformace.

Tyto negativní vlivy se eliminují ověřováním a kalibrací měřicích zařízení.

**Vliv okolí** – Výrazný vliv na měřené rozměry má teplota, proto se většina metrologických laboratoří snaží důsledně udržovat teplotu  $20^{\circ}\text{C} \pm 1^{\circ}\text{C}$ .

**Vliv objektu měření** – Na výsledek měření mají vliv i některé charakteristiky měřené součásti, jako např.:

- charakteristika povrchu,
- tvrdost,
- elastická a plastická pružnost měřeného objektu.

**Vliv obsluhy a strategie měření** – je potřeba dodržovat zvolenou strategii měření, protože s tím souvisí i velikost nejistoty. Některé strategie měření, mohou zvyšovat, nebo snižovat nejistotu měření.

#### **4.3.10 Chyby snímání u CMM**

Výsledky měření nejsou dokonalé a vykazují chyby, je to rozdíl od jmenovitého rozměru. Tyto rozdíly jsou stanoveny na základě ověřování rozměrových a geometrických specifikací. V souladu s normou ČSN EN ISO 10360 má každá specifikace přesnosti označení MPE (Maximum Permissible Error), přičemž měřicí úloha je charakterizována indexem (např. MPE<sub>E</sub> – největší dovolená chyba při měření rozměru).

#### **Největší dovolená chyba při měření rozměru (MPE<sub>E</sub>)**

Ke stanovení odchylky délkových rozměrů je potřebné měřit kalibrované koncové rozměry, nebo stupňovité koncové rozměry. Je nutné stanovit 5 různých délek v 7 libovolných pozicích v měřicím rozsahu přístroje. Každá délka se měří nejméně 3krát. Takovýmto způsobem získáme hodnoty, které se porovnávají s kalibračními hodnotami, a třeba dbát, aby odchylka nepřekročila specifikaci. Specifikace v závislosti na délce se uvádí ve tvaru:

$$MPE_E = \pm \text{minimum} ( A+L/K),$$

kde: A - je kladná konstanta v mikrometrech udávaná výrobcem,

K - je bezrozměrná kladná konstanta udávaná výrobcem,

L - je měřený rozměr v milimetrech.

#### **Největší dovolená chyba snímání (MPE<sub>P</sub>)**

Ke stanovení kontaktní odchylky se měří kalibrační kulička (průměr 10 až 50 mm) se zanedbatelnou tvarovou chybou na 25 místech doporučených normou ČSN EN ISO 10360-2. Z naměřených hodnot se vypočítá Gaussova vyrovnávací kulička. Rozsah radiálních vzdáleností od kalibrační kuličky nesmí překročit specifikaci.

#### **Největší dovolená chyba kontaktního snímání (MPE<sub>THP</sub>)**

Ke stanovení snímané kontaktní odchylky se nasnímá kalibrační kulička s průměrem 25 mm (se zanedbatelnou tvarovou chybou) na 4 drahách stanovených normou ČSN EN ISO 10360-4. Při porovnání naměřených hodnot se specifikací MPETHP musí být splněna podmínka:

Rozsah radiálních odchylek od kalibrační kuličky nesmí překročit specifikaci, která odpovídá MPEP. Navíc, je potřeba uvést čas *T* potřebný k vykonání kontroly, protože rychlost měření má také výrazný vliv na výsledek měření.

## 5 Požadavky na 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.

### 5.1 Pracovní prostory

Stupeň akreditace a přesnost měření, která jsou v laboratoři prováděny, úzce souvisí s požadavky na pracovní prostory. Přesné a spolehlivé měření v oblasti měření délek může být splněno při dodržení následujících podmínek:

- teplota:  $(20 \pm 0,5)$  °C, pro nejpřesnější měření:  $(20 \pm 0,1)$  °C,
- relativní vlhkost:  $(55 \div 60)$  %,
- intenzita umělého osvětlení: 800 lx, pro zvláště náročná měření až 1200 lx,
- přípustná hlučnost: max. 55 dB,
- bezprašnost (u zvláště náročných měření je definován počet zrn prachu v 1 cm<sup>3</sup> v ovzduší),
- prostředí bez vibrací, elektromagnetických poruch nebo rušení,
- dostatek prostoru,
- klid a pohoda pro soustředěnou práci,
- estetické prostředí.

### 5.2 Přístrojové vybavení

V laboratoři musí být trvale splněny podmínky na přístrojové vybavení požadované při akreditaci. Je nutné dodržovat pravidelnou údržbu a také podrobnou evidenci všech měřidel s uvedením základních dat, oprav, kalibrací, ověření atd. Při využívání přístrojového vybavení je nutné, aby všechny prováděné činnosti byly v souladu se zákonem O metrologii a jeho novelizací. Je nutné dodržet také podmínku návaznosti na státní etalony.

### 5.3 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.

### 5.4 Stavební realizace metrologických laboratoří

Metrologické laboratoře musí splňovat přísná stavební kritéria.

#### 5.4.1 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 zvláště 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 nejpřesnější 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).

#### **5.4.2 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.

#### **5.4.3 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.

#### **5.4.4 Osvětlení**

Osvětlení se provádí zářivkami nebo jinými svítilny 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.

#### **5.4.5 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 108 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 100 W.

#### **5.4.6 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 přísávaním 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.

#### **5.4.7 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.

#### **5.4.8 Rozvody energie**

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.

## 6 Řízení kvality v metrologii

Tempo dnešního světa je velmi rychlé a hektické, s požadavkem současného i budoucího uspokojení zákazníka a odhadnutí jeho nastávajících potřeb, tj. vyrábět kvalitní výrobky prostřednictvím kvalitních procesů a poskytování kvalitních služeb. Co to však kvalita ve skutečnosti je? Všeobecně je možné kvalitu definovat jako **subjektivní preferenci zákazníka**. Podle ČSN EN ISO 9000:2005, odstavec 3.1.1 - kvalita je stupeň splnění požadavků souborem inherentních znaků.

### 6.1 Definice kvality

Pojem kvalita může být analyzován z různých pohledů:

- Pohled Deminga - kvalita je posuzovaná ve vztahu k zákazníkovi a jeho potřebám, pro které se rozhodl produkt použít, přítomnost procesu neustálého zlepšování,
- Pohled Jurana – z pohledu dlouhodobé životnosti je podstatná dostupnost, spolehlivost a udržitelnost,
- Pohled Cosbyho – dosahování kvality se rovná shodě s požadavky,

### Legislativní zodpovědnost za výrobky

Potřeba zavedení a implementace systému managementu kvality a systému řízení měření souvisí s faktem dosahování cílů kvality a s požadavky právní zodpovědnosti každého podnikatelského subjektu zabezpečit ochranu spotřebitele a se všeobecnou zodpovědností za výrobek. Rámcovými dokumenty je směrnice rady ES 85/374/EEC o zodpovědnosti za chybné výrobky a směrnice 92/59/EEC o všeobecné bezpečnosti výrobků. Dané směrnice zabezpečují sblížení zákonů a jiných právních a správních předpisů členských států EU. V podmínkách právního systému České republiky jsou pro ochranu spotřebitele platné následující zákony:

- **Zákon č.59/1998 Sb.** odpovědnosti za škodu způsobenou vadou výrobku ve znění, **zákona č.209/2000 Sb.** o obecné bezpečnosti výrobků a o změně některých zákonů,
- **Zákon č.102/2001 Sb.** o o obecné bezpečnosti výrobků a o změně některých zákonů (zákon o obecné bezpečnosti výrobků),
- **Zákon č.22/1997 Sb.** o technických požadavcích na výrobky a související předpisy,
- **Zákon č.110/1997 Sb.** o potravinách a tabákových výrobcích a o změně a doplnění některých souvisejících zákonů,
- **Zákon č.258/2000 Sb.** o ochraně veřejného zdraví a související předpisy.

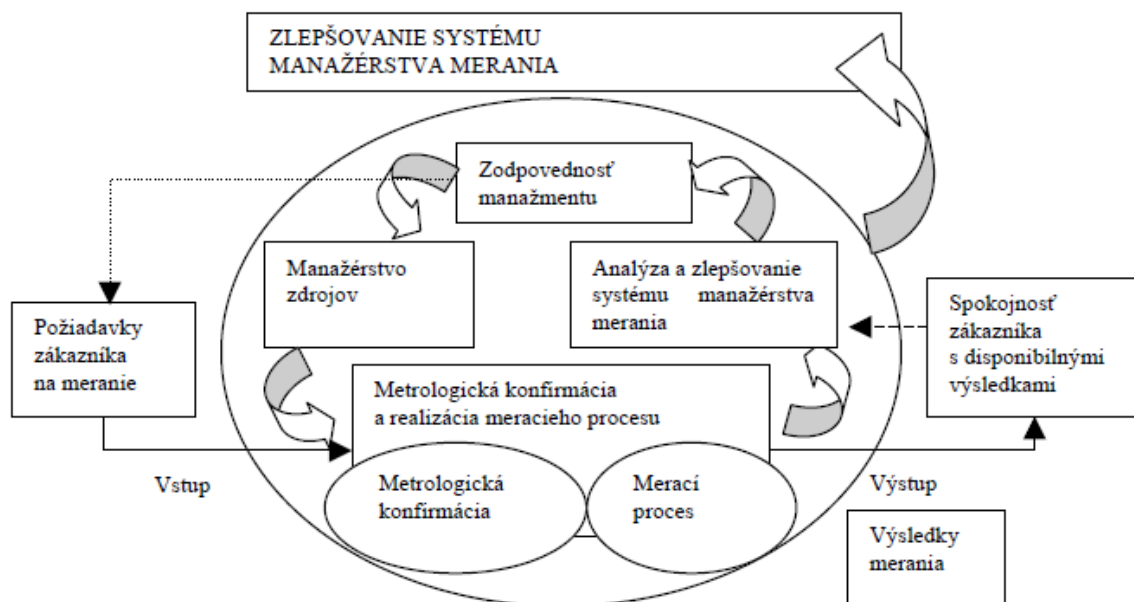
Mimo vzpomenutých zákonů platí též celá řada dodatečných zákonů, směrnic a nařízení, které se postupně harmonizují podle požadavků EU a jejich dodržování je zabezpečeno prostřednictvím kontrolních úřadů jako např. Česká obchodní inspekce (ČOI), Státní zemědělská a potravinářská inspekce (SZPI), Státní veterinární služba a Hygienická služba.

## 6.2 Systém řízení měření a zařízení na monitorování měření

Důležitým podsystémem systémů řízení kvality je systém řízení měření, který zabezpečuje, že měřicí zařízení a měřicí procesy vyhovují požadovanému použití ve smyslu normy ČSN EN ISO 10012:2003 – Systémy manažerství měření. Při budování systému je požadováno též rozdělení zodpovědnosti, činnosti a způsob dosažení žádané přesnosti. Kardinálním principem managementu kvality je rozhodování na základě faktů – na základě naměřených hodnot. Cílem systému řízení měření je rozpoznání nesprávných výsledků měření získaných prostřednictvím vybraných měřicích zařízení a měřicích postupů, což by mohlo mít za následek výrobu neshodných kusů. Uvádění nejistoty měření neznamená identifikaci nedostatku nebo negativního vlivu, ale reálný popis měření – komplexní výsledek měření. Nejistota měření není identická s chybou měření, jako je mnohokrát nesprávně uváděno v literatuře.

Používané metody v systému řízení měření jsou různorodé a začínají od základních pozorování měření a charakteristik měřicího zařízení až po rozsáhlé použití statistických technik v měřicích procesech. Jejich úroveň stanovuje organizace, stejně jako zařízení na monitorování a měření.

Při nutnosti zajištění platnosti výsledků musí být měřicí zařízení v určitých intervalech kalibrována, verifikována v porovnání s metrologickými etalony (mezinárodními a národními), nebo musí být zabezpečena základna kalibrace a verifikace. Zařízení musí být dále identifikovatelné, aby se mohl určit stav jejich kalibrace, existuje podmínka jejich nastavitelnosti, opětovné nastavitelnosti a ochrany nastavení před znehodnocením výsledků měření stejně jako potřeba ochrany před poškozením a znehodnocením během manipulace, údržby a skladování.



Obr. 119 Model systému manažerstva měření podle normy ČSN EN ISO 10012:2003

Pokud je zjištěna neshodnost zařízení s požadavky, organizace musí posoudit platnost předcházejících výsledků měření a udělat o tom záznam. Následně musí být vykonána nová kalibrace zařízení a záznamy z kalibrace a verifikace musí být čitelně, lehce identifikovatelné

a dostupné. Požadavky na měřicí zařízení a procesy se mohou vyjádřit ve formě největší dovolené chyby, rozsahu, nejistoty, citlivosti, stability, zručnosti obsluhy nebo environmentálních podmínek.

Podporou systému řízení měření je **konfirmace měřicího zařízení**, tzv. metrologická konfirmace a **řízení měřících procesů**.

Základním předpokladem budování konfirmačního systému je definování metrologických požadavků na měřicí zařízení. Konkrétní nebo potenciální požadavky zákazníka na měření musí být stanoveny pře započítím práce na výrobku nebo službě s ohledem na předpoklady výrobce měřicího zařízení, norem, předpisů, apod. Co se týká řízení měřících procesů, je potřeba si uvědomit respektování dokumentovaných postupů. Výhodou systémů řízení měřících procesů je téměř okamžité určení odchylek mimo toleranční hranice. Priorita je vždy kladena výsledkem měřících procesů se značným vlivem na kvalitu výrobku, procesu nebo služby.

Systém řízení měřících procesů se skládá z:

1. **identifikace měřicího procesu** - určení vhodného časového rozvrhu měření a požadavek na přesnost,
2. **respektování konfirmačního systému pro měřicí zařízení**,
3. **analýzování databáze údajů pro řízení měřících procesů**,
4. **implementace nápravných opatření**.

Protože proces měření je ovlivněn variabilitou během měření byly vypracovány metodiky na analýzu systému měření, tzn., nejedná se pouze o posouzení výsledku měření, jako je tomu při určování nejistoty měření. Cílem analýzy systému měření je určení zdrojů nepřesnosti za účelem jeho vylepšení. Mezi základní zdroje nepřesností patří výrobek, použité měřicí zařízení, podmínky prostředí měření a operátor.

K metodám určení kvality měřicího systému v automobilovém průmyslu patří metody na výpočet komplexní způsobilosti měřicího systému metodikou MSA – Analýza systému měření (Measurement System Analysis) – 4. vydání a VDA5 – Vhodnost kontrolních systémů – 2. vydání. Obě metodiky jsou zjednodušením metodiky GUM – Guide to the expression of Uncertainty in Measurement. Uplatňování analýzy systému měření je vyžadováno normou ISO/TS 16 494 u všech dodavatelů pro automobilový průmysl.

### **6.3 MSA – Measurement System Analysis**

Následující část bude věnována vysvětlení základní metodiky MSA. Příručka MSA se neustále vyvíjí a je pouze úvodem k analýze systému měření. Jejím záměrem je omezovat vývoj metod analýzy vhodných pro určité procesy nebo komodity. Historie vzniku metodiky MSA je spojená s rokem 1990 s poptávkou po sjednocení individuálních směrnic společností Chrysler, Ford a General Motors pro analýzu kvality systému měření, určení kvality naměřených dat a určení významného vztahu mezi více proměnnými. Metodika MSA je určena zejména pro procesy měření, kde existuje možnost opakovatelnosti. Nejčastějším důvodem vzniku databáze nízké kvality je fakt, že existuje v souboru naměřených dat příliš velká variabilita zapříčiněná interakcí systému měření a jeho prostředí. Proto je kladen významný důraz na generování dat pouze přijatelné kvality.

Přehled používané terminologie (v příručce MSA):

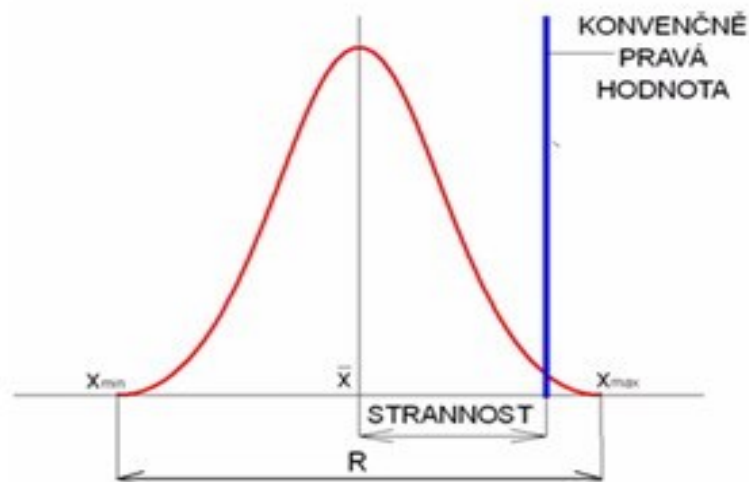
- **Měření (Measurement)** – podle C. Eisenharta je to „přiřazování čísel nebo hodnot hmotným věcem za účelem reprezentování jejich vzájemných vztahů s ohledem na konkrétní vlastnosti“.
- **Měřidlo (Gage)** – je to jakékoliv zařízení používané na měření.
- **System měření** – je to komplexní množina přístrojů nebo měřidel, etalonů, operací, metod, přípravků, personálu, prostředí a software využívaných na definování jednotek měření.
- **Etalon (Standard)** – definovaná hodnota v rozsahu stanovených tolerancí nejistoty, která je přijatá jako pravá (referenční) hodnota.
- **Efektivní rozlišení (Effective resolution)** – citlivost systému měření k variabilitě procesu při individuální úloze a použití.
- **Referenční hodnota (Reference value)** – odsouhlasená hodnota artefaktu, která je používaná jako pravá hodnota artefaktu.
- **Pravá hodnota (True value)** – je neznámá a je to skutečná hodnota artefaktu.

Při řešení MSA se sledují následující statistické vlastnosti systému měření:

- Variabilita polohy.
- Variabilita rozptylu.
- Variabilita systému.

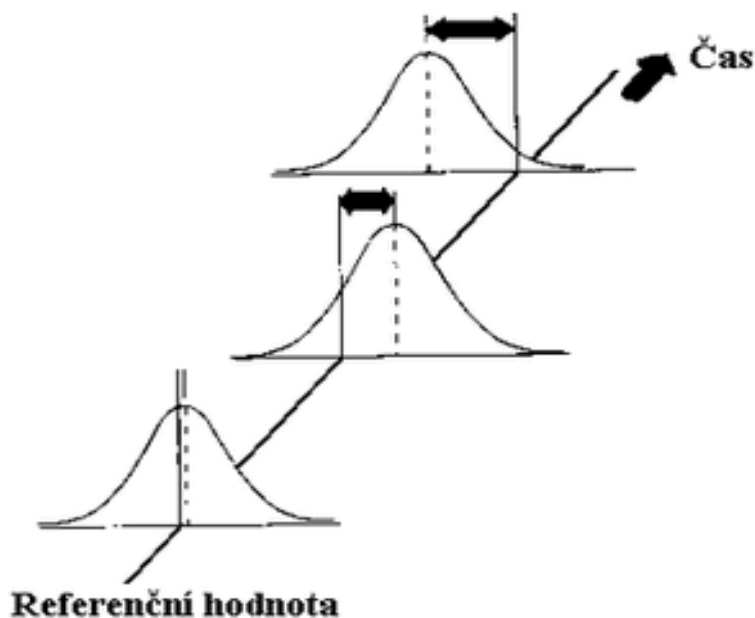
### 6.3.1 Variabilita polohy:

1. **Přesnost (Accuracy)** – „těsnost“ v porovnání s pravou hodnotou resp. přijatou referenční hodnotou.
2. **Strannost (Bias)** – je identifikovaná jako složka systematické chyby měření a je to rozdíl mezi referenční hodnotou a průměrem měření. Důvodem jejího vzniku mohou být příčiny, jako je nesprávná kalibrace, opotřebením měřicího zařízení, nevhodně vybrané měřidlo pro daný účel měření, odlišná metoda měření, vlivy prostředí např. teplota, vlhkost, vibrace, čistota.



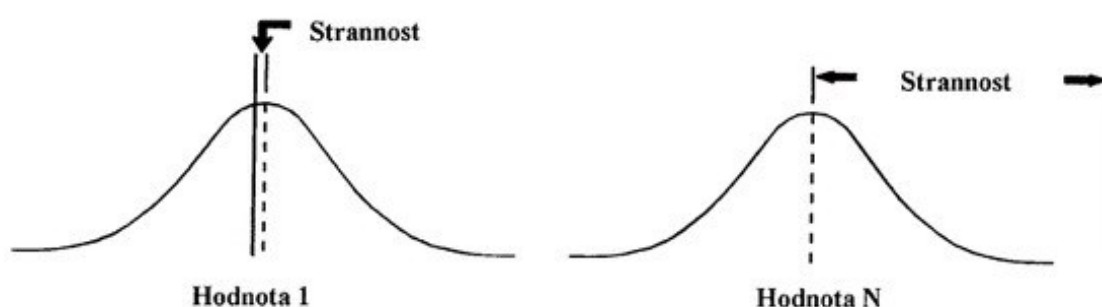
Obr. 120 Strannost měření

3. **Stabilita (Stability)** – stabilizovaný proces měření ve statisticky regulovaném stavu vzhledem k poloze, také změna strannosti v čase. Zdroje nestability mohou být opotřeбенý přístroj, zařízení nebo přípravek, nevyhovující údržba, odlišná metoda měření, nesprávná kalibrace a nesprávné použití hlavního etalonu.



Obr. 121 Stabilita měření

4. **Linearita (Linearity)** – změna strannosti v běžném rozsahu a závislost násobných a nezávislých chyb, složky systematické chyby. Příčiny linearity mohou být následující: nesprávná kalibrace měřidla, měřicí zařízení špatné kvality, nesjednocená metoda měření, špatná údržba.



Obr. 122 Linearita systému měření

### 6.3.2 Variabilita rozptylu:

1. **Shodnost (Precision)** – složka náhodné chyby, těsnost souhlasu mezi nezávislými výsledky zkoušky.
2. **Opakovatelnost (Repeatability)** – označení EV – variabilita zařízení, variabilita opakovaného měření naměřená jedním měřicím zařízením při měření identické charakteristiky stejného dílu. Příпустné příčiny nevyhovující opakovatelnosti mohou být zapříčiněné dílem (konzistence výběru, forma, poloha, povrchová úprava, zkosení),

přístrojem (oprava, opotřebení, chyba zařízení, špatná údržba), etalonem (kvalita, třída, opotřebení), metodou (variabilita nastavení, technika, uchycení resp. upnutí při měření), operátorem (technika, poloha, nedostatek zkušeností, odbornost při manipulaci, cit, únava), prostředím (výkyvy teploty, vlhkosti, vibrace, osvětlení, míra čistoty prostředí)

$$EV = \frac{\bar{R}}{d_2^*}$$

(1) kde:

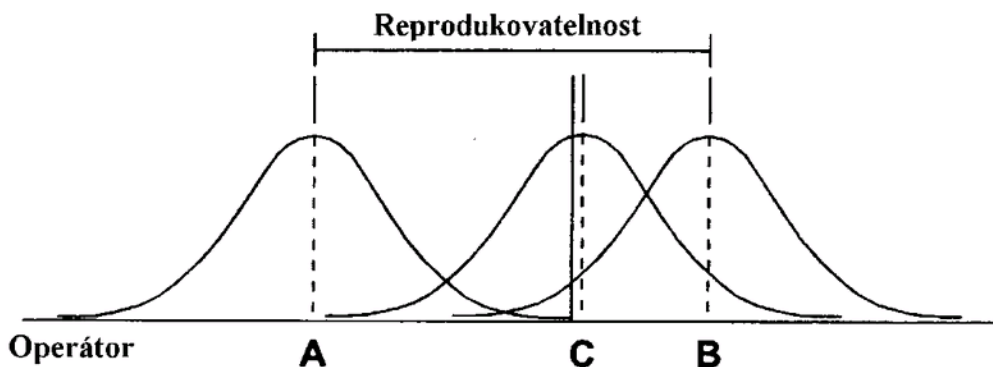
$\bar{R}$  je průměrné rozpětí opakovaných měření všech operátorů,

$d_2^*$  je koeficient závislý na počtu opakování měření, součinu počtu měřených součástí a počtu operátorů.



Obr. 123 Opakovatelnost

3. **Reprodukovatelnost (Reproducibility)** – označení AV – variabilita operátora, variabilita průměru měření jedním měřicím přístrojem za předpokladu měření stejné charakteristiky u stejného dílu. Jedná se o variabilitu systému měření ovlivněnou chováním operátorů jako vysvětluje obr. 73.



Obr. 124 Reprodukovatelnost

Reprodukovatelnost může být definována jako variabilita mezi systémy měření nebo mezi podmínkami měření. Proto potenciaální zdroje variability mohou vznikat mezi díly (průměrný

rozdíl při měření dílu typu A, B, C za předpokladu použití stejného měřicího zařízení, operátora a metody), mezi měřicími zařízeními (průměrný rozdíl při použití měřicích zařízení typu A, B, C za předpokladu použití stejných dílů, operátorů a v podmínkách stejného prostředí), mezi etalony (vliv prostředí), mezi měřicími metodami (změna systému měření, např. z ručních na automatizované, nulování, způsoby uchycení měřeného dílu), mezi operátory (vliv zkušeností s použitím měřicí techniky, odbornosti) a mezi prostředím (cykly prostředí).

$$AV = \sqrt{\left(\frac{R_0}{d_2^*}\right)^2 - \left(\frac{(EV)^2}{n \cdot r}\right)} \quad (2) \quad \text{kde:}$$

$R_0$  je variační rozpětí průměru opakovaných měření jednotlivých kusů jednotlivými operátory,

$r$  je počet měřených kusů,

$n$  je počet opakovaných měření,

$d_2^*$  je koeficient závislý od počtu operátorů.

Opakovatelnost a reprodukovatelnost měřidla (GRR nebo R&R) - daná metoda může a také nemusí zahrnovat účinky času, jedná se o kombinovaný odhad opakovatelnosti a reprodukovatelnosti systému měření.

$$GRR = \sqrt{(EV)^2 + (AV)^2} \quad (3)$$

Také platí, že GRR je součet rozptylu uvnitř systému a mezi systémy.

$$\sigma^2_{GRR} = \sigma^2_{reprodukovatelnost} + \sigma^2_{opakovatelnost} \quad (4)$$

4. **Způsobilost systému měření (Measurement system capability)** – krátkodobý výpočet variability systému měření např. „GRR“ spolu s grafickým znázorněním.
5. **Funkčnost systému měření (Measurement system performance)** – dlouhodobý výpočet variability systému měření.
6. **Citlivost (Sensitivity)** – je daná prahem citlivosti měřidla – je to schopnost reakce systému měření na změny měřeného prvku, vlastní kvalitou od výrobce originálního zařízení, provozním stavem přístroje, etalonu a údržby.
7. **Konzistence (Consistency)** – vyjadřuje statisticky zvládnutý stav vzhledem k variabilitě a je to stupeň změny opakovatelnosti v čase.
8. **Uniformita (Uniformity)** – je homogenita opakovatelnosti a vyjadřuje změnu opakovatelnosti v běžném provozním rozsahu.

### 6.3.3 Variabilita systému:

1. **Způsobilost (Capability)** – variabilita získaná v krátkém časovém úseku při odečítání hodnot.
2. **Funkčnost (Performance)** – variabilita získaná v dlouhém časovém úseku při odčítání hodnot.
3. **Nejistota (Uncertainty)** – rozmezí hodnot okolo měřené veličiny, která je považovaná za pravou hodnotu.

Na měření kvantitativních proměnných se využívá studium opakovatelnosti a reprodukovatelnosti systému měření.

Mezi nejpoužívanější metody patří:

- **Metoda založená na rozpětí** – metoda je též známá pod termínem „rychlá metoda“ a umožňuje rychlou aproximaci měření.
- **Metoda průměrů a rozpětí** – metoda je oproti předchozí metodě nákladnější a náročnější na čas. Její výhody: poskytuje odhad opakovatelnosti a reprodukovatelnosti systému měření. Nevýhody: nevyjadřuje jejich vzájemné působení.
- **Metoda ANOVA** - jedná se o standardní statistickou metodu, která je vhodná na analyzování chyby měření a jiných zdrojů variability údajů při analýze systému měření.

Výhody použití metody MSA oproti VDA5:

- Rozsah použitelnosti je rozsáhlejší než VDA5, kterou je možno uplatnit pouze na výpočet geometrických veličin.
- Metodika MSA dovoluje výpočet všech vlivů na systém měření (reprodukovatelnost a opakovatelnost) při jednom rozsáhlejší měření; metodika VDA5 měří vlivy odděleně.
- MSA udává grafické výstupy analýzy např. při výpočtu GRR a VDA5, neudává jediný grafický výstup.

Ve všeobecnosti je metodika MSA při využití softwarové podpory v obou případech více používaná, rozšířenější a praktičtější než metodika VDA5.

## 7 Použitá literatura:

1. <https://www.technicke-normy-csn.cz/csn-25-4108-254108-172144.html> (Měření závitů měřicími drátky. ČSN 254108, 1972-05)
2. Kaňuch P., Kováč J., Dovica M. *Metrológia v strojárstve. Laboratórne úlohy – teoretická časť*. Strojnícka fakulta: Košice, 2010, s. 71. ISBN 978-80-553-0543-1
3. Čepová L., Petřkovská L. *Legislativa ve strojírenské metrologie*.
4. Petřkovská L., Čepová, L. *Metrologie a řízení kvality*. Ediční středisko VŠB – TUO, Ostrava, 2012, s. 142. ISBN 978-80-248-2771-1
5. Tichá, Š., Mrkvica I. *Vybrané kapitoly ze strojírenské metrologie*. VŠB – TUO, Ostrava, 2012, s. 143. ISBN .....
6. Petřkovská L., Čepová L. *Strojírenská metrologie*. VŠB – TU, Vydání: první, 2011, s.100. ISBN: .....
7. *Strojírenská technologie Plzeň 2011: sborník abstraktů: IV. ročník mezinárodní konference konané ve dnech 25.- 26.1.2011 v Plzni*. Vyd. 1. Plzeň: ZČU v Plzni, 2011, s. [1-8]. ISBN 978-80-7043-934-0.
8. ČSN EN ISO 4287 *Geometrické požadavky na výrobky (GPS)- Struktura povrchu: Profilová metoda – Termíny, definice, a parametry struktury povrchu*. Český normalizační institut, březen 1999
9. PETŘKOVSKÁ, L.; PETRŮ, J., *Engineering Metrology and Assembly*. VŠB – Technical university of Ostrava, 2012, p. 106
10. Norma ČSN EN ISO 25178-2
11. normou ČSN EN ISO 4287
12. normě EN ISO 25 178-3“
13. ČSN ISO 16610-21
14. ČSN EN ISO 25 178-2
15. ČSN EN ISO 13565
16. ČSN EN ISO 25178-2 (01 4451). *Geometrické specifikace produktu (GPS) - Textura povrchu: Plocha - Část 2: Termíny, definice a parametry textury povrchu*. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, Prosinec 2012. 52 s.
17. NOVÁK, Zdenek, 2015. *3D analýzy a filtrace profilu povrchu* [online]. MM Průmyslové spektrum. pp. 78, 2015 [cit. 2022-02-15]. Dostupné z: <http://www.digitovarna.cz/clanek-84/3d-analyzy-a-filtrace-profilu-povrchu.html>
18. TUREK, Pavel, 2017. *Více parametrové hodnocení povrchů součástí*. Ostrava, 2017, 57 s. Diplomová práce. VŠB – Technická univerzita Ostrava, Fakulta Strojní. Vedoucí práce Ing. Lenka Čepová, PhD.
19. ČSN EN ISO 25178-3 (01 4451). *Geometrické specifikace produktu (GPS) - Textura povrchu: Plocha – Část32: Specifikace operátorů*. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, Duben 2013. 20 s.
20. *Prostorové hodnocení struktury povrchu*. [online], 2005. MM Průmyslové spektrum [cit. 2020-04-08]. Dostupné z: <https://www.mmspektrum.com/clanek/prostorove-hodnoceni-struktury-povrchu>.

21. ČSN EN ISO 13565-2: Geometrické požadavky na výrobky (GPS) -Struktura povrchu: Profilová metoda, povrchy mající stratifikované funkční vlastnosti - Část 2: Výškové charakteristiky využívající křivku lineárního poměru materiálu. Praha: Český normalizační institut, 1999.
22. ČSN EN ISO 13565-3 (01 4446) *Geometrické požadavky na výrobky (GPS) -Struktura povrchu: Profilová metoda, Povrchy mající stratifikované funkční vlastnosti - Část 3: Výškové charakteristiky využívající pravděpodobnostní křivku materiálu.* Praha. Český normalizační institut, Září 2001. 24 s.
23. LEACH, Richard. *Characterisation of areal surface texture.* Heidelberg: Springer, 2013. ISBN 978-3-642-36458-7.
24. Introduction to Surface Roughness Measurement: Surface Roughness Measurement—Parameters [online]. [cit. 2021-01-12]. Dostupné z: [https://www.olympus-ims.com/cs/metrology/surface-roughness-measurement-portal/parameters/#!cms\[focus\]=cmsContent14709&cms\[tab\]=undefined](https://www.olympus-ims.com/cs/metrology/surface-roughness-measurement-portal/parameters/#!cms[focus]=cmsContent14709&cms[tab]=undefined)
25. ČSN EN ISO 25178-606 (01 4451) *Geometrické specifikace produktu (GPS) - Textura povrchu: Plocha - Část 606: Jmenovité charakteristiky bezdotykových přístrojů (variance sond).* Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, Leden 2016, 40 s.
26. PERNIKÁŘ, J.-TYKAL, M.-VAČKÁŘ, J.: *Jakost a metrologie.* Skripta VUT FS. Akademické nakladatelství CERM, Brno 2001.
27. ČSN EN ISO 4287: Geometrické požadavky na výrobky (GPS) - Struktura povrchu: Profilová metoda - Termíny, definice a parametry struktury povrchu. Praha: Český normalizační institut, 1999, 24 s.
28. [online], 2021. [cit. 2020-02-18]. Dostupné z: <http://www.dd-technologies.com/styli.html>
29. ČSN EN ISO 3274. *Geometrické požadavky na výrobky (GPS) - Struktura povrchu: Profilová metoda - Jmenovité charakteristiky dotykových (hrotových) přístrojů.* Praha: Český normalizační institut, 1999, 20 s.
30. BUMBÁLEK, Bohumil; ODVODY, Vladimír; OŠŤÁDAL, Bohuslav. *Drsnost povrchu.* Praha: SNTL - Nakladatelství technické literatury, 1989. 338 s
31. ČECH, J., PERNIKÁŘ, J., PODANÝ, K. *Strojírenská metrologie I.* 5. vydání. Brno: Akademické nakladatelství CERM, 2009. 183 s. ISBN 978-80-214-4010-4.
32. DAVIM, J.P.: *Surface integrity in Machining.* Springer, 2009
33. FRANCO, L. A., SINATORA, A. 3D surface parameters (ISO 25178-2): Actual meaning of Spk and its relationship to Vmp. *Precision Engineering.* vol. 40, 2015, pp. 106-111., ISSN 0141-6359.

34. ČSN EN ISO 25178-2 (01 4451). *Geometrické specifikace produktu (GPS) - Textura povrchu: Plocha - Část 2: Termíny, definice a parametry textury povrchu*. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, Prosinec 2012. 52 s.
35. PERNIKÁŘ, J.-TYKAL, M.-VAČKÁŘ, J.: *Jakost a metrologie*. Skripta VUT FS. Akademické nakladatelství CERM, Brno 2001.
36. DOVICA, M. a kol., *Metrológia v strojárstve*, Edícia vedeckej a odbornej literatúry – Strojnícka fakulta TU v Košiciach, 2006.
37. DRBUL, Mário; ŠAJGALÍK, Michal; ŠEMCER, Ján; CZÁNOVÁ, Tatiana; PETŘKOVSKÁ, Lenka; ČEPOVÁ, Lenka. *Strojárska metrológia a kvalita povrchov vytvorených technológiami obrábania*. Žilina : Ediční stredisko ŽU v Žiline, 2014, 115 s. ISBN 978-80-89276-45-5.
38. FRANCO, L. A., SINATORA, A. 3D surface parameters (ISO 25178-2): Actual meaning of Spk and its relationship to Vmp. *Precision Engineering*. vol. 40, 2015, pp. 106-111., ISSN 0141-6359.