

**FAKULTA
STROJNÍ
ČVUT V PRAZE**

Ústav technologie obrábění, projektování a metrologie

**Ověřování geometrických specifikací pomocí
souřadnicových měřicích strojů a CT**

**Verification of geometrical specifications
using coordinate measuring machines and CT**

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

2020

Dominik HORČIČKA

Studijní program: B2342 TEORETICKÝ ZÁKLAD STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ
Studijní obor: 2301R000 Studijní program je bezoborový
Vedoucí práce: Ing. Mikeš Petr, Ph.D.

I. OSOBNÍ A STUDIJNÍ ÚDAJE

Příjmení: **Horčíčka** Jméno: **Dominik** Osobní číslo: **473615**
Fakulta/ústav: **Fakulta strojní**
Zadávající 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:

Ověřování geometrických specifikací pomocí souřadnicových měřicích strojů a CT

Název bakalářské práce anglicky:

Verification of geometrical specifications using coordinate measuring machines and CT

Pokyny pro vypracování:

- 1) Vlastnosti rentgenového záření.
- 2) Princip počítačové tomografie.
- 3) Příprava plánu měření pro vybranou součást pro kontrolu na CMM a CT.
- 4) Porovnání výsledků měření CMM a CT.

Seznam doporučené literatury:

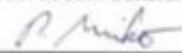
Jméno a pracoviště vedoucí(ho) bakalářské práce:

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: **30.04.2020**Termín odevzdání bakalářské práce: **31.07.2020**

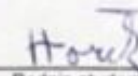
Platnost zadání bakalářské práce:


Ing. Petr Mikeš, Ph.D.
podpis vedoucí(ho) práce
Ing. Libor Beránek, Ph.D.
podpis vedoucí(ho) katedry/katedry
prof. Ing. Michael Valášek, DrSc.
podpis odborníka**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.

23.6.2020

Datum převzetí zadání


Podpis studenta

Čestné prohlášení

Prohlašuji, že jsem bakalářskou práci „Ověřování geometrických specifikací pomocí souřadnicových měřicích strojů a CT“ vypracoval samostatně pod vedením vedoucího Ing. Petra Mikeše, Ph.D. a uvedl jsem všechny použité zdroje a literaturu.

V Praze dne:

.....

Dominik Horčíčka

Poděkování

Tímto bych chtěl rád poděkovat svému vedoucímu bakalářské práce Ing. Petru Mikešovi, Ph.D., a to za cenné rady, odborné vedení, připomínky, trpělivost a čas při vypracování této bakalářské práce. Velké díky patří také Ing. Janu Šimotovi za pomoc s měřeními na CT.

Touto cestou bych rád poděkoval i své rodině, která mi byla oporou při celém bakalářském studiu.

Anotace

Bakalářská práce je zaměřena na ověření geometrických tolerancí pomocí CMM a CT. V první části je popsána historie, vznik a vlastnosti rentgenového záření a jeho aplikace ve strojírenství. V části věnované počítačové tomografii je popsána historie, konstrukce, software a firmy, které se zabývají výrobou strojů využívající rentgenové záření. Ve druhé části je popsán postup tvorby modelové úlohy a její vyhodnocení.

Klíčová slova

Rentgenové záření, počítačová tomografie, CT, souřadnicové měřicí stroje, CMM.

Annotation

The bachelor thesis is focused on the verification of geometric tolerances using CMM and CT. The first part describes the history, creation and properties of X-rays and its application in mechanical engineering. The section dedicated to computed tomography describes the history, construction, software and companies involved in the manufacture of machines using X-rays. The second part describes the process of creating a model task and its evaluation.

Key words

X-rays, computed tomography, CT, coordinate measuring machines, CMM.

Obsah

Úvod	8
1. Rentgenové záření.....	9
1.1 Historie.....	9
1.2 Vznik rentgenového záření	9
1.2.1 Rentgenka	10
1.2.2 Rentgenové záření	12
1.2.3 Vzorci.....	13
1.3 Vlastnosti rentgenového záření.....	13
2. Počítačová tomografie.....	15
2.1 Historie.....	15
2.2 Konstrukční uspořádání	16
2.2.1 Rotační osa	17
2.3 Princip počítačové tomografie.....	17
2.3.1 Software	18
2.4 Integrace strojů do výroby.....	21
2.5 Dodavatele tomografů	22
2.5.1 General Electric Company.....	22
2.5.2 Carl Zeiss	23
2.6 Software	24
3. Příprava plánu měření pro vybranou součást pro kontrolu na CMM a CT	26
3.1 Měření na CMM.....	27
3.1.1 Příprava součásti a kalibrace.....	27
3.1.2 Tvoření plánu měření.....	29
3.1.3 Elementy	31
3.1.4 Charakteristiky	33

3.2	Měření na CT.....	35
4.	Porovnání výsledků měření CMM a CT	38
	Závěr	51
	Zdroje.....	52
	Seznam obrázků.....	54
	Seznam tabulek.....	56

Úvod

Požadavky na přesnost součástek se neustále zvyšují. Dříve striktní kontroly rozměrů v leteckém průmyslu se již přenesly na většinu strojírenských oborů. Na základě těchto skutečností byla potřeba najít zařízení, která by ve strojírenství umožnila komplexní měření strojních součástí. Pro tyto potřeby byl vynalezen souřadnicový měřicí stroj (SMS), anglicky Coordinate Measuring Machine (CMM), který slouží k měření rozměrů součástí, případně ke kontrole geometrických prvků či tolerancí.

K měření se využívá několik druhů souřadnicových měřicích strojů, které umožňují převážně změření lehce dostupných ploch. Naopak pro měření těžce dostupných ploch je k dispozici například počítačová tomografie, kterou lze použít i pro zkoumání vnitřku materiálu. Prozatím se pro kontrolu součástek, na které je kladena vysoká přesnost, využívá převážně dotykové měření. Z tohoto důvodu bych chtěl zjistit, zda by počítačová tomografie také mohla sloužit pro přesnou kontrolu rozměrů s přesností stejnou nebo lepší, než má samotné dotykové měření.

Cílem práce tedy je porovnání metod dotykového souřadnicového měření a měření pomocí počítačové tomografie (Computed Tomography). Abych poukázal na rozdíl přesnosti jednotlivých technologií, zvolil jsem součástku, kterou nejprve budu měřit na souřadnicovém měřicím stroji a později pomocí počítačové tomografie. Hodnoty získané z měření budou použity pro porovnání výše zmíněných metod. Očekávaným výsledkem měření je větší přesnost souřadnicového měřicího stroje.

1. Rentgenové záření

1.1 Historie

Od roku 1879 mnoho vědců zaujala nově objevená radiační hmota nazývaná jako katodové paprsky. Jedná se o proud elektronů vyzařovaných z elektrody, které prokázal Sir William Crookes. Paprsky X (anglicky X-rays), dále rentgenové záření, byly objeveny v zimě roku 1895 Wilhelmem Conrad Röntgenem, který zkoušel vnější efekty z nově vynalezených typů vakuových trubic. V té době byl profesorem fyziky na univerzitě ve Würzburgu v Německu. Tento pokus pan Röntgen nejspíš zkoušel pouze ze zvědavosti, ale měl štěstí a koupil správné vybavení. Z tohoto důvodu si při pokusech v jeho laboratoři všiml, že obraz fluorescence platinokyanidu barnatého se objevil 6 stop daleko. Tento objev vzbudil ve světě mnoho zájmu. [1,2]

O rok později Joseph J. Thomson oznámil, že katodové paprsky jsou tvořeny částicemi nazývané elektrony a za tento objev dostal Nobelovu cenu v roce 1906. Röntgen potvrdil, že nový druh paprsků by mohl mít takový efekt a proto je nazval paprsky X, X jako neznáma. [1,2]

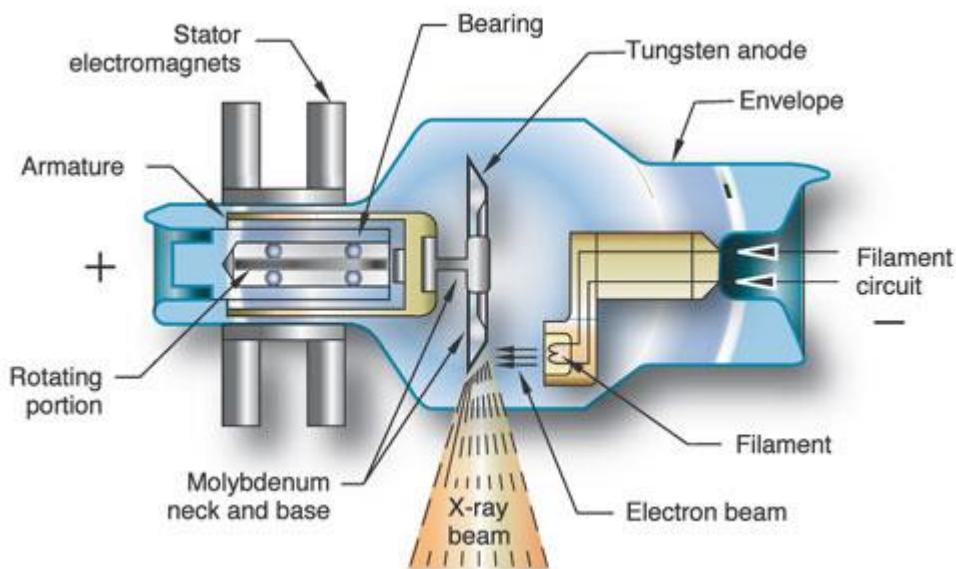
Röntgen začal sám dělat mnoho experimentálních pokusů a nikomu o nich neříkal. Například objevil, že rentgenové záření se nevychyluje magnetickým polem a dokáže pronikat skrz mnoho hmot. Při jednom pokusu uzavřel skleněnou trubici do fotografické desky a pro jeho překvapení obraz fluorescence se zvětšil. Nadále experimentoval s fotografickou deskou, přičemž se jeho ruka dostala mezi trubici a obraz fluorescence, tím uviděl kosti své ruky. Dva týdny po jeho objevu udělal kompletní snímek ruky své ženy, o kterém napsal a spustil tím po celém světě experimenty jiných vědců. [1,2]

1.2 Vznik rentgenového záření

„Rentgenové záření je ionizující elektromagnetické záření, proud fotonů, o energiích desítek až stovek keV a vlnových délkách v rozmezí 10-12 až 10-8 m (1 pm až 10 nm).“ [3]
Přirozeným zdrojem rentgenového záření jsou například hvězdy. Uměle se dá vytvořit pomocí rentgenky nebo v betatronu. [3]

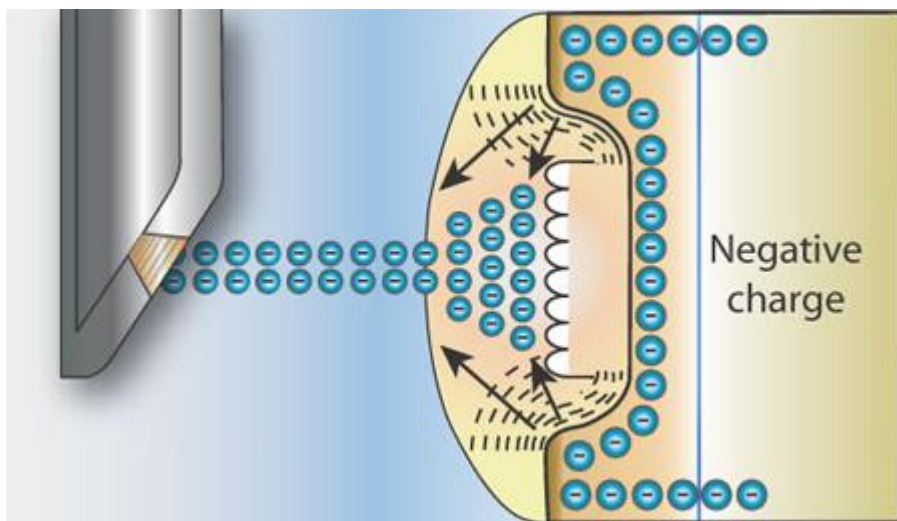
1.2.1 Rentgenka

Rentgenová lampa (rentgenka) vytváří prostředí pro produkci rentgenového záření. Je to trubice, která má uvnitř vakuum. Zdrojem elektronů je katoda, kde tyto elektrony jsou urychlovány a poté dopadají na terčik neboli anodu, čímž vzniká rentgenové záření. Hlavními komponenty rentgenky jsou katoda, anoda, rotor / stator, evakuovaná baňka (Obrázek 1). [4]



Obrázek 1 - Rentgenka [5]

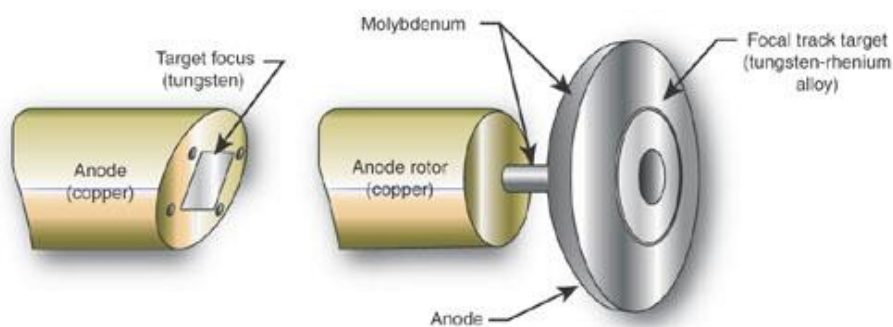
Katoda je zápornou elektrodou v rentgence, která se skládá z vlákna a zaostřovací misky. Vlákno je vyrobeno z wolframového drátu navinutého ve tvaru spirály, která je elektricky připojena k obvodu. Tento elektrický obvod poskytuje napětí přibližně až 10 V a proměnný proud až 7 A. Většina rentgenek má dvě vlákna různých délek. Jeden konec je přímo spojen se zaostřovacím pohárkem a druhý konec je elektricky izolován keramickou vložkou. Zaostřovací misky slouží k tomu, aby elektrony nedopadaly na kterékoliv místo anody (Obrázek 2). [4]



Obrázek 2 -Zaostřovací miska [5]

Anoda je kovová elektroda, která je udržována ve velkém rozdílu kladného potenciálu oproti katodě. Většina dopadajících elektronů na anodu (wolframový terčík) ukládají svojí energii jako teplo, pouze malá část je emitována jako rentgenové záření. Z tohoto důvodu musí být produkce rentgenového záření úměrná proudu trubice. Při velkých proudech musí být doba produkce omezena, aby se zabránilo zničení od vysokých teplot. Wolfram je nejvíce využívaným materiálem pro anodu, protože má vysokou teplotu tání a vysoké atomové číslo, což zvyšuje produkci fotonů rentgenového záření. [4]

Existují dva druhy anod: pevná a rotační (Obrázek 3). **Pevná anoda** se skládá z wolframové destičky, která je zastrčená v měděném bloku, což je nejjednodušší případ anody. Měď slouží pro dvě věci: slouží jednak jako upevnění pro anodu a také slouží jako efektivní odvod tepla od wolframového terčíku, nicméně malý prostor pro dopad proudu elektronů na anodu limituje velikost proudu a rentgenového záření. **Rotační anody** jsou používané více pro diagnostické účely, jelikož vydrží mnohem větší zatížení teplem. Design rotační anody rozkládá teplo po velké ploše na rozdíl od anody pevné, čímž je schopný vydržet mnohem větší proud a dobu použití. Rotační anoda je zkosený disk připevněný na rotor nesený ve vložce rentgenové trubice. Rotor se skládá z měděných desek poskládaných okolo železného středu. [4]

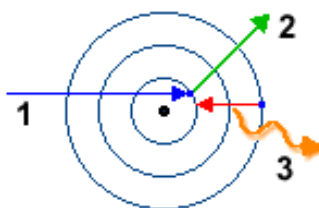


Obrázek 3 - Pevná a rotační anoda [5]

1.2.2 Rentgenové záření

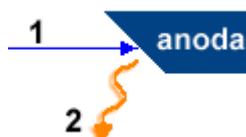
Máme dva druhy rentgenového záření vystupujícího z anody – charakteristické a brzdné.

Charakteristické záření (Obrázek 4) – „elektron (1) dopadající na anodu může vyrazit některý elektron (2) z nejvnitřnějších hladin K nebo L atomu materiálu anody. Tím vzniká neobsazené místo, které je okamžitě obsazeno jiným elektronem z vnějších hladin za vyzáření fotonu (3) rentgenového záření s energií rovnou energetickému rozdílu mezi elektronovými hladinami. Charakteristické záření má proto čárové spektrum, které je závislé na materiálu anody.“ [3]



Obrázek 4 - Charakteristické záření [3]

Brzdné záření (Obrázek 5) – „rychle letící elektrony (1) se dopadem na anodu náhle zbrzdí a jejich kinetická energie se přemění na energii fotonů (2) elektromagnetického záření. Toto záření obsahuje fotony všech vlnových délek, počínaje tzv. mezní vlnovou délkou λ_m . Spektrum brzdného záření je spojité.“ [3]



Obrázek 5 - Brzdné záření [3]

1.2.3 Vzorce

- Kinetická energie elektronu dopadající na anodu rentgenky:

$$E_k = eU \quad (1)$$

- Rychlost v elektronu, dopadajícího na anodu rentgenky:

$$v = \sqrt{\frac{2eU}{m}} \quad (2)$$

- Mezní vlnová délka L_m – nejkratší vlnová délka rentgenového záření, vznikajícího při určitém napětí mezi katodou a anodou:

$$L_m = \frac{hc}{eU} \quad (3)$$

V těchto vztazích je :

U ... napětí mezi katodou a anodou rentgenky (V)

$c = 3 \cdot 10^8$ m/s ... rychlost světla ve vakuu

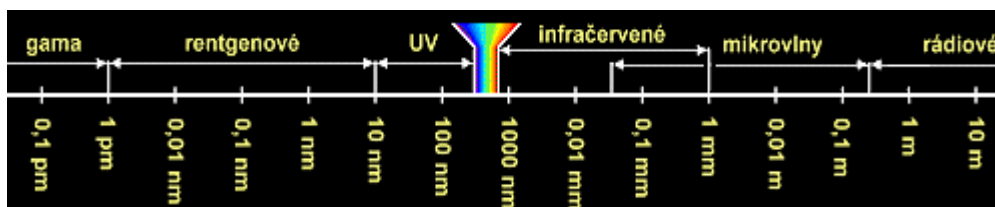
$e = -1,6 \cdot 10^{-19}$ C ... náboj elektronu

$m = 9,1 \cdot 10^{-31}$ kg ... hmotnost elektronu

$h = 6,6 \cdot 10^{-34}$ J.s ... Planckova konstanta [3]

1.3 Vlastnosti rentgenového záření

Rentgenové záření je elektromagnetické vlnění (Obrázek 6), kterými jsou i rádiové vlny, infračervené záření, viditelné světlo, ultrafialové záření a mikrovlny. Rentgenové záření má vlnovou délku v rozmezí 10^{-12} až 10^{-8} m (1 pm až 10 nm). Tím se řadí mezi vlnění s krátkou vlnovou délkou, což je příčinou odlišných vlastností oproti viditelnému světlu. [6]



Obrázek 6 - Elektromagnetické spektrum [7]

Rentgenové záření ionizuje (proces, při kterém se z elektricky neutrálního atomu nebo molekuly stávají ionty) vzduch a jiné plyny. Využíváme toho například u některých typů indikátorů rentgenového záření. [6]

Rentgenové záření je pohlcováno různými materiály, čím větší je protonové číslo atomu materiálu, tím více je schopen materiál záření pohltit. Toho využíváme například v medicíně, kde kosti (vápník) pohlcují záření více než měkké tkáně (voda). Pohlcování rentgenového záření závisí také na hloubce pohlcující vrstvy. [6]

W.C. Röntgen při zkoumání zjistil, že při ozáření fotografické desky rentgenovým zářením zčerná a velikost zčernání záleží na intenzitě dopadajícího záření. V některých látkách rentgenové záření vyvolává luminescenci. Luminescenční stínítko bylo dlouhou dobu využíváno v rentgenovém přístroji, dnes je však nahrazen digitálním zpracováním, polovodičovými detektory nebo televizním systémem. [6]

Rentgenové záření dělíme na tvrdé (velmi pronikavé) a měkké (méně pronikavé). Pronikavost záleží na velikosti napětí mezi anodou a katodou rentgenky, takzvané urychlující napětí. Pomocí rentgenového záření můžeme vyvolat v živých organismech biologické, chemické a genetické změny, toho využíváme například při ozařování zhoubných nádorů. [6]

2. Počítačová tomografie

2.1 Historie

První opravdový pokus o sestrojení funkčního CT skeneru se připisuje W. H. Oldendorfu, který vyplnil patent pro jeho systém v roce 1960. První prakticky komerce schopný model CT se objevil v roce 1968. Počáteční test CT skeneru byl proveden na válcovém *fantomu* s neprůhlednými objekty vloženými do válce při použití slabého zdroje gama. Skenování trvalo 9 dní a dalších 2,5 hodiny se vyhodnocovalo měření. Skenovací čas byl později zrychlen na 9 hodin. To se povedlo pomocí nahrazení zdroje gama za rentgenové záření. Pro vytvoření obrazu s rozlišením 80 x 80 pixelů se čekalo 20 minut. První sken mozku proběhl v nemocnici Atkinson Morley říjnu 1971. [8]

Zpočátku 70. let 20. století se CT používalo výhradně v lékařské oblasti, ale na počátku 80. let se začaly objevovat adaptace z lékařského CT na průmyslové nedestruktivní hodnocení. V roce 1984 L.A. Feldkamp, L. C. Davis a J. W. Kress z oddělení výzkumných pracovníků společnosti Ford Motor Company v Dearbornu v Michiganu (USA) představili algoritmus pro 3D snímání rotujícího objektu pomocí rentgenové záření z divergentního paprsku označovaného jako kužel. Tento algoritmus řeší problém s rekonstrukcí 3D obrazu pomocí 2D rentgenového snímku obdrženého v kuželu. Ačkoliv toto řešení je matematického původu, brzy se stalo nejvíce používaným algoritmem pro CT v industriální sféře a pro jeho jednoduchost se používá dodnes. Na začátku 21. století byl podobný algoritmus vytvořen A. Katsevichem, profesorem matematiky na univerzitě Central Florida (USA), tento algoritmus byl na principu spirálové skenovací cesty, ale bohužel se tolik nevyužívá, jelikož je k němu potřeba velmi přesná kalibrace. V letech 1990 se objevily první záznamy použití CT technologie pro metrologii a od roku 2005 řada firem začala vyrábět a prodávat CT systémy zaměřené pouze na metrologii. [8]

2.2 Konstrukční uspořádání

Počítačová tomografie v průmyslové metrologii se výrazně liší od té medicíně. Objekt je potřeba zachytit z několika úhlů pohledů. V medicíně stroj rotuje kolem člověka. V průmyslové metrologii je zas stroj navržen tak, že rentgenová jednotka je nehybná a obrobek se otáčí v dráze paprsku. Objekty zkoumané v průmyslové metrologii se velmi liší použitými parametry záření. Rovněž se liší požadavky na přesnost a rozlišení. V průmyslových aplikacích zpravidla nepředstavuje expozice zkoumaného objektu problém. To znamená, že lze použít větší intenzitu záření než v oblasti medicíny. [9]

Rentgenová tomografie využívá schopnosti rentgenového záření pronikat materiálem. Rentgenku lze považovat za téměř bodový zdroj rentgenového záření. Rentgenové záření prochází měřeným objektem, aby se dostalo k rentgenovému senzoru. Čím delší je penetrace objektu, tím méně záření uniká z objektu druhou stranou. Absorpce také záleží na typu materiálu. [9]

Při navrhování souřadnicového měřicího stroje s rentgenovým zářením, musejí být zohledněny speciální požadavky. Maximální velikost měřeného objektu a požadovaná přesnost hraje obrovskou roli. Nejvhodnější technologie a mechanika strojů musí být správně zvolena podle velikosti a materiálu měřeného dílu. Také se musí rozhodnout, zda stroj bude používán jako jednoúčelový (stroj pro jednu rodinu dílů) nebo jako flexibilní měřicí stroj pro různé druhy měření. [9]

Záření z rentgenky může být považován jako tok fotonů o různých frekvencích. Protože energie fotonu je úměrná k frekvenci, vybrané elektrické napětí rentgenky tedy ovlivňuje frekvenci a tím i energii fotonů. To je důležité při výběru rentgenky, protože určité materiály mohou být měřeny pouze s relativně malou úrovní radiační energie. Naopak ostatní materiály, mohou být penetrovány pouze s vysokou radiační energií. V praxi záleží na druhu rentgenky a využívá se maximálního napětí mezi 90 kV až 450 kV. Pro plastické části je to napětí mezi 90 kV až 130 kV. Při měření kovu je potřeba zvýšit napětí. Synchrotrony mohou generovat rentgenové paprsky s vyšší energií než energie vyprodukovaná rentgenkou, nicméně v současné době se používají pouze ve vědecké aplikaci díky jejich vysokým nákladům.

Vysokofrekvenční synchrotrony mohou být použity pro penetraci velkého kovového objektu, jako například kompletní motorový blok. [9]

Cíle rentgenky jsou klasifikovány jako odrazové terče a přenosové terče. Rozdíl při použití odrazových nebo přenosových terčů je v radiační síle, době měření a minimální velikosti paprskového bodu. V odrazovém terči (také označován jako přímý emitör) se rentgenové záření odráží od terče. Tato konstrukce poskytuje větší teplotní rozptyl a tím i vyšší sílu a kratší dobu měření. Minimální velikost ohniskového bodu, kterou lze dosáhnout pomocí odrazového terče je několik mikronů. To je dostačující pro běžné měření, jelikož měření s nižším rozlišením než 5 mikronů je zřídka nutné. [9]

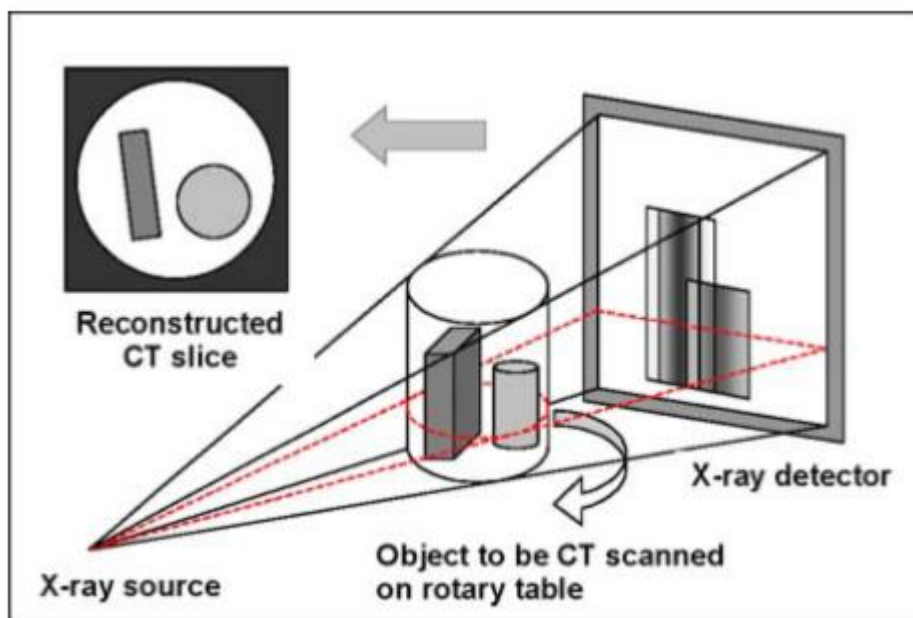
2.2.1 Rotační osa

V zásadě nezáleží na tom, zda zdroj rentgenového záření a senzor se otáčí kolem objektu nebo se měřený objekt otáčí v cestě paprsku, nicméně v metrologii má větší využití rotace objektu. Tento typ stroje může být vyroben s vysokou přesností a zároveň nízkou cenou. Vlastnosti rotační osy jako je spektrální házení, axiální házení a chyba indexu přímo ovlivňuje měření. Například odchylka v úhlu měření jedné obloukové sekundy v poloměru 200 mm, způsobuje chybu asi 1 μm . Nicméně z tohoto nelze odvodit závěr chyb, je nutno zahrnout mnoho ostatních faktorů. [9]

2.3 Princip počítačové tomografie

Viditelný kontrast v CT je vytvářen rentgenovým zářením pomocí absorpce materiálu, proto je funkcí lokální hustoty elektronů studovaného objektu. Hlavními aspekty zájmu průmyslové aplikace CT skeneru je nedestruktivní analýza poruch jako jsou praskliny, trhliny, smrštění a složení materiálu uvnitř objemu. Uživatelé stále více chtějí měřit vnitřní a vnější geometrické prvky s největší přesností. [10]

Měřicí řetězec průmyslového CT začíná zdrojem, kde jsou rentgenové paprsky emitovány buď trubicemi s definovanými ohniskovými body nebo lineárními urychlovači. Objekt, který má být skenován, je umístěn na otočném stole. V závislosti na tom, zda se používá detektor linií 1D nebo oblast 2D jsou CT skenery schopny měřit 2D nebo 3D informace s jednou otáčkou součásti (Obrázek 7). [10]



Obrázek 7 - Princip CT skeneru pomocí 2D detektoru [10]

Vzhledem ke složitosti prozatím nebyly stanoveny nejistoty měření CT skeneru. Doposud byly aspekty rozlišení a opakovatelnosti studovány a stanoveny standardy. Jedním limitem pro prostorové rozlišení v CT je velikost a tvar rentgenového ostření. Pro rentgenku se minimální velikost zaostření zvyšuje s výkonem a napětím trubice. Pro větší části musí být použity trubice o velkém napětí. Dosažitelné rozlišení se proto snižuje s velikostí kontrolovaného objektu. Typické parametry rozlišení je 250 pm s trubicí 450 kV pro hliníkový předmět do 150 mm a 10 pm s 225 kV mikroskopickou zaostřovací trubicí pro hliníkový předmět 10 mm. Veličina ovlivňující nejistotu měření je také relativní vzdálenost zdroje od objektu a od detektoru. Pro rozměrová měření musí být poté provedena detekce bodu povrchu pomocí identifikace hran uvnitř *voxelu*. K tomuto účelu se používají algoritmy podobné těm, které se používají pro zpracování obrazu. [10]

2.3.1 Software

Na rozdíl od technického vybavení výpočetního tomografu má software podstatnou roli. Hlavně pro rekonstrukci objemného modelu z obdržených 2D snímků. Rekonstrukce se obvykle provádí pomocí matematické metody vyvinutou J. Radonem v roce 1917 nazývanou jako *Filtrovaná zpětné projekce*, která je založena na *Lineární Integrální Transformaci*. Model

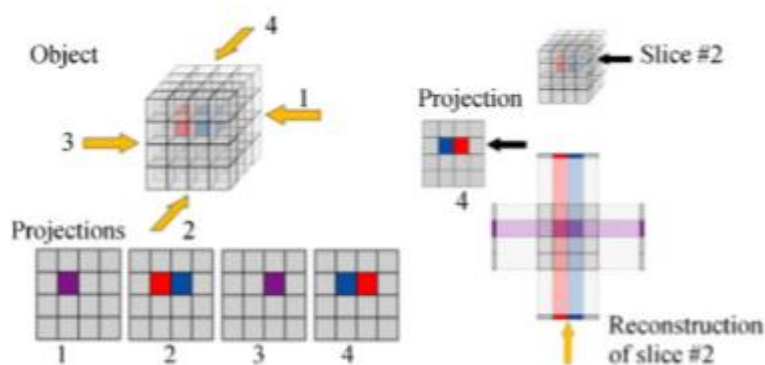
popisuje absorpci rentgenového záření při průchodu médiem s měnícím se lineárním koeficientem μ :

$$I = I_0 \exp[-\int \mu(x) dx], \quad (4)$$

který se vrací k Beer-Lambertově pravidlu vyjadřující exponenciální útlum elektromagnetické radiace s počáteční intenzitou I_0 cestující vzdálenost x v absorbujícím médiu μ :

$$I(x) = I_0 e^{-\mu x} \quad (5)$$

Ve výpočetním tomografu, μ se také s energií rentgenového fotonu mění v souladu s absorpčním spektrem materiálu. [11]

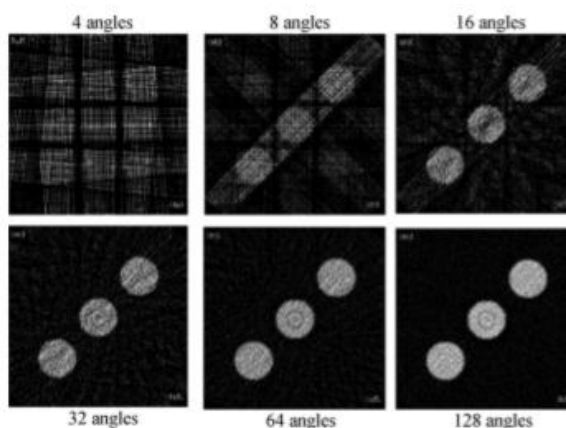


Obrázek 8 - Příklad rekonstrukce zpětné projekce [11]

Vstupem pro rekonstrukci modelu je *profil šedého objemu* (Obrázek 7) představující evoluci intenzity záření podél pixelů nacházejících se na linii detektoru. Obrázek 8 zobrazuje princip zpětné projekce pro objekt, který má 2 voxely rozdílných útlumů. Zbytek objemu (na Obrázek 8, kostka 4x4x4 voxelů) je naplněna vzduchem. Na tomto příkladu rekonstrukce je vyprojektována kostka z 0°, 90°, 180° a 270°. [11]

Rekonstrukce by měla počítat s tím, že voxely nezůstanou ve stejné projekční horizontální rovině při použití kuželovitého zdroje a rotaci objektu. Rekonstrukce je pak na základě *Feldkamp* algoritmu. Tato rekonstrukce je velmi citlivá na vodorovné vychýlení zdroje, ose otáčení a detektoru. Vyžaduje pravidelnou kalibraci (např. použití vysoce pohlcující wolframový drát) a odpovídající korekci chyb. [11]

Obrázek 9 zobrazuje výsledek rekonstrukce při skenování tří koulí pomocí rostoucího počtu úhlových pozic (od 4 do 128). Při rekonstrukci pomocí čtyř úhlu je velmi neurčitá a vypadá spíše jako byl změřen spíše čtvercový objekt 3x3. Jak se počet pozic rozšiřuje, rekonstrukce se stává přesnějším a končí přesným obrázkem tří koulí. [11]



Obrázek 9 - Více úhlu zlepšuje přesnost rekonstrukce, ale zvýší měřicí čas [11]

Toto vysvětlení objasňuje, že měření a rekonstrukce je ovlivněno velikostí pixelů, počtem pixelů v každém profilu šedého objemu (počet pixelů v rovině X,Y pro detektor linie), počtem úhlových poloh (počet úhlů, ve kterém jsou snímky pořizovány) a *binningem* („slévání“ pixelů). [11]

3D rekonstrukce se uskutečňuje pomocí detekce hran (povrchu) nebo segmentace určující příslušná rozhraní mezi pevným materiálem a okolním vzduchem nebo mezi různými pevnými materiály. Detekce okrajů převádí 3D voxely do 3D povrchových dat. Existuje několik různých metod jak identifikovat hrany materiálu: přiřazení odstínu šedé barvy ke hraničním voxelům, interpolací mezi hodnotami šedých voxelů, hledání maximální šedé derivační hodnoty, střední hodnota šedé mezi světlým vzduchovým voxelem a tmavým voxelem materiálu, lokální adaptivní šedý práh. [11]

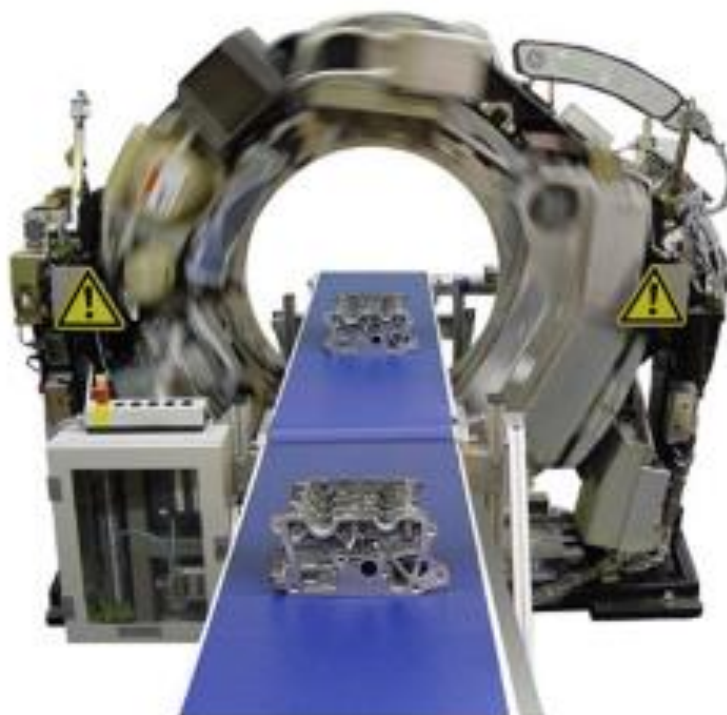
Zatímco 3D rekonstrukční software je používán ve všech CT systémech, CT systémy pro metrologii vyžadují další přídavné specifické funkce pro extrahování geometrických prvků (roviny, koule atd.) a výpočtu geometrických dat (poloha, orientace, rozměr, délka, průměr, úhel, chyby tvaru, měření nejistot atd.). Metrografie často vyžaduje různé kroky pro zpracování dat geometrických prvků a CAD modelu, na kterém lze provádět měření. Software by měl podporovat většinu měřicích úloh dostupných na tradičních souřadnicových měřicích strojích. [11]

2.4 Integrace strojů do výroby

Bylo potřeba integrovat stroje s počítačovou tomografií do linkové výroby vzhledem k potřebě rychlého automatického měření. Tato integrace se často nazývá jako **INLINE CT**. Dříve probíhala kontrola součástí pouze namátkově nebo za účelem porozumět problematice, avšak měření bylo časově náročné a drahé. Dnes je potřeba kontrolu urychlit, aby se mohlo zkontrolovat co nejvíce součástek. [12,13]

Klasická metoda nezaručuje, že všechny díly, které jsou dodávány zákazníkům, jsou bezproblémové. Kontrola probíhá pouze namátkově, tudíž nejsou všechny součástky měřeny. Všechny měřené součástky mohou projít kontrolou, ale i tak nelze zaručit 100% správnost celé výroby. Inline CT však kontroluje celou produkci, a tím je zaručeno zákazníkům, že se k nim dostanou pouze bezzávadné výrobky. [12,13]

Inline CT nám zaručuje zkrácení doby manipulace s výrobkem, pomocí nahrazení lidské ruky např. pásovým dopravníkem nebo robotem. U prvního případu projíždí výrobek skrz tomograf (Obrázek 10). U druhého případu je použit pásový dopravník k transportování dílu na místo, kde robot díl uchopí a následně po změření vyndá (Obrázek 11). Podle konstrukce tomografu se liší řešení pro podávání součástek. [12,13]



Obrázek 10 - Inline CT výrobky projíždí skrz [13]



Obrázek 11 - Inline CT pomocí robota [12]

2.5 Dodavatele tomografů

Společnosti, které se zabývají výrobou a vývojem počítačových tomografů je velké množství. V práci jsou však zmíněny pouze některé z nich. Zmínil jsem nejvýznamnější společnosti současnosti, které dle mého uvážení mají největší přínos pro strojírenskou metrologii a její vývoj. Někteří dodavatelé rovněž vyrábějí lékařské tomografy.

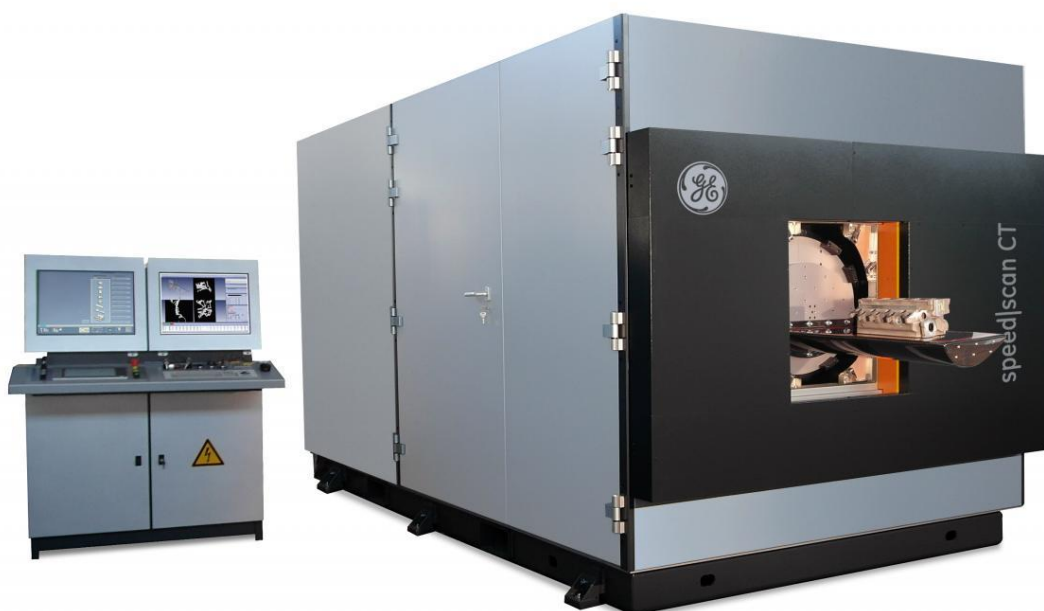
2.5.1 General Electric Company

GE Measurement & Control pokračuje v bohatém dědictví vůdcovství a inovací jako člen rodiny společnosti GE. Společnost GE byla založena v roce 1878 Thomasem Edisonem jako společnost Edison Electric CO. a je celosvětově uznávaná pro dokonalost, inovace a služby pokrývající širokou škálu průmyslových odvětví. [14]

GE measurement & Control se zaměřují na mnoho druhů industriálních aplikací zahrnující nedestruktivní testování (NDT), snímání, monitorování stavu aktiv, kontrol,

instrumentace a měření radiace. Nastavují nejlepší postupy pro dnešek a neustále hledají řešení pro zítřek. [14]

GE vyrábí tomografy s možností dvou konstrukcí. Tomografy se statickým detektorem a zdrojem záření, zatímco mají rotační stůl. Druhá varianta provedení je s rotujícím zdrojem záření a detektorem, přičemž měřená součást je položena na nepohyblivý stůl (Obrázek 12). [15]



Obrázek 12 - GE speed|scan CT 64 [15]

2.5.2 Carl Zeiss

ZEISS Industrial Metrology je lídrem v CNC souřadnicových měřicích strojích a kompletních řešeních pro multidimenzionální metrologii. Společnost je uznávaným partnerem automobilového průmyslu a jeho dodavatelů. [16]

Součástí nabídky jsou můstkové, horizontální a inline měřicí stroje. Všechny příslušné moduly jako jsou regulátory, software a senzory, jsou vyvíjeny interně. Poslední nový vývoj zahrnuje systém pro měření extrémně malých dílů a počítačový tomograf pro zajištění průmyslové kvality (Obrázek 13). V rámci spolupráce s Fakultou strojní ČVUT v Praze bylo

vybudováno metrologické centrum vybavené souřadnicovou měřicí technikou od této společnosti. [16]



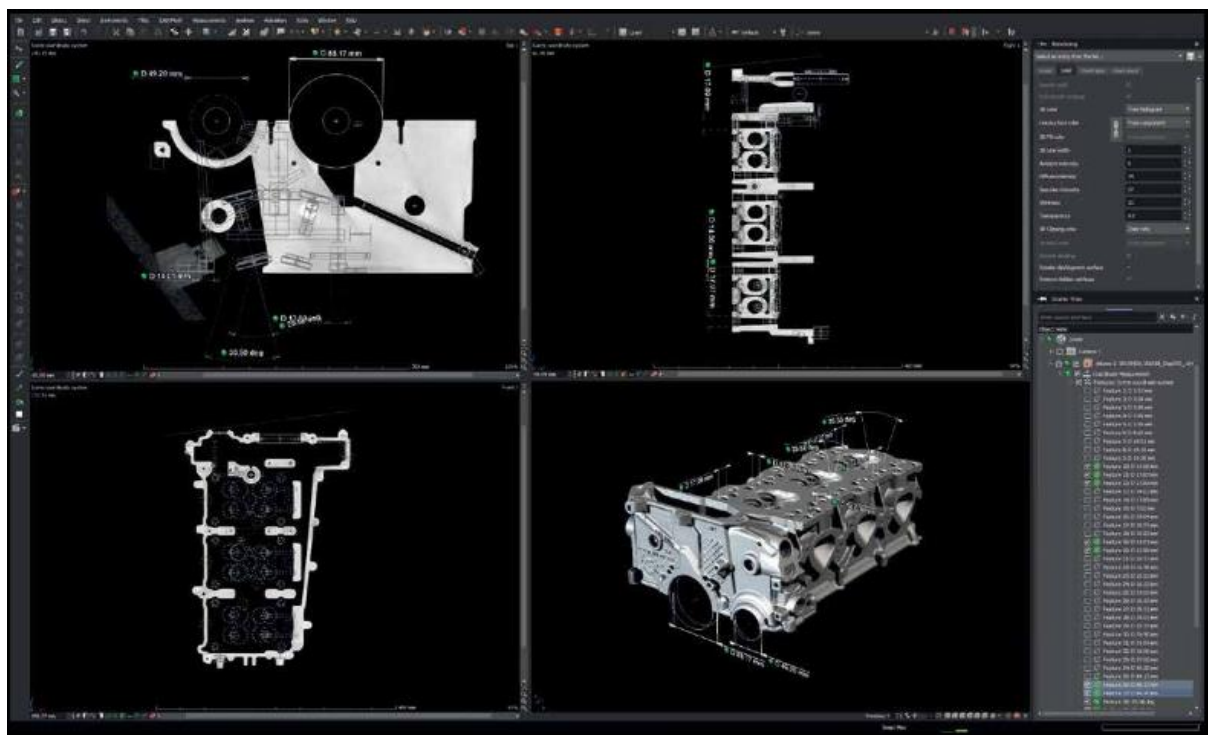
Obrázek 13 - CT od Zeiss Metrotom 800 225 kV [16]

Počítačovou tomografií do metrologie se zabývá mnoho společností jako jsou již zmiňované Carl Zeiss a General Electric, tak i například Werth Masstechnik, Siemens, Nikon Metrology, NanoFocus Ray a mnoho dalších.

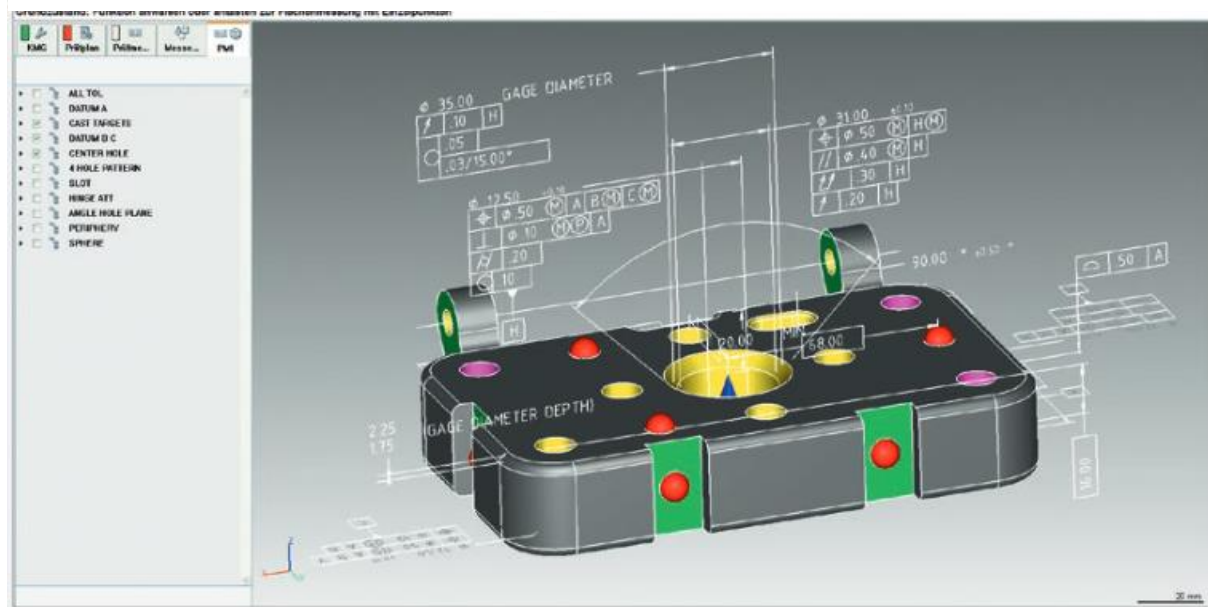
2.6 Software

Slouží k analýze získaných bodů z tomografií. Máme dva typy softwarů. Prvním typem jsou softwary, které od svého počátku byly navrženy tak, aby pracovaly s velkým množstvím bodů. Od společnosti Volume Graphics je to například software VGStudio MAX (Obrázek 14). Druhým typem jsou softwary, které byly navrženy pro práci jen s pár body, a až postupným vývojem se software přizpůsobil pro práci s velkým množstvím bodů. Tento software je zejména používán pro měření GPS (Geometrical Product Specifications). Od společnosti Carl

Zeiss je to například jejich software Calypso (Obrázek 15). V dnešní době se oba typy softwarů podobají.



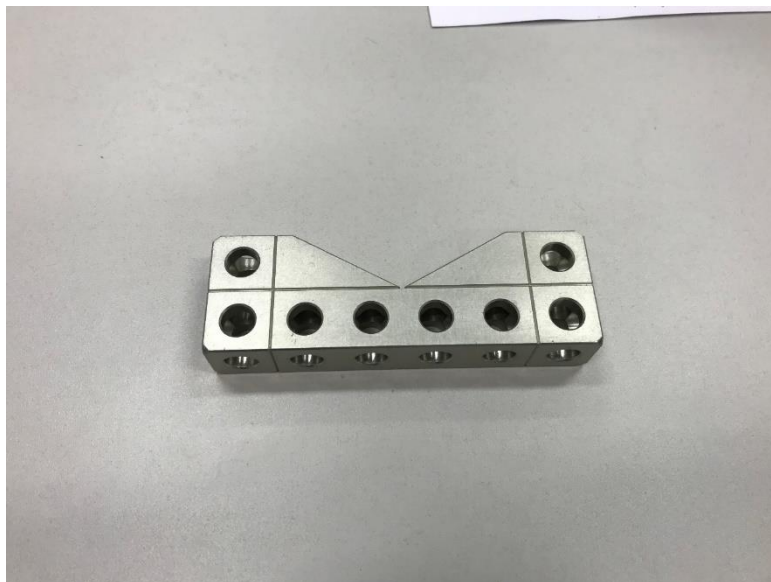
Obrázek 14 - Ukázka softwaru VGStudio Max [17]



Obrázek 15 - Ukázka softwaru Calypso [18]

3. Příprava plánu měření pro vybranou součást pro kontrolu na CMM a CT

Součást bude měřena i na CT, z tohoto důvodu byl vybrán díl z hliníku, který je snadno prozářitelný rentgenovým zářením. Pro měření byl vybrán díl z modulárního upínacího systému Alufix (Obrázek 16), na kterém lze ověřit velké množství geometrických charakteristik.

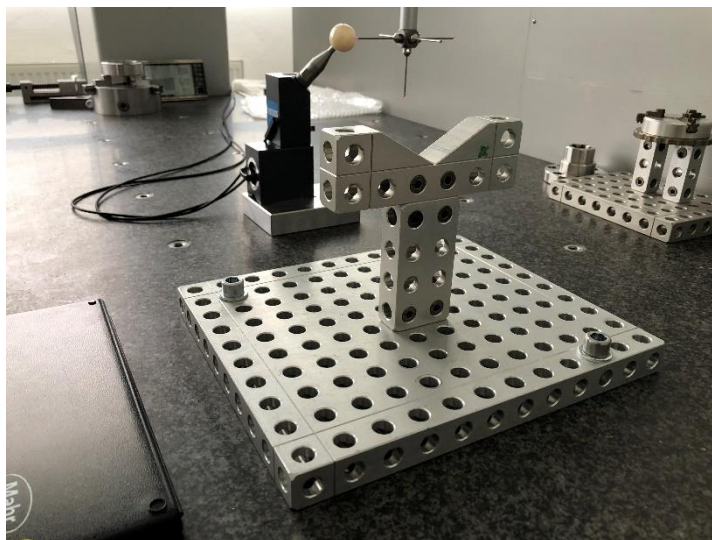


Obrázek 16 - Alufix VB120°STD

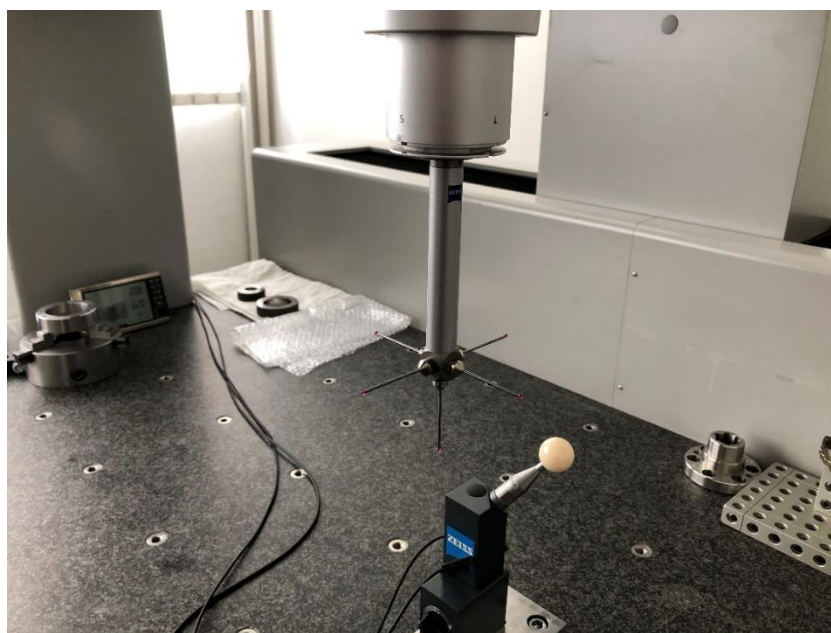
Pro tuto součást byl vytvořen model v Inventoru a následně technický výkres. Na tomto výkresu (Obrázek 17) byly vytvořeny geometrické tolerance, které budou prověřeny v softwaru Calypso. Veškeré geometrické tolerance byly vytvořeny pouze pro porovnání metod měření a nesplňují funkční vlastnosti měřeného dílce.

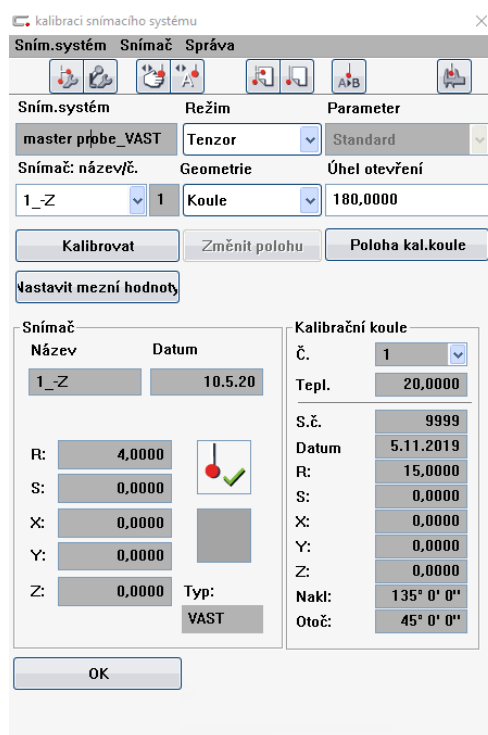


-27-

*Obrázek 18 - Upnutí součásti na CMM*

Před začátkem celého procesu měření byl zkalibrován (správná terminologie kvalifikace) snímací systém pomocí referenčního snímače „MasterProbe“, kterým byla zaměřena poloha kalibrační koule (Obrázek 19). Po zaměření polohy byl referenční snímací systém vyměněn za mnou sestavený snímací systém ve tvaru hvězdice (Obrázek 19) a na něm byla provedena kalibrace všech pěti snímačů. Do kalibrační koule bylo najžděno ve směru dříku snímače. Při kalibraci byla hlídána hodnota směrodatné odchylky s : (Obrázek 20), která by měla být co nejmenší (u tohoto stroje nejlépe v rozmezí 0,0000-0,0003).

*Obrázek 19 - Snímací systém a kalibrační koule*

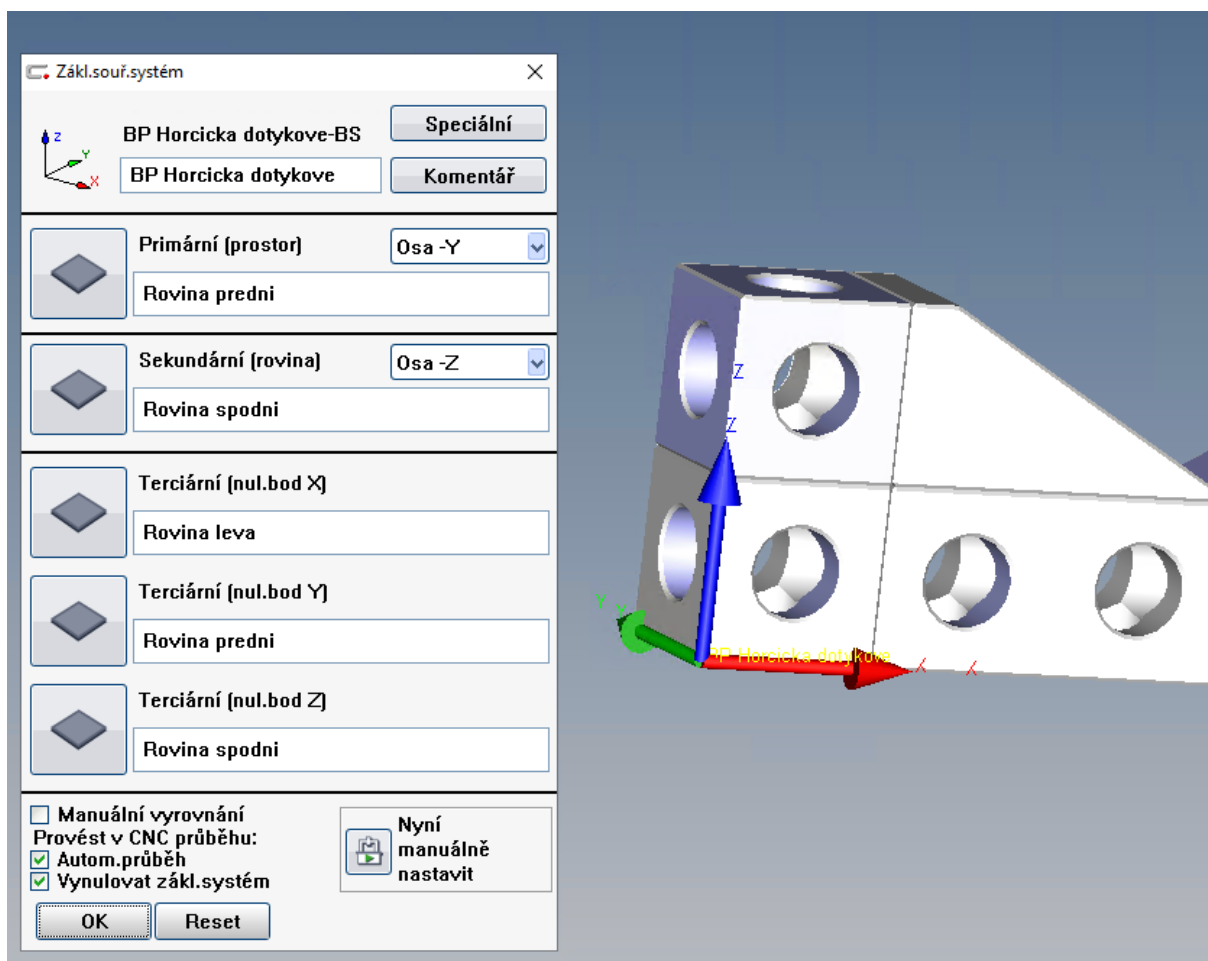


Obrázek 20 - kalibrace snímacího systému

3.1.2 Tvoření plánu měření

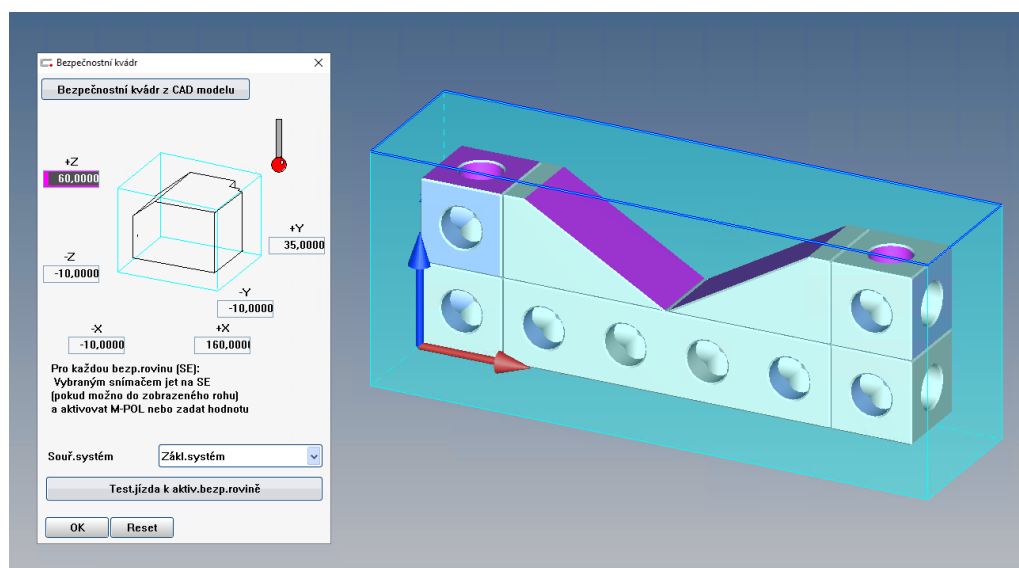
V dalším kroku bylo provedeno nastavení základního souřadnicového systému, bezpečnostního kvádru, teplotní kompenzace. Zároveň byl také do softwaru Calypso nahrán CAD model součásti.

Pro definování základního souřadnicového systému dle standardní metody se musí vytvořit rovina, přímka a bod v elementech pro definování počátku. Pro vyrovnání mé součásti byly vytvořeny tři roviny – přední, spodní a levá (Obrázek 21). Tyto elementy byly ručně naměřeny, aby proběhlo kompletní vyrovnání. Pomocí nastavení na Obrázku 21 byl určen počátek souřadnicového systému v levé spodní části dílce.



Obrázek 21 - Nastavení základního souřadnicového systému

Jelikož byl vytvořen CAD model, tak nastavení bezpečnostního kvádru proběhlo pomocí funkce „Bezpečnostní kvádr z CAD modelu“, které lze vidět na Obrázku 22.

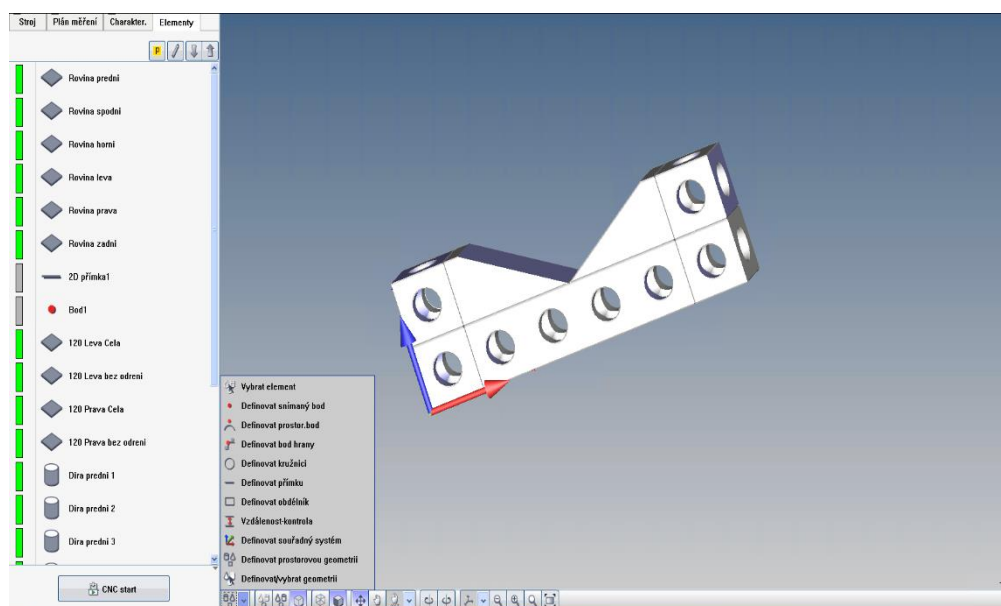


Obrázek 22 - Nastavení bezpečnostního kvádru

Nastavení teplotní kompenzace bylo provedeno pomocí dvou senzorů připevněných k součásti. Do softwaru byl zadán koeficient tepelné délkové roztažnosti, která je pro hliník $24 \frac{10^{-6}}{K}$ při 20°C. Tím stroj počítal teplotní kompenzaci.

3.1.3 Elementy

Pro vytvoření elementu z CAD modelu bylo využíváno funkce v dolní liště calypsa (Obrázek 23), která se nazývá „výběr nebo vytvoření geometrie z CAD modelu.“ Bylo využíváno hlavně podfunkce „definovat prostorovou geometrii.“

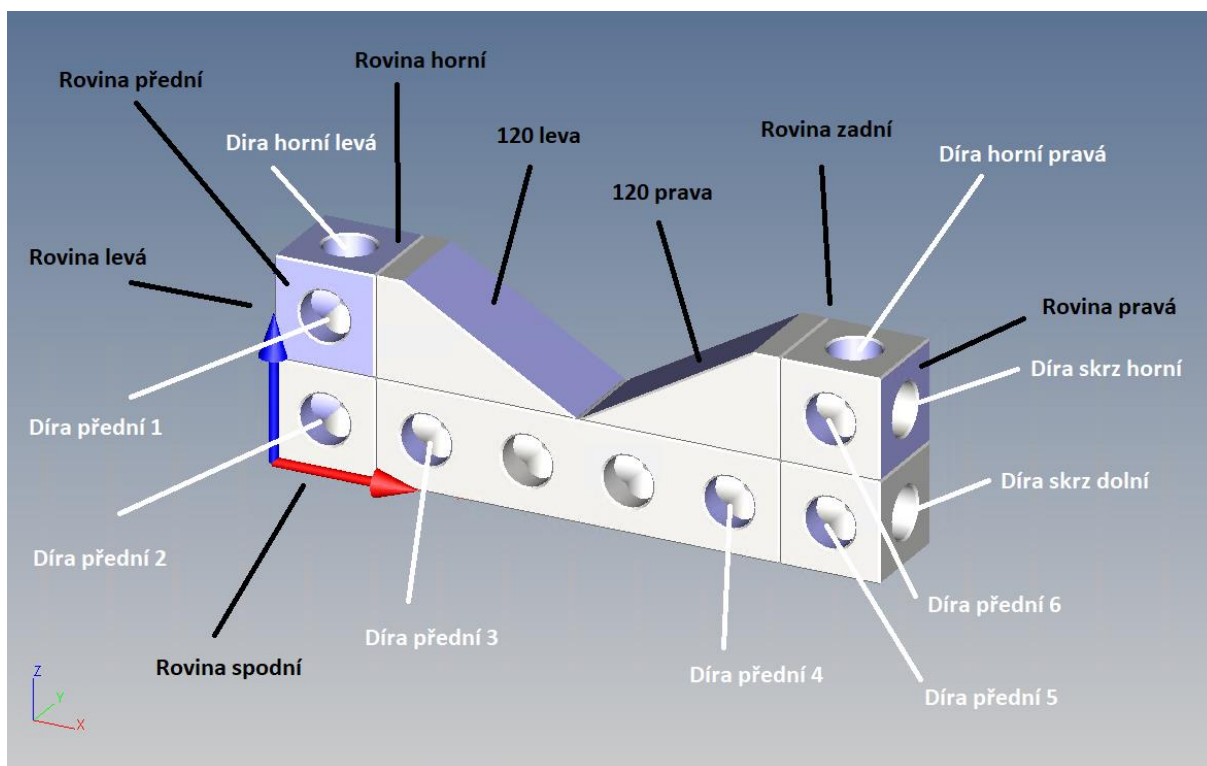


Obrázek 23 - Vytváření elementu z CAD modelu

Na součásti bylo vytvořeno tolik elementů, kolik byla potřeba pro vyhodnocení všech rozměrů a geometrických tolerancí z výkresu. Pro kompletní zhodnocení všech charakteristik bylo vytvořeno 20 různých elementů (Obrázek 24).

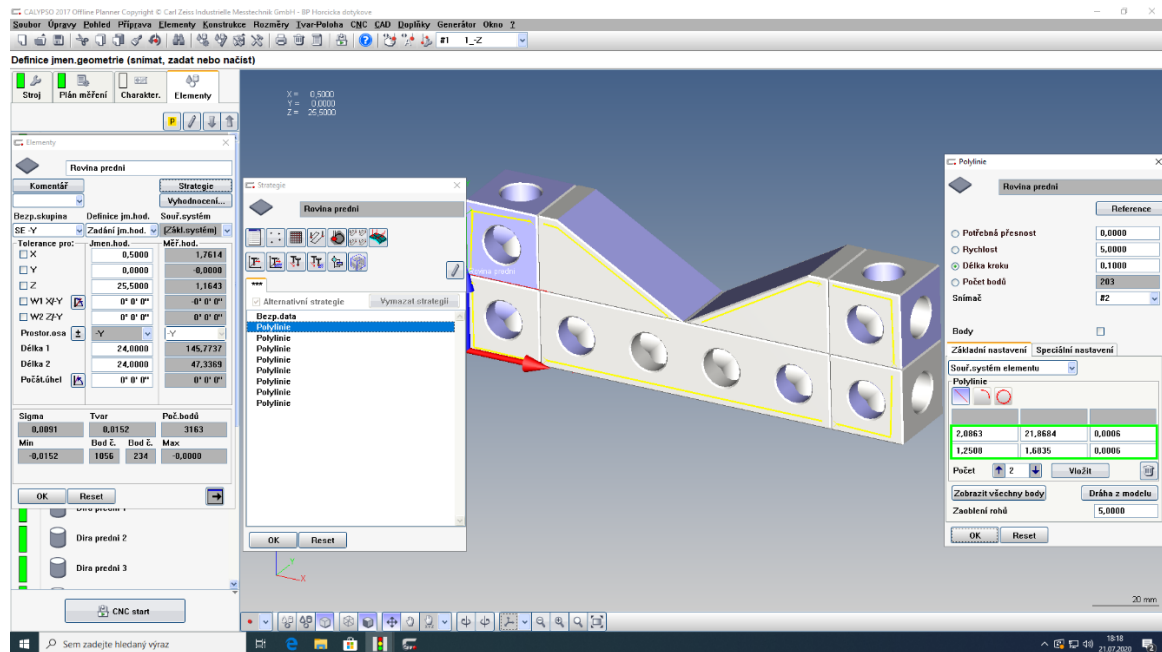
Na straně prisma (úhel $V = 120^\circ$), bylo značné poškození (poškrábání od upínání součástek). Z tohoto důvodu byly tyto roviny měřeny dvakrát. Jednou se měřila celá rovina i s poškozením a podruhé se snímač vyhnul poškození, aby bylo zabráněno nepřesnostem při vyhodnocení.

Pro všechny elementy byla ve funkci vyhodnocení zapnuta filtrace (typ filtru: Spline nízkopásmový o vlnové délce 2,5 mm). U rovin byla zvolena metoda vyhodnocení „Element-vnější tangenciální“ a pro díry metoda „Element-vepsaný.“



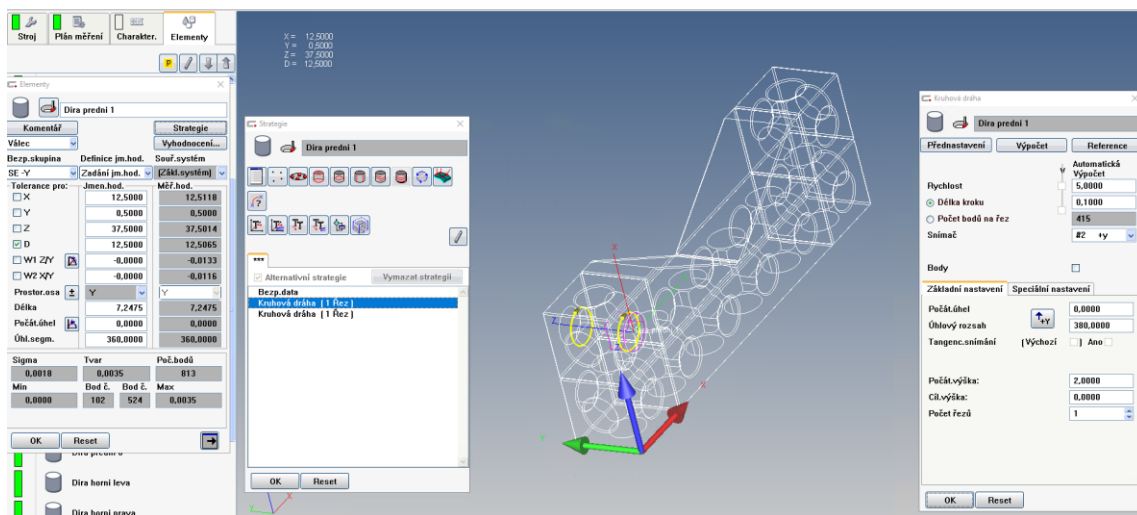
Obrázek 24 - Seznam elementů

U všech rovin byla použita strategie „polylinie“ (Obrázek 25). V této strategii byla definována dráha stroje tak, aby se snímač vyhnul vybraní na součásti. Na obrázku 26 je ukázka nastavení polylinie pro přední rovinu. Toto nastavení bylo aplikováno i pro všechny ostatní roviny. Rychlost pohybu snímacího systému při měření byla zvolena 5 mm/s a délka kroku 0,1 mm, z toho byl vypočítán počet měřených bodů pro danou polylinii.



Obrázek 25 - Strategie rovin

U děr byla použita strategie „kruhová dráha“ (Obrázek 26). Rychlost snímacího systému byla opět zvolena 5 mm/s a délka kroku 0,1, z toho byl vypočítán počet měřených bodů pro zvolenou strategii. V závislosti na délce jednotlivých válcových děr byl volen počet kruhových drah.



Obrázek 26 - Strategie děr

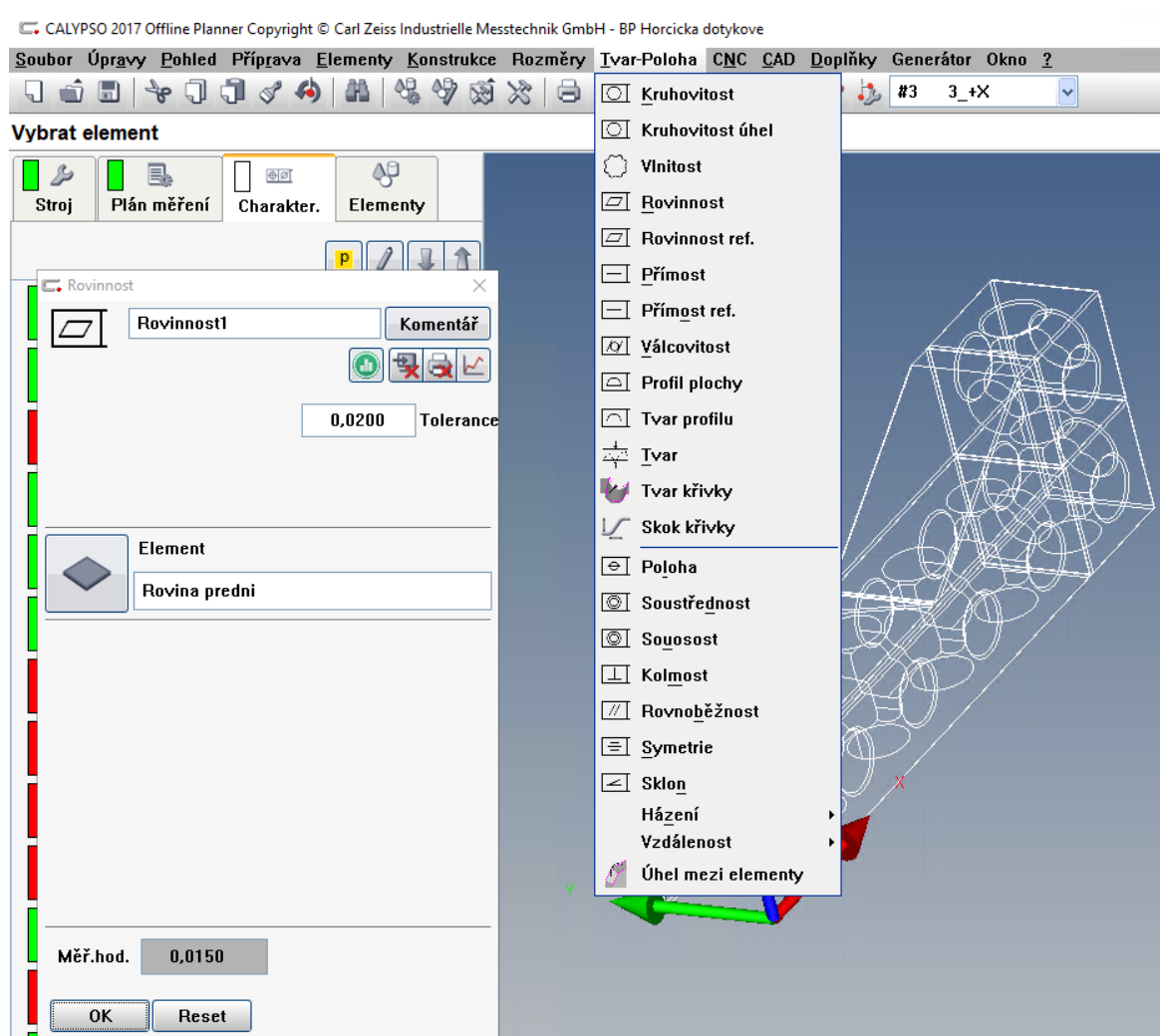
3.1.4 Charakteristiky

Po vytvoření všech potřebných elementů byly vytvořeny charakteristiky podle výkresu na Obrázku 17. Jednalo se především o geometrické tolerance tvaru (např. rovinnost a

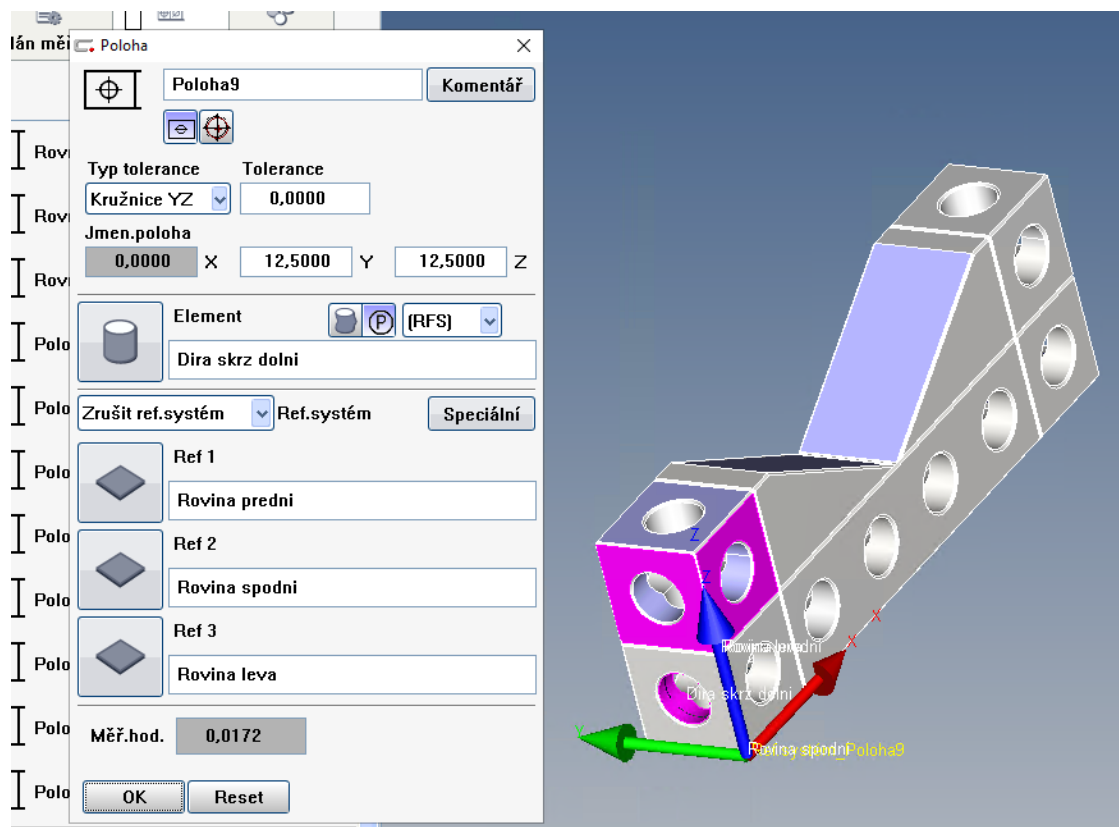
válcovitost), směru (např. rovnoběžnost, kolmost a sklon), polohy (např. umístění) a průměru děr.

U průměru děr 12,5 mm je třída přesnosti H7, tudíž byla vytvořena funkce „Průměr děr“ a ve funkci byl vybrán kontrolovaný element a nastavena třída přesnosti H7.

Všechny geometrické tolerance nalezneme v Calypsu pod funkcí „Tvar-Poloha“ (Obrázek 27). Geometrické tolerance tvaru fungují na stejném principu jako funkce „průměr děr.“ Tudíž byla vybrána požadovaná geometrická tolerance tvaru (na Obrázku 27 rovinnost) a k tomu vybrán element, pro který byla geometrická tolerance předepsána. Do kolonky tolerance byla doplněna hodnota z výkresu. U geometrických tolerancí směru a polohy byly ke kontrolovanému elementu vybrány referenční elementy neboli základny geometrických tolerancí (Obrázek 28).



Obrázek 27 - Tvar-Poloha a rovinnost



Obrázek 28 - Ukázka charakteristiky poloha

Po vytvoření všech charakteristik byly v CNC režimu naměřeny hodnoty a vytvořen protokol, který posloužil k porovnání výsledku.

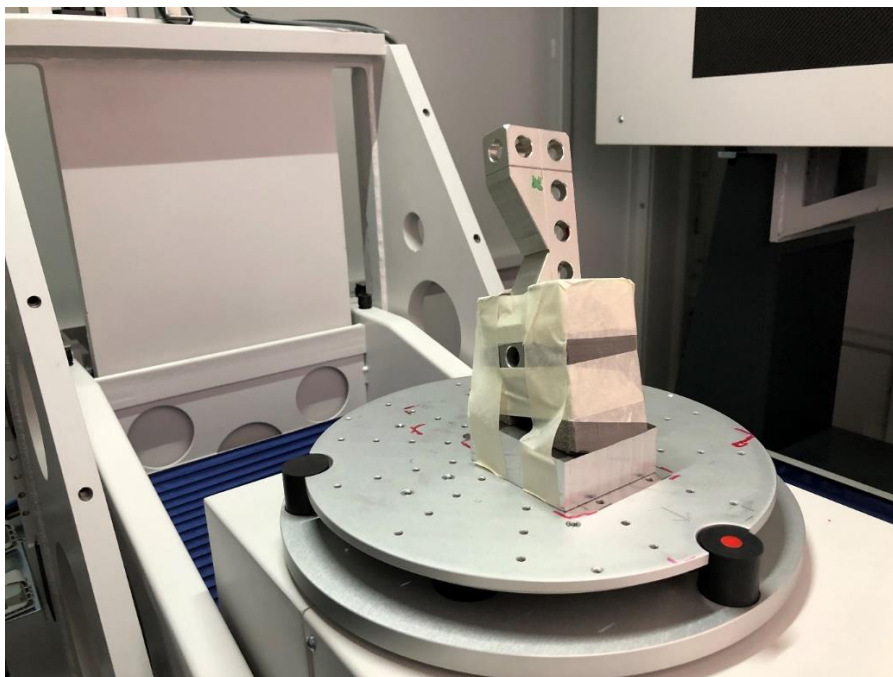
3.2 Měření na CT

Měření proběhlo na CT Metrotom 1500 od firmy Zeiss s MPE 4,5 + L/50, maximálním napětím 225kV a silou 500W.

Pro měření na CT bylo v plánu změřit součást dvakrát. Jednou bylo měření uděláno tak, aby součást byla ve větší vzdálenosti od zdroje ($x=620$), ale změřena celá za cenu horšího rozlišení. Druhé měření bylo provedeno tak, že součást byla blíže ke zdroji ($x=400$) a musela se změřit na tři skeny. Jednotlivé skeny byly v softwaru později spojeny do jednoho. Tímto způsobem bylo zajištěno lepší rozlišení. Při měření tímto způsobem bylo potřeba počítat s tím, že data budou několikrát větší než z prvního měření (v mém případě 3,5x větší).

Při vyhodnocení prvního měření bylo zjištěno, že díra stejného průměru měla chybu tvaru mezi 0,03-0,18 mm. Později bylo zjištěno, že chyba nastala z nedostatečného upnutí

součásti ve stroji a součást se při rotaci stolu chvěla. Proto byl vytvořen přípravek pro součást, který je na Obrázku 29.

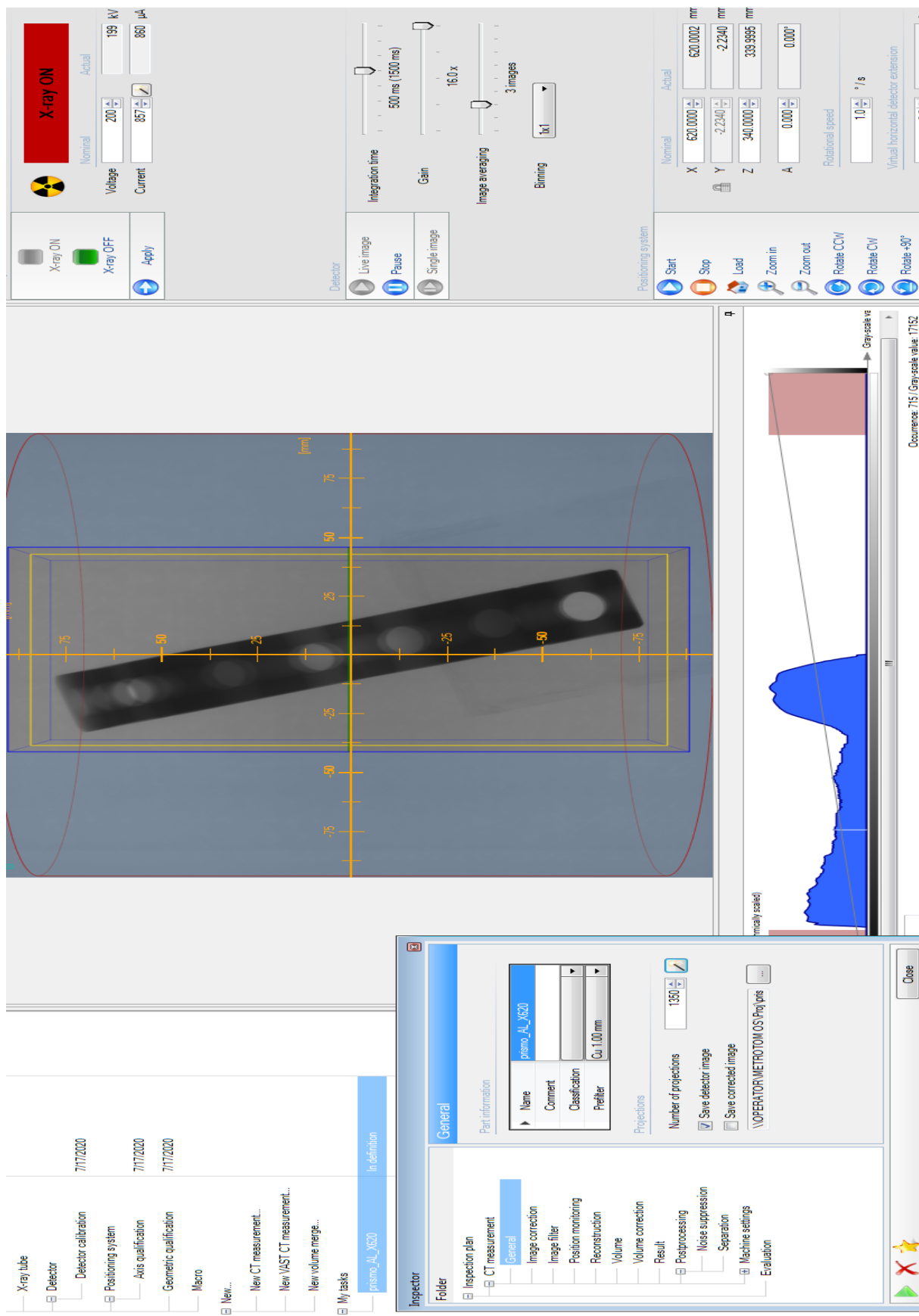


Obrázek 29 - Součást v přípravku na otočném stole

Po vložení součásti do stroje bylo CT nastaveno pro dané měření. Při nastavení byla potřeba brát ohled na materiál a maximální délku, kterou je potřeba prozářit. Nastavení lze vidět na Obrázku 30, které probíhalo podle příručky ke stroji. Nejprve bylo určeno napětí stroje podle materiálu a délky. Z tohoto byl přepočítán proud. Dalším krokem bylo nastavení integračního času, ISO a průměr snímku tak, aby histogram nebyl v červených částech. Ve střední části Obrázku 30 je vidět součást již prozářená, z tohoto pohledu byla potřeba nastavit rámečky tak, aby při rotaci na otočném stole se neuřízl roh součásti. Stejný postup se opakoval i při nastavení druhého měření. Jen vzdálenost osy x byla menší a v záběru jednoho měření byla jen část součásti.

Pro měření byly nastaveny hodnoty:

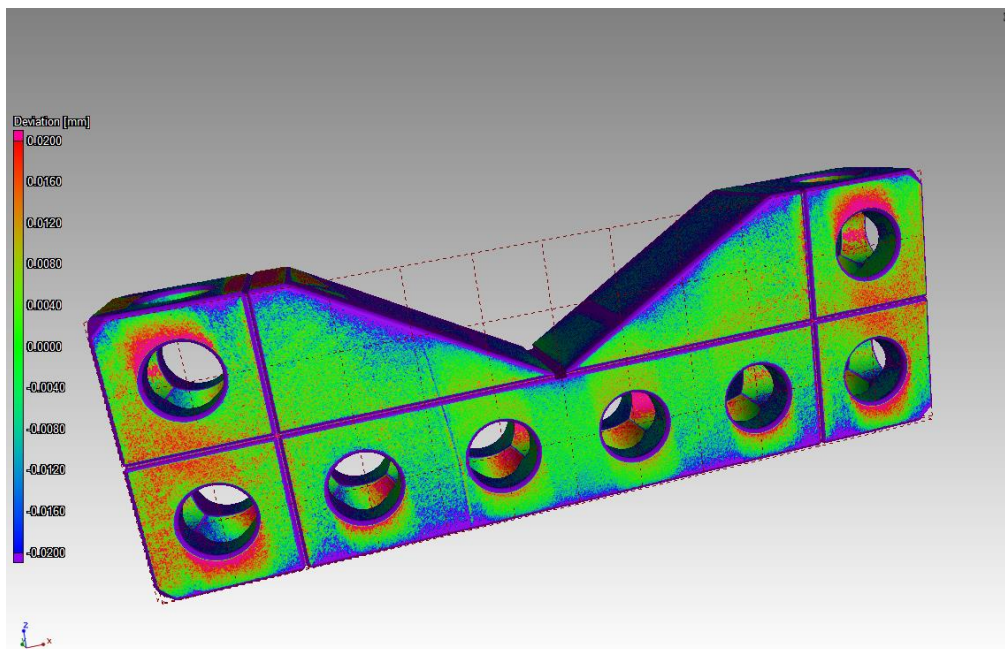
- Napětí stroje = 200 V
- Proud = 857 A
- Integrační čas = 500 ms,
- ISO = 16x
- průměr snímků = 3



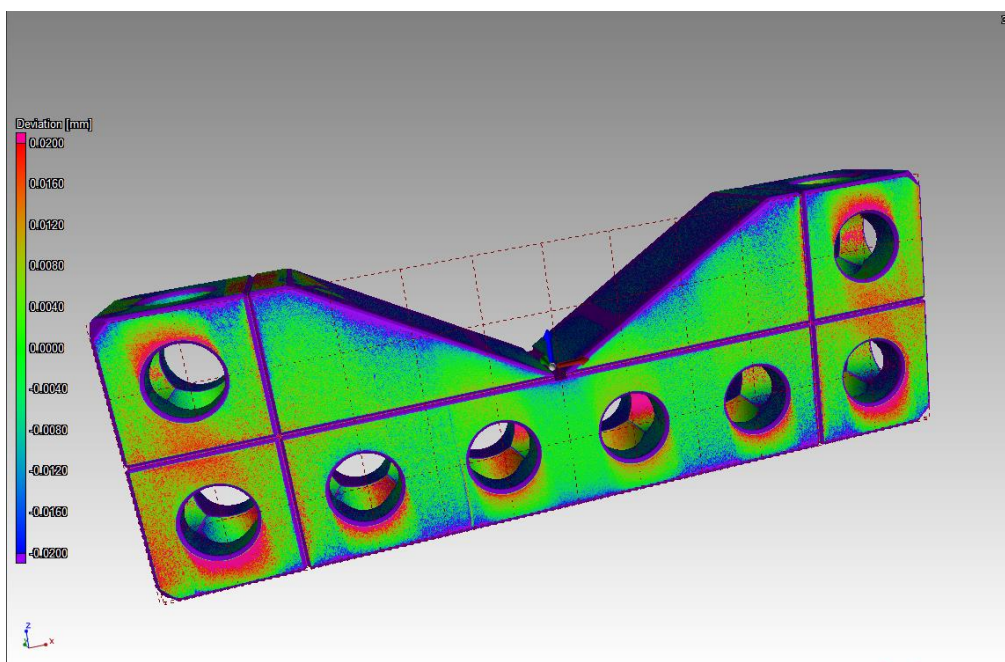
Obrázek 30 - Nastavení CT pro délku x=620

4. Porovnání výsledků měření CMM a CT

Pro viditelnost odchylek od CAD modelu byla vytvořena barevná mapa v programu VG Studio. Na Obrázku 31 lze vidět barevnou mapu pro první měření. Na Obrázku 32 lze vidět barevnou mapu pro součást, která byla na tři skeny. U sražení hran je velká odchylka, jelikož jsem při modelování neměl přesné rozměry dílce. Barevné mapy jsou pro toleranci $\pm 0,02$ mm.



Obrázek 31 - Barevná mapa pro x=620

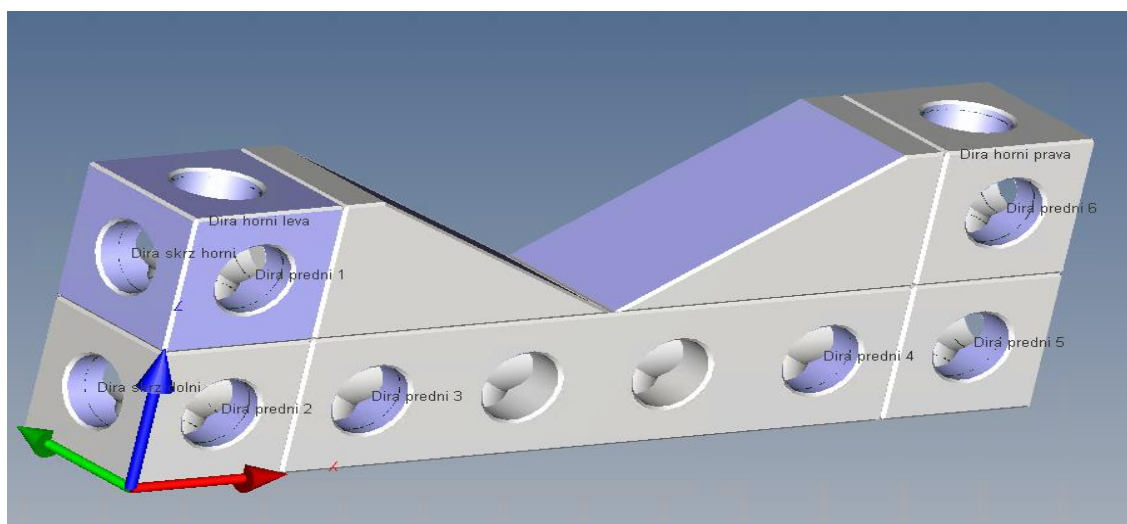


Obrázek 32 - Barevná mapa pro x=400

Z každého měření byl vytvořen excelový soubor s hodnotami, které porovnávají jednotlivá měření. Toto srovnání je v několika tabulkách pod tímto textem. V tabulkách lze vidět o kolik se nám liší hodnoty jednotlivých měření a jaké jsou jejich odchylky.

Tabulka 1 - Porovnání rozměrů děr [mm]

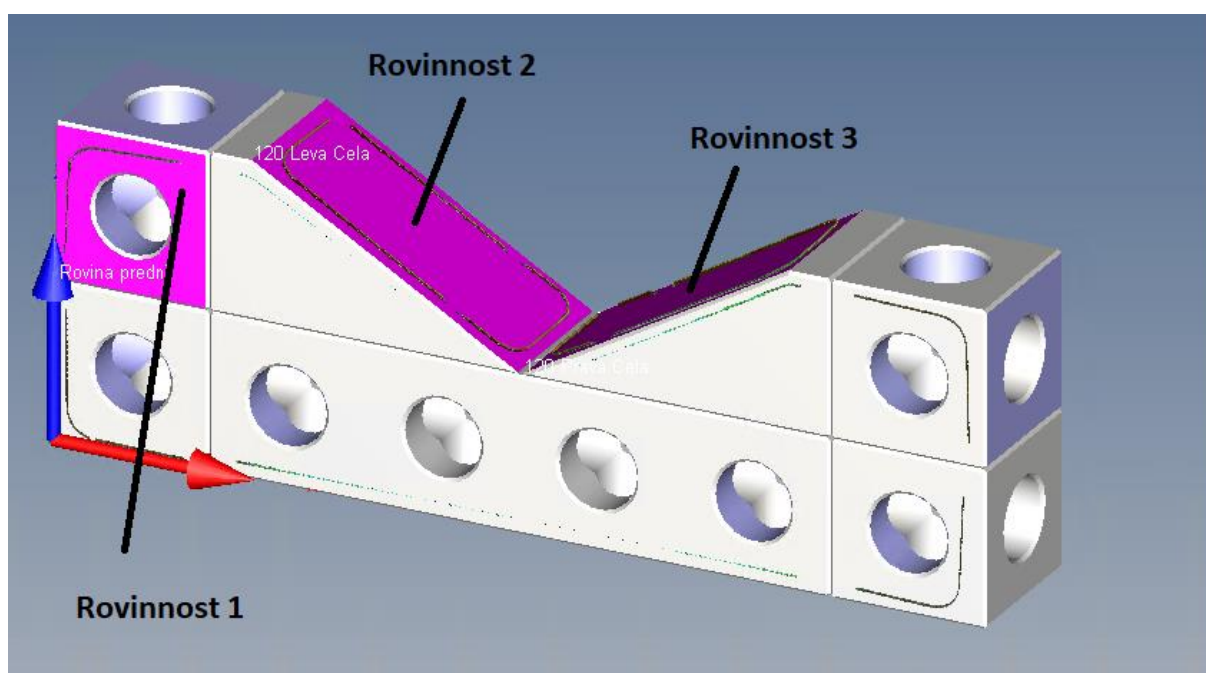
Charakteristika	Jmenovitá hodnota a tolerance	CMM hodnota / odchylka	CT 1 hodnota / odchylka	CT 2 hodnota / odchylka
Průměr díra přední 1	12,5 $H7({}_0^{+0,018})$	12,5065 0,0065	12,4962 -0,0038	12,5010 0,0010
Průměr díra přední 2	12,5 $H7({}_0^{+0,018})$	12,5046 0,0046	12,4940 -0,0060	12,4952 -0,0048
Průměr díra přední 3	12,5 $H7({}_0^{+0,018})$	12,4778 -0,0222	12,4992 -0,0008	12,5031 0,0031
Průměr díra přední 4	12,5 $H7({}_0^{+0,018})$	12,5110 0,0110	12,5055 0,0055	12,5068 0,0068
Průměr díra přední 5	12,5 $H7({}_0^{+0,018})$	12,5090 0,0090	12,5039 0,0039	12,5036 0,0036
Průměr díra přední 6	12,5 $H7({}_0^{+0,018})$	12,5057 0,0057	12,4995 -0,0005	12,5015 0,0015
Průměr díra horní levá	12,5 $H7({}_0^{+0,018})$	12,4968 -0,0032	12,4993 -0,0057	12,4998 -0,0002
Průměr díra horní pravá	12,5 $H7({}_0^{+0,018})$	12,4972 -0,0028	12,4938 -0,0062	12,4987 -0,0013



Obrázek 34 – Poloha děr k tabulce 1

Tabulka 2 – Porovnání rovinností [mm]

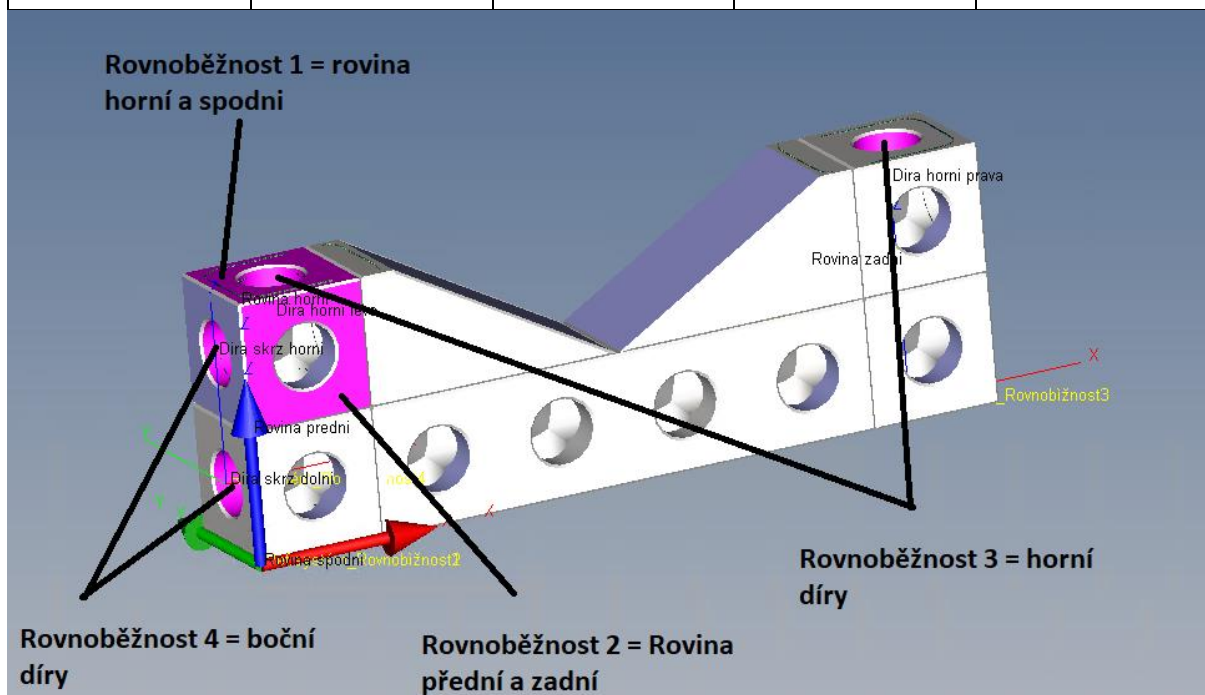
Charakteristika	Jmenovitá hodnota a tolerance	CMM hodnota / odchylka	CT 1 hodnota / odchylka	CT 2 hodnota / odchylka
Rovinnost 1	0 – 0,02	0,0150	0,0452	0,0374
Rovinnost 2	0 – 0,02	0,0203	0,0583	0,0470
Rovinnost 3	0 – 0,02	0,0182	0,0361	0,0312
Průměr	_____	0,0178	0,0465	0,0385



Obrázek 35 – Rovinnosti k tabulce 2

Tabulka 3 - Porovnání rovnoběžností [mm]

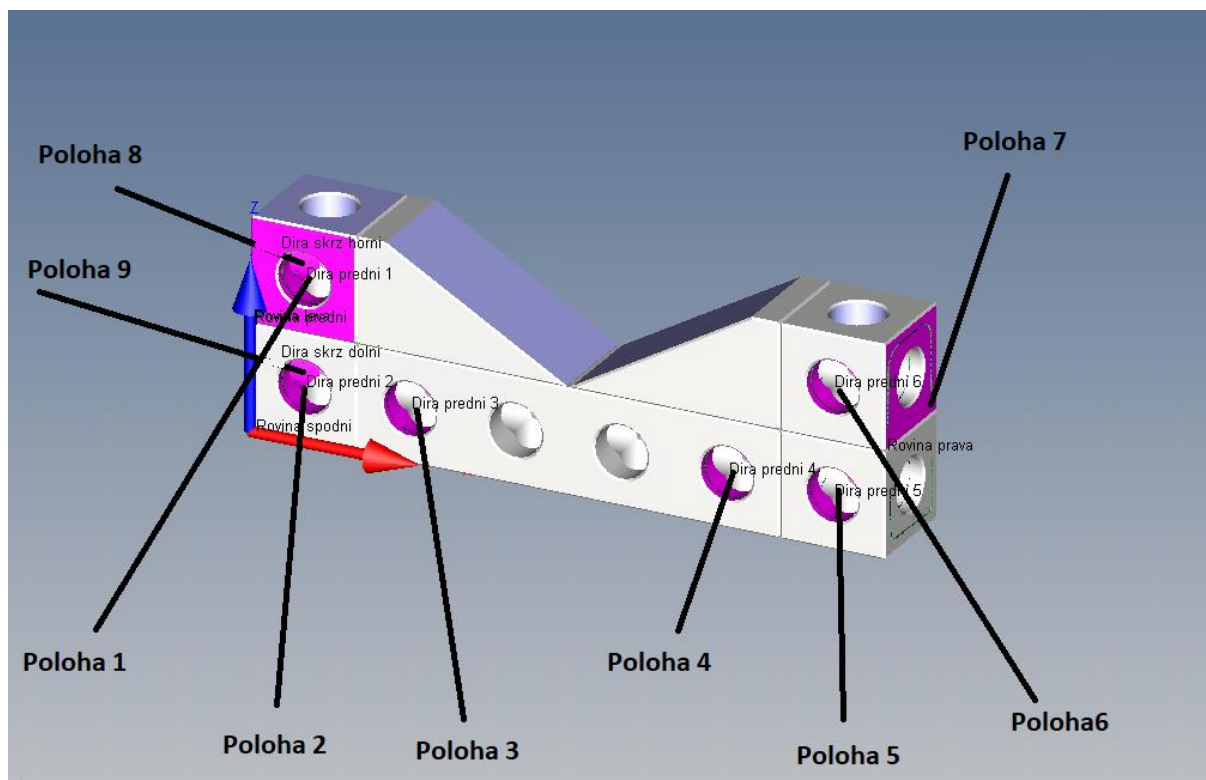
Charakteristika	Jmenovitá hodnota a tolerance	CMM hodnota / odchylka	CT 1 hodnota / odchylka	CT 2 hodnota / odchylka
Rovnoběžnost 1	0 – 0,02	0,0082	0,0583	0,0270
Rovnoběžnost 2	0 – 0,02	0,0219	0,0528	0,0541
Rovnoběžnost 3	0 – 0,02	0,0024	0,0011	0,0028
Rovnoběžnost 4	0 – 0,02	0,0004	0,0002	0,0003
Průměr	_____	0,0082	0,0281	0,0211



Obrázek 36 - Rovnoběžnosti k tabulce 3

Tabulka 4 - Porovnání polohy [mm]

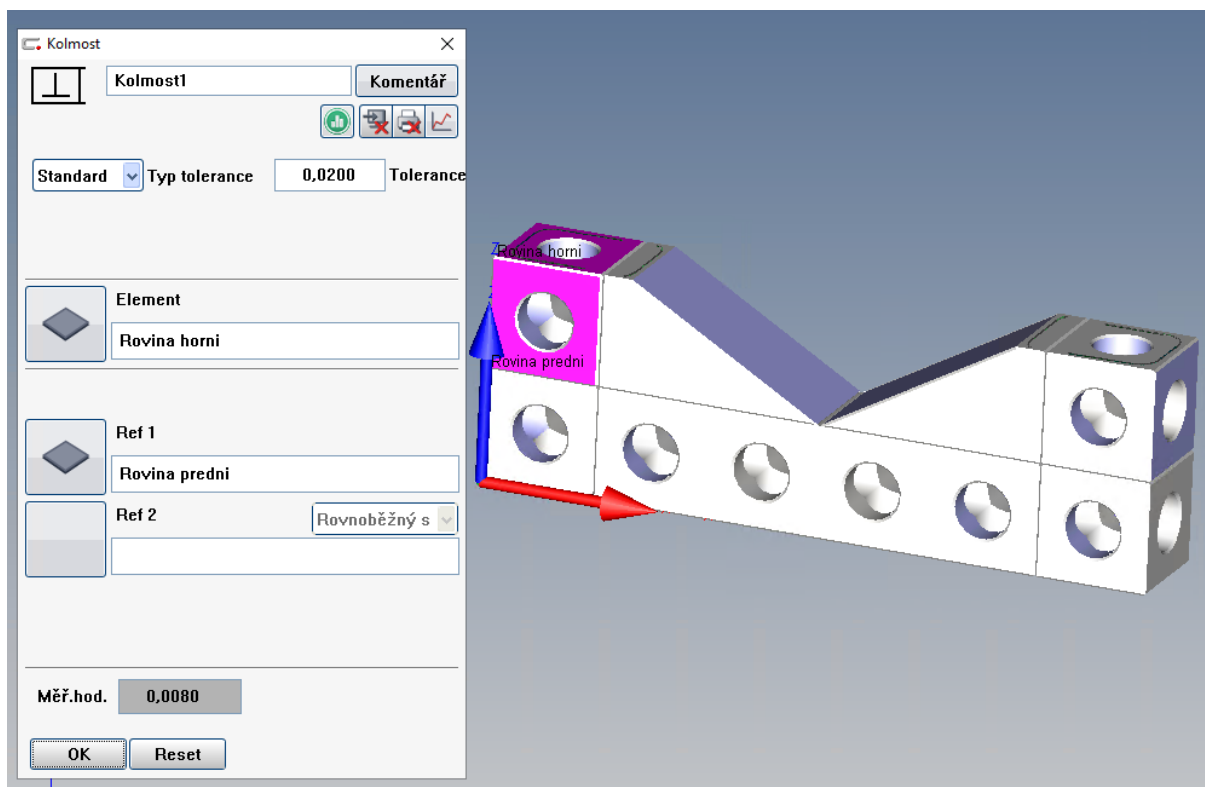
Charakteristika	Jmenovitá hodnota a tolerance	CMM hodnota / odchylka	CT 1 hodnota / odchylka	CT 2 hodnota / odchylka
Poloha 1	0 – 0,02	0,0237	0,0235	0,0371
Poloha 2	0 – 0,02	0,0236	0,0311	0,0364
Poloha 3	0 – 0,02	0,0308	0,0257	0,0362
Poloha 4	0 – 0,02	0,0240	0,0448	0,0358
Poloha 5	0 – 0,02	0,0308	0,0425	0,0488
Poloha 6	0 – 0,02	0,0240	0,0356	0,0412
Poloha 7	0 – 0,02	0,0291	0,0878	0,0615
Poloha 8	0 – 0,02	0,0123	0,0292	0,0272
Poloha 9	0 – 0,02	0,0172	0,0102	0,0036
Průměr	_____	0,0239	0,0367	0,0364



Obrázek 37 - Polohy k tabulce 4

Tabulka 5 - Porovnání kolmosti [mm]

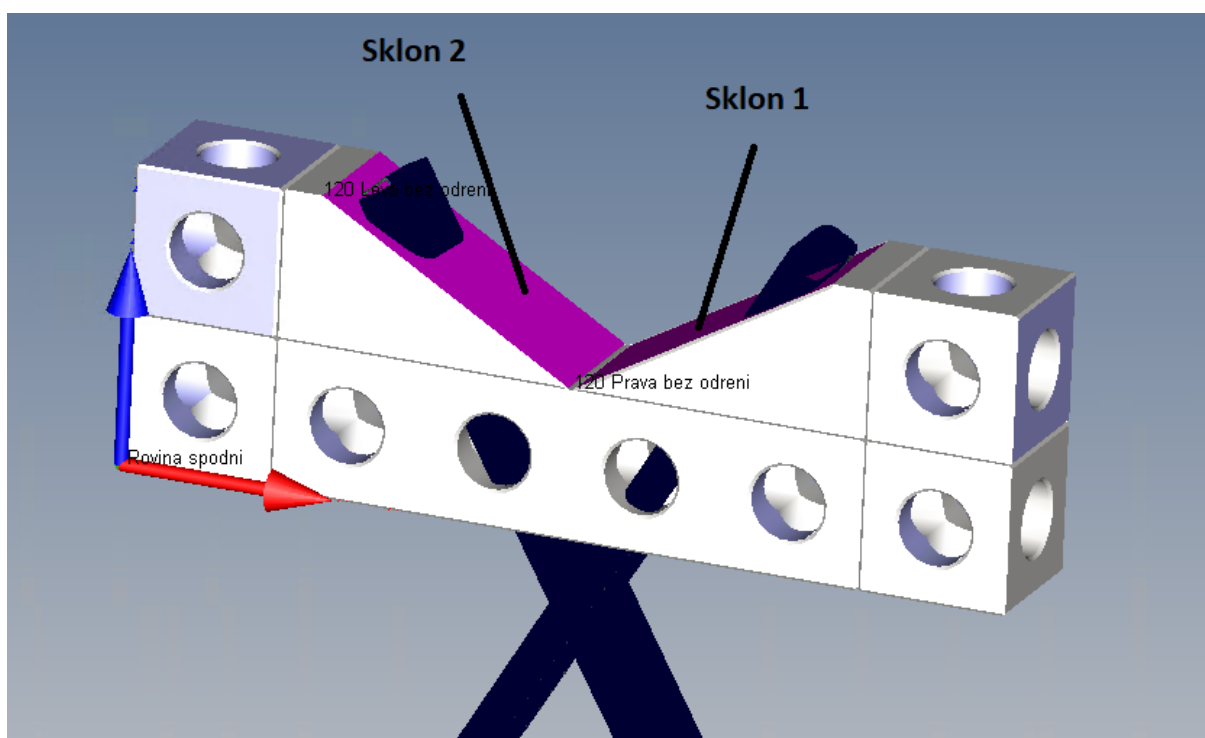
Charakteristika	Jmenovitá hodnota a tolerance	CMM hodnota / odchylka	CT 1 hodnota / odchylka	CT 2 hodnota / odchylka
Kolmost 1	0 – 0,02	0,0080	0,0706	0,0293



Obrázek 38 - Kolmost k tabulce 5

Tabulka 6 - Porovnání sklonu [mm]

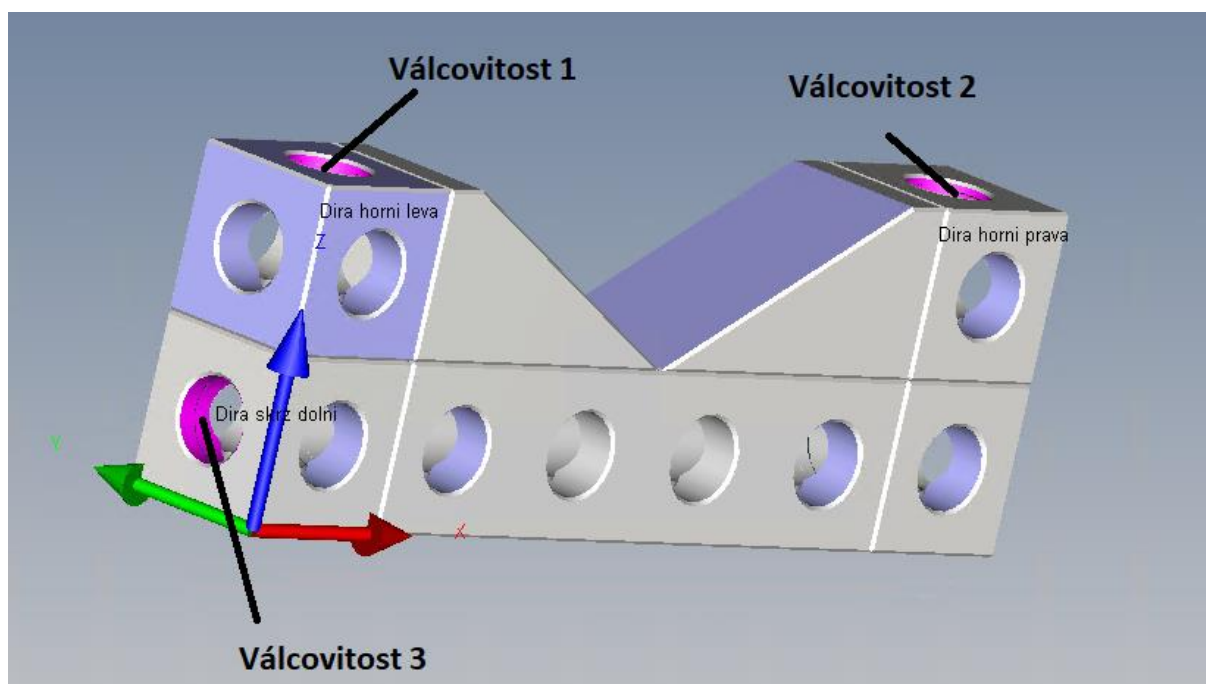
Charakteristika	Jmenovitá hodnota a tolerance	CMM hodnota / odchylka	CT 1 hodnota / odchylka	CT 2 hodnota / odchylka
Sklon 1	0 – 0,035	0,0031	0,0153	0,0142
Sklon 2	0 – 0,035	0,0038	0,0632	0,0362
Průměr	_____	0,0035	0,0393	0,0252



Obrázek 39 - Sklony k tabulce 6

Tabulka 7 - Porovnání válcovitostí [mm]

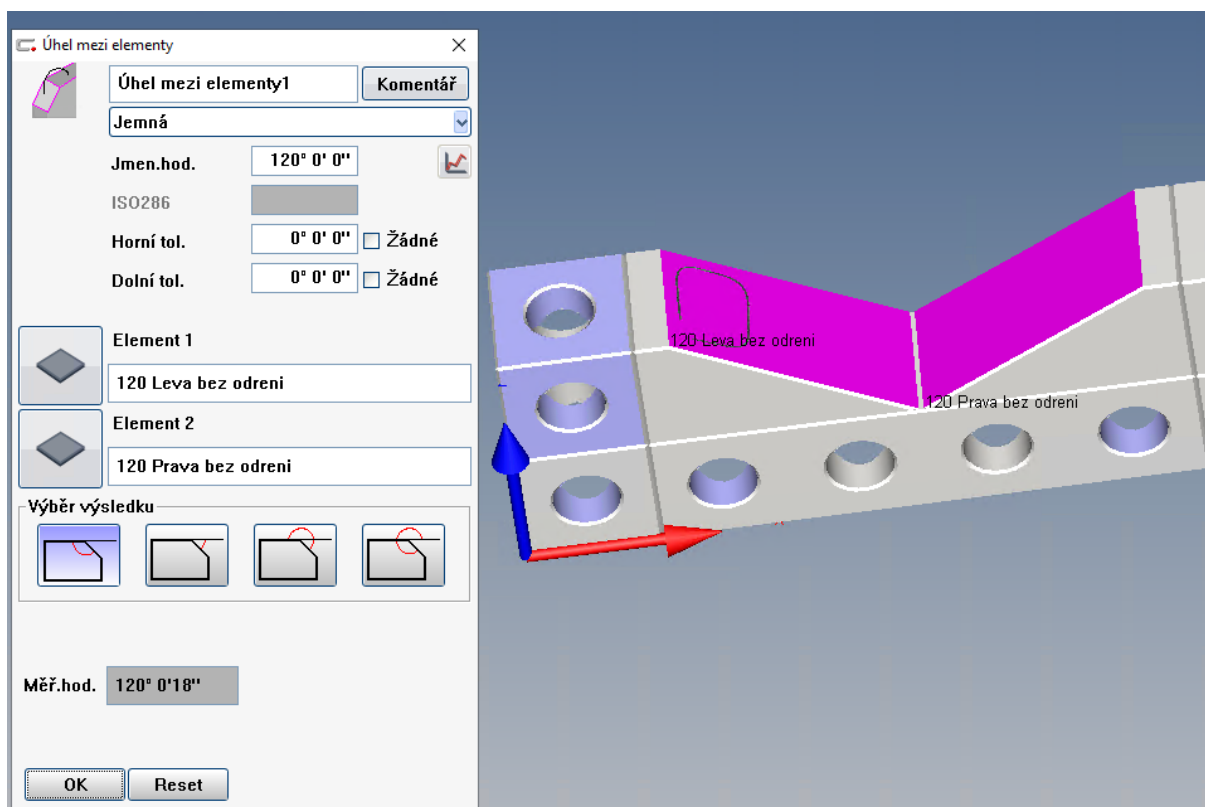
Charakteristika	Jmenovitá hodnota a tolerance	CMM hodnota / odchylka	CT 1 hodnota / odchylka	CT 2 hodnota / odchylka
Válcovitost 1	0 – 0,02	0,0154	0,0277	0,0209
Válcovitost 2	0 – 0,02	0,0139	0,0340	0,0242
Válcovitost 3	0 – 0,02	0,0135	0,0331	0,0262
Průměr	_____	0,0143	0,0316	0,0238



Obrázek 40 - Válcovitosti k tabulce 7

Tabulka 8 - Porovnání úhlu mezi elementy [mm]

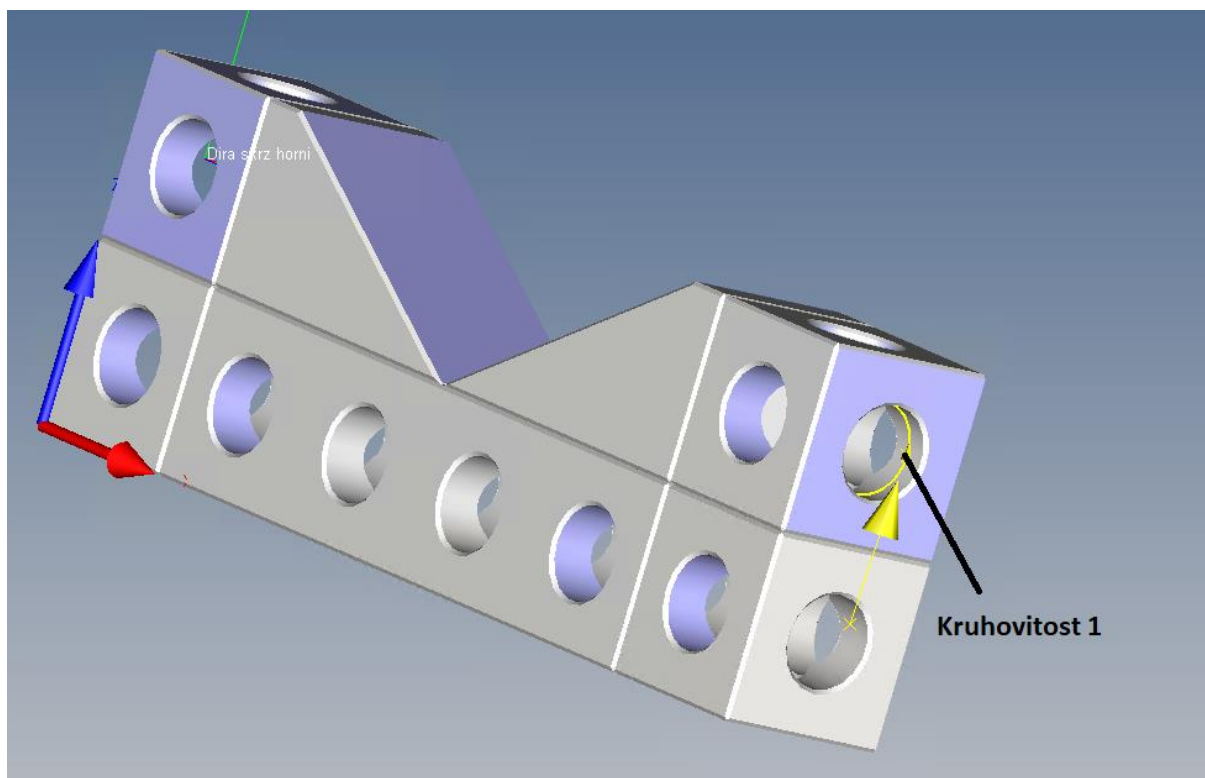
Charakteristika	Jmenovitá hodnota a tolerance	CMM hodnota / odchylka	CT 1 hodnota / odchylka	CT 2 hodnota / odchylka
Úhel mezi elementy	120	120,0051 0,0051	119,8525 -0,1475	119,9143 -0,0857



Obrázek 41 - Úhel mezi elementy k tabulce 8

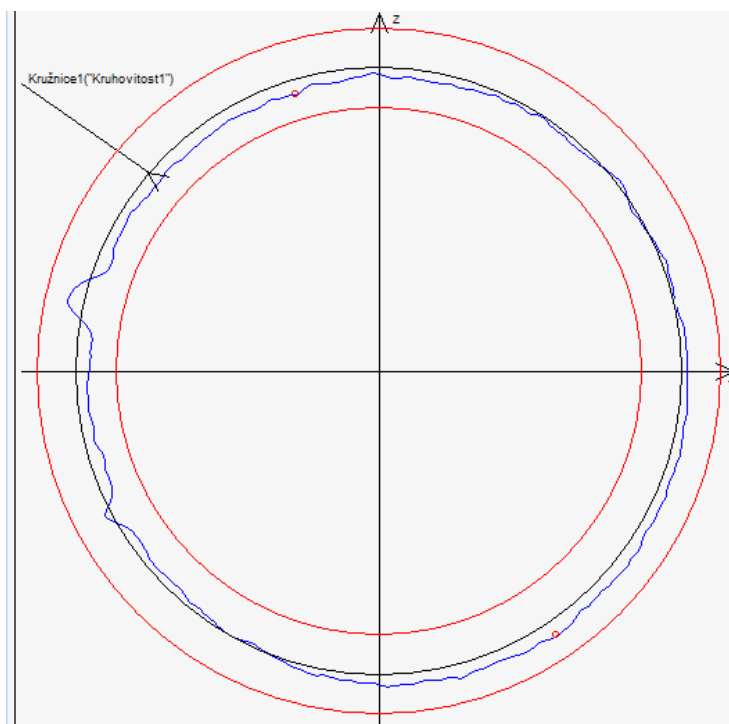
Tabulka 9 - Porovnání kruhovitosti [mm]

Charakteristika	Jmenovitá hodnota a tolerance	CMM hodnota / odchylka	CT 1 hodnota / odchylka	CT 2 hodnota / odchylka
Kruhovitost 1	0 – 0,02	0,0078	0,0367	0,0271

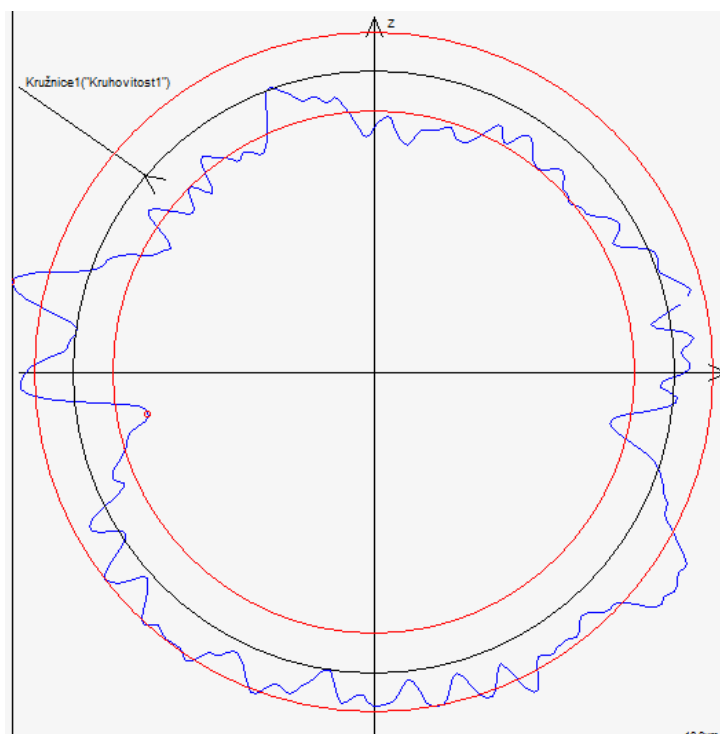


Obrázek 42 - Kruhovitost k tabulce 9

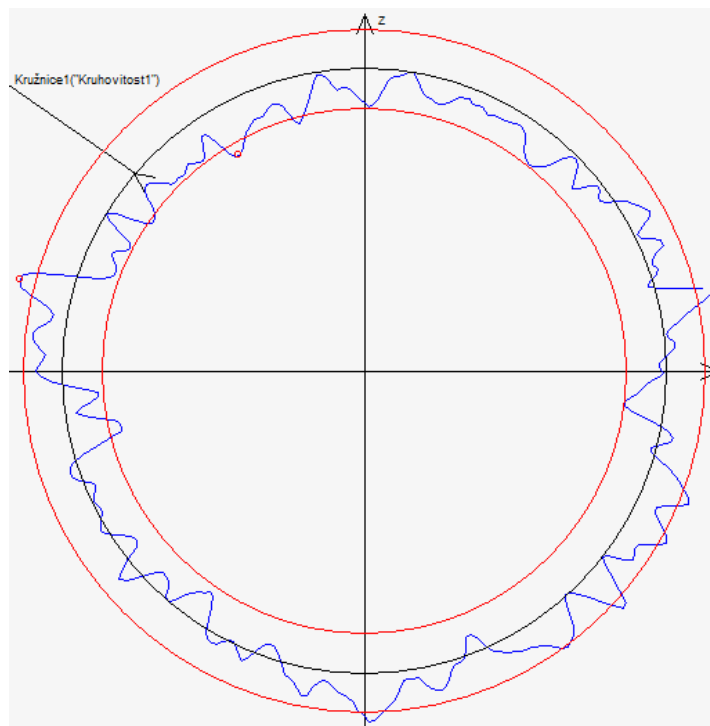
Pro viditelnost tvaru kruhovitosti bylo vytvořeno grafické vyhodnocení pro všechny metody měření. Grafické vyhodnocení měření na CMM je na Obrázku 43, Obrázek 44 je pro CT při skenování celého dílce a Obrázek 45 je pro CT při měření na tři skeny.



Obrázek 43 - Grafické vyhodnocení kruhovitosti na CMM



Obrázek 44 - Grafické vyhodnocení kruhovitosti na CT1



Obrázek 45 - Grafické vyhodnocení kruhovitosti na CT2

Závěr

Bakalářská práce byla zaměřena na porovnání metod měření souřadnicovým strojem a měřením na počítačové tomografii. V teoretické části práce jsem krátce shrnul historii, vznik a vlastnosti rentgenového záření a popisuji funkci rentgenky. Dále jsem popsal vývoj počítačové tomografie, konstrukční uspořádání strojů, princip rekonstrukce bodů, hlavní firmy v tomto odvětví a jejich softwary.

V analytické části této práce jsem popsal vytvoření programu, který byl následně použit u všech metod pro vyhodnocení číselných a grafických dat měřené součástky. Byly popsány i práce potřebné před začátkem měření, včetně nastavení jednotlivých strojů.

Na základě výsledků provedených měření zobrazených v tabulkách výše bylo zjištěno, že odchylky měření za použití technologií CMM a CT se pohybují v rozdílech $10\ \mu\text{m}$ až $30\ \mu\text{m}$ v neprospěch měření CT technologie. Z tohoto důvodu je CT vhodnější pro měření vnitřních těžko dostupných rozměrů součástek nebo pro kontrolu vnitřních vad materiálu. Při současném stavu technologie a výpočetní techniky nemá CT potřebnou přesnost pro kontrolu rozměrů součástek, na které jsou kladeny požadavky pro vysokou přesnost. Postupným vývojem CT technologie by se mohla přesnost zlepšit a nahradit CMM, jelikož by se najednou provedla jak kontrola rozměru, tak i kontrola vad materiálu.

Na začátku práce jsem zmiňoval hypotézu, která zněla: „očekávaným výsledkem měření je větší přesnost souřadnicového měřicího stroje.“ Jak již bylo uvedeno výše, měření na CMM stroji je při současném stavu technologií přesnější. Na základě této skutečnosti byl tento předpoklad potvrzen provedeným měřením. Nutno také podotknout, že zde vzniká prostor pro řadu výzkumných prací, které by v budoucnu mohli přinést levnější kontrolu součástek, jelikož by nebyla potřeba kupovat dva stroje pro kompletní kontrolu, ale pouze jeden. Což by jistě spousta firem uvítalo, vzhledem k vysokým pořizovacím nákladům obou strojů.

Zdroje

- [1] HESSENBRUCH, Arne. A brief history of x-rays. *Endeavour* [online]. 2002, 137-141 [cit. 2020-07-24]. Dostupné z:
<https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0160932702014655>
- [2] FERREIRA NASCIMENTO, Marcio Luis. Brief history of X-ray tube patents. *World Patent Information* [online]. 2014, (37), 48-53 [cit. 2020-07-24]. Dostupné z:
<https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0172219014000374>
- [3] Rentgenové záření: Vznik rentgenového záření. ČEZ [online]. [cit. 2020-07-24]. Dostupné z:
<https://www.cez.cz/edee/content/microsites/rtg/k21.htm>
- [4] Bushberg JT, Seibert JA, Leidholdt EM, Boone JM. *The essential physics of medical imaging*. Second edition. Lippincott Williams & Wilkins, 2002, Philadelphia
- [5] X-ray tube. *Whs.wsd.wednet* [online]. [cit. 2020-07-24]. Dostupné z:
<http://whs.wsd.wednet.edu/faculty/busse/mathhomepage/busseclasses/radiationphysics/lecturenotes/chapter6/chapter6.html>
- [6] Rentgenové záření: Vlastnosti rentgenového záření. ČEZ [online]. [cit. 2020-07-24]. Dostupné z:
<https://www.cez.cz/edee/content/microsites/rtg/k22.htm>
- [7] Rentgenové záření: Elektromagnetické spektrum. ČEZ [online]. [cit. 2020-07-24]. Dostupné z:
<https://www.cez.cz/edee/content/microsites/rtg/k23.htm>
- [8] VILLARRAGA-GÓMEZ, Herminso a Stuart T. SMITH. X-ray computed tomography: from medical imaging to dimensional metrology. *Precision Engineering* [online]. 2019, (60), 544-569 [cit. 2020-07-24]. Dostupné z:
<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0141635919300376>
- [9] X-ray tomography in Industrial Metrology. Röntgentomografie in der industriellen Messtechnik. Munich: Süddeutscher Verlag, 2011, s. 6-25. ISBN 978-3-86236-0208
- [10] SCHWENKE, Heinrich, Ulrich NEUSCHAEFER-RUBE a Horst KUNZMANN. Optical Methods for Dimensional Metrology in Production Engineering. *CIRP Annals* [online]. 2002, (51), 685-699 [cit. 2020-07-24]. Dostupné z:
<https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0007850607617077>

- [11] KRUTH, J. P., M. BARTSCHER, S. CARMIGNATO, R. SCHMITT, L. De CHIFFRE a A. WECKENMANN. Computed tomography for dimensional metrology. *CIRP Annals* [online]. 2011, (51), 821-842 [cit. 2020-07-24]. Dostupné z: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0007850607617077>
- [12] KATUCH, Peter. Industrial Computed Tomography: by Zeiss [online]. In: . s. 43 [cit. 2016-08-16].
- [13] Industrial applications of computed tomography. *CIRP Annals* [online]. 2014, (63), 655-677 [cit. 2020-07-24]. Dostupné z: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0007850614001930>
- [14] GE Measurement & Control [online]. [cit. 2020-07-24]. Dostupné z: <https://gms-instruments.com/brand/ge-measurement-control/>
- [15] Speed|scan CT 64 [online]. [cit. 2020-05-03]. Dostupné z: <https://www.bakerhughesds.com/inspection-technologies/radiography-ct/x-ray-computed-tomography/speedscan-ct-64>
- [16] ZEISS Industrial Metrology [online]. [cit. 2020-05-03]. Dostupné z: <https://www.zeiss.com/metrology/about-us.html>
- [17] VGStudiomax: High-End Industrial CT Software. *Volumegraphics* [online]. Germany, 2019 [cit. 2020-05-03]. Dostupné z: https://www.volumegraphics.com/Resources/Persistent/9/5/2/f/952ffc933187f783dd8ba7beaac35c48191fcdcf/Brochure_VGSTUDIO_MAX_33_en.pdf
- [18] Zeiss metrologický software: Přehled. *Zeiss* [online]. Germany: Industrielle Messtechnik, 2016 [cit. 2020-05-03]. Dostupné z: [https://applications.zeiss.com/C1257A26006EFF9E/0/A8D27EDE2E2EF730C1257D03003DB66D/\\$FILE/ZEISS_Software_CZ_60_011_0005I.pdf](https://applications.zeiss.com/C1257A26006EFF9E/0/A8D27EDE2E2EF730C1257D03003DB66D/$FILE/ZEISS_Software_CZ_60_011_0005I.pdf)
- [19] UPMC Spec. *Carl Zeiss* [online]. , 1-6 [cit. 2020-07-26]. Dostupné z: <https://www.atechauthority.com/pdf/UPMC-Specs.pdf>

Seznam obrázků

Obrázek 1 - Rentgenka [5]	10
Obrázek 2 -Zaostřovací miska [5].....	11
Obrázek 3 - Pevná a rotační anoda [5]	12
Obrázek 4 - Charakteristické záření [3].....	12
Obrázek 5 - Brzdné záření [3]	12
Obrázek 6 - Elektromagnetické spektrum [7]	13
Obrázek 7 - Princip CT skeneru pomocí 2D detektoru [10]	18
Obrázek 8 - Příklad rekonstrukce zpětné projekce [11]	19
Obrázek 9 - Více úhlu zlepší přesnost rekonstrukce, ale zvýší měřicí čas [11]	20
Obrázek 10 - Inline CT výrobky projíždí skrz [13].....	21
Obrázek 11 - Inline CT pomocí robota [12].....	22
Obrázek 12 - GE speed scan CT 64 [15]	23
Obrázek 13 - CT od Zeiss Metrotom 800 225 kV [16].....	24
Obrázek 14 - Ukázka softwaru VGStudio Max [17]	25
Obrázek 15 - Ukázka softwaru Calypso [18]	25
Obrázek 16 - Alufix VB120°STD	26
Obrázek 17 - Výkres součástí Alufix VB120°STD	27
Obrázek 18 - Upnutí součásti na CMM	28
Obrázek 19 - Snímací systém a kalibrační koule.....	28
Obrázek 20 - kalibrace snímacího systému	29
Obrázek 21 - Nastavení základního souřadnicového systému.....	30
Obrázek 22 - Nastavení bezpečnostního kvádru	30
Obrázek 23 - Vytváření elementu z CAD modelu	31
Obrázek 24 - Seznam elementů.....	32
Obrázek 25 - Strategie rovin	33
Obrázek 26 - Strategie děr	33
Obrázek 27 - Tvar-Poloha a rovinnost	34
Obrázek 28 - Ukázka charakteristiky poloha	35
Obrázek 29 - Součást v přípravku na otočném stole	36

Obrázek 30 - Nastavení CT pro délku $x=620$	37
Obrázek 31 - Barevná mapa pro $x=620$	38
Obrázek 32 - Barevná mapa pro $x=400$	38
Obrázek 33 - Nastavení Calypso pro CT.....	39
Obrázek 34 – Poloha děr k tabulce 1.....	40
Obrázek 35 – Rovinnosti k tabulce 2	41
Obrázek 36 - Rovnoběžnosti k tabulce 3	42
Obrázek 37 - Polohy k tabulce 4	43
Obrázek 38 - Kolmost k tabulce 5	44
Obrázek 39 - Sklony k tabulce 6.....	45
Obrázek 40 - Válcovitosti k tabulce 7	46
Obrázek 41 - Úhel mezi elementy k tabulce 8.....	47
Obrázek 42 - Kruhovitost k tabulce 9	48
Obrázek 43 - Grafické vyhodnocení kruhovitosti na CMM.....	49
Obrázek 44 - Grafické vyhodnocení kruhovitosti na CT1	49
Obrázek 45 - Grafické vyhodnocení kruhovitosti na CT2	50

Seznam tabulek

Tabulka 1 - Porovnání rozměrů děr [mm]	40
Tabulka 2 – Porovnání rovinností [mm]	41
Tabulka 3 - Porovnání rovnoběžností [mm]	42
Tabulka 4 - Porovnání polohy [mm]	43
Tabulka 5 - Porovnání kolmosti [mm].....	44
Tabulka 6 - Porovnání sklonu [mm]	45
Tabulka 7 - Porovnání válcovitostí [mm]	46
Tabulka 8 - Porovnání úhlu mezi elementy [mm].....	47
Tabulka 9 - Porovnání kruhovitosti [mm]	48