



**FAKULTA
STROJNÍ
ČVUT V PRAZE**

**Ústav technologie obrábění,
projektování a metrologie**

**Geometrické specifikace produktů - tolerování
rozměrů**

**Geometrical product specifications - dimensional
tolerancing**

Bakalářská práce

Praha

2018

Autor práce: Jakub Kala

Vedoucí práce: Ing. Petr Mikeš, Ph.D.

Studijní program: B2342 TEORETICKÝ ZÁKLAD STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ

I. OSOBNÍ A STUDIJNÍ ÚDAJE

Příjmení: **Kala** Jméno: **Jakub** Osobní číslo: **437288**
Fakulta/ústav: **Fakulta strojní**
Zadávací katedra/ústav: **Ústav technologie obrábění, projektování a metrologie**
Studijní program: **Teoretický základ strojního inženýrství**
Studijní obor: **bez oboru**

II. ÚDAJE K BAKALÁŘSKÉ PRÁCI

Název bakalářské práce:

Geometrické specifikace produktů - tolerování rozměrů

Název bakalářské práce anglicky:

Geometrical product specifications - dimensional tolerancing

Pokyny pro vypracování:

1. Analýza normy ČSN EN ISO 14405
2. Vytvoření modelových součástí pro realizaci měřicích úloh
3. Vypracování modelových úloh pro kontrolu součástí v softwaru Calypso
4. Simulace měření

Seznam doporučené literatury:

Jméno a pracoviště vedoucí(ho) bakalářské práce:

Ing. Petr Mikeš, Ph.D., ústav technologie obrábění, projektování a metrologie FS

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

Datum zadání bakalářské práce: **09.04.2018**

Termín odevzdání bakalářské práce: **31.07.2018**

Platnost zadání bakalářské práce: _____

Ing. Petr Mikeš, Ph.D.
podpis vedoucí(ho) práce

Ing. Libor Beránek, Ph.D.
podpis vedoucí(ho) ústavu/katedry

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

III. PŘEVZETÍ ZADÁNÍ

Student bere na vědomí, že je povinen vypracovat bakalářskou práci samostatně, bez cizí pomoci, s výjimkou poskytnutých konzultací.
Seznam použité literatury, jiných pramenů a jmen konzultantů je třeba uvést v bakalářské práci.

Datum převzetí zadání

Podpis studenta

PODĚKOVÁNÍ

Rád bych poděkoval vedoucímu své bakalářské práce panu Ing. Petru Mikešovi, Ph.D. za vstřícný přístup a přínosné rady k zpracování této závěrečné práce. Dále děkuji své rodině za podporu během studia.

PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že jsem bakalářskou práci s názvem: „Geometrické specifikace produktů - tolerování rozměrů“ vypracoval samostatně pod vedením Ing. Petra Mikeše Ph.D., s použitím literatury, která je uvedena na konci mé bakalářské práce v seznamu použité literatury.

V Praze dne 26. 7. 2018

Abstrakt:

Cílem této bakalářské práce je přehledné a srozumitelné zpracování nejdůležitějších bodů normy ČNS EN ISO 14405 s názvem Geometrické specifikace produktů (GPS) – Tolerování rozměrů a následné zpracování modelových úloh pomocí programu Calypso 2017. Měření je provedeno v režimu simulace s aktivovaným generováním náhodných hodnot podél tolerovaného prvku pro názornější výsledky měření.

Klíčová slova:

Geometrické tolerance, tolerování, lineární rozměry

Abstract:

The goal of this bachelor thesis is to make organized understandable and summary of the most important points of ČSN EN ISO 14405 called Geometrical product specifications (GPS) — Dimensional tolerancing and subsequent processing of model tasks using software Calypso 2017. The measurement is performed in simulation mode with generation of random values along the tolerated element for more illustrative measurement results.

Keywords:

Geometric tolerances, tolerancing, linear dimensions

Obsah

1	Úvod.....	8
2	Analýza normy ČSN 14405	8
2.1	Seznam lineárních rozměrů.....	9
2.1.1	Popis místních lineárních rozměrů	10
2.1.2	Popis přímých globálních lineárních rozměrů	12
2.1.3	Popis lineárních vypočtených rozměrů.....	14
2.1.4	Popis uspořádané rozměrové řady	17
3	Specifikátory modifikací a jejich symboly	19
3.1	Znázornění tolerance na výkresech	22
3.2	Znázornění modifikátorů na výkresech.....	23
3.3	Pravidla indikace lineárních rozměrů na výkresech.....	24
3.3.1	Pravidla indikace základních GPS specifikací.....	24
3.3.2	Pravidla indikace pomocí specifikátorů modifikací	25
4	Indikace na výkresech.....	25
4.1	Požadavek obálky.....	27
4.2	Kompletně tolerovaný prvek.....	28
4.3	Specifická pevná omezená část.....	28
4.4	Libovolná omezená část rozměru se specifickou délkou.....	29
4.5	Libovolný průřez a libovolná podélná část	29
4.6	Specifický pevný průřez.....	30
4.7	Jednotlivé tolerování více než jednoho prvku.....	32
4.8	Společné tolerování více než jednoho prvku	32
4.9	Pružné části	32
4.10	Doplňující značení.....	33
5	Rozměry jiné než lineární rozměry.....	34
5.1	Jednoznačné a nejednoznačné tolerování.....	36
5.1.1	Lineární vzdálenost mezi dvěma integrálními prvky	36
5.1.2	Lineární vzdálenost mezi integrálním a odvozeným prvkem.....	38
5.1.3	Lineární vzdálenost mezi dvěma odvozenými prvky	39
5.1.4	Vzdálenost poloměru	40
5.1.5	Lineární vzdálenost mezi nerovinnými integrálními prvky.....	41
5.1.6	Lineární vzdálenosti ve dvou směrech.....	41

5.1.7	Úhlová vzdálenost.....	42
5.1.8	Úhlová vzdálenosti mezi integrálním a odvozeným prvkem.....	43
6	Vypracování měřících úloh.....	44
6.1	Vytvoření snímacího systému	45
6.2	Měření vzdálenosti mezi dvěma integrálními prvky.....	46
6.3	Měření vzdálenosti mezi integrálním a odvozeným prvkem	52
6.4	Měření vzdálenosti mezi dvěma odvozenými prvky	56
7	Simulace měření	61
8	Závěr	63
9	Seznam použité literatury	64

1 Úvod

Žádný rozměr nejde vyrobit úplně přesně (s nulovou tolerancí) a vždy se musí nějakým způsobem tolerovat. Čím přesnější výrobek požadujeme, tím dražší je jeho výroba. V případě volby parametrů tolerancí se obvykle volí kompromis mezi přesností a cenou výroby. Při správně nastavených parametrech tolerancí rozměrů získáme výrobek, který splňuje požadované vlastnosti a zároveň je jeho výroba ekonomicky přijatelná.

V první části práce je analýza normy ČSN EN ISO 14405, která se skládá ze tří částí. První část se zabývá tolerováním lineárních rozměrů, druhá pojednává o rozměrech jiných než lineárních a poslední část je zaměřena na tolerování úhlových rozměrů. Z normy se vybraly nejdůležitější pasáže, které se dále zpracovaly do přehledné a srozumitelné podoby.

V následujících částech byly vytvořeny jednoduché modely reprezentující modelové případy z druhé části normy. V programu Calypso 2017 proběhla tvorba plánu měření a následná realizace simulace měření na souřadnicových měřicích strojích.

Norma ČSN EN ISO 14405 je jedna z nejdůležitějších norem zabývajících se kontrolou kvality. Práce má za úkol vytvořit přehled nejdůležitějších bodů z aktuální normy a jejich následné zpracování v měřicím software.

2 Analýza normy ČSN 14405

Norma ČSN EN ISO 14405, která popisuje tolerování rozměrů, se skládá ze tří částí:

- ČSN EN ISO 14405-1 (014115) Geometrické specifikace produktu (GPS) - Tolerování rozměrů - Část 1: Lineární rozměry.
- ČSN EN ISO 14405-2 (014115) Geometrické specifikace produktu (GPS) - Tolerování rozměrů - Část 2: Rozměry jiné než lineární rozměry
- ČSN EN ISO 14405-2 (014115) Geometrické specifikace produktu (GPS) - Tolerování rozměrů - Část 3: Úhlové rozměry

Část 1 vyšla v březnu 2017 a nahrazuje stejnojmennou normu ze srpna 2011, druhá v červenci 2012 a třetí část vyšla poprvé v červenci 2017. Části 1 a 3 jsou zatím pouze v anglickém jazyce. Předmětem této bakalářské práce jsou první dvě části normy, tedy lineární rozměry a rozměry jiné než lineární rozměry.

2.1 Seznam lineárních rozměrů

Norma ČSN EN ISO 14405-1 definuje operátory specifikace a zavádí jejich značení na výkresech pro lineární rozměrové prvky. Tato část se zabývá lineárními rozměry, kterými se rozumí:

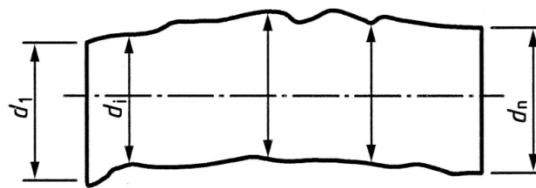
- místní rozměr
 - rozměr mezi dvěma body
 - sférický rozměr
 - rozměr průřezu
 - rozměr části
- globální rozměr
 - přímý globální lineární rozměr
 - rozměr nejmenších čtverců
 - maximální vepsaný rozměr
 - minimální opsaný rozměr
 - minimax rozměr
 - nepřímý globální lineární rozměr
- vypočtený (odvozený) rozměr
 - průměr z obvodu
 - průměr z plochy
 - průměr z objemu
- uspořádaná rozměrová řada
 - maximální rozměr
 - minimální rozměr
 - průměrný rozměr
 - střední rozměr (medián)
 - střední rozsah rozměru
 - rozsah rozměru
 - standardní odchylka rozměru

2.1.1 Popis místních lineárních rozměrů

Místní rozměr je rozměrová charakteristika, která určuje jedinečný výsledek vyhodnocení. Při použití rozměru průřezu válce můžeme pro stanovení přesného průměru použít různá kritéria pro vyhodnocení. Při použití maximálního vepsaného a minimálního opsaného průměru vznikne u nedokonalých výrobků vždy odchylka a proto neurčuje jedinečný výsledek vyhodnocení. V následující části je popis a znázornění výše uvedených místních lineárních rozměrů.

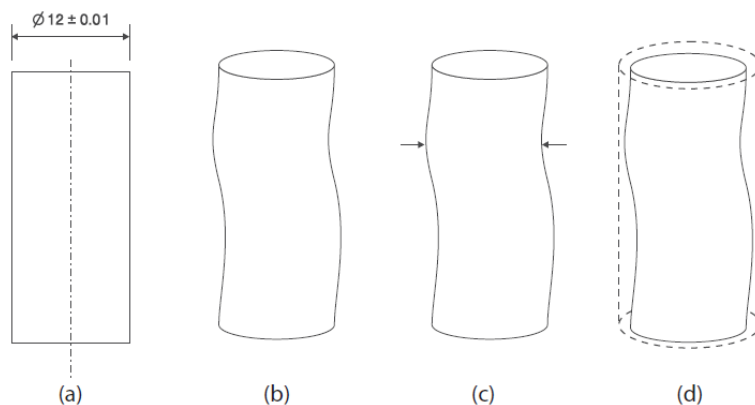
Rozměr mezi dvěma body

Rozměr mezi dvěma opačnými body na extrahovaném prvku je nejpoužívanější druh lineárního rozměru. Tento typ rozměru je snadno změřitelný pomocí posuvného měřítka a jeho kontrola je velmi rychlá a jednoduchá. Rozměr mezi dvěma body na válci se může nazývat „průměr určený mezi dvěma body“ a u dvou rovnoběžných protilehlých rovin lze použít termín „vzdálenost dvou bodů“. Jedná se o základní typ rozměru, pokud není na výkresu uvedeno jinak, používá se tento způsob.



Obrázek 1 Příklad více rozměrů mezi dvěma body [1]

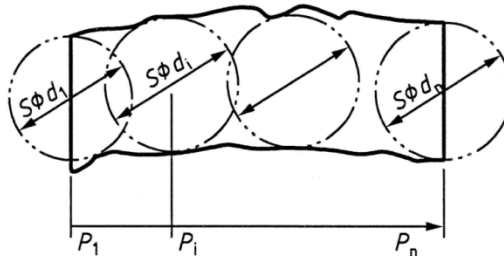
Na obrázku 2 je porovnání rozměru mezi dvěma body a minimálního opsaného rozměru, (a) značí předepsaný rozměr, (b) je skutečný tvar válce, (c) vzdálenost mezi šipkami je rozměr mezi dvěma body a (d) je minimální opsaný rozměr válce.



Obrázek 2 Porovnání rozměru mezi dvěma body a minimálního opsaného rozměru [2]

Sférický rozměr

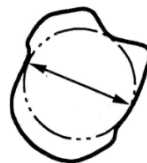
Tímto rozměrem se rozumí průměr největší vepsané koule. Největší vepsaná koule se používá pro vnější i vnitřní rozměry. Na obrázku 3 značí P pozici jednotlivé koule a $S\phi d_i$ je průměr jednotlivých koulí.



Obrázek 3 Příklad použití sférického rozměru [1]

Rozměr průřezu

Jedná se o rozměr průřezu skutečného výrobku. Způsob vyhodnocení rozměru průřezu může být definován pomocí různých kritérií. Možná kritéria jsou metoda nejmenších čtverců, maximální vepsaný rozměr, minimální opsaný rozměr a minimax kritérium. Při použití různých kritérií můžeme získat rozdílné výsledné rozměry. Na válci je možno definovat nekonečné množství rozměrů průřezu.



Obrázek 4 Rozměr průřezu získaný kritériem maximálního vepsaného rozměru [1]

Rozměr části

Je to místní rozměr pro danou část prvku na výrobku. Pro vyhodnocení rozměru části lze, podobně jako u rozměru průřezu, použít různá kritéria.

[1]



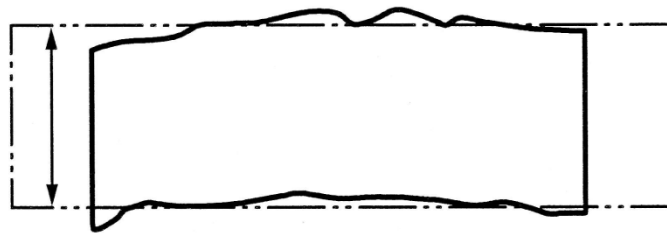
Obrázek 5 Rozměr části získaný kritériem maximálního vepsaného rozměru [1]

2.1.2 Popis přímých globálních lineárních rozměrů

Jedná se o rozměry, pro které je výsledný rozměrový prvek vytvořený z extrahovaného prvku. Jde o určité způsoby aproximace skutečných rozměrů, které nejsou totožné s rozměry předepsanými na výkrese.

Rozměr nejmenších čtverců

Tento rozměr minimalizuje součet čtverců vzdáleností existujících mezi předepsaným a skutečným rozměrem. Tímto rozměrem se vytvoří křivka z extrahovaného prvku tak, že plná plocha na její hranici je stejně velká jako prázdná plocha pod ní.



Obrázek 6 Příklad rozměru nejmenších čtverců [1]

Maximální vepsaný rozměr

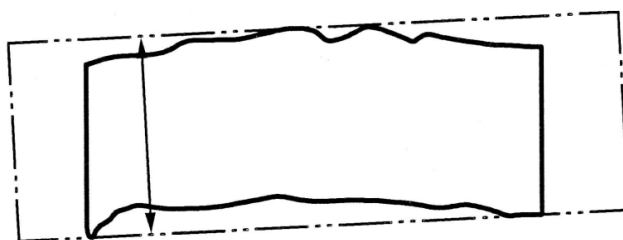
V případě vnitřního rozměru býval tento rozměr nazýván „párový rozměr vnitřního prvku“. Je to maximální rozměr, který lze vepsat do extrahovaného prvku. Při toleranci uložení je vhodné použít tento rozměr na typu díra. Při tomto způsobu zápisu se zajistí, že žádný bod nesmí ležet mimo.



Obrázek 7 Příklad maximálního vepsaného rozměru [1]

Minimální opsaný rozměr

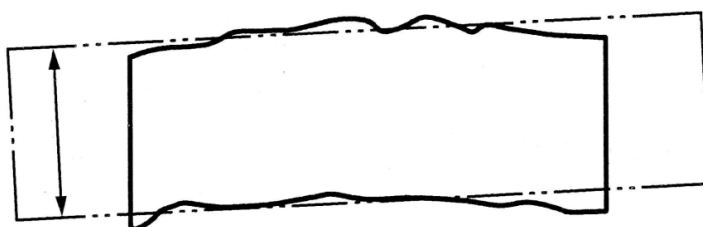
V případě vnějšího rozměru byl tento rozměr nazýván „párový rozměr vnějšího prvku“. Je to minimální rozměr, kterým lze opsat extrahovaný prvek. V případě tolerance uložení je výhodné tolerovat tímto druhem rozměru hřídel.



Obrázek 8 Příklad minimálního opsaného rozměru [1]

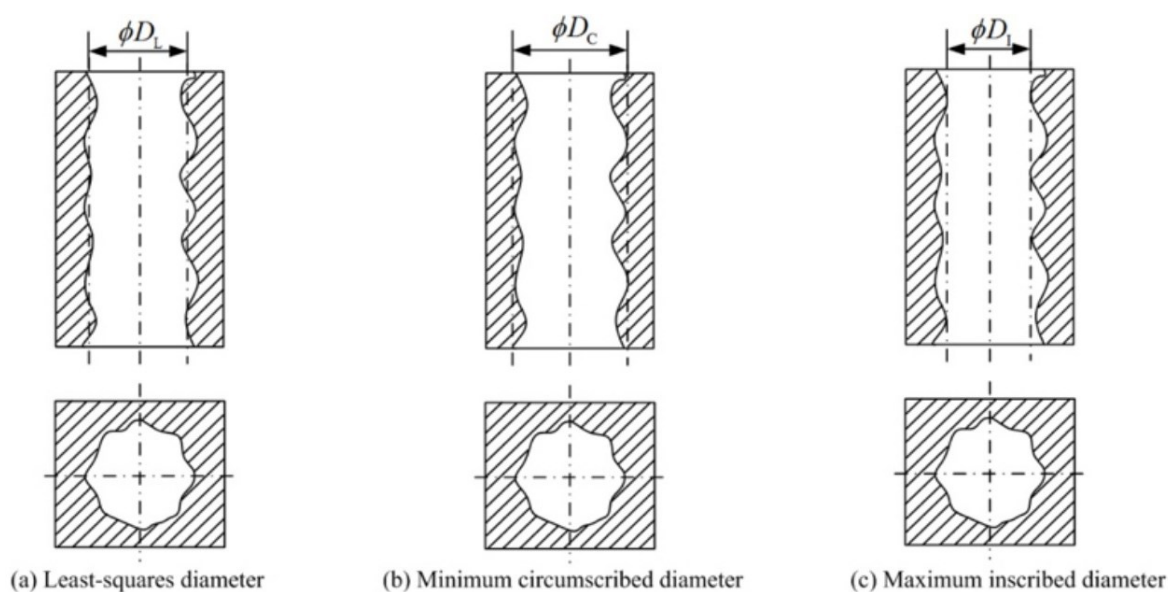
Minimax rozměr

Minimax rozměr je také známý jako Čebyševův rozměr. Jedná se o aproximaci tvaru skutečného výrobku. V měřícím software se tento rozměr označuje také jako minimální element. [1]



Obrázek 9 Příklad minimax rozměru [1]

Na obrázku 10 je porovnání tří druhů vyhodnocení průměru díry, (a) je rozměr nejmenších čtverců, (b) je nejmenší opsaný rozměr a (c) je největší vepsaný rozměr. V případě stejné naprosto stejného profilu díry, ale jiného typu rozměru lze očekávat rozdílný výsledný rozměr.



Obrázek 10 Porovnání vyhodnocení různých typů globálních rozměrů [3]

2.1.3 Popis lineárních vypočtených rozměrů

Vypočtené rozměry jsou rozměry získané pomocí matematického vzorce, který se vztahuje k vnitřní charakteristice prvku. Mezi lineární vypočtené rozměry patří průměr z obvodu, průměr z plochy a průměr z objemu.

Průměr z obvodu

Touto metodou získáme z obvodu válce jeho průměr. Průřez válce, ze kterého se získá obvod, musí být kolmý na osu válce. Výchozí kritérium pro získání obvodu je metoda nejmenších čtverců. Když se použije jiné kritérium, je možné získat jinou hodnotu obvodu válce. V případě, že je křivka z části nekonvexní, může být vypočtený průměr z obvodu větší než průměr nejmenší opsané kružnice.

Průměr d [mm] získáme z rovnice:

$$d = \frac{C}{\pi}$$

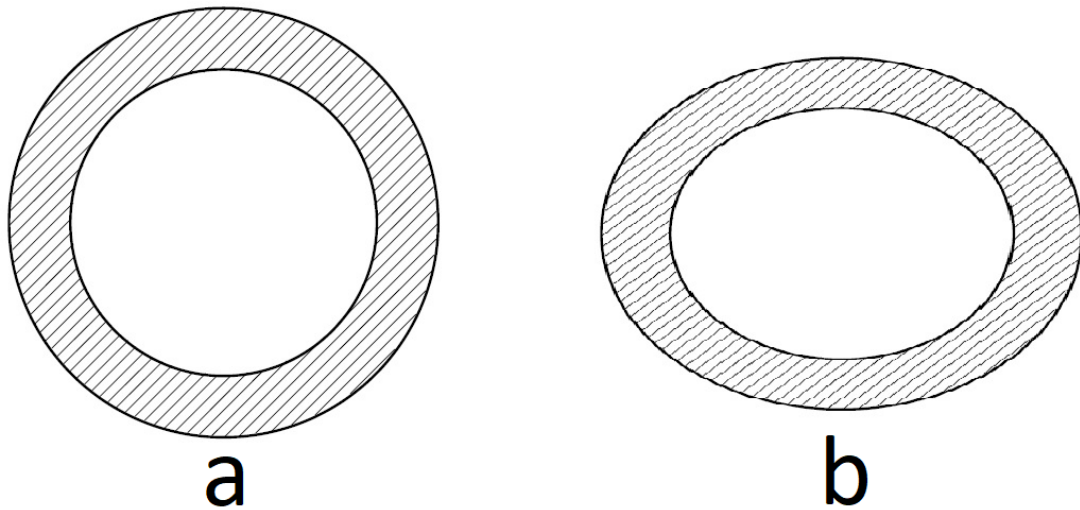
kde

C [mm] je extrahovaný obvod válce



Obrázek 11 Průměr z obvodu [1]

Tento typ rozměru lze použít například pro kótování rozměrů hadic. Hadice z poddajného materiálu je kvůli deformacím obtížné zkontrolovat použitím rozměru mezi dvěma body. Hadice má průměr nestálý, ale obvod průřezu hadice je i při běžné deformaci hadice pořád stejný. Při běžné deformaci se z kružnice stává ovál, či jiný tvar a není jednoznačně definovaný průměr.



Obrázek 12 Porovnání nezdeformované (a) a zdeformované (b) hadice

Průměr z plochy

Tato metoda je podobná předešlé, také se získá obvod válce, ze kterého se ale spočítá plocha průřezu. Průřez válce, ze kterého se získá jeho plocha, musí být kolmý na osu válce. Výchozí kritérium pro získání obvodu, ze kterého se získá plocha, je metoda nejmenších čtverců. Když se použije jiné kritérium, je možné získat jinou hodnotu plochy průřezu válce. Tento typ rozměru lze použít například pro kótování průměru potrubí, kdy není příliš důležitý tvar, ale spíše velikost průřezu potrubí pro zajištění dostatečného průtoku.

Průměr válce získáme ze vztahu:

$$d = \sqrt{\frac{4A}{\pi}}$$

kde

A [mm^2] je plocha uvnitř extrahované křivky obvodu válce



Obrázek 13 Průměr z plochy [1]

Průměr z objemu

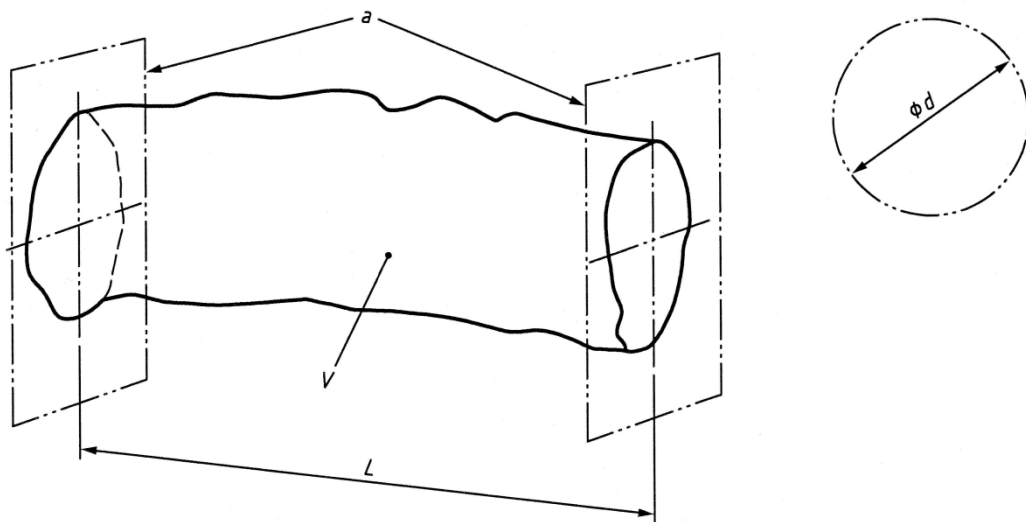
Touto metodou můžeme spočítat průměr válce z jeho objemu. Základním kritériem pro získání plochy průřezu válce a rozměru L je metoda nejmenších čtverců. Při použití jiného kritéria můžeme získat jiný výsledek. Průměr z objemu získáme pomocí následujícího vzorce.

$$d = \sqrt{\frac{4V}{\pi * L}}$$

kde

V objem vymezený extrahovaným válcem

L výška válce ohraničená dvěma rovinami kolnými na osu válce



Obrázek 14 Příklad průměru z objemu [1]

Na obrázku 14 je V objem extrahovaného válce, L délka válce, d průměr z objemu a písmeno a značí dvě, co nejvzdálenější, rovnoběžné roviny kolné na osu válce. [1]

2.1.4 Popis uspořádané rozměrové řady

Uspořádaná rozměrová řada je rozměrová charakteristika definovaná ze sady naměřených hodnot. Z této sady se poté určitým pravidlem vybere konečná hodnota

Maximální rozměr

Jedná se o nejvyšší hodnotu ze skupiny naměřených hodnot.

Minimální rozměr

Je to nejmenší naměřená hodnota ze sady získaných hodnot rozměrů.

Průměrný rozměr

Průměrný rozměr je hodnota získaná aritmetickým průměrem sady naměřených hodnot. Průměrný rozměr může být stejný nebo rozdílný jako střední rozměr, záleží na získaných hodnotách.

Střední rozměr

Střední rozměr (také mediánový rozměr) je definovaný tak, že získané hodnoty jsou seřazené podle velikosti a střední rozměr je ten, který je v přesně v polovině. Je-li naměřených hodnot sudý počet, použijí se dvě hodnoty nejbližší středu a z nich se získá střední rozměr pomocí aritmetického průměru.

Střední rozsah rozměru

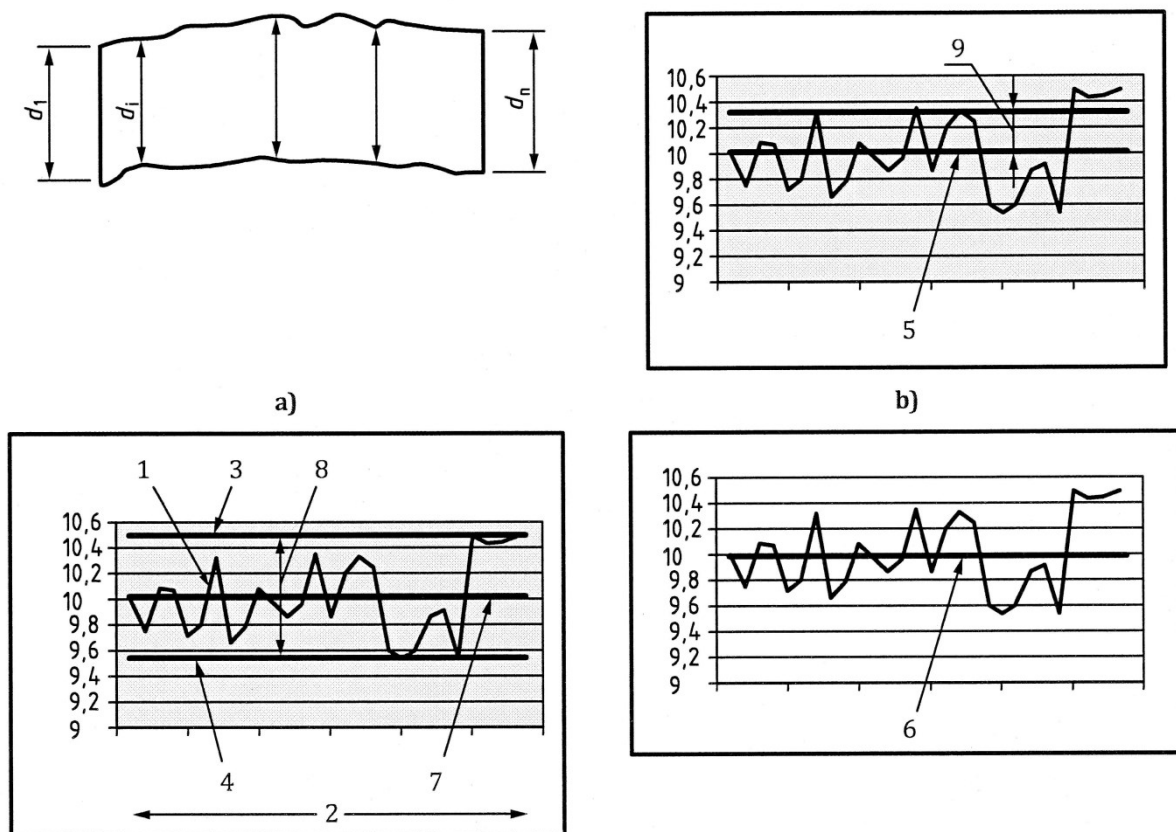
Jedná se o aritmetický průměr maximální a minimální hodnoty ze sady naměřených hodnot.

Rozsah rozměru

Rozsah rozměru je rozdíl mezi maximálním a minimálním rozměrem ze skupiny naměřených hodnot podél tolerovaného prvku.

Standardní odchylka rozměru

Je definovaná jako standardní odchylka rozměrů sady hodnot získané podél tolerovaného prvku. Někdy je standardní odchylka rozměru prezentovaná jako kvadratický součet.



Obrázek 15 Příklad uspořádané rozměrové řady získané měřením mezi dvěma body [1]

Na obrázku je znárodněná řada rozměrů mezi dvěma body získaných měření. Předepsaná hodnota rozměru je 10 mm.

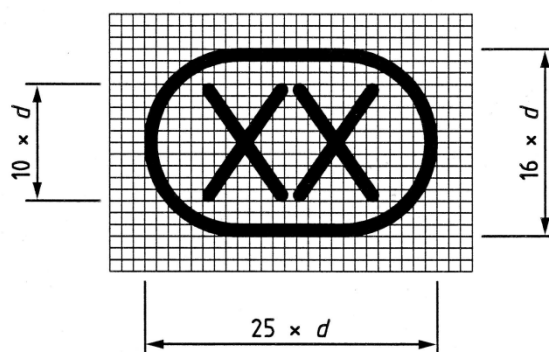
Na obrázku je:

- 1 sada hodnot lokálních rozměrů
- 2 pozice rozměrů podél osy
- 3 maximální rozměr (10,497 88)
- 4 minimální rozměr (9,542 81)
- 5 průměrný rozměr (10,011 69)
- 6 střední rozměr (9,969 86)
- 7 střední rozměr (10,020 345)
- 8 rozsah rozměru (0,955 07)
- 9 standardní odchylka rozměru (0,30178)
- d_i hodnoty lokálních rozměrů

[1]

3 Specifikátory modifikací a jejich symboly

Pro znázornění rozměrů na výkresech se používají specifikátory modifikací. Lze použít i více modifikátorů najednou. Standardní specifikátor modifikace je znázorněný dvěma velkými písmeny v oválu. Rozměry specifikátoru jsou předepsané následujícím způsobem. Písmeno d na obrázku značí tloušťku použité čáry. [1]





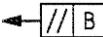

Obrázek 16 Znázornění specifikátoru modifikace skládajícího se ze dvou písmen [1]

Tabulka 1 Specifikátory modifikací pro lineární rozměry [1]

Modifikátor	Popis
(LP)	Rozměr mezi dvěma body
(LS)	Lokální rozměr definovaný koulí
(GG)	Asociační kritérium nejmenší čtverců
(GX)	Asociační kritérium maximálního vepsaného rozměru
(GN)	Asociační kritérium minimálního opsaného rozměru
(GC)	Asociační kritérium minimax (Čebyševův)
(CC)	Průměr z obvodu (vypočtený rozměr)
(CA)	Průměr z plochy (vypočtený rozměr)
(CV)	Průměr z objemu (vypočtený rozměr)
(SX)	Maximální rozměr
(SN)	Minimální rozměr
(SA)	Průměrný rozměr
(SM)	Střední rozměr (medián)
(SD)	Střední rozsah rozměru
(SR)	Rozsah rozměrů
(SQ)	Standardní odchylka rozměru

Dále existují i doplňkové specifikátory modifikací, které lze použít samostatně nebo v kombinaci se specifikátory modifikací lineárních rozměrů.

Tabulka 2 Doplňkové specifikátory modifikací [1]

Popis	Značka	Příklad značení
Jednotné označení rozměru	UF	UF 3x $\varnothing 10 \pm 0,1$ (GN)
Požadavek obálky	(E)	$10 \pm 0,1$ (E)
Libovolné označení části prvku	/délka	$\varnothing 10 \pm 0,1$ (GG) / 5
Libovolný průřez	ACS	$\varnothing 10 \pm 0,1$ (GX) ACS
Specifický pevný průřez	SCS	$10 \pm 0,1$ (GX) CSC
Libovolná podélná část	ALS	$10 \pm 0,1$ (GX) ALS
Více než jeden prvek	číslo x	2 x $10 \pm 0,1$ (E)
Společná tolerance	CT	2 x $10 \pm 0,1$ (E) CT
Podmínka volného stavu	(F)	$\varnothing 10 \pm 0,1$ (LP) (SA) (F)
Mezi	↔	$\varnothing 10 \pm 0,1$ A ↔ B
Průsečík roviny		$5 \pm 0,02$ ALS 
Funkce orientace		$5 \pm 0,02$ ALS 
Modifikátor doplňkového značení	(1)	$10 \pm 0,1$ (1)

Tabulka 3 Typy a podtypy rozměrových charakteristik a přidružených modifikátorů [1]

Druh rozměrové charakteristiky	Podtyp	Dodatečná definice	Přidružený modifikátor	
Místní rozměr	Rozměr mezi dvěma body		(LP)	
	Sférický rozměr		(LS)	
		S kritériem nejmenších čtverců	(GG) ACS nebo (GG) ALS nebo (GG) SCS	
		S kritériem největšího vepsaného rozměru	(GX) ACS nebo (GX) ALS nebo (GX) SCS	
	Rozměr průřezu	S kritériem nejmenšího opsaného rozměru		(GN) ACS nebo (GN) ALS nebo (GN) SCS
			S kritériem minimax	(GC) ACS nebo (GC) ALS nebo (GC) SCS
		Vypočtený rozměr – průměr z obvodu	(CC)	
		Vypočtený rozměr – průměr z plochy	(CA)	
		Uspořádaná rozměrová řada – všechny typy místních rozměrů	Příklad: (LP) (SA) ACS	
		Rozměr části o délce L	S kritériem nejmenších čtverců	Příklad: (GG) /20
	S kritériem největšího vepsaného rozměru		Příklad: (GX) /20	
	S kritériem nejmenšího opsaného rozměru		Příklad: (GN) /20	
	S kritériem minimax		Příklad: (GC) /20	
	Vypočtený rozměr – průměr objemu		Příklad: (CV) /20	
	Uspořádaná rozměrová řada – všechny typy místních rozměrů		Příklad: (LP) (SA) ACS (SX) A ↔ B	
Globální rozměr	Přímý globální rozměr	S kritériem nejmenších čtverců	(GG)	
		S kritériem největšího vepsaného rozměru	(GX)	
		S kritériem nejmenšího opsaného rozměru	(GX)	
		S kritériem minimax	(GC)	
	Vypočtený globální rozměr	Vypočtený rozměr – průměr z objemu	(CV)	
	Nepřímý globální rozměr	Uspořádaná rozměrová řada založená na rozměru mezi dvěma body	Příklad: (GN) ACS (SX)	
Místní a globální rozměr	Požadavek obálky	Kombinace (LP) a (GX) nebo (GN)	(E)	

3.1 Znázornění tolerance na výkresech

Pro tolerování lze použít tři způsoby znázornění nebo lze použít netolerovaný rozměr. Všechny tři formy jsou ekvivalentní a jde jen o jiný typ značení.

- 1) Předepsaný rozměr a kladný a/nebo záporný maximální limit úchytky (např. $15 \begin{smallmatrix} +0,12 \\ -0,10 \end{smallmatrix}$)



Obrázek 17 Příklad tolerování minimální a maximální odchylky - typ rozměru válec a dvě rovnoběžné protilehlé roviny [1]

- 2) Horní limit rozměru a/nebo dolní limit rozměru (např. $20/19,18$)



Obrázek 18 Příklad tolerování minimálního a maximálního rozměru - typ rozměru válec a dvě rovnoběžné protilehlé roviny [1]

- 3) Toleranční třídy dle ISO 286-1



Obrázek 19 Příklad tolerování pomocí tolerančních tříd dle ISO 286-1 - typ rozměru válec a dvě rovnoběžné protilehlé roviny [1]

Všechny tři způsoby se souhrnně nazývají \pm tolerování. Tyto možné způsoby tolerování lineárních rozměrů lze použít s modifikátory nebo bez nich. Netolerované rozměry se řídí normou ČSN ISO 2768-1. [1]

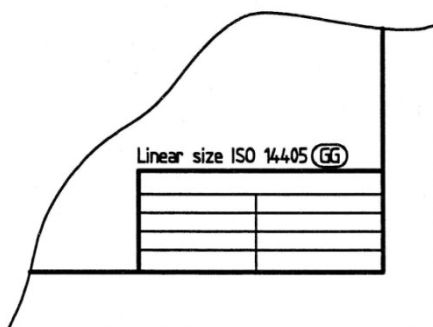
Tabulka 4 Nepředepsané tolerance délkových rozměrů dle ČSN ISO 2768-1 [4]

Třída přesnosti		Mezní úchytky pro základní rozsah rozměrů [mm]							
označení	název	0,5	přes	přes	přes	přes	přes	přes	přes
		do	3	6	30	120	400	1000	2000
		3	do	do	do	do	do	do	do
		6	6	120	120	400	1000	2000	4000
f	jemná	±0,05	±0,05	±0,1	±0,15	±0,2	±0,3	±0,5	-
m	střední	±0,1	±0,1	±0,2	±0,3	±0,5	±0,8	±1,2	±2
c	hrubá	±0,2	±0,3	±0,5	±0,8	±1,2	±2	±3	±4
v	velmi hrubá	-	±0,5	±1	±1,5	±2,5	±4	±6	±8

3.2 Znázornění modifikátorů na výkresech

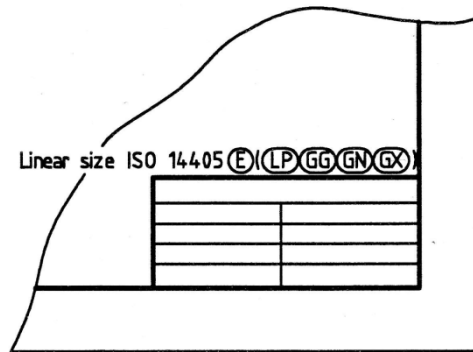
Základní typ lineárního rozměru je rozměr mezi dvěma body. Použije-li se pouze tento rozměr, není žádné speciální znázornění na výkresu potřeba. Je-li rozměr mezi dvěma body použit na horní i dolní limit rozměru, modifikátor (LP) se na výkrese nepoužívá. Pokud se použije rozměr mezi dvěma body pro jeden mezní rozměr, píše se za tolerovaný rozměr. Za druhý tolerovaný rozměr se píše modifikátor, který je zrovna použitý. Pokud se na výkresu použije i jiný typ rozměru než rozměr mezi dvěma body, všechny specifikátory modifikací se píšou na výkres následujícím stylem:

- odkaz na ISO normu – „LINEÁRNÍ ROZMĚR ISO 14405“
- specifikátor modifikace pro zvolenou základní definici lineárního rozměru



Obrázek 20 Znázornění specifikátoru modifikace nad razítkem [1]

Při použití více různých specifikátorů modifikací se musí zapsat všechny použité specifikátory nad razítko výkresu. Znázorňují se stejným stylem jako značky drsností na výkresech. Nejprve se napíše výchozí specifikátor a všechny další použité se píšou do závorčky za ním. [1]



Obrázek 21 Znázornění použití více specifikátorů modifikací nad razítkem [1]

3.3 Pravidla indikace lineárních rozměrů na výkresech

V této části jsou popsány pravidla pro znázornění lineárních rozměrů na výkresech. Jsou tu popsány způsoby tolerování pomocí základních GPS specifikací a pomocí modifikátorů specifikace.

3.3.1 Pravidla indikace základních GPS specifikací

Základní GPS specifikace rozměru mohou být napsané na jednom nebo dvou řádcích.

Na jeden řádek se píše když:

- má rozměr dvě stejně velké symetrické úchytky (příklad $25 \pm 0,1$)
- jsou použity toleranční kódy dle ISO 286-1 (příklad 20h6)
- rozměr je definovaný podle obecných tolerancí ISO 2768-1 (příklad $\varnothing 20$)
- rozměr má jednostranný limit (příklad $20 + 0,1$)

Na dva řádky se píše když:

- má předepsaný rozměr dvě různé úchytky
- rozměr se skládá z horního a dolního mezního rozměru

[1]

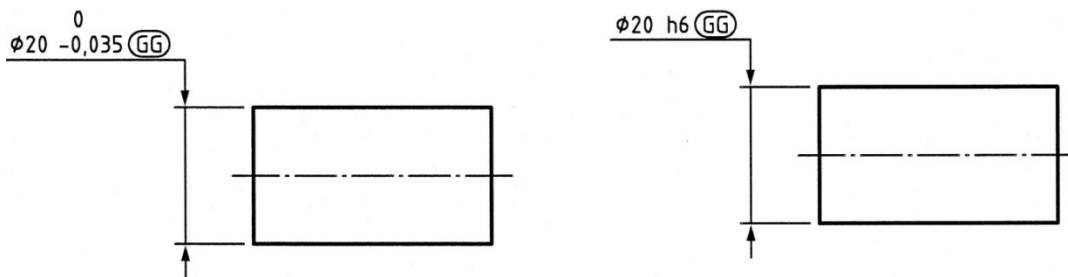
3.3.2 Pravidla indikace pomocí specifikátorů modifikací

Po tolerované hodnotě se mohou použít modifikátory specifikací v následujícím pořadí, přičemž některé z nich mohou být vynechané.

- Modifikátor pro typ charakteristiky. Příklad (LP), (CA) nebo (E).
- Modifikátor pro jakoukoli omezenou část, průřez nebo podélnou část kompletního rozměru. Příklad /25, ACS nebo ALS. Pokud je použita specifikace rozměru, může jí předcházet modifikátor uspořádané rozměrové řady pro definování každého rozměru části nebo řezu. Příklad (SX), (SA) nebo (SN).
- Modifikátor pro specifický pevný průřez SCS se seznamem jednoho nebo více specifických pevných průřezů, pokud může nastat dvojznačnost. Dále modifikátor uspořádané rozměrové řady (např. (SA)), který může předcházet sekvenci modifikátorů definujících místní charakteristiku. U globální charakteristiky lineárního rozměru je modifikátor uspořádané rozměrové řady umístěný za modifikátor pro omezenou část nebo průřez. Příklad $25 \pm 0,1$ (GG)/25(SA) nebo $12 \pm 0,05$ (GG)ACS(SX).
- Indikace specifické části pomocí symbolu mezi. Příklad \longleftrightarrow .
- Modifikátor společné tolerance CT. Modifikátor uspořádané rozměrové řady může předcházet modifikátoru CT. Příklad $2 \times 150 \pm 0,05$ (GG)ACS(SA)CT
- Modifikátor podmínky volného stavu (F).
- Průsečík rovin (pokud je potřeba objasnit o jaké roviny se jedná), ALS nebo ACS indikaci následovanou směru, je-li potřeba objasnit směr rozměru. Příklad $10 \pm 0,03$ (GN)ALS $\leftarrow \begin{array}{|c|} \hline \equiv \\ \hline \end{array} A \leftarrow \begin{array}{|c|} \hline // \\ \hline \end{array} A$.
- Modifikátor doplňkového značení. Příklad (1). [1]

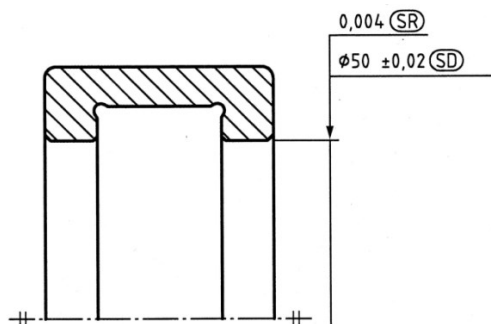
4 Indikace na výkresech

V případě použití specifikátorů modifikací lze použít stejný modifikátor pro horní i dolní mezní rozměr nebo pro každý mezní rozměr jiný. V případě stejného modifikátoru pro oba mezní rozměry se na výkresu použije modifikátor pouze jednou.



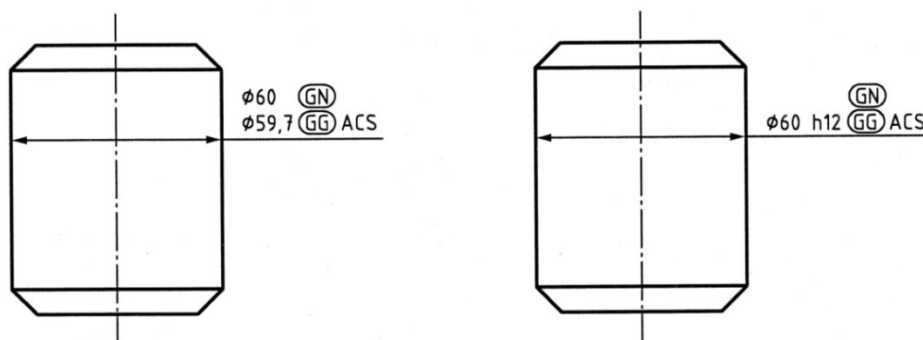
Obrázek 22 Příklad použití specifikátoru modifikace $\textcircled{\text{GG}}$ pro oba mezní rozměry. [1]

Také lze pro jeden rozměr použít více než jednu podmínku. V případě následujícího obrázku platí, že střední rozsah rozměru $\textcircled{\text{SD}}$ musí být v rozsahu $\phi 50 \pm 0,02$ a zároveň horní mezní limit rozsahu rozměrů $\textcircled{\text{SR}}$ musí být maximálně 0,004. Uvedené tolerance platí pouze pro průměr vpravo.



Obrázek 23 Příklad použití více než jedné podmínky. [1]

V případě použití rozdílných modifikátorů specifikací pro horní a dolní mezní rozměr se specifikátor modifikace píše za každý jmenovitý rozměr. Na následujícím obrázku je pro horní mezní rozměr $\phi 60$ definovaný metodou nejmenšího opsaného rozměru a dolní mezní rozměr metodou nejmenších čtverců. Doplňkový modifikátor ACS znamená, že rozměr je definován na všech průřezech válce.



Obrázek 24 Příklad použití různých specifikátorů pro horní a dolní mezní rozměr. [1]

Při použití stejných nebo rozdílných modifikátorů specifikací lze použít dva druhy zápisu. Oba způsoby jsou rovnocenné:

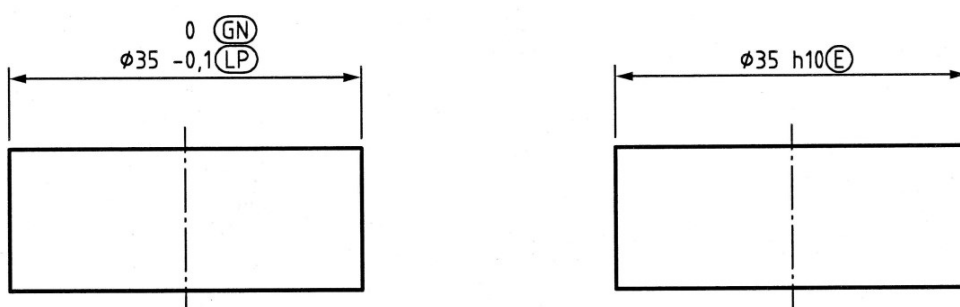
- zápis specifikátorů modifikací na dva řádky. Stejně jako na obrázku číslo 24.
- zápis na jeden řádek, který dodržuje následující pořadí: Modifikátor specifikace pro horní mezní rozměr v hranatých závorkách, mezer, pomlčka, mezer, specifikátor modifikace pro dolní mezní rozměr. [1]

Tabulka 5 Způsoby zápisu tolerancí pomocí specifikátorů modifikací [1]

Druh zápis	Příklad zobrazení
Na dva řádky	+0,2 $\text{\textcircled{GN}}$ /15 2x $\text{\textcircled{78}}$ -0,2 $\text{\textcircled{LP}}$ $\text{\textcircled{SA}}$
Na jeden řádek	2x $\text{\textcircled{78}}$ [+0,2 $\text{\textcircled{GN}}$ /15] – [-0,2 $\text{\textcircled{LP}}$ $\text{\textcircled{SA}}$]

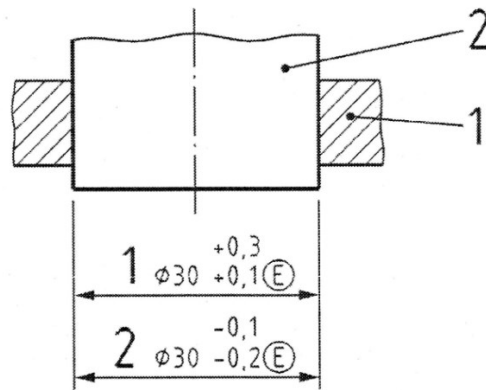
4.1 Požadavek obálky

Požadavek obálky $\text{\textcircled{E}}$, je zjednodušené označení, které nahrazuje dva specifikátory. Jedná se o ekvivalentní způsob zápisu. Pro vnitřní rozměr (typu díra) používá modifikátor největšího vepsaného rozměru $\text{\textcircled{GX}}$ pro dolní mezní rozměr a modifikátor rozměru mezi dvěma body $\text{\textcircled{LP}}$ pro horní mezní rozměr. Pro vnější rozměr (např. hřídel) se používá modifikátor nejmenšího opsaného rozměru $\text{\textcircled{GN}}$ pro horní mezní rozměr a modifikátor rozměru mezi dvěma body $\text{\textcircled{LP}}$ pro dolní mezní rozměr. Tento způsob zápisu zajistí, že žádný bod tolerovaného prvku nesmí ležet mimo předepsaný rozměr.



Obrázek 25 Příklad dvou ekvivalentních způsobů zápisu. [1]

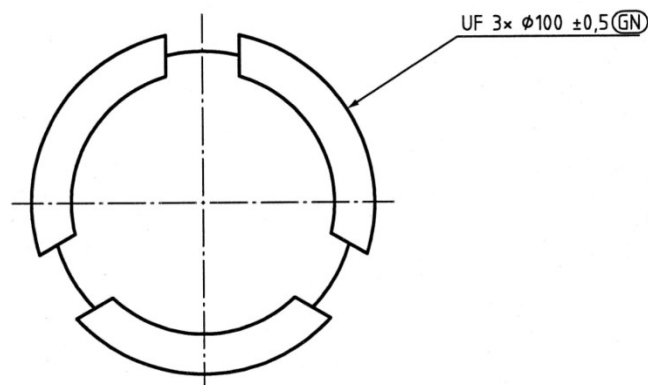
Požadavek obálky lze použít i na výkresu sestavy. Jedná se o přehledný způsob zápisu a správně zvolené hodnoty tolerancí zajišťují smontovatelnost sestavy. [1]



Obrázek 26 Příklad použití požadavku obálky E na výkresu sestavy [1]

4.2 Kompletně tolerovaný prvek

Jednoduchý prvek typu válec je kompletně tolerovaný za pomoci značení na obrázku číslo 25. U složitějších těles se pro kompletní tolerování používá modifikátor jednotného označení rozměru UF, který následuje modifikátor více než jednoho prvku n x. [1]



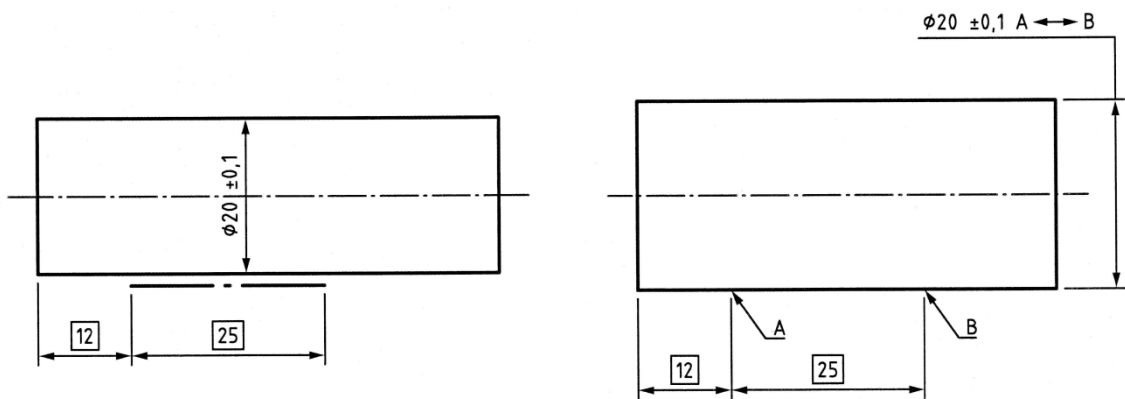
Obrázek 27 Příklad kompletně tolerovaného prvku - částí obvodu válce [1]

4.3 Specifická pevná omezená část

Pro vyznačení jedné vymezené části prvku lze použít dva způsoby:

- Vyznačení pomocí tlusté čerchované čáry, kterou je vyznačená potřebná délka.
- Použití dvou písmen, které definují začátek a konec rozměru. Mezi tyto dvě písmena je vepsán symbol mezi \longleftrightarrow .

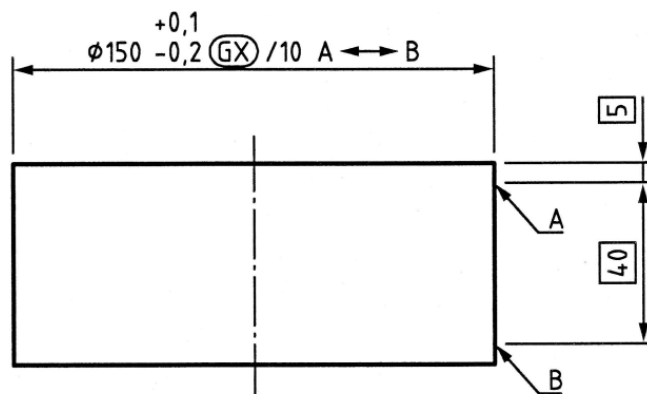
Délka omezené části a její pozice je definovaná pomocí teoreticky přesných rozměrů. [1]



Obrázek 28 Příklady použití značení pevné omezené části [1]

4.4 Libovolná omezená část rozměru se specifickou délkou

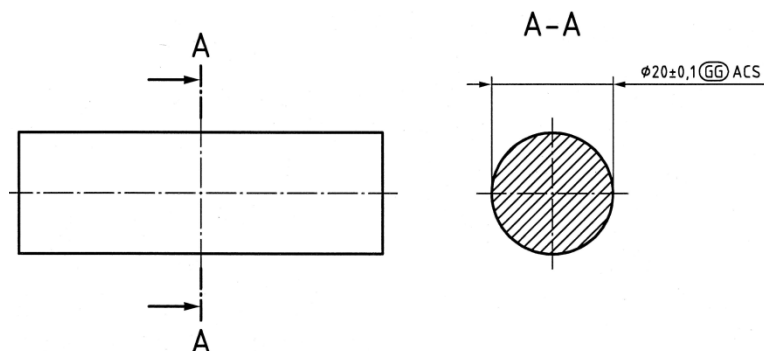
Pokud platí specifikátor na libovolnou omezenou část nebo na celý rozměr, použije se modifikátor /délka, kde délka značí délku omezeného části prvku. Značení /0 je ekvivalentní se značením ACS a v tomto případě se doporučuje použít značení ACS. Pro značení na výkresech se používá stejné značení jako u specifické omezené pevné části. [1]



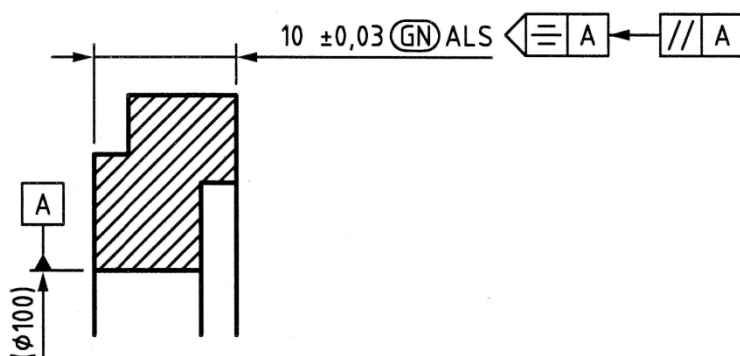
Obrázek 29 Příklad značení libovolné omezené části se specifickou délkou [1]

4.5 Libovolný průřez a libovolná podélná část

Pro označení libovolného průřezu se používá specifikátor ACS a pro libovolnou podélnou část ALS. Libovolný průřez je definovaný jako kolmý k ose součásti a libovolná podélná část jako polorovina, která je ohraničena osou součásti. [1]



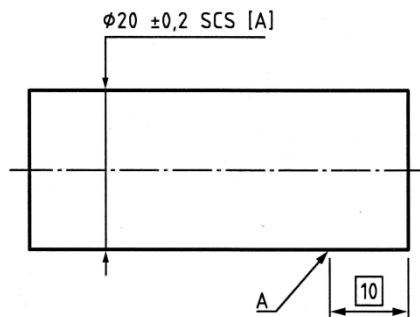
Obrázek 30 Příklad označení libovolného průřezu válce v řezu [1]



Obrázek 31 Příklad značení libovolné podélné části poloroviny. Jedná se o minimální opsaný rozměr vyšrafované části ve směru roviny rovnoběžné s údajem A [1]

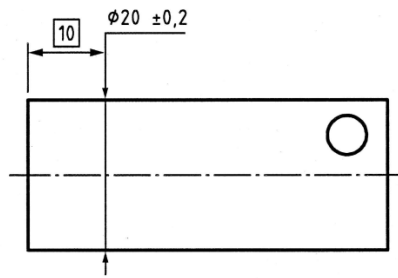
4.6 Specifický pevný průřez

Pozice specifického pevného průřezu se indikuje pomocí teoreticky přesných rozměrů. V případě indikace pomocí písmena a odkazové šipky je písmeno uvedeno po modifikátoru SCS v hranatých závorkách. Lokace specifického pevného průřezu by neměla být umístěna na konci nebo začátku části, aby se zajistilo, že průřez existuje. SCS lze definovat také na kuželu.

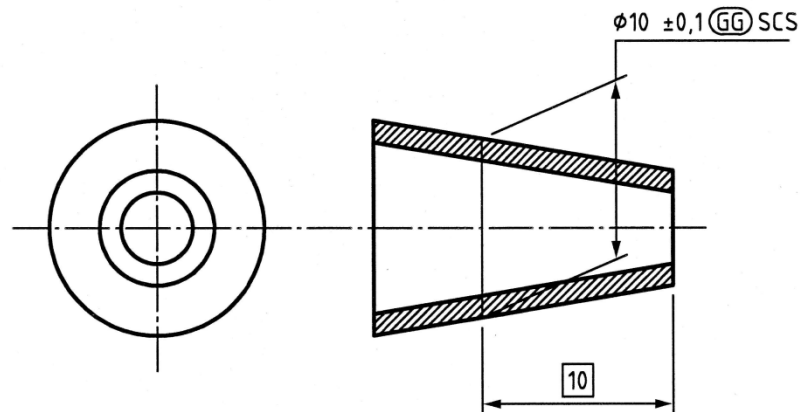


Obrázek 32 Ukázka použití značení specifického pevného průřezu [1]

V případě, že nehrozí rozdílný výklad značení na výkrese, modifikátor SCS může být vynechán.

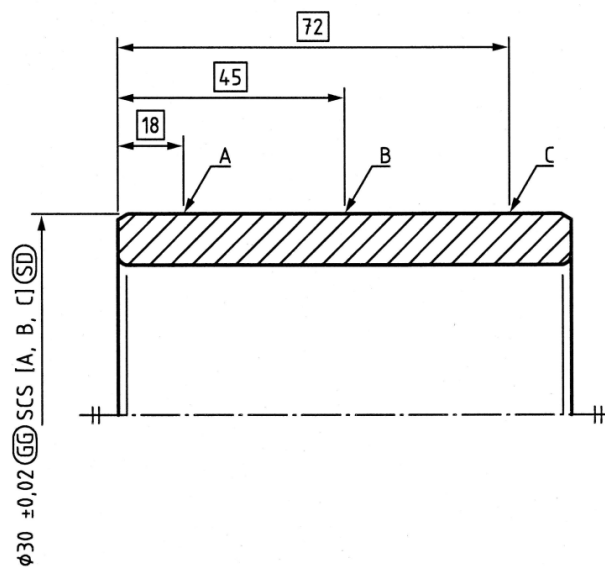


Obrázek 33 Příklad vynechání modifikátoru SCS [1]



Obrázek 34 Příklad indikace specifického pevného průřezu na kuželu [1]

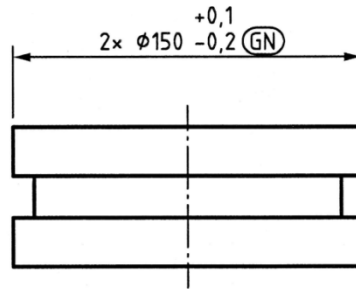
Na jedné součásti je možno použít více specifických pevných průřezů pomoci teoreticky přesných rozměrů. Poloha všech průřezů se uvádí v hranatých závorkách za modifikátorem SCS, každý oddělený čárkou a mezerou. Pokud je použita uspořádaná rozměrová řada, její specifikátor modifikace se uvádí za identifikátory průřezů. [1]



Obrázek 35 Příklad použití více specifických průřezů a uspořádané rozměrové řady [1]

4.7 Jednotlivé tolerování více než jednoho prvku

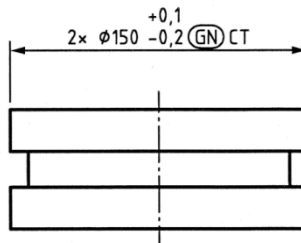
Pokud je potřeba tolerovat více stejných prvků, použije se v zápisu modifikátor vícenásobného tolerování, který je umístěn na začátku tolerance. Číslo na začátku modifikátoru značí, kolik prvků je tolerovaných. Modifikátor tolerance více prvků lze použít jen tam, kde je naprosto jasné, na které prvky se tolerance vztahuje. Každý jednotlivý prvek se posuzuje zvlášť. [1]



Obrázek 36 Příklad tolerování více prvků - průměru 150 mm [1]

4.8 Společné tolerování více než jednoho prvku

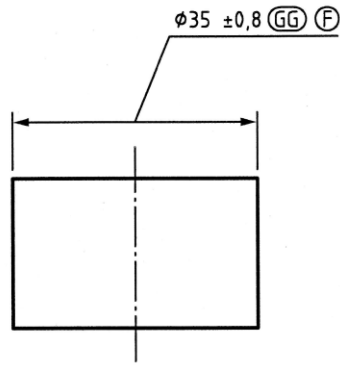
Společné tolerování více než jednoho prvku se provádí stejně jako u jednotlivého tolerování, ale na konec řetězce tolerance se přidá modifikátor společné tolerance CT. Při tomto způsobu zápisu se více prvků považuje za jeden. [1]



Obrázek 37 Příklad společného tolerování více než jednoho prvku [1]

4.9 Pružné části

V případě, že je součást z pružného materiálu, na konec tolerance se přidá modifikátor podmínky volného stavu \textcircled{F} . [1]



Obrázek 38 Příklad tolerování pružné části pomocí modifikátoru podmínky volného stavu [1]

4.10 Doplnující značení

Při potřebě doplňujícího značení se použije indikátor očíslovaného modifikátoru doplňkového $\text{\textcircled{1}}$. Požadavek doplňkového značení se může umístit u razítka nebo na doplňkovém dokumentu.

$$[10 \pm 0,1 \text{\textcircled{1}}] - [10 \pm 0,2 \text{\textcircled{2}}]$$

Obrázek 39 Příklad značení pomocí modifikátoru doplňkového značení [1]

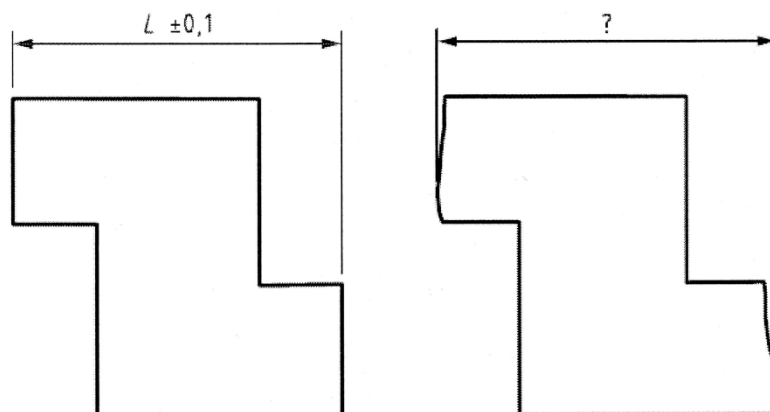
S popisem u razítka $\text{\textcircled{1}}$ před tepelným zpracováním

$\text{\textcircled{2}}$ po tepelném zpracování

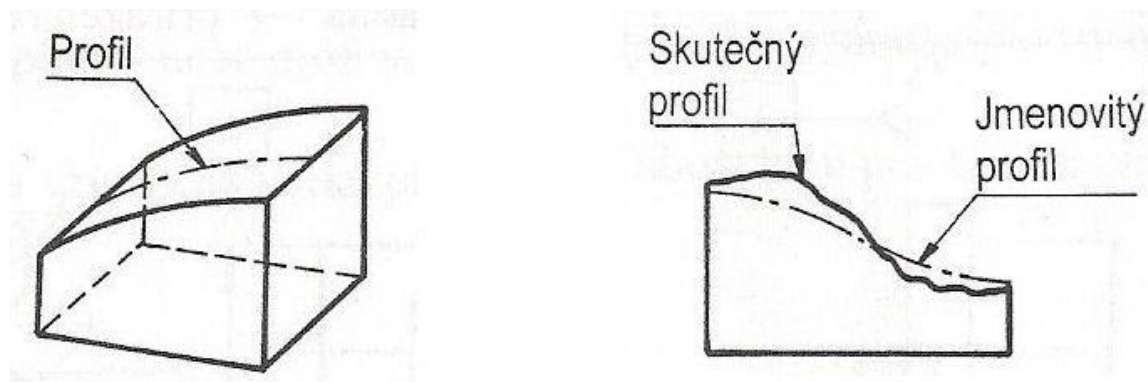
[1]

5 Rozměry jiné než lineární rozměry

Lineární rozměry se tolerují pomocí \pm tolerování, které je podrobně vysvětlené v ČSN ISO 14405-1. Pro rozměry jiné než lineární je ale tento způsob tolerování často nejednoznačný, zvláště při velkých chybách tvaru na výrobku. Pro rozměry jiné než lineární je vhodnější použít geometrické tolerování. Povrch a tvary skutečného výrobku totiž nejsou ideální a při použití \pm tolerování mohou vznikat závažné nejasnosti.



Obrázek 40 Porovnání výkresu a skutečného výrobku [5]



Obrázek 41 Porovnání skutečného a jmenovitého profilu výrobku [6]

Existuje mnoho druhů rozměrů, které se dále dělí do skupin. Dvě základní skupiny jsou lineární a úhlové rozměry. Pro lineární rozměr je základní jednotkou milimetr (mm) a pro úhlové je to stupeň ($^{\circ}$), který lze dále dělit pomocí desetinných stupňů nebo minut a vteřin. Pokud je na výkresu použita jiná jednotka, než jednotka základní, musí to být uvedeno v blízkosti razítka výkresu.

Tato část normy pracuje s termíny integrální a odvozený prvek.

Integrální prvek

Integrální prvek je rozměrový prvek, který je přímo změřitelný na výrobku. Klasickým příkladem integrálního prvku je rovina.

Odvozený prvek

Odvozeným prvek se rozumí prvek, který nelze přímo změřit. Příklad odvozeného prvku je například díra – je definovaná pomocí osy, ale polohu osy nemůžeme přímo změřit. Lze změřit povrch díry a z něj odvodit polohu osy. [5]

Tabulka 6 Druhy rozměrů [5]

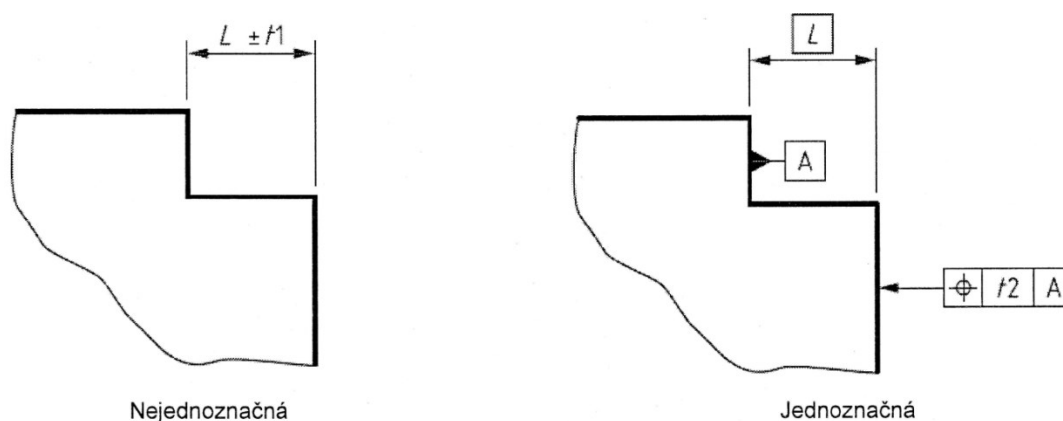
		Charakteristika, druh a počet prvků		Druh rozměru	
Rozměr	Lineární rozměr (délkové jednotky)	Jeden prvek	Integrální – pouze rozměrové prvky		Lineární rozměr
			Integrální nebo odvozený		Vzdálenost poloměru
			Integrální nebo odvozený		Délka oblouku
		Dva prvky	Integrální - integrální	Ležící stejným směrem	Lineární vzdálenost nebo výška kroku
				Ležící opačným směrem	Lineární vzdálenost
			Integrální - odvozený		Lineární vzdálenost
			Odvozený- odvozený		Lineární vzdálenost
		Hrana (přechodová oblast mezi dvěma integrálními prvky)	Integrální	Tvar sražení	Výška sražení a úhel
				Tvar zaoblení	Hrana poloměru
	Úhlový rozměr (Úhlové jednotky)	Jeden prvek	Integrální – pouze rozměrové prvky		Úhlový rozměr, kužele
		Dva prvky	Integrální - integrální		Úhlová vzdálenost
			Integrální - odvozený		Úhlová vzdálenost
			Odvozený - odvozený		Úhlová vzdálenost

5.1 Jednoznačné a nejednoznačné tolerování

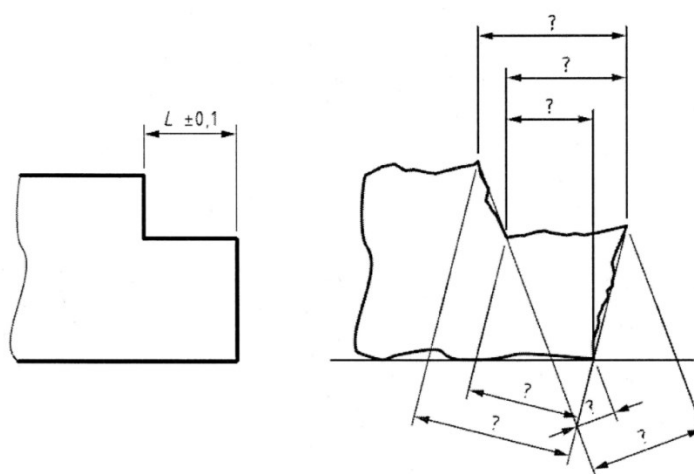
Pro rozměry jiné než lineární není \pm tolerování jednoznačné. V následující kapitole je vždy ukázka nejednoznačného tolerování a jednoznačného řešení za použití geometrických tolerancí a teoreticky přesných rozměrů. Často je možné použít více druhů jednoznačného tolerování. [5]

5.1.1 Lineární vzdálenost mezi dvěma integrálními prvky

Na obrázku 42 je vlevo zobrazený nejednoznačný styl tolerování. Na obrázku vpravo je ustanovená základní rovina A, od které je pravá svislá rovina tolerovaná pomocí geometrické tolerance umístění polohy ve vzdálenosti L. L je teoreticky přesný rozměr (TED). Na obrázcích 43 a 44 je porovnání rozměrů na výkresu a na skutečném výrobku.

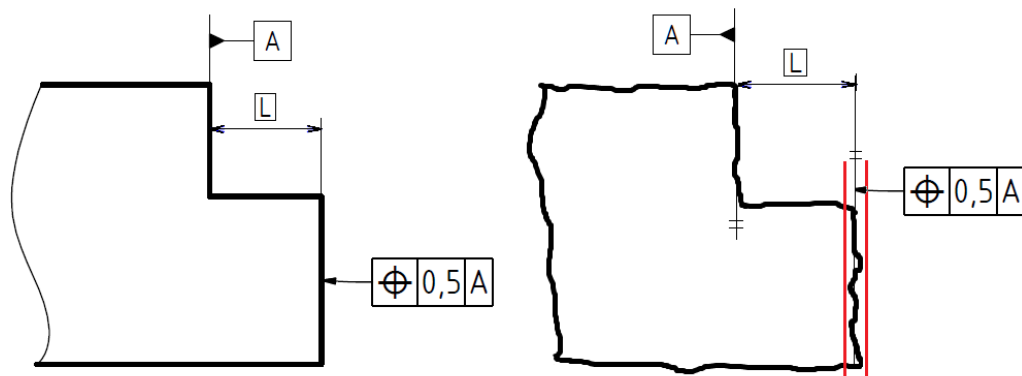


Obrázek 42 Příklad nejednoznačného a jednoznačného tolerování lineární vzdálenosti mezi dvěma integrálními prvky [5]



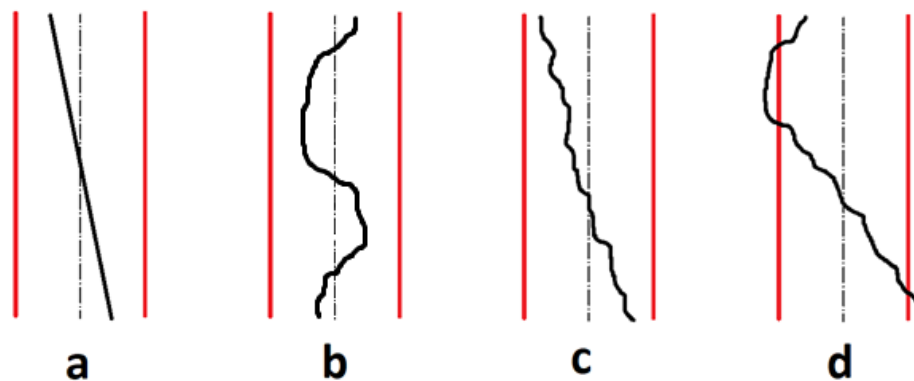
Obrázek 43 Porovnání nejednoznačného tolerování na výkresu a výrobku [5]

V případě jednoznačného tolerování na obrázku 44 je základní rovina A, od které je tolerovaná rovnoběžná rovina ve vzdálenosti L. Aby byla tolerance splněna, musí každý bod tolerované roviny ležet mezi dvěma hraničními rovinami (označené červeně na obrázku). Vzdálenost hraniční roviny od tolerované je polovina tolerance v rámečku. [5]



Obrázek 44 Ukázka jednoznačného tolerování na výkresu a výrobku

Povrch skutečného výrobku může mít různé druhy nedokonalostí, ale pokud se každý bod nachází v tolerovaném pásmu, je tolerance splněna. Všechny příklady, kromě bodu d, splňují toleranci. Červené čáry značí mezní hodnoty tolerance.



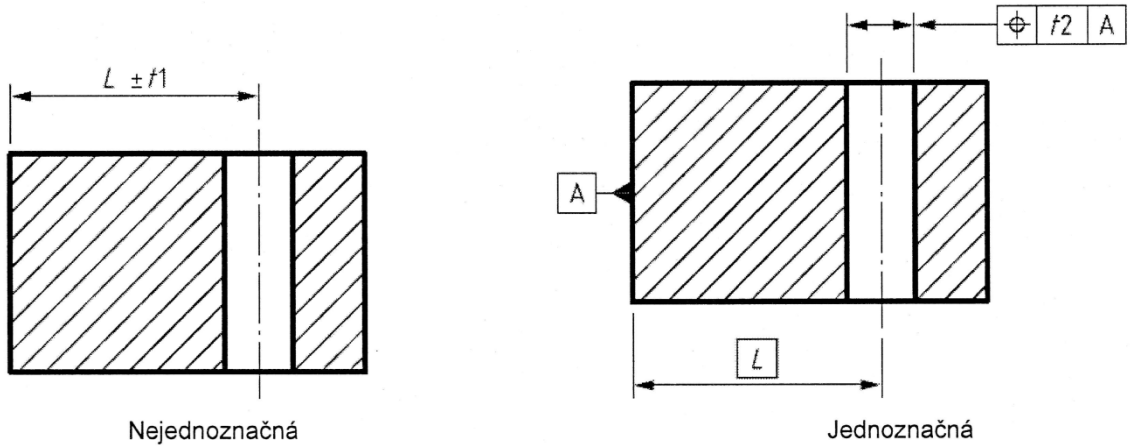
Obrázek 45 Detail povrchu součásti v tolerančním pásmu

Na obrázku je:

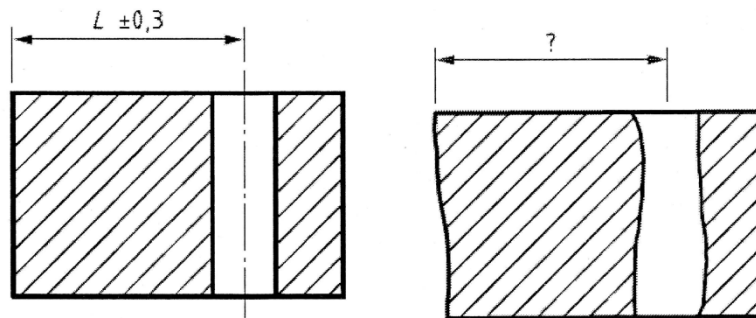
- a rovina vychýlena pod úhlem
- b rovina s nedokonalou kvalitou povrchu
- c rovina vychýlená pod úhlem a s nedokonalou kvalitou povrchu
- d rovina nesplňující toleranci

5.1.2 Lineární vzdálenost mezi integrálním a odvozeným prvkem

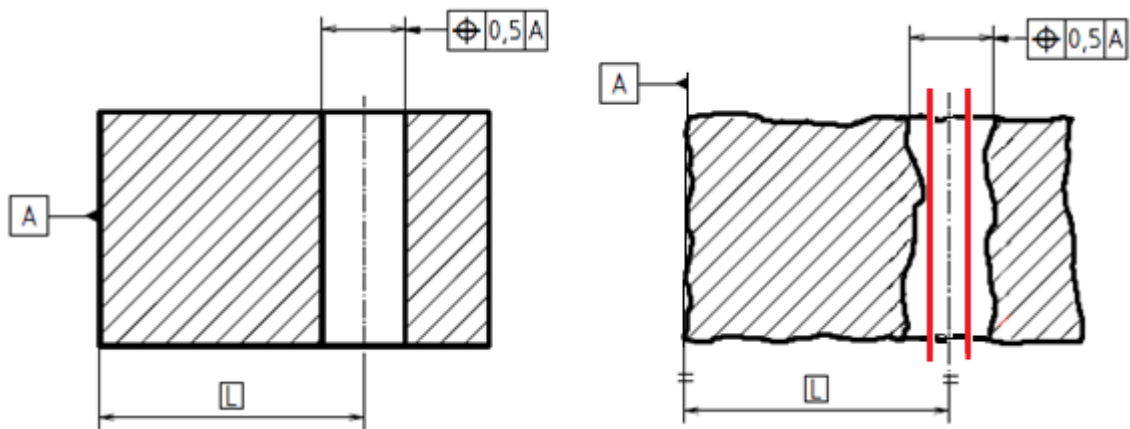
Obdobná je i situace u lineární vzdálenosti mezi integrální a odvozeným prvkem. U odvozených prvků (např. díry) se situace komplikuje, protože není možné žádným přímým způsobem změřit vzdálenost osy díry od roviny. [5]



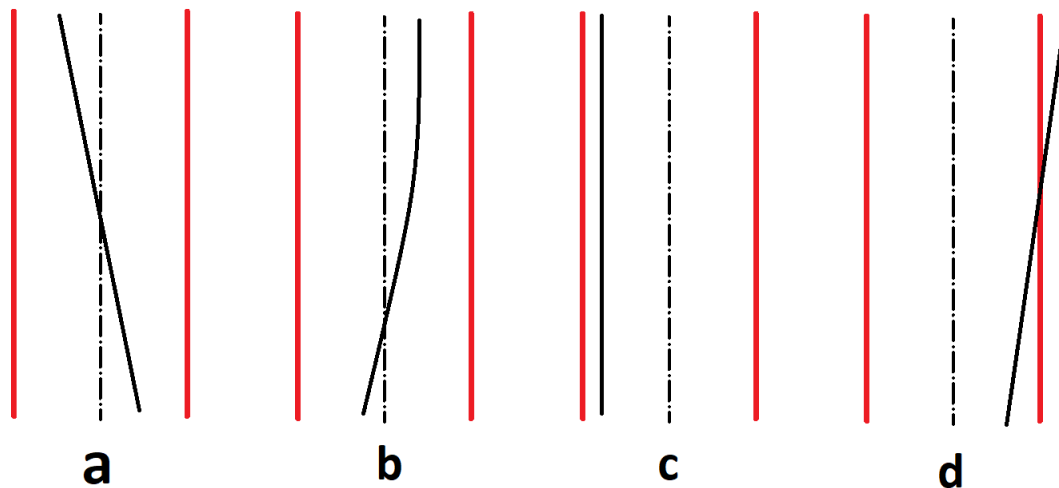
Obrázek 46 Příklad nejednoznačného a jednoznačného tolerování lineární vzdálenosti mezi integrálním a odvozeným prvkem [5]



Obrázek 47 Porovnání nejednoznačného tolerování na výkresu a výrobku [5]



Obrázek 48 Ukázka jednoznačného tolerování na výkresu a výrobku



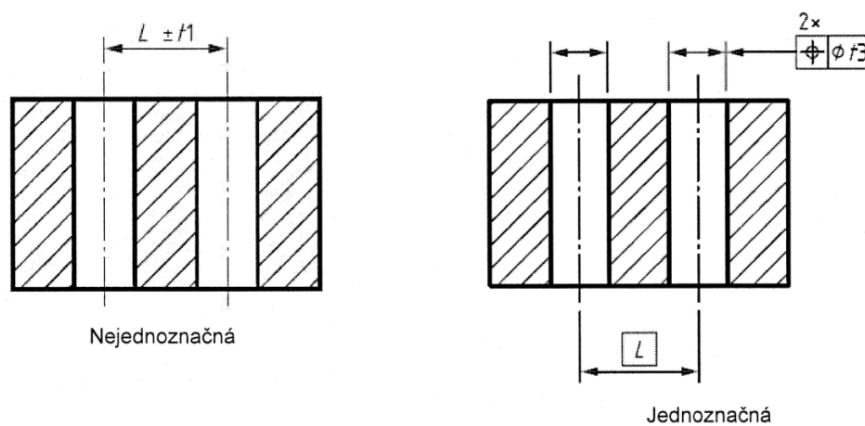
Obrázek 49 Detail tolerance umístění osy

Na obrázku je:

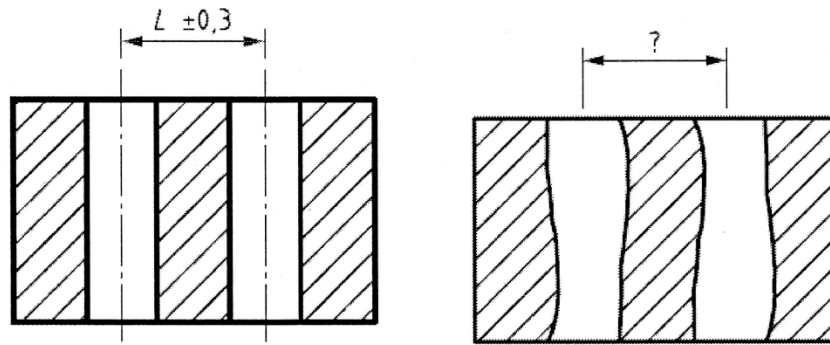
- a osa vychýlena pod úhlem
- b prohnutá osa díry
- c osa posunutá od předepsaného umístění
- d osa nesplňující toleranci

5.1.3 Lineární vzdálenost mezi dvěma odvozenými prvky

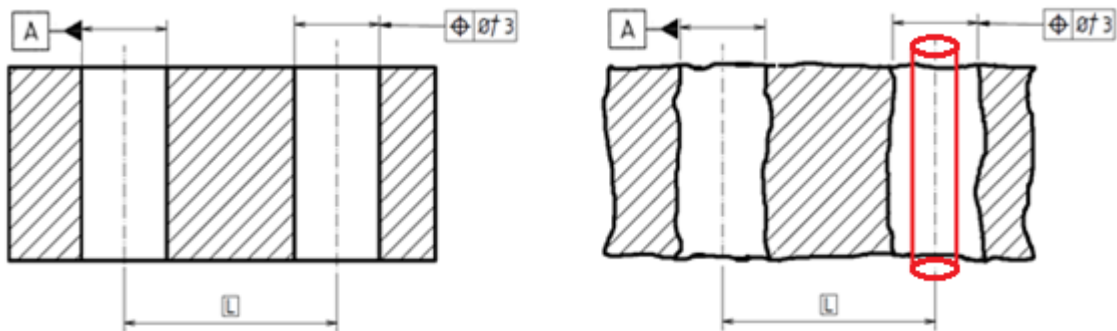
U vzdálenosti mezi dvěma odvozenými prvky lze použít více způsobů jednoznačného tolerování. Například způsob popsany u lineární vzdálenosti mezi integrálním a odvozeným prvkem nebo způsob popsany na následujícím obrázku.



Obrázek 50 Příklad nejednoznačného a jednoznačného tolerování lineární vzdálenosti mezi dvěma integrálními prvky [5]



Obrázek 51 Porovnání nejednoznačného tolerování na výkresu a výrobku [5]

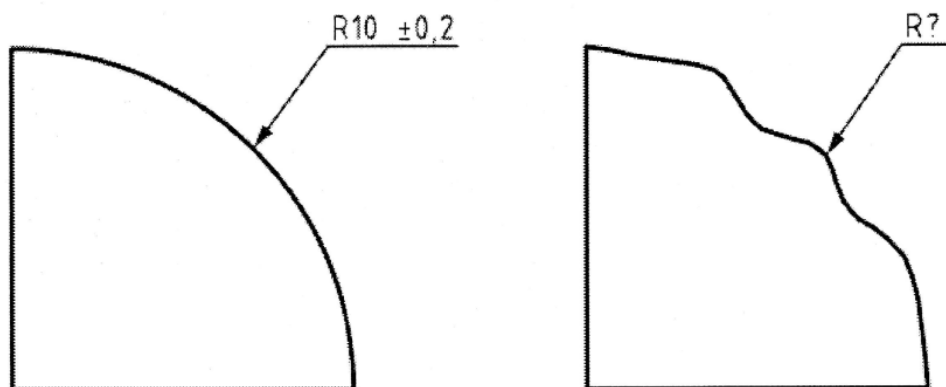


Obrázek 52 Ukázka jednoznačného tolerování na výkresu a výrobku

Detail osy v tolerančním poli je stejný jako u lineárního rozměru mezi integrálním a odvozeným prvkem.

5.1.4 Vzdálenost poloměru

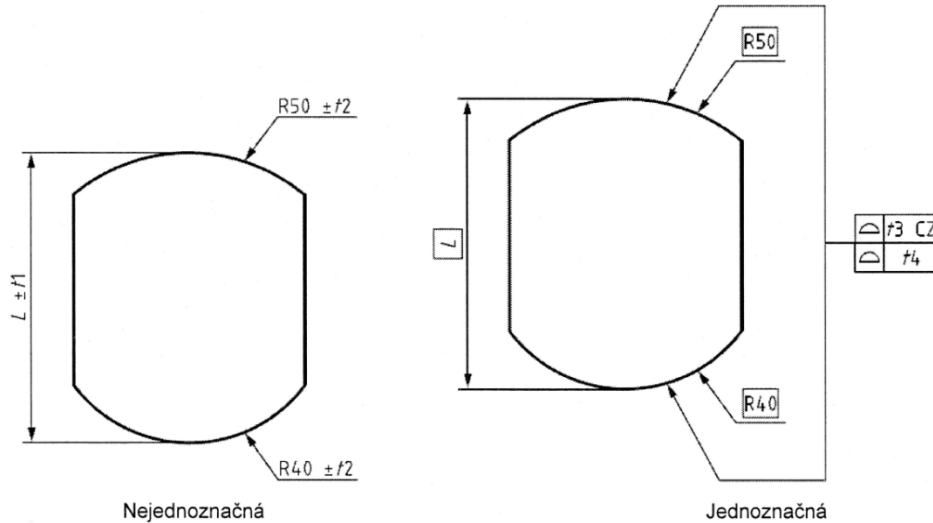
Při tolerování vzdálenosti poloměru je použité \pm tolerování nejednoznačné kvůli nedokonalé přesnosti výrobku. Lepší řešení je použití teoreticky přesného rozměru pro rádius a tolerance tvaru plochy. [5]



Obrázek 53 Porovnání předepsaného a skutečného rozměru vzdálenosti poloměru [5]

5.1.5 Lineární vzdálenost mezi nerovnými integrálními prvky

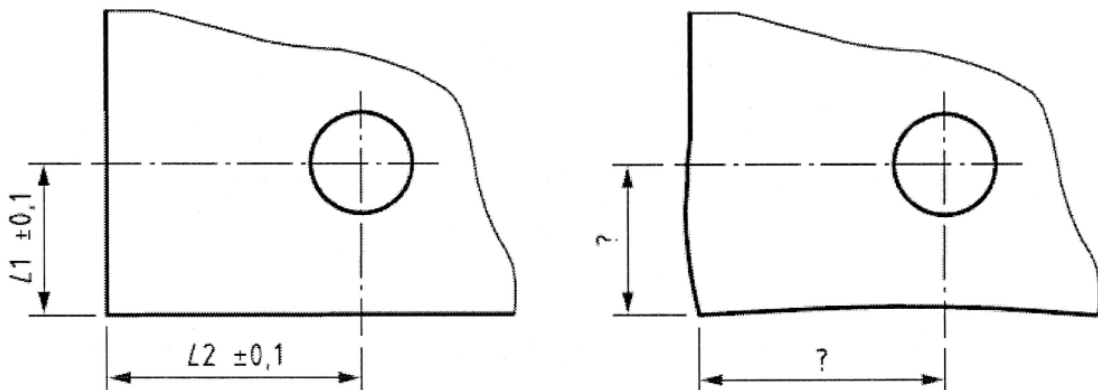
Pro tento typ vzdálenosti je také jednoznačné jen tolerování pomocí teoreticky přesných rozměrů a geometrických tolerancí. Na obrázku jednoznačného tolerování značí první tolerance tvaru plochy umístění prvků (s použitím operátoru společné plochy CZ) a druhý řádek značí toleranci tvaru oblouků. [5]



Obrázek 54 Příklad lineární vzdálenosti mezi dvě nerovnými integrálními prvky [5]

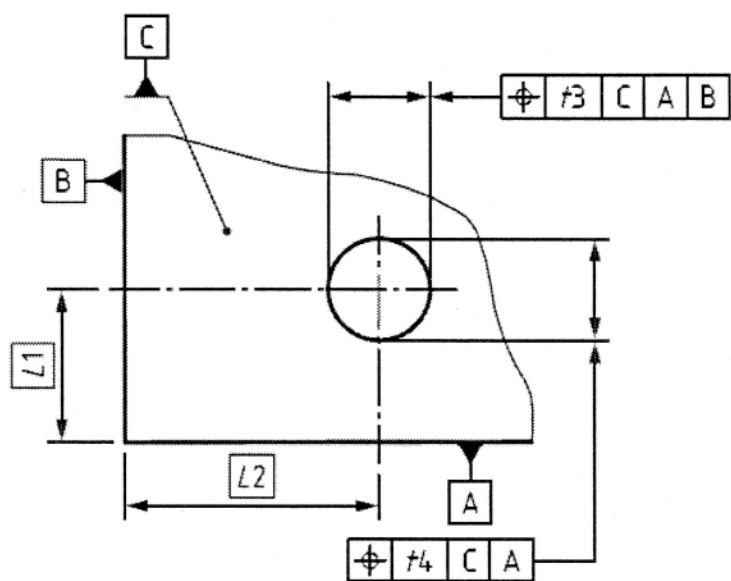
5.1.6 Lineární vzdálenosti ve dvou směrech

U tolerování lineární vzdálenosti ve dvou směrech vzniká velké množství nejednoznačností u skutečného výrobku. Reálně vyrobené plochy nejsou dokonale rovné.



Obrázek 55 Porovnání rozměrů na výkresu a na skutečném obrobku [5]

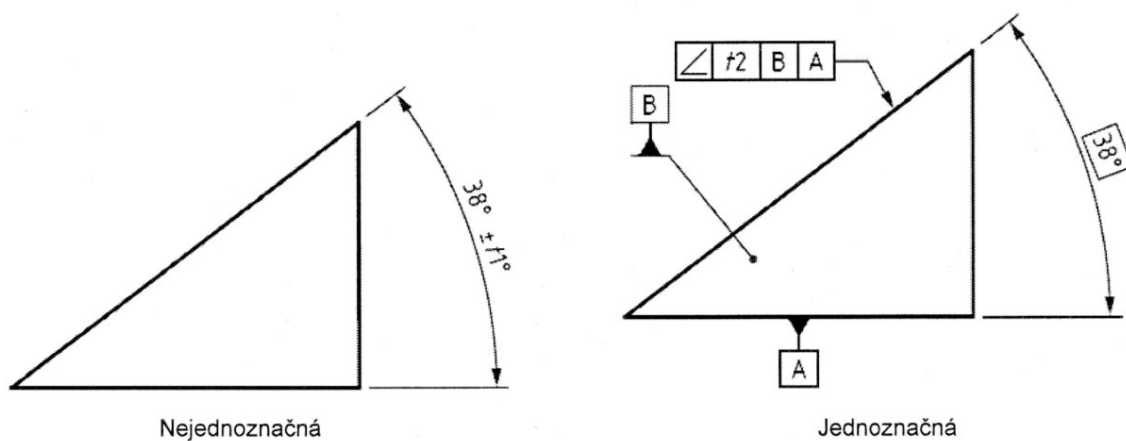
Vhodnější je použít jednoznačné tolerování pomocí geometrických tolerancí. Na dalším obrázku je příklad jednoznačného tolerování stejného rozměru. V každém směru lze použít jinou hodnotu tolerance. [5]



Obrázek 56 Příklad jednoznačného tolerování [5]

5.1.7 Úhlová vzdálenost

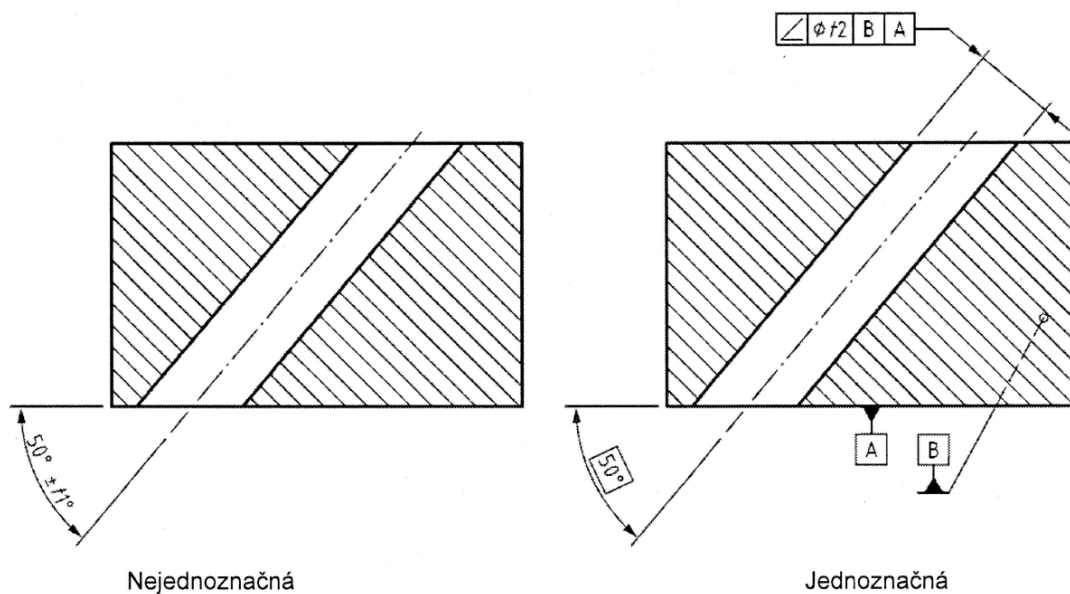
U úhlové vzdálenosti \pm tolerance řídí jen relativní orientaci mezi dvěma skutečnými rovinami, ale nezabývá se jejich úchylkami tvaru. Pro skutečně jednoznačné tolerování je nutné použít geometrické tolerování. [5]



Obrázek 57 Příklad nejednoznačného a jednoznačného tolerování úhlové vzdálenosti [5]

5.1.8 Úhlová vzdálenosti mezi integrálním a odvozeným prvkem

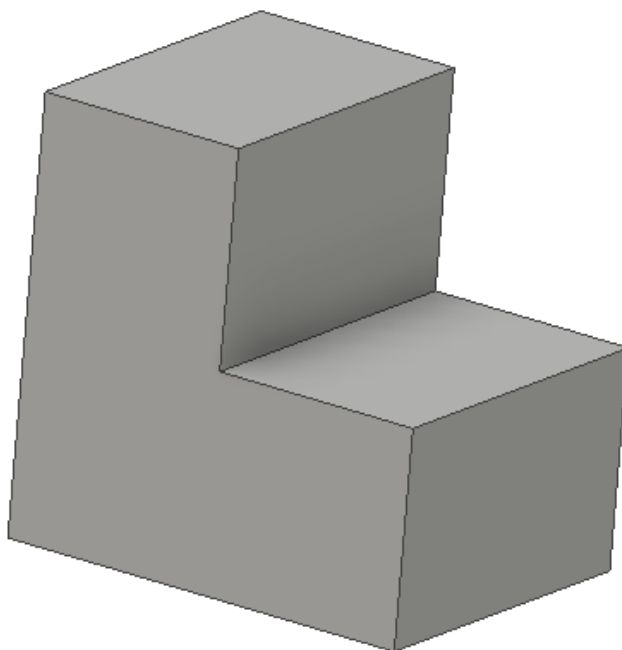
Pro jednoznačné tolerování úhlové vzdálenosti mezi integrálním a odvozeným prvkem je vhodné použití teoreticky přesného úhlového rozměru v kombinaci s tolerancí směru sklonu. [5]



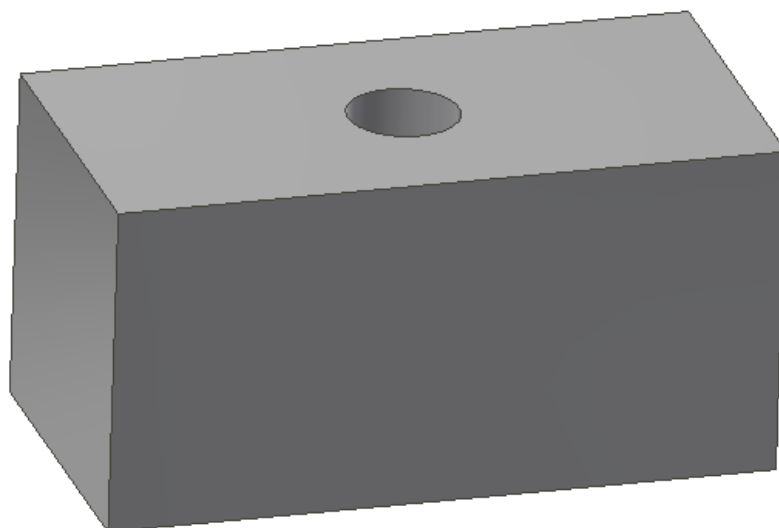
Obrázek 58 Příklad nejednoznačné a jednoznačné tolerance vzdálenosti mezi integrálním a odvozeným prvkem [5]

6 Vypracování měřících úloh

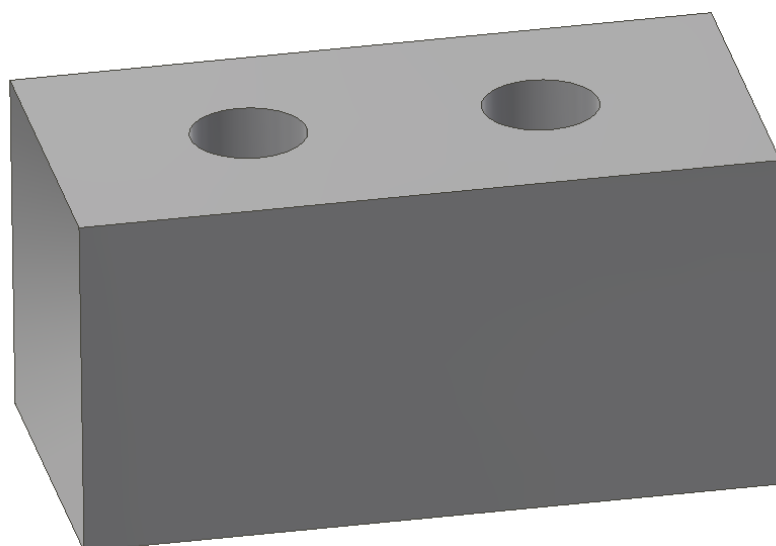
V následující části jsou vymodelované jednoduché součásti, na kterých lze názorně ukázat jednoznačné a nejednoznačné tolerování. Modely jsou vytvořené v programu Autodesk Inventor Professional 2016. K simulaci se použije software Calypso 2017.



Obrázek 59 Model pro měření vzdálenosti mezi lineárními prvky



Obrázek 60 Model pro měření vzdálenosti mezi lineárním a odvozeným prvkem



Obrázek 61 Model pro měření mezi odvozenými prvky

6.1 Vytvoření snímacího systému

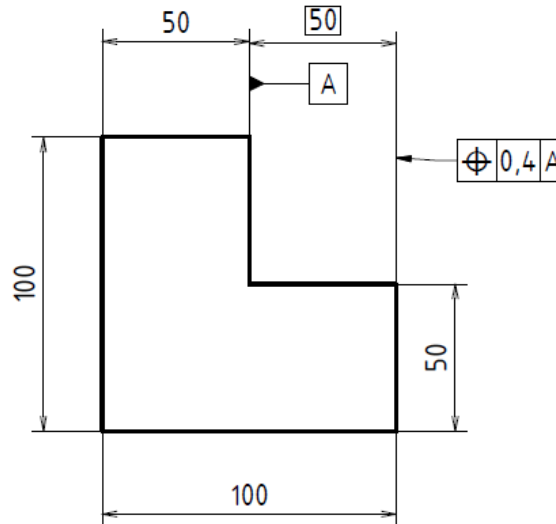
Nejprve se musí vytvořit vhodný snímací systém. Pro potřeby měření modelových úloh stačí jeden snímač. Snímací systém se skládá ze standardního upínacího talířku, prodloužení o délce 40 mm a vlastního snímače. Snímač je dotyková sonda s rubínovou kuličkou o průměru 3 mm a délce 65 mm. Modely obsahující díru mají na výšku 60 mm, takže je snímač dostatečně dlouhý pro změření celého modelu.



Obrázek 62 Snímací systém vytvořený v programu Calypso 2017

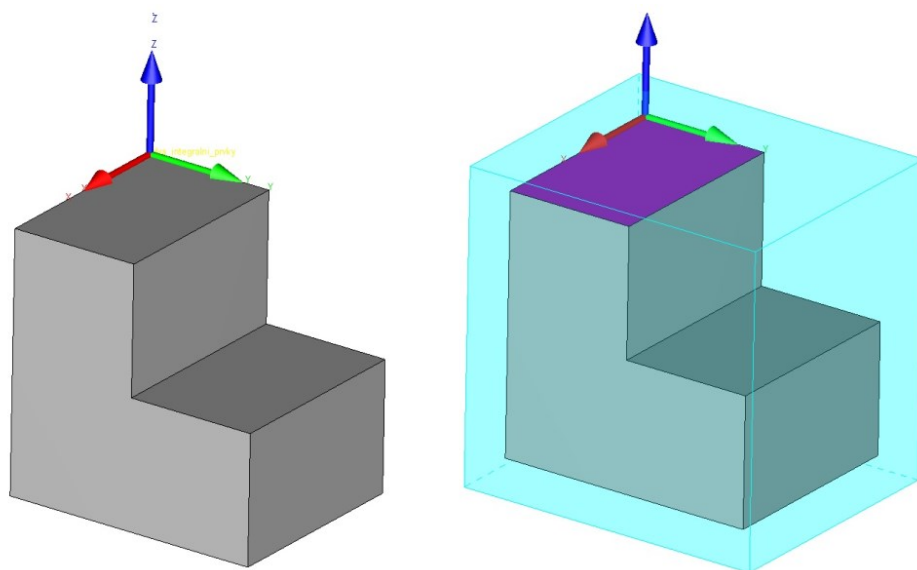
6.2 Měření vzdálenosti mezi dvěma integrálními prvky

Model pro měření vzdálenosti mezi dvěma integrálními prvky je kótován pomocí geometrických tolerancí následujícím způsobem.



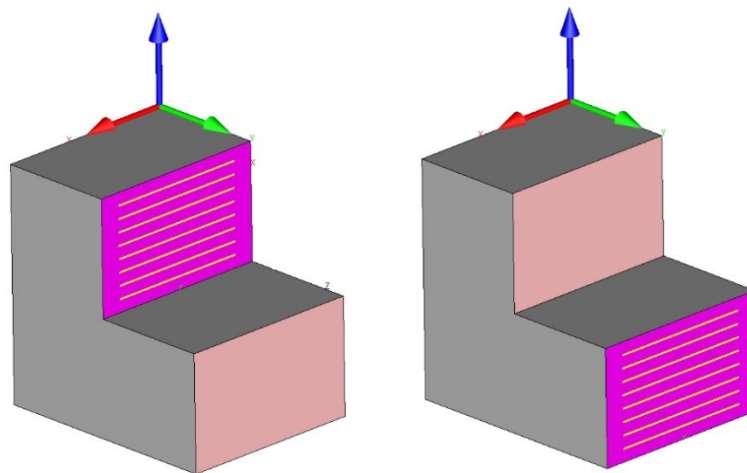
Obrázek 63 Kótování modelu pro měření vzdálenosti mezi dvěma integrálními prvky pomocí geometrických tolerancí

Po importu modelu se musí nejdříve zavést souřadnicový systém. U všech modelů je provedeno vyrovnaní souřadnicového systému standardní metodou (pomocí definování roviny, přímky a bodu se odstraní všechny stupně volnosti). Po vyrovnaní směřuje osa Z nahoru a osa Y ve směru měření. Po vyrovnaní souřadnicového systému se musí definovat bezpečnostní kvádr, který definuje oblast, kudy se nesmí snímací systém při přejezdech pohybovat. Při reálném měření by bylo také potřeba vyřešit upnutí dílu.



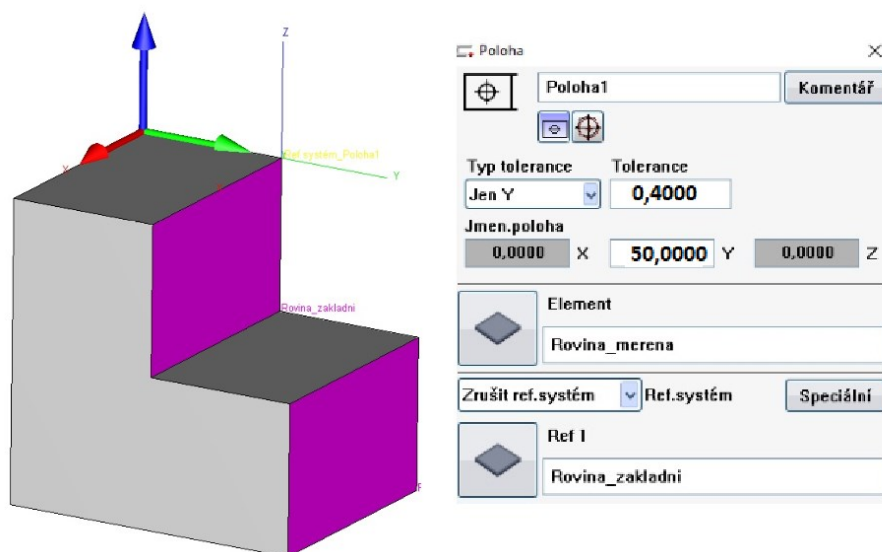
Obrázek 64 Vyrovnaní souřadnicového systému a bezpečnostní kvádr

Dále se musí definovat elementy potřebné pro vytvoření charakteristik měření. Zavedly se dvě roviny (na obrázku fialové). Horní rovina je referenční rovina a spodní je měřená rovina. Obě roviny jsou měřené pomocí liniového rastru, horní rovina pomocí celkem 500 bodů a spodní rovina pomocí pouhých 30 bodů. Pro reálné měření by bylo 30 bodů málo, ale pro ilustrování problému jednoznačného a nejednoznačného tolerování je to názornější. Při grafickém zobrazení výsledku měření by stovky bodů splývaly a vzájemně se překrývaly.



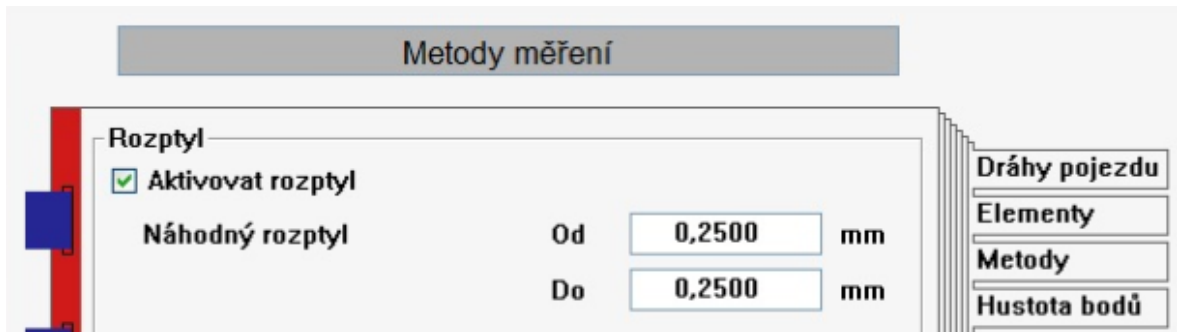
Obrázek 65 Vytvoření elementů pro měření. Na obrázku vlevo je referenční rovina a na obrázku vpravo je měřená rovina

Z vytvořených elementů se poté vytvoří charakteristika. V našem případě se jedná o geometrickou toleranci polohy. Základna, vzdálenost mezi rovinami a tolerance polohy vyčteme z výkresu.



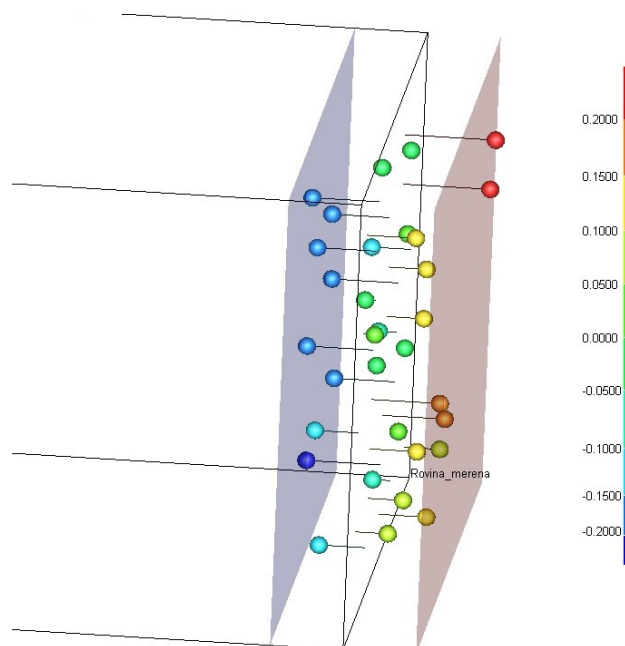
Obrázek 66 Vytvoření charakteristiky pro měření tolerance polohy

Když je vše připravené, může se spustit simulace měření. V případě skutečného měření by začala sonda měřit zadanou rychlostí posuvu po vytyčené trajektorii, ale při simulaci měření je vše velmi rychlé a téměř okamžitě program vygeneruje protokol o měření. Z protokolu o měření by vyplynulo, že roviny nemají žádnou chybu polohy (měřená hodnota toleranci polohy je 0 mm). Při reálném měření by se jednalo o ideální případ, ale pro účely této práce je takový výsledek nic neříkající. Proto se v programu zavede úmyslná chyba.



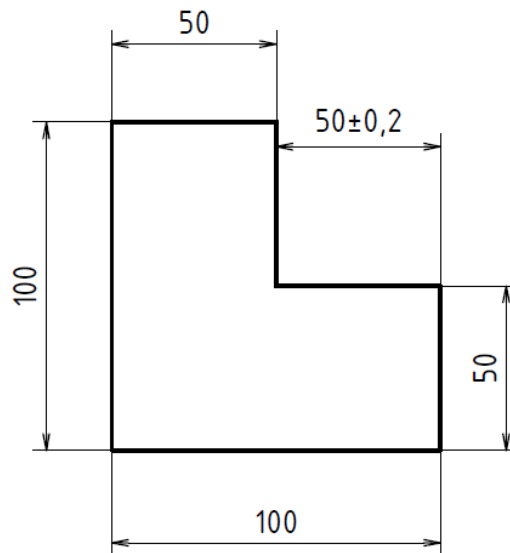
Obrázek 67 Dialogové okno pro aktivování rozptylu naměřených hodnot

Naměřené hodnoty se tedy budou pohybovat v rozmezí $50 \pm 0,25$ mm. Rozptyl hodnot neodpovídá skutečným výrobkům, ale je náhodně generován a rozložení bodů v tolerančním pásmu odpovídá Gaussově rozložení. Po aktivování rozptylu je už vše připravené a může se spustit simulace měření.



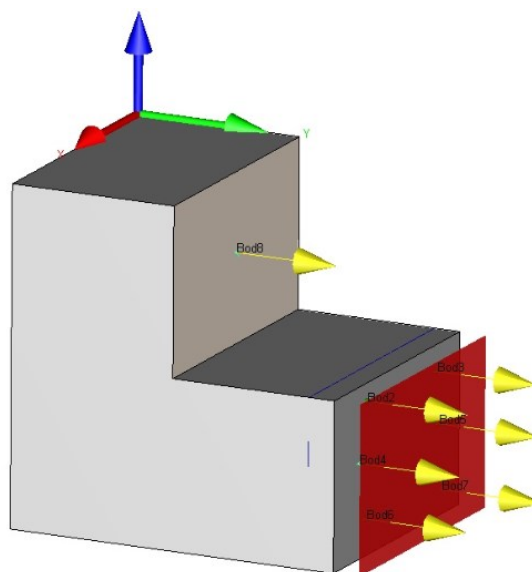
Obrázek 68 Grafické znázornění výsledků měření

Na obrázku 68 značí každá barevná koule jeden měřený bod. Dvě červené koule jsou mimo toleranční pole (červená a modrá rovina) a z měření naprosto jednoznačně plyne, že reálná hodnota je mimo toleranci a tolerance tedy není splněna. Výsledkem měření je jedna měřená hodnota tolerance polohy, která je vyšší než maximální přípustná hodnota. Naměřená hodnota je 0,4794 mm a nejvyšší povolená hodnota je 0,4 mm.



Obrázek 69 Kótování modelu pro měření vzdálenosti mezi dvěma integrálními prvky pomocí \pm tolerování

V případě použití pomocí \pm tolerování (obrázek 69) je situace rozdílná. Pro ilustraci nejednoznačného tolerování byl zvolen jeden bod na horní rovině a šest bodů na spodní rovině.



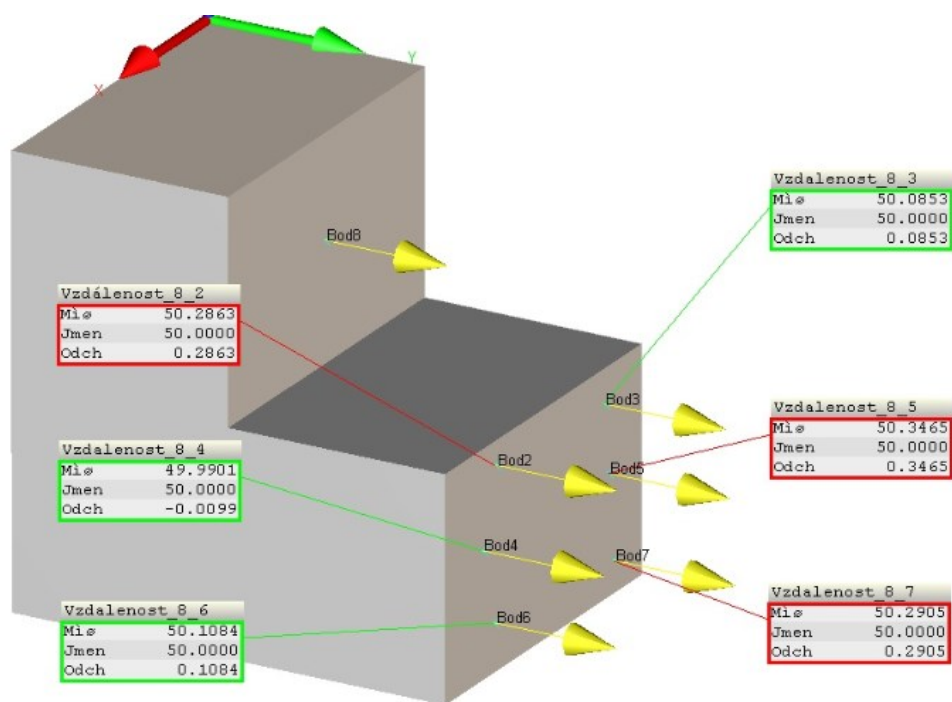
Obrázek 70 Body definované pro měření vzdálenosti rovin

V programu se definuje šestkrát vzdálenost mezi dvěma body, vždy mezi bodem na horní rovině a jedním ze šesti bodů na spodní rovině. Jmenovitá vzdálenost bodů ve směru osy Y je pro všechny vzdálenosti 50 mm a šířka tolerančního pole je stejná jako v případě geometrického tolerování 0,4 mm. Stejně jako v případě použití geometrické tolerance polohy je při simulaci měření nastavený úmyslný rozptyl hodnot.

Tabulka 7 Naměřené hodnoty vzdálenosti mezi dvěma integrálními prvky

Číslo měření	Jmenovitá hodnota [mm]	Naměřená hodnota [mm]	Odchylka rozměrů [mm]	Splňuje toleranci
1	50	50,2863	0,2863	NE
2	50	50,0853	0,0853	ANO
3	50	49,9901	-0,0099	ANO
4	50	50,3465	0,3465	NE
5	50	50,1084	0,1084	ANO
6	50	50,2905	0,2905	NE

Z tabulky je patrné, že pro některé vzdálenosti je tolerance splněná a pro některé ne. Právě toto je nejednoznačnost tolerování. Při vyhodnocení geometrického tolerování je výsledek jednoznačný – jedno číslo, ale v případě \pm tolerování dostaneme nekonečné množství hodnot. Při naměření jedné vzdálenosti splňující toleranci lze prohlásit, že díl splňuje toleranci.



Obrázek 71 Grafické vyhodnocení měření

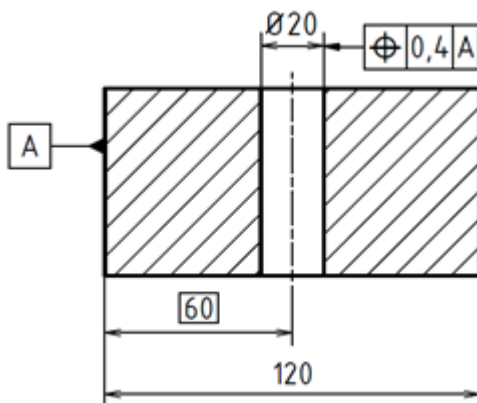
V programu Calypso lze také vygenerovat protokol o měření, na kterém jsou přehledně zobrazeny všechny neměřené hodnoty.

Name	Value	Nominal Value	Upper Allowance	Lower Allowance	Odchylka	+/-
Poloha1	0,4794	0,0000	0,4000	0,0000	0,4794	0,0794
Vzdálenost_8_2	50,2863	50,0000	0,2000	-0,2000	0,2863	0,0863
Vzdálenost_8_3	50,0853	50,0000	0,2000	-0,2000	0,0853	
Vzdálenost_8_4	49,9901	50,0000	0,2000	-0,2000	-0,0099	
Vzdálenost_8_5	50,3465	50,0000	0,2000	-0,2000	0,3465	0,1465
Vzdálenost_8_6	50,1084	50,0000	0,2000	-0,2000	0,1084	
Vzdálenost_8_7	50,2905	50,0000	0,2000	-0,2000	0,2905	0,0905

Obrázek 72 Protokol o měření

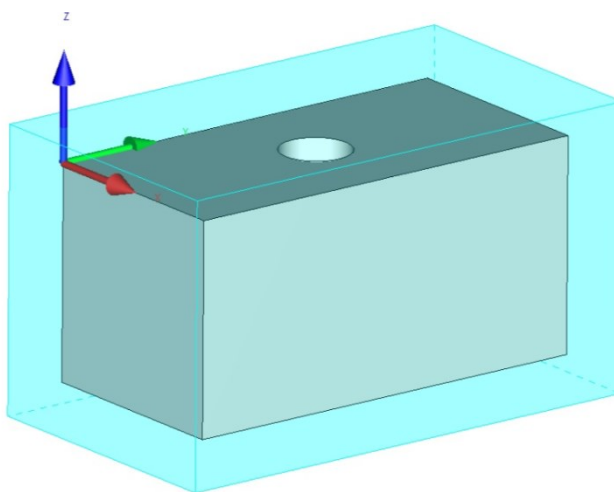
6.3 Měření vzdálenosti mezi integrálním a odvozeným prvkem

Tato měřicí úloha je velmi podobná přecházející, proto jsou některé části zkrácené. Model je okótovaný na následujícím obrázku.



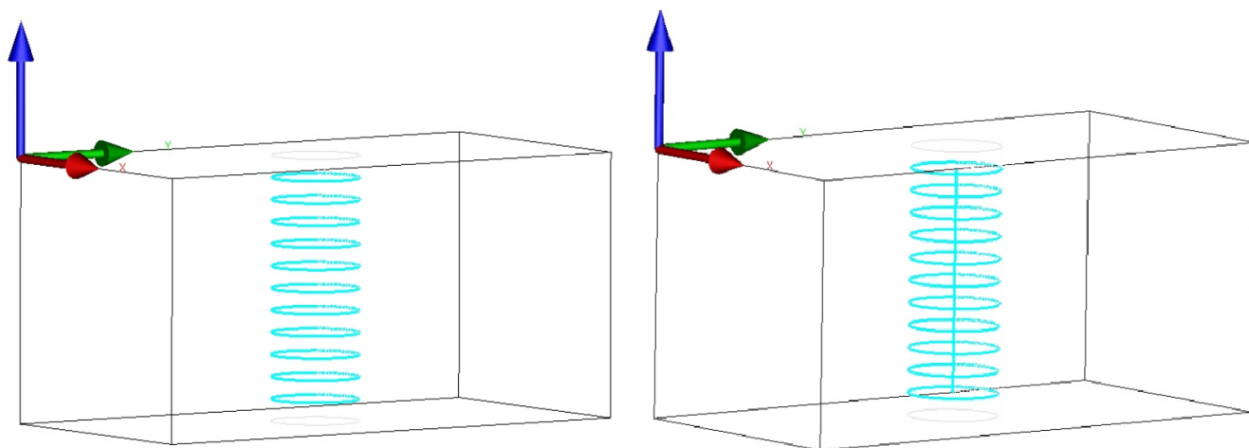
Obrázek 73 Kótování modelu pro měření vzdálenosti mezi integrálním a odvozeným prvkem pomocí geometrických tolerancí

Stejně jako v předchozím měření se nejprve musí vyrovnat souřadnicový systém a definovat bezpečnost kvádr kolem součásti.



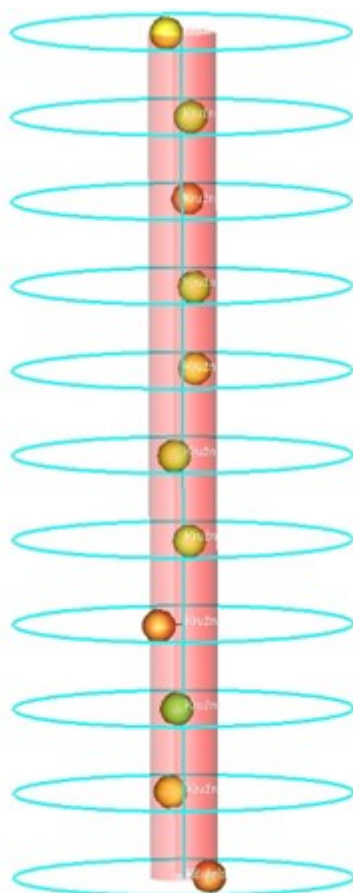
Obrázek 74 Model po vyrovnání souřadnicového systému a definování bezpečnostní kvádr

Dále se definují elementy pro naměření charakteristik. Rovina se definuje stejně jako v předchozím případě – pomocí rastru. V odvozeném prvku (díra) se vytvořilo 11 kružnic odstupňovaných po 5 mm. První kružnice je 5 mm od dolní hrany díry a poslední končí 5 mm pod horní hranou. Z těchto kružnic se pomocí zpětného vyvolání vytvoří 3D přímka, která je osou díry. Kvůli přehlednosti je na dalších obrázcích pouze drátový model dílu.



Obrázek 75 Postup vytvoření osy díry

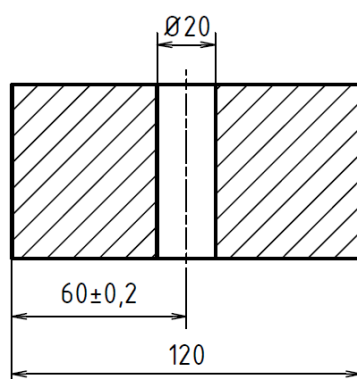
Stejným způsobem se aktivuje náhodný rozptyl hodnot a vytvoří se tolerance polohy – osa díry od základní roviny.



Obrázek 76 Rozložení bodů osy v tolerančním pásmu

Při reálném měření by takový rozptyl hodnot v ose díry nebyl, ale měření proběhlo v režimu simulace, kde se hodnoty generují náhodně a neodpovídají realitě, ale pro účely měření je to tímto způsobem názornější. Podobná situace je také u profilu díry na obrázku vpravo, kde je záměrně velká chyba tvaru díry a obrázek je zvětšený.

Měřením jsme získali výslednou hodnotu tolerance polohy 0,4644 mm a maximální povolená hodnota je 0,4 mm. Je tedy naprosto jednoznačné, že předepsaný rozměr není splněn.



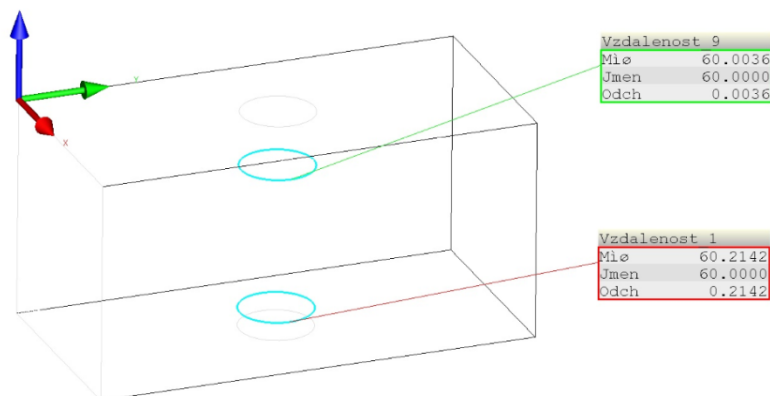
Obrázek 77 Kótování modelu pro měření vzdálenosti mezi integrálním a odvozeným prvkem pomocí \pm tolerování

Podobně jako v předcházejícím případě se porovná tento jednoznačný výsledek s několika rozměry mezi dvěma body. V následující tabulce je zapsán výsledek 11 měření.

Tabulka 8 Naměřené hodnoty vzdálenosti mezi integrálním a odvozeným prvkem

Číslo měření	Jmenovitá hodnota [mm]	Naměřená hodnota [mm]	Odchylka rozměrů [mm]	Splňuje toleranci
1	60	60,2142	0,2142	NE
2	60	59,9861	-0,0139	ANO
3	60	59,9829	-0,0171	ANO
4	60	59,8434	-0,1566	ANO
5	60	60,0068	0,0068	ANO
6	60	59,9161	-0,0839	ANO
7	60	60,0607	0,0607	ANO
8	60	59,9951	-0,0049	ANO
9	60	60,0036	0,0036	ANO
10	60	59,9632	-0,0368	ANO
11	60	59,7997	-0,2003	NE

Z jedenácti naměřených hodnot splňuje devět toleranci a dvě jí nespĺňují. Opět se jedná o nejednoznačné tolerování. Vhodným zvolením měřených bodů lze ovlivnit měření k dosažení požadovaného výsledku.



Obrázek 78 Porovnání dvou naměřených hodnot.

Z protokolu o měření lze jednoznačně vyčíst, že tolerování pomocí geometrických tolerancí není splněno, ale u jednotlivých měření je to nejednoznačné. Z jedenácti měření bylo devět z nich v předepsané toleranci, ale zároveň dvě nebyly. Těchto měření lze provést nekonečné množství a vždy záleží jen na tom, jaké dva konkrétní body se na měření vyberou.

ZEISS CALYPSO
6.4.04

Part name: Integralni_a_odvozeny

Drawing number:
 Order number:
 Variant:
 Company:
 Department:
 Typ stroje: Prismo
 Č.stroje: 000000
 Operator: Master
 Text:

Last 1 measurements: Approval ≠ Blocked

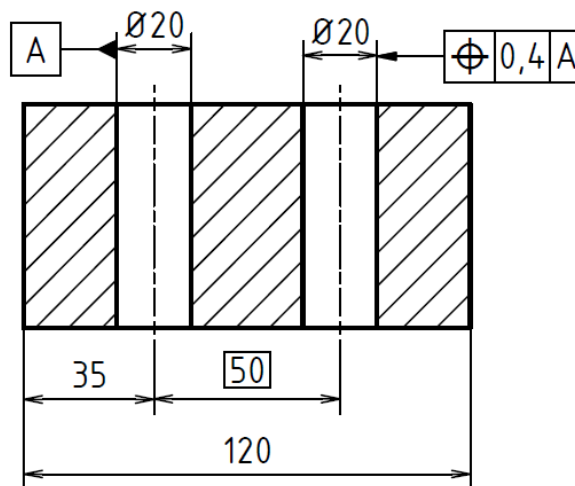
Part ident: 10
Time/Date: 09.07.2018 13:09
Run: Všechny charakteris...
No. measured values: 12
No. values: red: 3

Name	Value	Nominal Value	Upper Allowance	Lower Allowance	Odchylka	+/-
Poloha1	0.4844	0.0000	0.4000	0.0000	0.4844	0.0844
Vzdalenost_1	60.2142	60.0000	0.2000	-0.2000	0.2142	0.0142
Vzdalenost_2	59.9861	60.0000	0.2000	-0.2000	-0.0139	
Vzdalenost_3	59.9829	60.0000	0.2000	-0.2000	-0.0171	
Vzdalenost_4	58.8434	60.0000	0.2000	-0.2000	-0.1566	
Vzdalenost_5	60.0068	60.0000	0.2000	-0.2000	0.0068	
Vzdalenost_6	59.9161	60.0000	0.2000	-0.2000	-0.0839	
Vzdalenost_7	60.0807	60.0000	0.2000	-0.2000	0.0807	
Vzdalenost_8	59.9951	60.0000	0.2000	-0.2000	-0.0049	
Vzdalenost_9	60.0036	60.0000	0.2000	-0.2000	0.0036	
Vzdalenost_10	59.9632	60.0000	0.2000	-0.2000	-0.0368	
Vzdalenost_11	59.7997	60.0000	0.2000	-0.2000	-0.2003	-0.0003

Obrázek 79 Protokol o měření vzdálenosti mezi integrálním a odvozeným prvkem

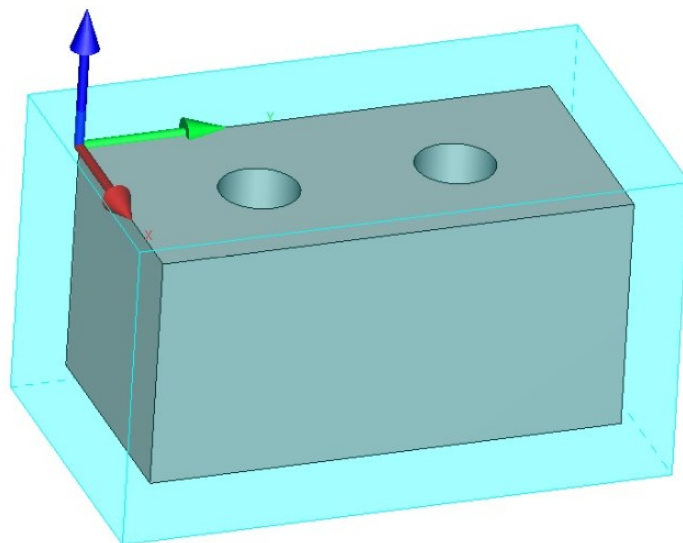
6.4 Měření vzdálenosti mezi dvěma odvozenými prvky

Poslední úlohou na simulaci měření je vzdálenost mezi dvěma odvozenými prvky. Jedná se o vzdálenost jedné osy díry od druhé. Tato vzdálenost je podobně jako přechozí případy definovaná pomocí teoreticky přesného rozměru a tolerance polohy osy.



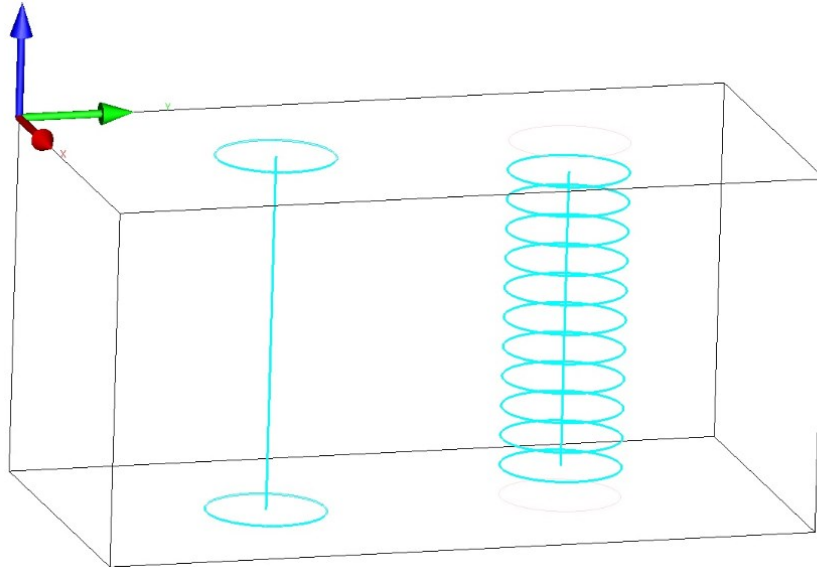
Obrázek 80 Kótování modelu pro měření vzdálenosti mezi dvěma odvozenými prvky pomocí geometrických tolerancí

Stejným způsobem jako v předchozích měřeních se musí nejprve definovat základní souřadnicový systém. Počátek souřadnicového systému je umístěn stejně jako v simulaci měření vzdálenosti mezi odvozeným a integrálním prvkem. Bezpečnostní kvádr je vygenerován z 3D modelu. Stěny bezpečnostního kváдру jsou od stěn modelu ve vzdálenosti 10 mm.



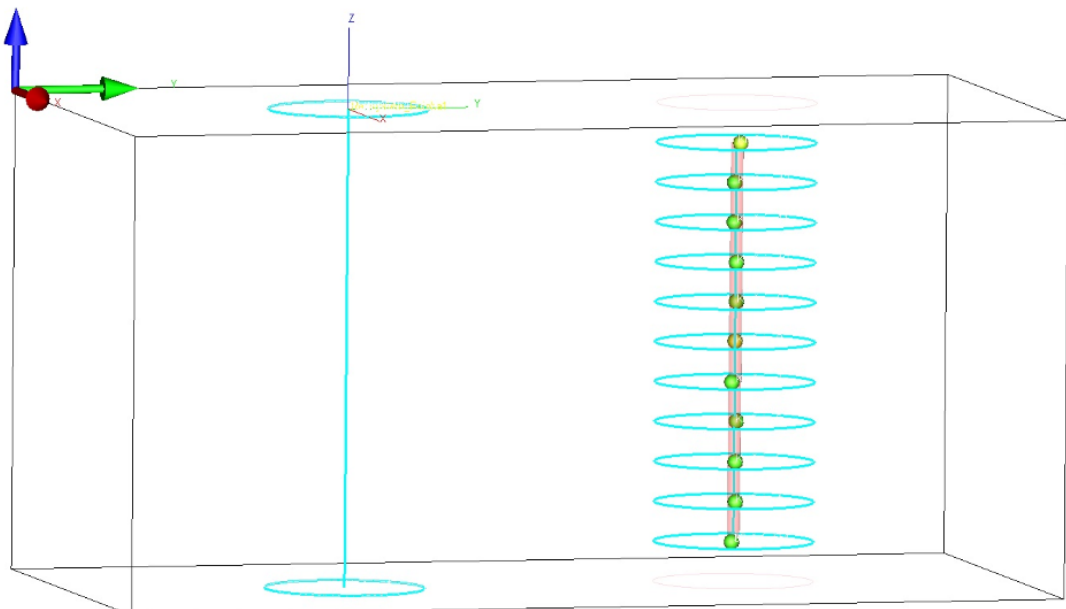
Obrázek 81 Model po vyrovnání souřadnicového systému a definování bezpečnostního kváдру

Následně se definují elementy pro vytvoření charakteristik. Levá (referenční) osa se definuje pomocí dvou, co nejdálkových průřezů díry, z kterých se pomocí zpětného vyvolání vytvoří osa díry. V pravé díře se stejně jako v předchozím případě definuje 11 průřezů odstupňovaných po 5 mm.



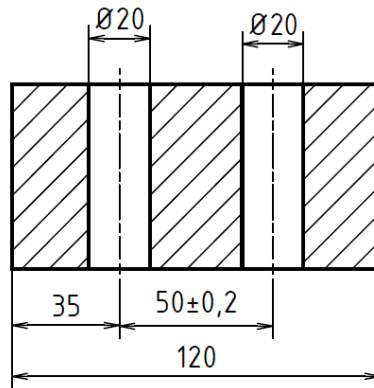
Obrázek 82 Vytvoření elementů pro definování charakteristik

Po vytvoření elementů a aktivování rozptylu náhodných hodnot se definuje tolerance polohy pravé osy.



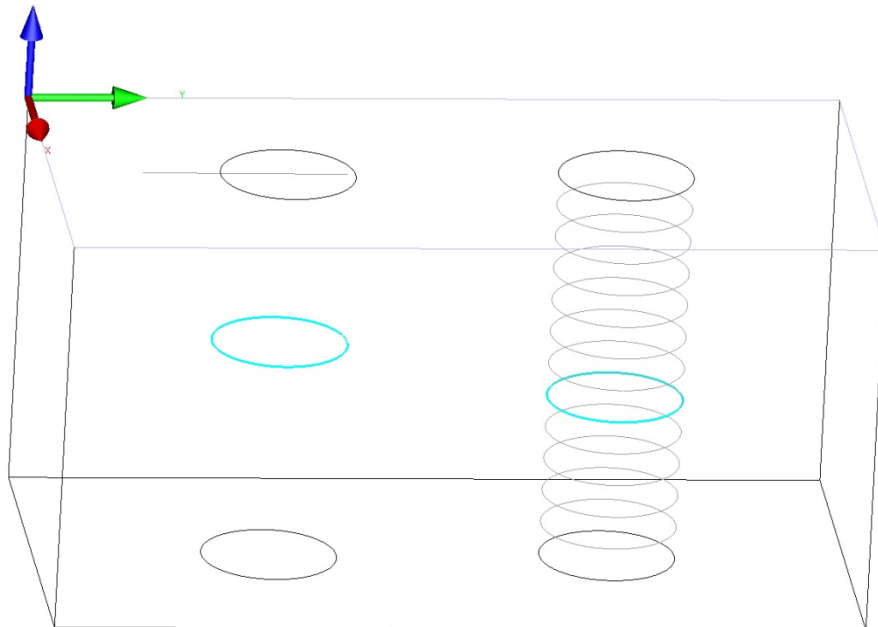
Obrázek 83 Poloha neměřených bodů osy díry

Po simulaci měření se získá jednoznačná hodnota tolerance polohy osy díry a to hodnota 0,5096 mm. Maximální povolená hodnota je 0,4 mm a je tedy jasné, že předepsané tolerance není splněna a díl je neshodný.

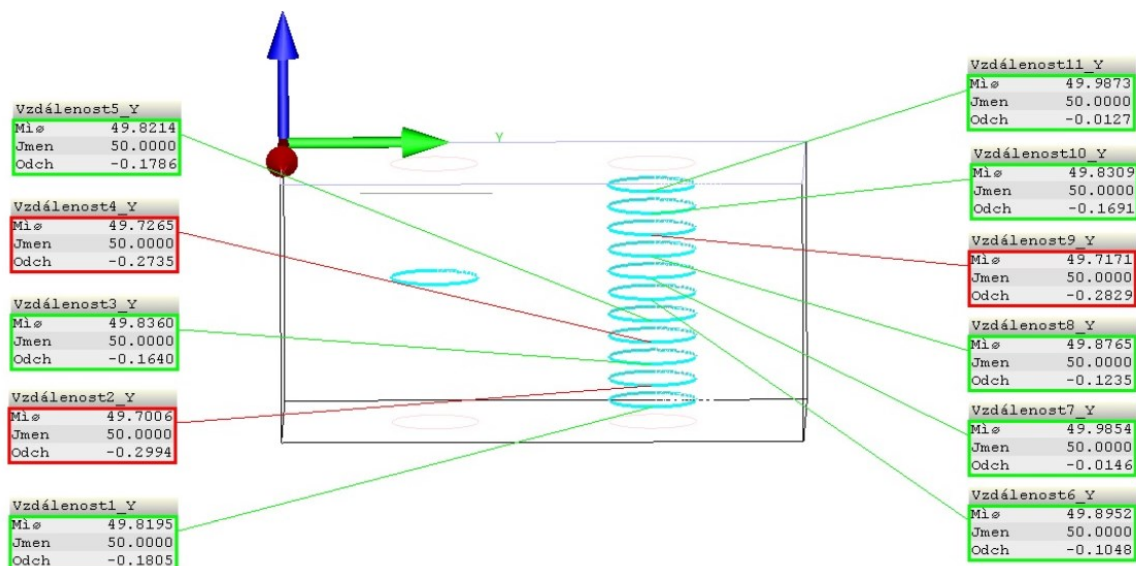


Obrázek 84 Kótování modelu pro měření vzdálenosti mezi dvěma odvozenými prvky pomocí \pm tolerování

Pro porovnání se na stejném modelu provede ještě série jednoduchých měření mezi středem kružnice, která se nachází zhruba uprostřed levé díry a středy jedenácti kružnic v pravé díře. Šířka tolerančního pole je stejná jako v případě geometrického tolerování, tedy 0,4 mm.



Obrázek 85 Definované elementy pro měření vzdálenosti středů kružnic, jedna vlevo uprostřed a jedenáct v levé díře.



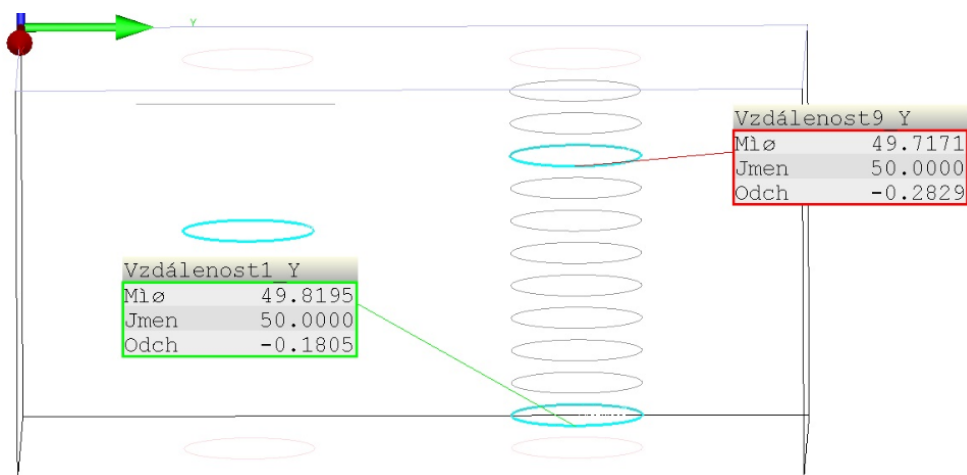
Obrázek 86 Grafické zobrazení výsledku měření

V následující tabulce je přehled výsledných naměřených hodnot.

Tabulka 9 Naměřené hodnoty vzdálenosti mezi dvěma odvozenými prvky

Číslo měření	Jmenovitá hodnota [mm]	Naměřená hodnota [mm]	Odchylka rozměrů [mm]	Splňuje toleranci
1	50	49,8195	-0,1805	ANO
2	50	49,7006	-0,2994	ANO
3	50	49,8360	-0,1640	ANO
4	50	49,7265	-0,2735	NE
5	50	49,8952	-0,1786	ANO
6	50	49,8952	-0,1048	ANO
7	50	49,9854	-0,0146	ANO
8	50	49,8765	-0,1235	ANO
9	50	49,7171	-0,2829	NE
10	50	49,8309	-0,1691	ANO
11	50	49,9873	-0,0127	ANO

Opět některé naměřené hodnoty splňují předepsanou toleranci a některé ne. Nastává tu nejednoznačnost výsledku. Při předepsání rozměru bez použití geometrického tolerování stačí provést jedno měření a na základě jeho výsledku lze prohlásit, jestli díl splňuje toleranci nebo ne. Záleží ale na konkrétním místě, na kterém se provede měření.



Obrázek 87 Porovnání dvou naměřených hodnot - jedna v toleranci a jedna mimo toleranci

Na dalším obrázku je výsledný protokol o měření. Z protokolu lze vyčíst jednoznačnost geometrické tolerance polohy. Tolerancí polohy se získá jednoznačný výsledek – jedno číslo. Ale v případě \pm tolerování lze získat nekonečné množství výsledků a o žádném z nich nelze jednoznačně říct, že je správný.

ZEISS CALYPSO
6.4.04

Part name: Program 9

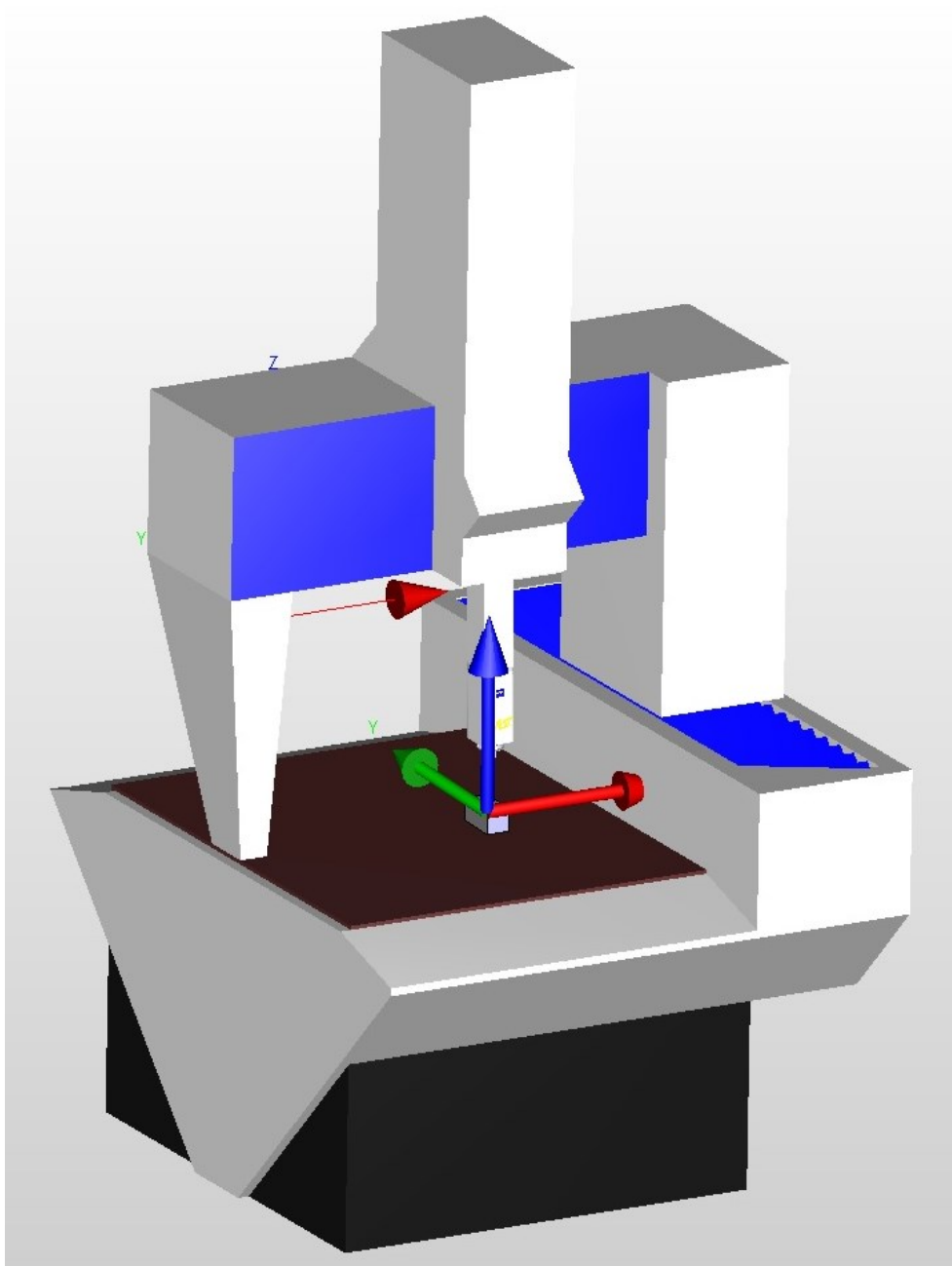
Drawing number:
Order number:
Variant:
Company:
Department:
Typ stroje: Prismo
Č.stroje: 000000
Operator: Master
Text:
Last 1 measurements: Approval ≠ Blocked
Part ident: 36
Time/Date: 09.07.2018 15:03
Run: Všechny charakteris...
No. measured values: 13
No. values: red: 5

Name	Value	Nominal Value	Upper Allowance	Lower Allowance	Odchylka	+/-
Poloha1	0,5096	0,0000	0,4000	0,0000	0,5096	0,1096
Vzdálenost1_Y	49,8195	50,0000	0,2000	-0,2000	-0,1805	
Vzdálenost2_Y	49,7006	50,0000	0,2000	-0,2000	-0,2994	-0,0994
Vzdálenost3_Y	49,8380	50,0000	0,2000	-0,2000	-0,1640	
Vzdálenost5_Y	49,7265	50,0000	0,2000	-0,2000	-0,2735	-0,0735
Vzdálenost6_Y	49,8214	50,0000	0,2000	-0,2000	-0,1786	
Vzdálenost7_Y	49,8952	50,0000	0,2000	-0,2000	-0,1048	
Vzdálenost8_Y	49,9854	50,0000	0,2000	-0,2000	-0,0146	
Vzdálenost9_Y	49,8765	50,0000	0,2000	-0,2000	-0,1235	
Vzdálenost10_Y	49,7171	50,0000	0,2000	-0,2000	-0,2829	-0,0829
Vzdálenost11_Y	49,8309	50,0000	0,2000	-0,2000	-0,1691	
Vzdálenost12_Y	49,9873	50,0000	0,2000	-0,2000	-0,0127	

Obrázek 88 Výsledný protokol o měření

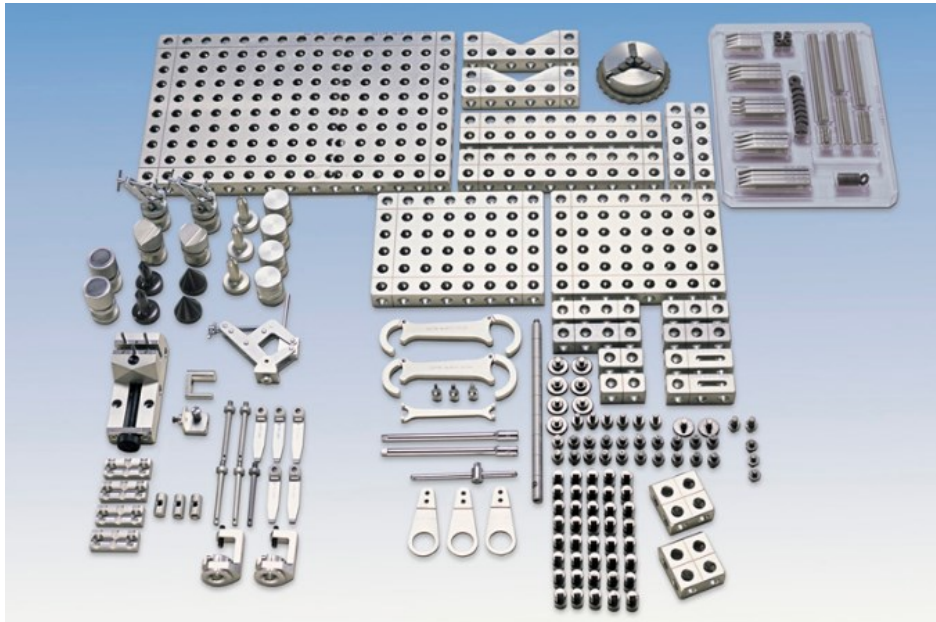
7 Simulace měření

V softwaru Calypso lze také přímo nasimulovat měření na souřadnicovém měřicím stroji. V průběhu simulace se pohybuje měřicí senzor po vytyčené trajektorii stejným způsobem a rychlostí jako v případě měření na skutečném stroji. V simulaci lze odpozorovat případné kolize měřicí sondy s měřeným dílem a předcházet tak škodám při skutečném měření.

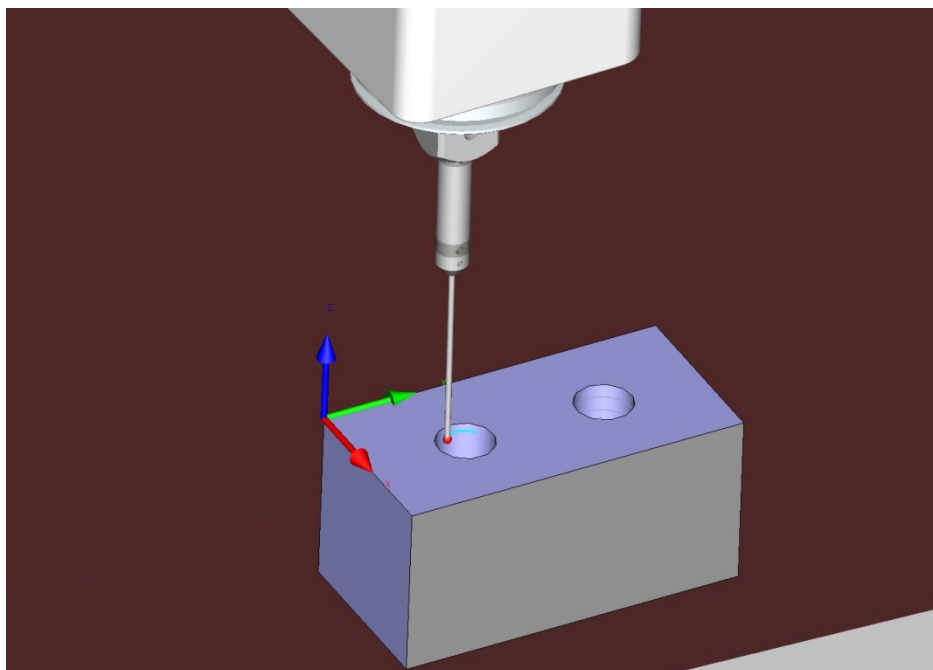


Obrázek 89 Zobrazení souřadnicového měřicího stroje v software Calypso

Při simulaci se použije již vypracovaný plán měření, jen je nutné správně polohovat díl na stroji. Při měření na skutečném stroji se dále musí vyřešit upnutí dílu. V případě simulace stačí díl posunout směrem od měřicího stolu do vzduchu. Díl se může upnout například pomocí svěráku nebo pomocí speciální upínací sady. Příklad upínací sady je na následujícím obrázku.



Obrázek 90 Základní sada upínacího systému Alufix [7]



Obrázek 91 Detail z průběhu simulace měření

8 Závěr

V první části této práce je analýza normy ČNS EN ISO 14405-1, která se zabývá tolerováním lineárních rozměrů. Tato norma mění staré chápání slova rozměr a definuje mnoho nových typů rozměrů a jejich značení na výkresech pomocí specifikátorů modifikací. Lineární rozměr už nadále není jen jednoduchou vzdáleností mezi dvěma body, ale může se jednat o průměr vypočtený z plochy nebo o nejmenší opsaný rozměr. Také může nastat situace, že dírou o určité velikosti neprojde stejně velký kalibr, ale předepsaný rozměr je dodržen. Rozměr může mít určitou chybu tvaru, které se například pomocí rozměru nejmenších čtverců určitým způsobem aproximuje. Dříve nebylo možné tak jednoduše stanovit přesný profil výrobku a norma je důsledek postupného vývoje přesného měření a především souřadnicových měřicích strojů, které jsou schopné měřit s přesností v řádu mikrometrů až desetin mikrometru.

Hlavním tématem druhé části normy je rozdíl \pm tolerování a tolerování pomocí geometrických tolerancí. V případě použití \pm tolerování může vzniknout nejednoznačnost při kontrolním měření, ale v případě použití geometrické tolerance polohy získáme jednoznačný výsledek. Kontrola je ale v případě použití geometrické tolerance mnohonásobně obtížnější a vždy je nutné zvážit všechny výhody a nevýhody obou stylů tolerování. Tři modelové případy z této normy jsou vybrány pro simulaci měření.

Při samotné simulaci měření bylo nejprve nutné vytvořit modely. Pro vytvoření se použil software Autodesk Inventor 2016 a pro simulaci měření se použil program Calypso 2017. V programu se vytvoří plán měření obdobným způsobem jako při skutečném měření. Pro lepší názornost výsledků měření bylo využito generování měřených hodnot. Jedná se o náhodně vygenerované hodnoty v rozmezí, které si lze v programu Calypso nastavit.

Z výsledků samotného měření vyplývá, že tolerování pomocí geometrických tolerancí je jednoznačné. Měřením získáme jednu konkrétní hodnotu a tu lze snadno porovnat s předepsanou tolerancí na výkrese. Při použití \pm tolerování u vzdálenosti dvou rovin získáme nekonečné množství bodů na jedné i druhé rovině a nelze jednoznačně stanovit, mezi kterými dvěma body je vzdálenost stanovena.

Pro zajištění jednoznačnosti tolerance vzdálenosti mezi dvěma integrálními prvky, integrálním a odvozeným prvkem a dvěma odvozenými prvky je vždy nutné použít tolerování pomocí geometrických tolerancí.

9 Seznam použité literatury

- [1] ČSN EN ISO 14405-1 (014115) Geometrické specifikace produktu (GPS) - Tolerování rozměrů - Část 1: Lineární rozměry, 2017, Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví
- [2] MORSE, Edward P a Vijay SRINIVASAN. Size tolerancing revisited: A basic notion and its evolution in standards. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part B: Journal of Engineering Manufacture [online]. 2013, 227(5), 662-671 [cit. 2018-07-14]. DOI: 10.1177/0954405412470418. ISSN 0954-4054. Dostupné z: <http://journals.sagepub.com/doi/10.1177/0954405412470418>
- [3] ZHAO, Zexiang, Bin LI, Guoqing ZHANG, et al. Study on the evaluation of cylinder's global sizes. Precision Engineering [online]. 2017, 49, 189-199 [cit. 2018-07-14]. DOI: 10.1016/j.precisioneng.2017.02.007. ISSN 01416359. Dostupné z: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0141635916301817>
- [4] ČSN ISO 2768-1 (014240) Všeobecné tolerance. Nepředepsané mezní úchytky délkových a úhlových rozměrů, 1989, Vydavatelství úřadu pro normalizaci a měření
- [5] ČSN EN ISO 14405-2 (014115) Geometrické specifikace produktu (GPS) - Tolerování rozměrů - Část 2: Rozměry jiné než lineární rozměry, 2012, Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví
- [6] SLANEC, Karel. Konstruování: geometrická přesnost výrobků. Praha: Vydavatelství ČVUT, 2004. ISBN 80-01-029921
- [7] Alufix Classic - Horst Witte - Hightech in Aluminium. Witte Barskamp KG - Hightech in Aluminium [online]. Copyright © 2018 Witte Barskamp KG [cit. 14.07.2018]. Dostupné z: <https://witte-barskamp.com/products/modular-fixturing-systems/alufix-classic.php>