

České vysoké učení technické v Praze

Fakulta strojní

Ústav technologie obrábění, projektování a metrologie

Možnosti měření profilu lopatek leteckého motoru na CMM

Bakalářská práce

Vypracovala: Bartoš Matěj

Vedoucí práce: Ing. Urban Jan

Rok: 2020



ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

I. OSOBNÍ A STUDIJNÍ ÚDAJE

Příjmení:	Bartoš	Jméno: Matěj	Osobní číslo: 473684
Fakulta/ústav:	Fakulta strojní		
Zadávací katedra/ústav:	Ústav technologie obrábění, projektování a metrologie		
Studijní program:	Teoretický základ strojího inženýrství		
Studijní obor:	bez oboru		

II. ÚDAJE K BAKALÁŘSKÉ PRÁCI

Název bakalářské práce:
Možnosti měření profilu lopatek leteckého motoru na CMM

Název bakalářské práce anglicky:
Possibilities of measurement blades profile of aircraft engine on the CMM

Pokyny pro vypracování:
1) Vhodné snímací systémy pro měření lopatek
2) Možnosti měření obecných tvarových ploch na CMM
3) Popis postupu pro měření profilu lopatek v SW Blade Pro

Seznam doporučené literatury:

Jméno a pracoviště vedoucí(ho) bakalářské práce:
Ing. Jan Urban, 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. Jan Urban 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.

<u>23.6.2020</u> Datum převzetí zadání	<u></u> Podpis studenta
---	---

Anotační záznam

Jméno autora: Matěj Bartoš

Název bakalářské práce: Možnosti měření profilu lopatek leteckého motoru na CMM

Název bakalářské práce v anglickém jazyce: Possibilities of measurement blades profile of aircraft engine on the CMM

Rozsah práce:

47 stran

63 obrázků

Akademický rok 2020/2021

Ústav: 12134 ústav technologie obrábění, projektování a metrologie

Studijní program: TZSI

Vedoucí práce: Ing. Urban Jan

Klíčová slova: souřadnicové měřicí stroje, Blade Pro, CMM, měření lopatek

Key words: coordination measuring machines, Blade Pro, CMM, blade measuring

Abstrakt

V této bakalářské práci budu prověřovat možnosti měření lopatek leteckého motoru na CMM. Nejprve se zaměřím obecně na snímací systémy strojů CMM, následně přejdu ke konstrukci těchto strojů a upínacím prvkům. Dále sestavím zjednodušený návod pro obsluhu programu BladePro s popisem důležitých charakteristik a jejich měření. Pokusím se vyhodnotit náběžnou hranu lopatky. Závěrem zhodnotím práci s programem z uživatelského hlediska.

Abstract

This thesis will examine possibilities of measuring blades profile of engine on CMM. First, I will focus on the sensing systems of CMM machines in general, then I will move on to the construction of these machines and clamping elements. I will also compile a simplified operating manual for the BladePro program with a description of important characteristics and their measurements. I will try to evaluate leading edge of the blade. Finally, I will evaluate the work with the program from the user's point of view.

Čestné prohlášení

Prohlašuji, že jsem bakalářskou práci vypracoval sám, a všechny použité zdroje řádně citoval na konci práce v seznamu citací.

V Praze dne: 31.7.2020

Podpis:



Poděkování

Rád bych poděkoval svému vedoucímu práce Ing. Urbanovi Janu za vedení mé práce.

Obsah

1	Úvod.....	11
2	Souřadnicové měřicí stroje	11
2.1	Využití.....	11
2.2	Základní prvky CMM	11
2.3	Princip	12
2.4	Postup měření na CMM	13
2.5	Obecné zásady pro měření na CMM.....	14
3	Snímací systémy CMM	15
3.1	Dotykové spínací senzory	15
3.2	Rozdělení.....	16
3.3	Elektromechanická sonda.....	17
3.4	Piezoelektrická sonda.....	17
3.5	Skenovací dotykové senzory (aktivní senzory).....	18
3.6	Měřicí elementy dotykového snímacího systému	19
3.7	Materiály	19
4	Konstrukce souřadnicových strojů.....	20
4.1	Mostová s pohyblivým mostem	20
4.2	Mostová s nepohyblivým mostem	21
4.3	Portálová konstrukce	21
4.4	Stojanová konstrukce	22
4.5	Výložníková konstrukce.....	22
4.6	Horizontální rameno.....	23
5	Upínací systémy.....	23
5.1	Renishaw upínací stavebnice pro CMM	23
5.2	Upínací deska	24
5.3	Upínací elementy	24
5.4	Svěrák.....	25
5.5	Univerzální naklápěcí otočný stůl.....	26
5.6	Otočný stůl pro CMM	26

6	Vytváření obecných křivek v programu Calypso 2017	27
7	Export bodů z programu Calypso 2017	29
8	Měření lopatkových kol	30
8.1	Úvod do Blade Pro	30
8.2	Definování specifikace lopatky	30
8.3	Definování a vytvoření nového měřeného řezu lopatkou	31
8.4	Import nominálních dat do Blade Pro	31
8.5	Charakteristiky řezu	34
8.6	Vyhodnocování naměřených dat.....	35
8.7	Vyhodnocení	35
8.8	Export dat	35
8.9	Příklad formuláře z měření.....	36
8.10	Vybrané geometrické charakteristiky	36
8.11	Charakteristické měření	39
9	Závěr	44
10	Zdroje.....	44
	Seznam obrázků.....	45

1 Úvod

Souřadnicové měřicí stroje (CMM) patří mezi jednu z největších inovací ve světě strojírenské metrologie. Tyto stroje byly vyvinuty pro potřeby měření složitých součástí v automobilovém a leteckém průmyslu. Poslední dobou dochází k přílivu firem z leteckého prostředí do České Republiky a to klade zvětšené nároky na metrologii a kontrolu těchto vyráběných součástí. Stroje CMM jsou schopné provádět měření, které muselo být v minulosti prováděno mnoha individuálními stroji. Od prvního stroje CMM z roku 1985 se vývoj těchto strojů stále posouvá. Přesnost a rychlost měření vzrůstá, programy pro vyhodnocování dat a vlastností měření se stále zdokonalují.[1][2][3]

2 Souřadnicové měřicí stroje

2.1 Využití

Jedná se o stroj provádějící extrakci bodů z povrchu součásti s následným výpočtem geometrických veličin metodami analytické geometrie v různých typech souřadných systémů, jako jsou např. kartézský, cylindrický, atd.. Měření je možné automatizovat a vyhodnocovat ve formě protokolu, exportovaných bodů, či souborů pro SW zabezpečující statistické sledování kontrolovaných znaků. Stroje CMM mohou pracovat v manuálním, poloautomatickém a automatickém režimu. V manuálním režimu stroj CMM přímo ovládá operátor a nebo sám spouští automatický měřicí program. Protokol o měření je zpracováván automaticky a operátor odešle výsledky ve formě klasického protokolu nebo ve standardizovaném formátu AQDF. V poloautomatickém režimu se obrobek dostal na CMM podle řídicího programu a obsluha spouští automatický měřicí program s vytištěním protokolu z měření (klasický či AQDF). Následně specifikuje příčiny chybného měření s odesláním jejích výsledků. V automatickém režimu se obrobek na CMM dostal automaticky a měřicí program je též spuštěn automaticky včetně hlášení výsledků (klasický či AQDF) a závad. Stroje CMM jsou schopné provádět měření, které muselo být v minulosti prováděno mnoha individuálními stroji. Od prvního stroje CMM z roku 1985 se vývoj těchto strojů stále posouvá. Přesnost a rychlost měření vzrůstá, programy pro vyhodnocování dat a vlastností měření se stále zdokonalují.[1][2][3]

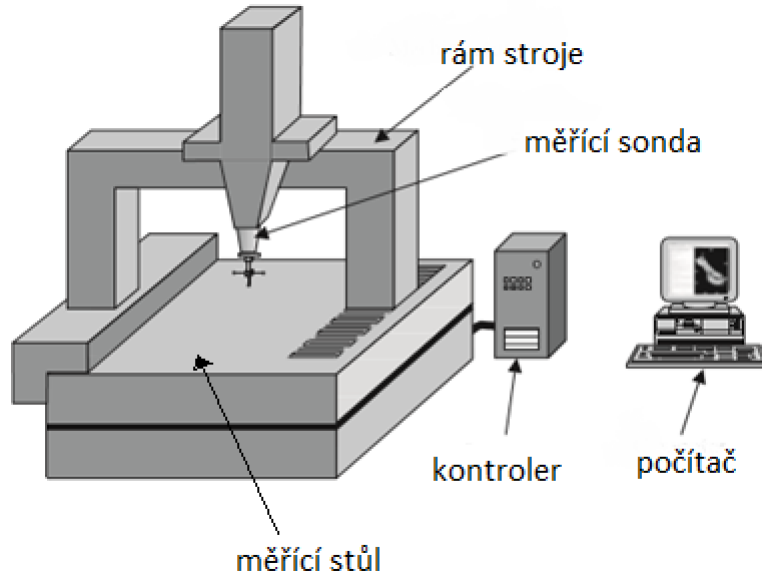
2.2 Základní prvky CMM

Rám stroje- U většiny strojů CMM je rám svařenec, který musí mít určitou tuhost, jelikož je stroj vystaven dynamickému zatížení.[6]

Stůl- U moderních strojů je stůl zhotoven z granitu, žuly nebo z litiny. Litinové stoly mají například dílenské stroje. Granit se používá převážně u laboratorních strojů. Na stole provádíme upínání měřených součástí přímo, nebo pomocí upínacích přípravků různých konstrukcí. Materiál pracovního stolu musí být teplotně a objemově stálý. Musí odolávat korozi, disponovat vysokou životností a tuhostí.[6][3]

Pinola- Provedení pinoly může být horizontální nebo vertikální. Průřez pinoly je buďto kruhový nebo čtvercový. Při konstrukci horizontální pinoly je důležité počítat s možným průhybem od vlastní hmotnosti při vysunutí. Tento průhyb je nežádoucí. [6]

Sloupy, mosty- Tyto části jsou většinou montované sestavy, okrajově svařence. Z důvodů zvyšování produktivity a pojezdových rychlostí se v některých případech přechází k odlehčeným materiálům, jako jsou např. kompozity, či slitiny hliníku apod. Důvodem je snížení dynamických účinků konstrukce mostu na snímací systém v důsledku rychlého pohybu stroje. Dříve byl pro konstrukci mostu používán převážně granit, což je velmi

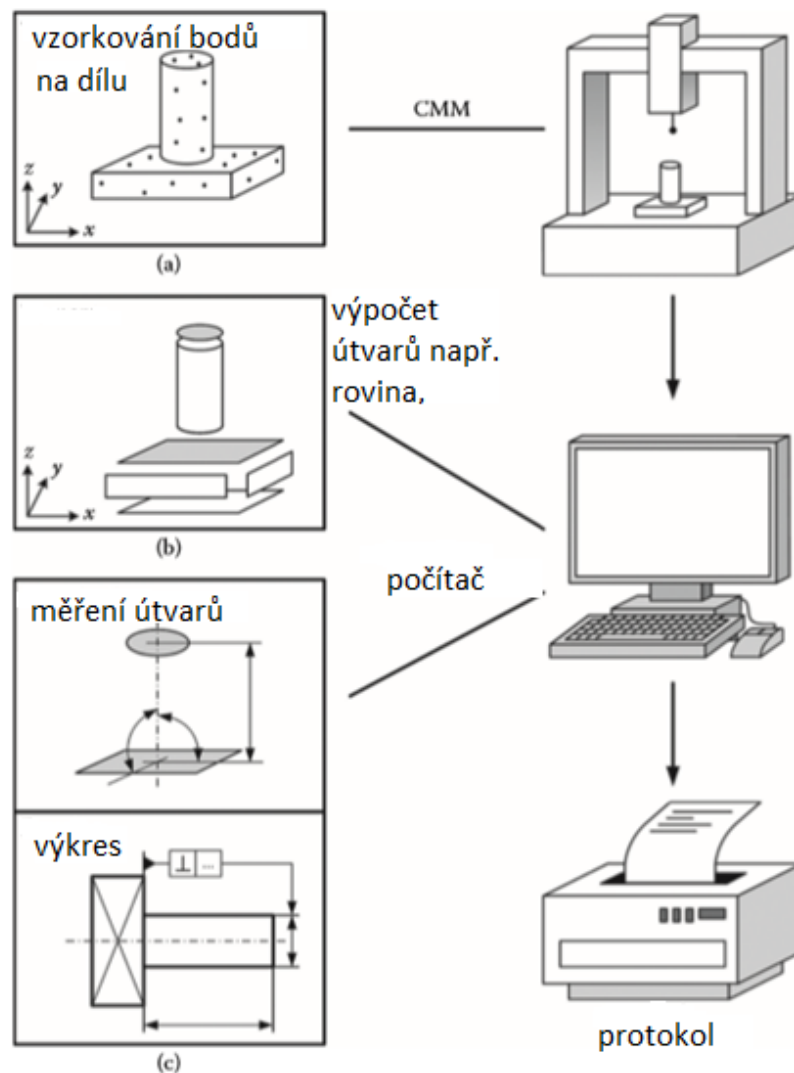


Obrázek 1: Schéma stroje CMM[2]

tuhý a teplotně stabilní materiál, dnes je již z výše popsaných důvodů využíván jen u těch nejpřesnějších strojů, kde je produktivita měření až na druhém místě po přesnosti stroje. [3] [6]

2.3 Princip

Primární funkcí CMM je měření skutečných tvarů měřeného dílu s následným srovnáním s požadovaným tvarem a rozměry dílu. Skutečný tvar povrchu je získáván extrakcí bodů z povrchu v prostoru. Tato extrakce dat může být realizována různými senzory (kontaktními nebo bezkontaktními) a souvisle nebo nesouvisle. Některé senzory umožňují získávat i směrové vektory měřených bodů, což nám zvyšuje přesnost. Nicméně nelze vyhodnocovat parametry (průměr, vzdálenost, úhel, velikost a další) přímo ze souřadnic naměřených bodů. Nejdříve musíme před vyhodnocením vytvořit analytický model a z toho provést vyhodnocení. Principem měření na strojích CMM je stanovení základního bodu v prostoru a zaznamenání polohy měřených bodů na měřeném dílu. Následně dochází k výpočtu elementů a určení měřených požadovaných charakteristik. Body zaznamenáváme dotykem měřicí sondy nebo bezdotykovým senzorem. Polohu těchto bodů určujeme pomocí souřadnic v osách daného souřadného systému X, Y, Z. Základní problematikou a základem přesného měření je správné vyrovnaní součásti. Vyrovnaní znamená stanovení počátku souřadného systému výrobku do přesné polohy souřadného systému stroje.[2]



















Obrázek 2: Princip strojů CMM[2]

2.4 Postup měření na CMM

Postup měření na strojích CMM lze rozdělit do těchto základních bodů:

1. Projít a analyzovat technickou dokumentaci.
2. Zvolit si vhodný souřadný systém, ve kterém budu měření realizovat (kartézský nebo polární).
3. Zvolit vhodné upnutí součásti.
4. Pomyslně si rozdělit měřenou součást na základní geometrické elementy, každému takovému útvaru odpovídá určitý minimální počet nasnímaných bodů pro definování.
5. Navrhnout nejvhodnější metodu vyrovnání součástky (např. metoda 3-2-1, RPS, MPA apod.) - odeberou 6 stupňů volnosti měřenému dílu.
6. Naměřit vybrané geometrické elementy pro základní vyrovnání a potom na nich uplatnit jednu z výše uvedených metod vyrovnání. Po aplikování příslušné metody se přenesou souřadný systém stroje automaticky na měřený díl.
7. Naměřit zbývající geometrické útvary
8. Tvorba měřicího protokolu s výsledky.[6]

2.5 Obecné zásady pro měření na CMM

Útvary	Příklady a popisující parametry	Počet bodů pro určení	Příklady v praxi
Bod	 $P(x,y,z)$ poziční vektor	1	 roh
Přímka	 $V(u,v,w)$ $P(x,y,z)$ bod směr	2	 hrana hranolu
Rovina	 $N(u,v,w)$ $P(x,y,z)$ bod kolmice	3	 rovina hranolu
Kružnice	 $N(u,v,w)$ $P(x,y,z)$ bod kolmice poloměr	3	 vztažná kružnice děr
Koule	 $P(x,y,z)$ bod poloměr	4	 upínání přívěsného vozíka
Válec	 $N(u,v,w)$ $P(x,y,z)$ bod směr poloměr	5	 Hřídel
Kužel	 $P(x,y,z)$ $N(u,v,w)$ bod, směr úhel kužele	6	 upínací kužel vrtačky
Anuloid	 $N(u,v,w)$ $P(x,y,z)$ bod, směr poloměr prstence a vodiče	7	 zaoblení na válci

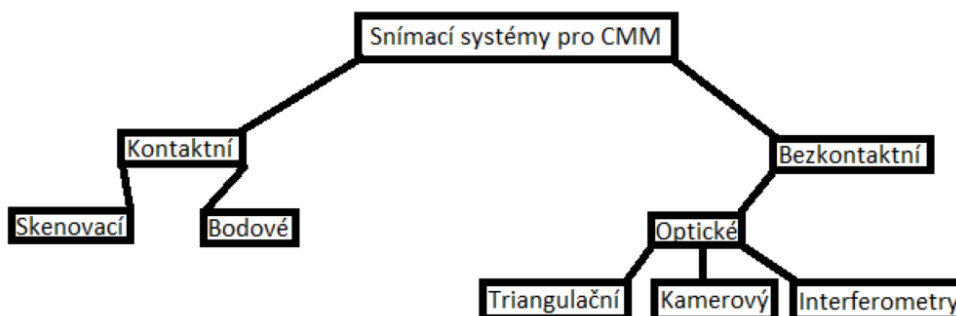
Obrázek 3: Základní geometrické útvary [6]

Pro správné a efektivní měření by měl operátor CMM dodržovat tyto základní zásady.

1. Obrobek upnout a usadit na co největší plochu pro dosažení potřebné stability.
2. Osadit měřený díl tím způsobem, aby bylo v nejlepším případě možné proměření v jedné poloze.
3. Volit minimální počet dotyků.
4. Volit měřicí body pro nejkratší postup měření.
5. Volit 2 až 3 více nasnímaných bodů než požaduje geometrická definice.
6. Slučovat měřicí operace.
7. Měřicí základny by měli být shodné s konstrukčními základnami.

3 Snímací systémy CMM

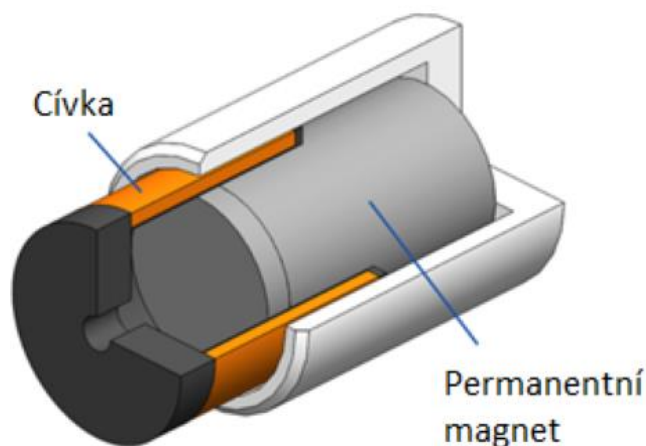
Senzory jsou používány pro získání primárního signálu z měřeného dílu. Skládají se z mechanických, optoelektronických a softwarových komponent a jejich variací. Senzory běžně dělíme na bezdotykové a dotykové (kontaktní). U dotykových senzorů jsou údaje získávány dotykem měřicí sondy měřeného povrchu. Bezdotykové senzory získávají údaje o měřeném povrchu pomocí světla a jeho odrazu.[1] [2]



Obrázek 4: Senzory CMM dle principu[2]

3.1 Dotykové snímací senzory

Princip funkce spočívá ve mechanickém kontaktu měřicího elementu sondy a měřeného povrchu. Měřicí element může mít tvar koule, kužele atd.. Měřicí koule musí mít vysokou tuhost, odolnost proti opotřebení. Měřicí element je spojen se senzorem pomocí dráčky. Jeho funkce je přenos měřené informace (měřicí síly) do senzoru. Další důležitou součástí je generátor definované měřicí síly. Skoro všechny snímací dotykové senzory mají pasivní generování měřicí síly. To je realizované pomocí elastického elementu (listové pružiny, cívky). Výhodou pasivních systému je menší cena, menší váha z důvodu nepřítomnosti regulátoru a jeho řízení. Existují i aktivní generátory měřicí síly. Ty jsou realizovány pomocí nekomutovaných DC aktuátorů. Základní částí je permanentní magnet a cívka. Proud procházející cívkou interaguje s permanentním magnetickým polem a generuje měřicí sílu. Tuto měřicí sílu lze libovolně měnit v závislosti na proudu. Dále jsou zde využívány i paralelogramy zajišťující malý pohyb při vychýlení sondy.[2]

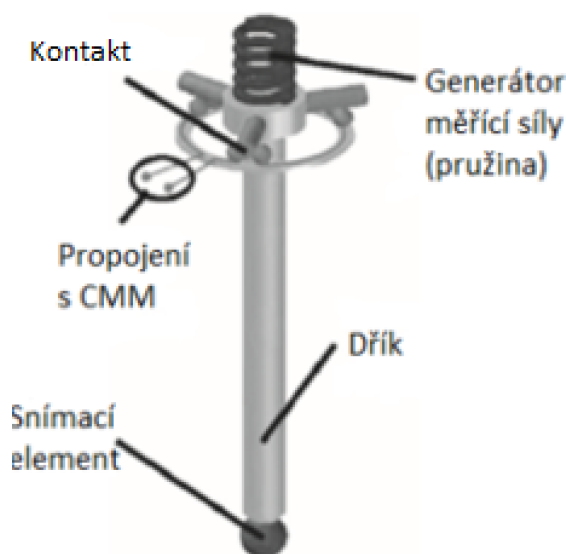


Obrázek 5: Nekomutovaný DC lineární aktuátor[5]

3.2 Rozdělení

Tyto senzory jsou vhodné pro měření standardních geometrických vlastností, díky nízkému požadovanému počtu měřených bodů a jednoduché kompenzaci průměru měřicí kuličky. Výhodou spínacích senzorů je jejich nízká cena, hmotnost, velikost a možnost skenování tvarově náročných objektů. Tyto senzory vždycky měří dynamicky, což znamená, že detekují bod na povrchu, když je stroj CMM v pohybu. Jestliže se měřicím elementem dotkneme měřeného povrchu, dojde k vyslání signálu pro přečtení souřadnic odměřovacím systémem. Měřený bod je vztažen ke středu měřicího elementu (popřípadě koule). Existují dva způsoby jak toho docílit [2]

1. Elektromechanicky
2. Piezoelektricky

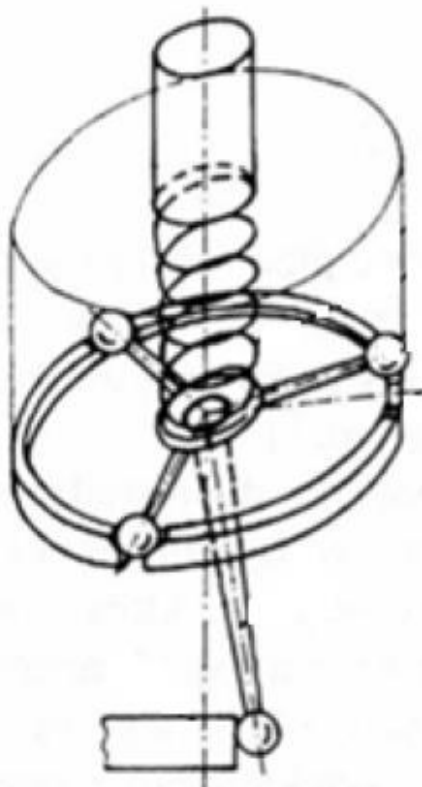


Obrázek 6: Spínací dotykové senzory[2]

3.3 Elektromechanická sonda

Principem této sondy je elektrický obvod obsahující součást, která se podobá hvězdici. Jsou to rozpínací kontakty, který jsou pootočené o 120° . Měřicí element je na druhém konci osazen prstencem, který v nezátíženém stavu v spojuje všechny kontakty.[6]

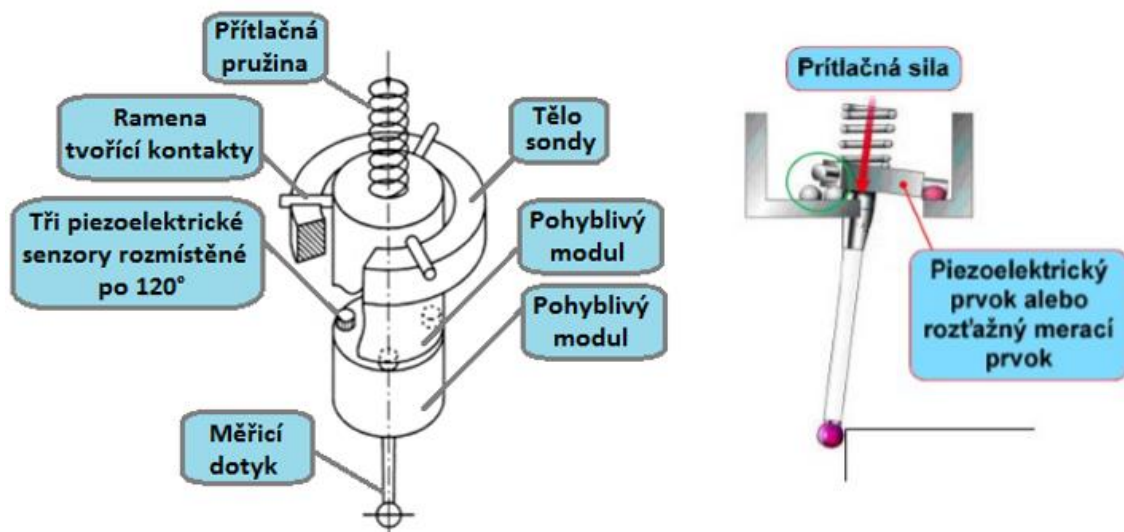
K odečtení polohy odměřovacím systémem dojde v okamžiku rozpojení jednoho z kontaktů. Kontakty jsou ve tvaru kulových ploch pro zajištění stejné výchylky při rozpojení. Bohužel ale při rozpojení kontaktů dochází k malému vychýlení měřicího elementu sondy a s tím i k posunu osy stroje oproti momentu, kdy došlo ke skutečnému dotyku s povrchem. Tato nepřesnost je eliminována při použití piezoelektrické sondy.[6]



Obrázek7:Kinematické schéma sondy s elektrokontaktním snímačem[6]

3.4 Piezoelektrická sonda

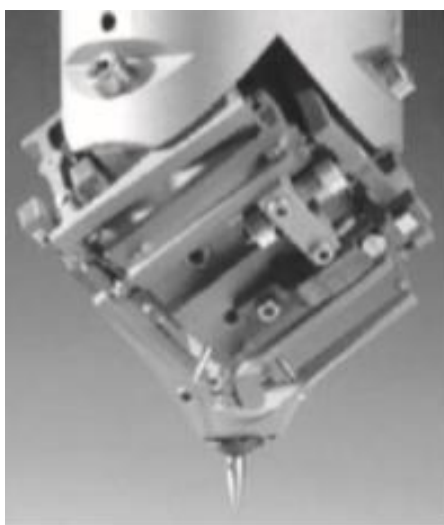
Tyto sondy využívají dvou způsobů pro indikaci měřeného bodu. První způsob je pomocí piezokrystalů. Dochází k deformaci těchto krystalů při malých výchylkách a následnému vydávání elektrických impulzů pro odečítání souřadnic. Druhý způsob indikace je elektromechanický. K rozpojení elektrického kontaktu dojde při větším vychýlení. Při naměření impulzů a jejich potvrzení se souřadnice dočasně uloží a dojde k zastavení pohybu stroje. Nevýhodou piezoelektrických senzorů je to, že signály musíme potvrzovat, jelikož jsou tak citlivé, že by mohli vydat signál při náhodném zachvění.[6]



Obrázek8:Piezoelektrická sonda[6]

3.5 Skenovací dotykové senzory (aktivní senzory)

Na rozdíl od spínacích senzorů mohou měřicí senzory být stále v kontaktu s měřeným povrchem a nasnímat stovky bodů což se nazývá skenování. Sonda se pohybuje relativně k povrchu dílce a během tohoto povrchu jsou ukládány údaje o vychýlení dotyku. Tyto senzory umožňují i klasické bodové snímání či zmíněné skenování po určitém kroku. Aktivní senzory patří v dnešní době mezi nejpoužívanější snímací systémy. Dokáží nasnímat desítky až stovky bodů za sekundu a v důsledku toho lze vytvořit jasnější obraz o tvarových odchylkách měřeného povrchu. Tyto systémy používají systém aktivní kontroly přítlačné síly, prostřednictvím soustavy paralelogramů a elektromagnetů. Mezi důležité zástupce aktivních senzorů umožňující vysokou přesnost skenování patří výrobek od firmy Zeiss VAST Gold. Využívá lehkou konstrukci a možnost připevnění bočního snímače. Firma Renishaw nabízí skenovací sondy například SP80. [7][2]



Obrázek 10:Měřicí dotyková hlava[2]



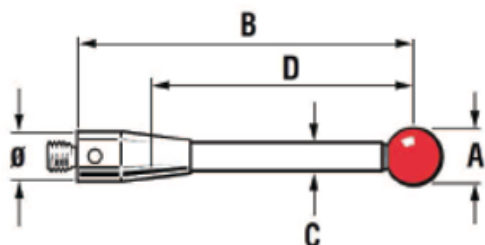
Obrázek 11:Carl Zeiss VAST Gold[7]



Obrázek9:Renishaw SP80[13]

3.6 Měřicí elementy dotykového snímacího systému

Tato součást zajišťuje kontakt mezi dílcem a dříkem měřicí sondy. Dřík je často vyroben z oceli, keramiky, karbidu wolframu nebo uhlíkových vyztužených vláken. Dochází k zaznamenání souřadnice při dotyku měřicího elementu s měřeným povrchem.[6]



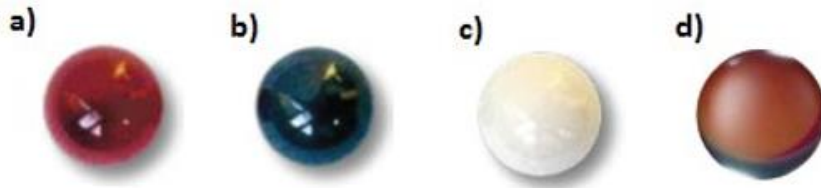
- A – průměr kuličky,**
- B – celková délka,**
- C – průměr dříku,**
- D – efektivní činná délka (EWL).**

Obrázek 12: Měřicí element[6]

Při návrhu a výběru měřicího elementu bychom se měli řídit jistými zásadami. Měli bychom volit co největší průměr měřicí kuličky, pokud nám to dovolí měřený objekt. Volíme co nejkratší dotyk, pro eliminování nežádoucího průhybu a nejmenší počet prodlužovacích nástavců. [6]

3.7 Materiály

- a) Rubín: Jedná se o nejpoužívanější materiál pro většinu měření. Vynikají svou velkou tvrdostí a hladkým povrchem. Mají velkou pevnost v tlaku a odolnost proti otěru. V jistých případech je tato volba kuličky nevhodná. Například u skenování na hliníkových materiálech. Může zde docházet k adheznímu otěru, kdy se na povrchu kuličky může usazovat hliník. Další nevhodný příklad je skenování litinových povrchů, které může způsobit poškození kuličky otěrem.[6] [14]
- b) Nitrid křemíku: Tento materiál je velmi tvrdý a má značnou odolnost proti opotřebení. Bohužel ale dochází k opotřebení otěrem při měření ocelových povrchů.[6]
- c) Oxid zirkoničitý: Jedná se o velmi pevný keramický materiál s podobnými vlastnostmi jako rubín. Je vhodný pro měřicí aplikace litinových povrchů.[6]
- d) Diamant: Tento materiál umožňuje nejpreciznější a nejekonomičtější měření. Diamant má hladký povrch a velikou tvrdost. Umožňují skenování hliníkových povrchů a snášejí velké zatížení. Můžeme je tedy použít pro všechny měřicí aplikace. [6]

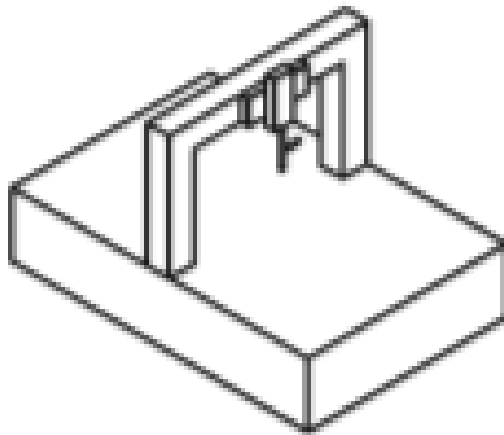


Obrázek 13: Materiály měřicích elementů[6]

4 Konstrukce souřadnicových strojů

4.1 Mostová s pohyblivým mostem

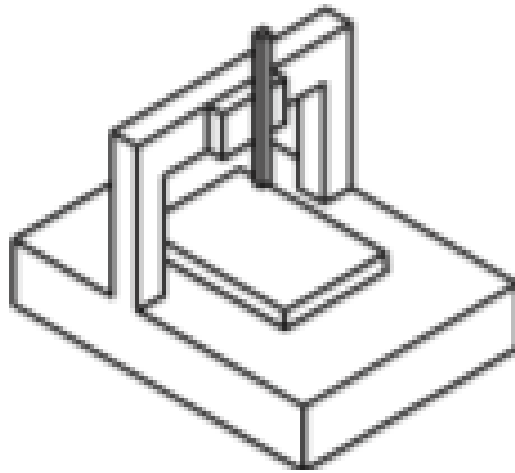
Mostová pohyblivá konstrukce přístroje CMM patří do nejčastěji používané v CMM průmyslu. Skládá se ze stacionárního stolu pro podepření měřeného dílu a pohyblivého mostu. Pohyb měřicí sondy po pracovním stole je realizován posuvem obou podpěrných nohou různými rychlostmi. Tento duální posuv snižuje přesnost měření na tomto stroji. V porovnání s konzolovou konstrukcí dosáhneme menšího ohybu druhé horizontální osy z důvodu dvou podpěrných noh. Mostová pohyblivá konstrukce nám umožňuje měřit v malém až středním rozsahu s relativně malými nepřesnostmi. Obecné mostové konstrukce nacházejí využití v laboratorních měření.[2]



Obrázek 14: Mostová konstrukce s pohyblivým mostem[2]

4.2 Mostová s nepohyblivým mostem

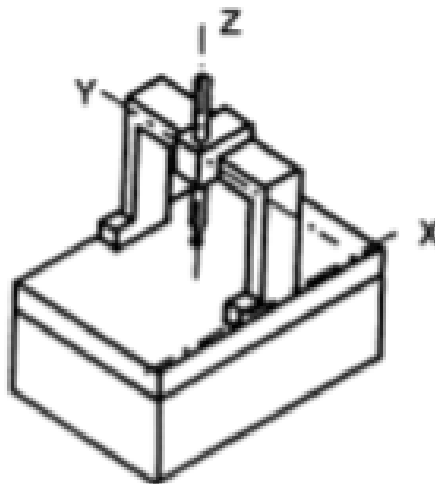
V této konfiguraci je most nepohyblivý a připevněn k tělu stroje. Toto provedení stroje zaručuje vysokou tuhost stroje. Nejpřesnější CMM stroje jsou právě proto v této konfiguraci. Na druhou stranu rychlost měření je snížena, jelikož musíme posouvat s těžkým měřicím stolem, který má na sobě měřenou součást. To snižuje využitelnost stroje, jelikož si nemůžeme dovolit tak vysokou hmotnost měřených dílů. Váha dílů nám také způsobuje ohyb, který má negativní vliv na přesnost měření. [2]



Obrázek 15: Mostová konstrukce s nepohyblivým mostem[2]

4.3 Portálová konstrukce

Portálová koncepce nám umožňuje měření středních až velkých dílů s dosažením příznivé přesnosti. V praxi často používáme konstrukci s duálním-posuvem pro zvětšení tuhosti a vedení posuvného trámu. Díky velkému rozměru stroje máme dobrý přístup ke všem částem měřeného dílu. Tento druh CMM má příznivý poměr cena-výkon. Cena tohoto

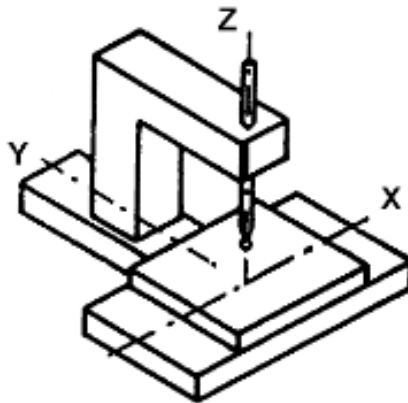


Obrázek 16: Portálová konstrukce[1]

stroje však může růst s požadavkem na větší přesnosti, které můžeme docílit pořízením speciálního vybavení, či provedení základny z velkých žulových bloků nebo izolované základny.[2]

4.4 Stojanová konstrukce

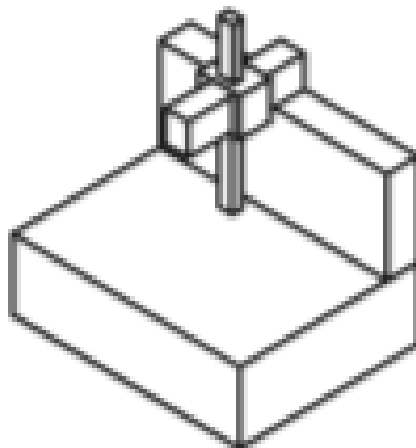
Tato konstrukce nám umožňuje menší rozsah měření s dobrou přístupností k měřené části. CMM je tvořeno z dělicích stolů, díky tomu můžeme měřit v polárních souřadnicích. Tyto CMM se často nachází v laboratorních prostředí.[1]



Obrázek 17: Stojanová konstrukce[1]

4.5 Výložníková konstrukce

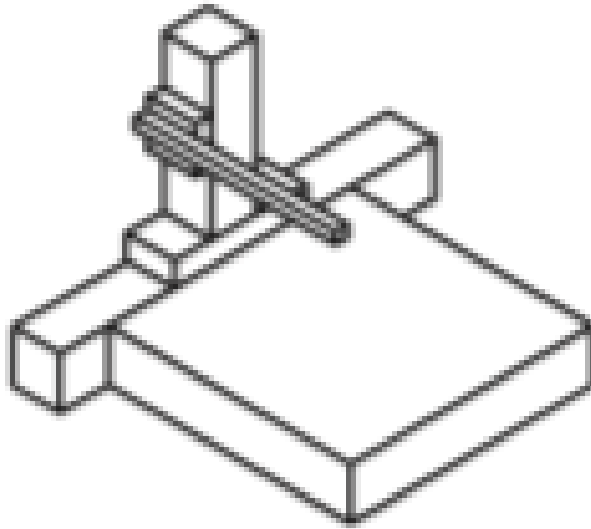
Tato koncepce má konzolové rameno pro pohyb ven a dovnitř z měřeného prostoru. Vertikální pohyb nám umožňuje vysouvací měřicí sonda. Jelikož máme 3 volné strany, máme tedy ideální přístup k měřené součásti. Měřená součást je umístěna na měřicím stole a umožňuje i těžší předměty pro samotné měření. Výložníková koncepce nám umožňuje dlouhý měřicí stůl s relativně malým měřicím rozsahem v dalších dvou osách pro měření dlouhých a tenkých součástí. V porovnání s mostovou konstrukcí nedosahujeme takové přesnosti. Tato konstrukce je vhodná i pro dílenské použití.[2]



Obrázek 18: Výložníková konstrukce[2]

4.6 Horizontální rameno

Konstrukce horizontálního ramene je vhodná pro měření automobilových karoserií a ostatních podobně velkých součástí. Výhodou těchto CMM je výborný přístup ze všech stran k měřené součásti. Nevýhodou je menší přesnost, z důvodu malé tuhosti horizontálního ramene. K měření se používají i duální ramena pro zvětšení účinnosti měření a snížení času měření. Měřicí ramena měří proti sobě z obou stran.[2]



Obrázek 19: Horizontální rameno[2]

5 Upínací systémy

5.1 Renishaw upínací stavebnice pro CMM

Společnost Renishaw nabízí flexibilní řešení pro upínání součástí komplexních tvarů, velikostí a materiálů. Toto řešení je využíváno ke kontrole součástí napříč zdravotnickým, letecko-kosmickým, automobilovým a elektronickým průmyslem. Výhodou těchto upínacích stavebnic je jejich možnost rychlého sestavení a tím snížení odpovídajících časových prostojeů.[8]

5.2 Upínací deska

Základní součástí je upínací deska, která je odlita z hliníku a je opatřena tvrzeným eloxovaným povlakem NiTuff®. Tento povlak zvyšuje odolnost proti poškrábání a opotřebení. Rozměry těchto desek jsou dodávány až v rozměrech 1500x3000mm, 60“x 120“. Systém upínání je realizován pomocí závitů M4, M6, M8, každá závitová díra je opatřena souřadnicí, která umožňuje rozebrání a opětovné sestavení upínací sestavy. Upínací desky lze na stůl upevňovat pomocí speciálních upínek. [8]



Obrázek 20: Upínací deska Renishaw[8]

5.3 Upínací elementy

Na upínací desku můžeme pomocí upínacích elementů provádět samotné vytváření upínacích sestav pro upínání měřených součástí. Tyto elementy jsou snadno nastavitelné a stačí minimálních sil pro montáž. Mezi tyto elementy patří upínky, úhlově nastavitelné prvky, stavěcí věže, podpěry, magnety a další příslušenství. [8]



Obrázek 21: Upínka[8]



Obrázek 22: Podpěra[8]



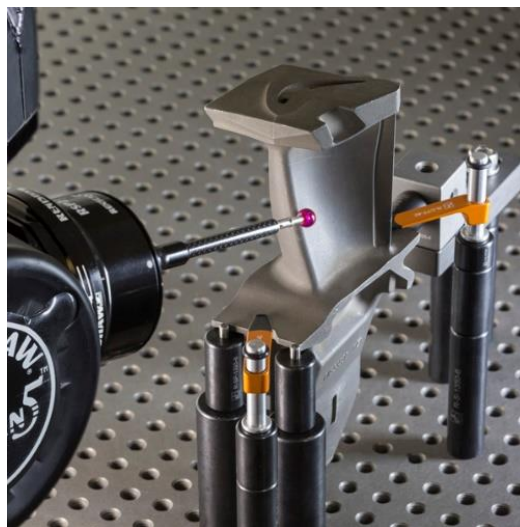
Obrázek 24:Stavitelná kloub[8]



Obrázek 23:Magnet[8]



Obrázek 25:Stavěcí věž[8]



Obrázek 26:Příklad upnutí lopatky turbínového kola[8]

5.4 Svěrák

Svěrák je základní upínací nástroj, pomocí upínek je možný rychlé a tuhé upnutí. Je tvořen dvěma čelisti, jedna je pohyblivá a druhá je pevná. Vyrábí se z litiny a čelisti jsou osazeny kalenými a broušenými výměnnými nástavci. Pohyb čelistí je realizován pomocí pohyblivého šroubu, pneumaticky či hydraulicky. Některé svěráky jsou osazeny otočnou hlavou kolem svislé osy s možností naklápění o nastavitelný úhel.



Obrázek 27:Svěrák[9]

5.5 Univerzální naklápěcí otočný stůl

Upínání je také možné pomocí univerzálního naklápěcího otočného stolu. Můžeme zde upínat dílce v námi nastavené libovolné poloze. Naklápěním stolu můžeme nastavit různé složené úhly.



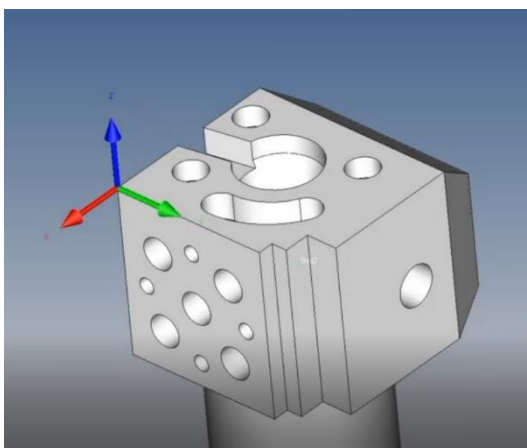
Obrázek 28:Univerzální naklápěcí otočný stůl [10]

5.6 Otočný stůl pro CMM

Otočný stůl je ideální doplněk pro stroje CMM, obzvláště pro otáčení symetrickými součástmi jako jsou lopatky, ozubená kola atd.. Jako příklad bych uvedl stůl RT-AB od firmy Zeiss. Tento stůl se pohybuje na vzduchovém ložisku a umožňuje tak rychlé přesuny.

6 Vytváření obecných křivek v programu Calypso 2017

K měření turbínových lopatek využíváme stroje CMM, jelikož plochy lopatek jsou obecné 3D plochy, a protože pro jejich vyhodnocení potřebujeme nasnímat a vyhodnotit velké množství bodů. K vyhodnocování turbínových kol lze použít univerzální měřicí software CALYPSO jen pro základní vyhodnocení tvaru. Pro specializované vyhodnocení např. rádius náběžné hrany, délka tětivy lopatky je třeba mít k dispozici i specializovanou nadstavbu Blade Pro. Ta nám umožňuje vyhodnocovat tvarově složité lopatky. Pro příklad vytvoření obecné křivky použijí cvičný CAD model výukové

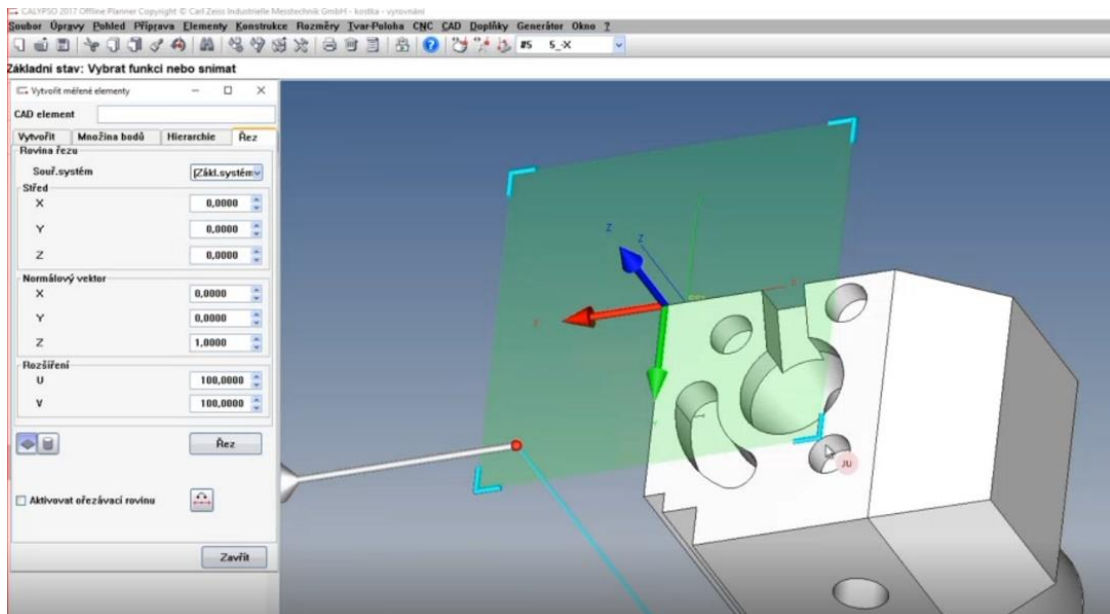


Obrázek 29: Výuková součást

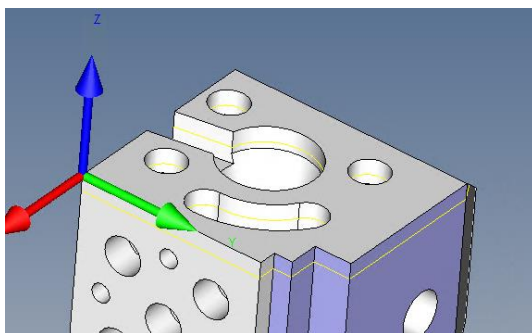
součásti od firmy Zeiss (cvičná kostka). Princip tvorby obecných křivek je stejný a tudíž princip lze aplikovat na všechny součásti. Pro ukázání principu tedy budu chtít vytvořit křivku z kapsy na cvičné kostce. Pro tyto účely používám program Calypso 2017 poskytnutý od ČVUT.

K vytvoření křivky je třeba na součásti vytvořit řez. To provedeme tak, že klikneme na ikonku CAD-Vytvořit měřené elementy-Řez.

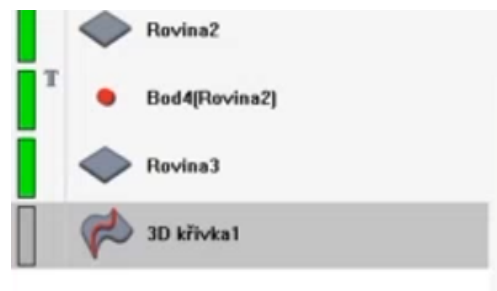
Nastavíme parametry roviny a kliknutím na ikonku Řez se vytvoří řez, označený žlutou čarou. Dále je třeba rozkliknout znovu CAD-Vytvořit měřený element. Následně podržíme Ctrl a vybereme stisknutím levého tlačítka myši všechny plochy přes který je veden řez. Je třeba také uvážit kolika body bude křivka tvořena. Následně klikneme na ikonku 3D křivka a v elementech už se nám tato křivka objevila a je vytvořena. Můžeme s ní dále pracovat a vyhodnocovat. Můžeme vyhodnocovat v Calypsu například tvar profilu.



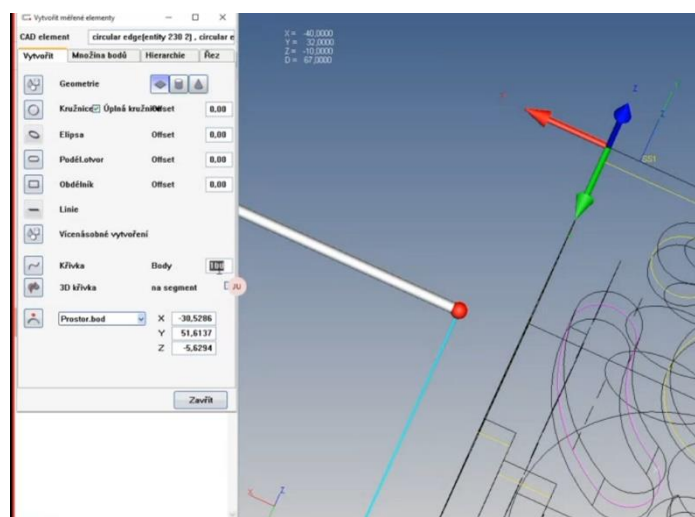
Obrázek 30: Tvorba roviny



Obrázek 32: Vytvořený řez



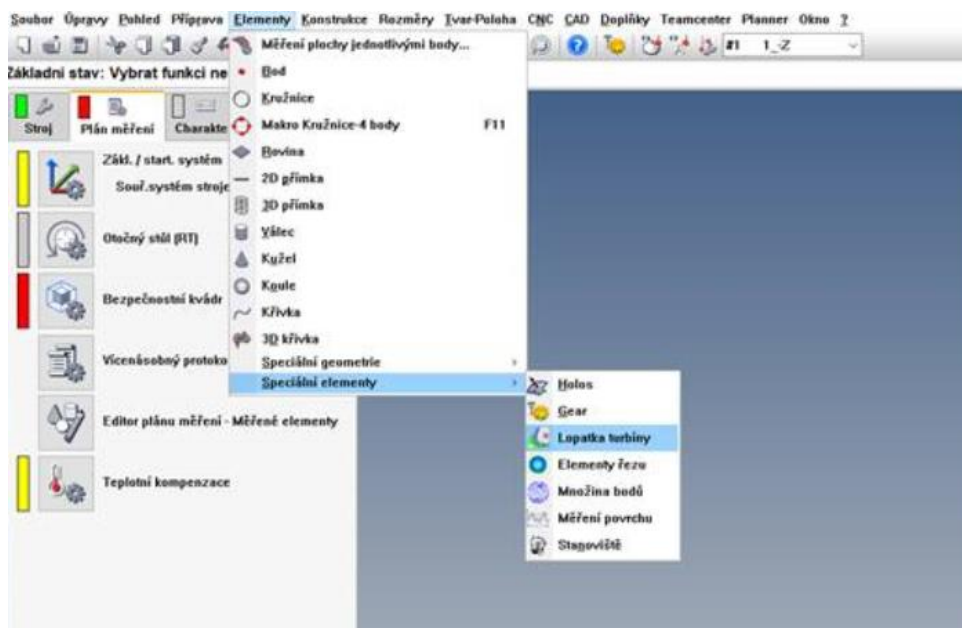
Obrázek 31: Ikonka křivky



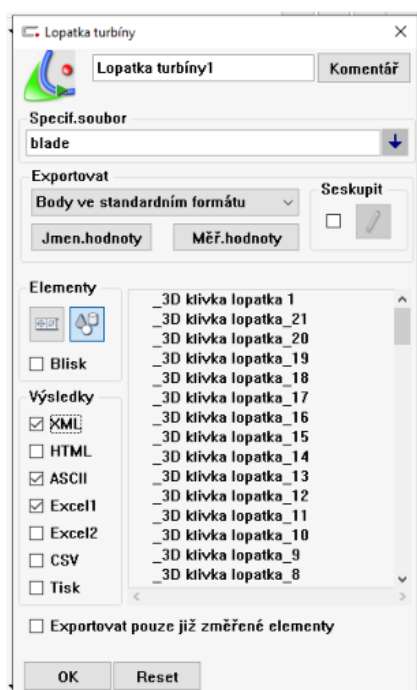
Obrázek 33: Tvorba křivky

7 Export bodů z programu Calypso 2017

Export dat do formátu XML se realizuje přes speciální element Lopatka turbíny



Obrázek 34: Export dat 1



Obrázek 35: Export dat 2

8 Měření lopatkových kol

8.1 Úvod do Blade Pro

Blade Pro je systém vyvinutý pro vyhodnocování měření turbínových lopatek na základě nominálních a naměřených dat, které jsou generovány prostřednictvím strojů CMM. Na poli produkce turbínových lopatek, které jsou v provozu namáhány vysokými teplotami a odstředivými silami je nutné zaručit vysoké kvalitativní požadavky a zaručit bezpečnost a spolehlivost těchto součástí v různých odvětvích.



Obrázek 36: Blade pro aplikace [11]

8.2 Definování specifikace lopatky

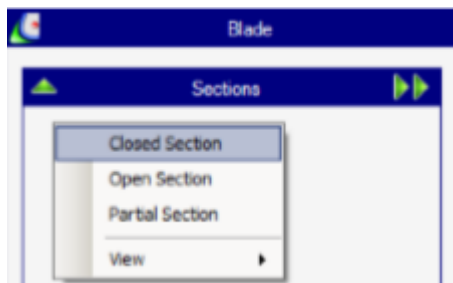
Při otevření programu BladePro a před začátkem vyhodnocování měření lopatky je nutné vyplnit specifikaci lopatky. Tato specifikace nám upřesňuje číslo lopatky, její název, sériové číslo, výrobce, kontrolera, operátora a další potřebné údaje.

Specification				
Name		Relative Result Directory		
Turbine Blade		<Company>\<Departement>\		
Blade Properties				
Position	Name	Content	Type	
1	SEM	4711	Dynamic	
3	Part Naming	1234	Dynamic	
4	AVO	234	Dynamic	
5	Blade Number	1	Dynamic	
6	Part Number	22000567	Dynamic	
7	Charge Number	45678	Dynamic	
8	Serial Number	M000321	Dynamic	
9	Company	IZM Dresden	Static	
10	Departement	TTQ	Static	
▶	11	<Date>	Dynamic	
	12	<Time>	Dynamic	
+	13	Controller	Mr. Miller	Dynamic

Obrázek 37: Specifikace lopatky [12]

8.3 Definování a vytvoření nového měřeného řezu lopatkou

V pravém rohu obrazovky rozklikneme navigační okno s názvem Blade („lopatka“), které obsahuje podokno Sections („řezy“). Po jeho rozkliknutí pravým tlačítkem se nám objeví 3 možnosti měření. [12]



Obrázek 38: Měření řezu [12]

8.3.1 Closed section (uzavřený řez)

Closed section znamená měření uzavřených řezů (první a poslední měřený bod je identický). Toto měření budeme volit pro standardní měření lopatek, který mají uzavřený profil. V dalším popisovaném postupu budeme vycházet z tohoto výběru. [12]

8.3.2 Open section (otevřený řez)

Jestliže požadavek na uzavřený profil není splněný, tak volíme měření neuzavřeného profilu řezu. [12]

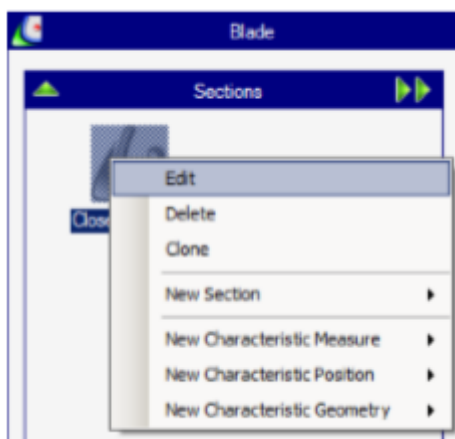
8.3.3 Partial section (částečný řez)

Tato možnost je pro vyhodnocování jednotlivých částí řezu. Jako příklad když chceme konkrétně vyhodnocovat samostatně náběžnou a odtokovou hranu.

V dalších krocích již není možno se k tomuto rozdělení vrátit a změnit ho. [12]

8.4 Import nominálních dat do Blade Pro

Při rozkliknutí pravým tlačítkem ikonky „Closed section“ můžeme po rozkliknutí tlačítka „edit“ vyplnit vlastnosti daného řezu. Vyplňujeme číslo a značení řezu, číslo součásti. [12]



Obrázek 39: Vlastnosti řezu [12]

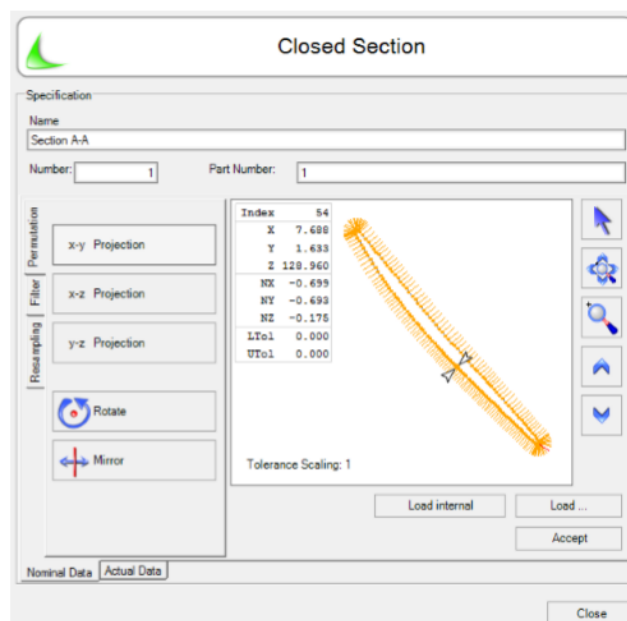
Po rozkliknutí ikonky „Closed section“ levým tlačítkem okno daného řezu. Stisknutím tlačítka „Load“ (nahrát) můžeme nahrát nominální data daného řezu. Tyto data jsou graficky vykresleny v pravé části dialogového okna. [12]

Pomocí tlačítek na pravé straně můžeme najíždět kurzorem na jednotlivé body a zjišťovat jejich vlastnosti zobrazené nalevo od řezu. Dále můžeme řez přibližovat či dle naší potřeby různě otáčet.

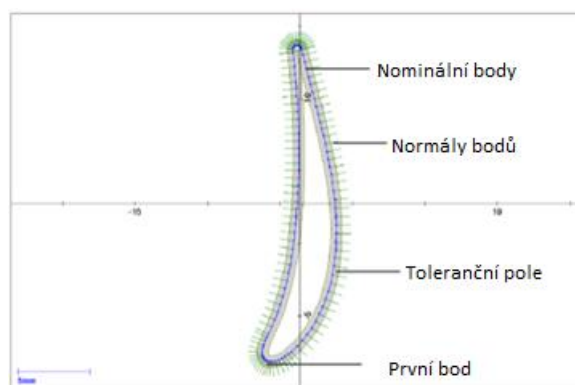
Tlačítka na levé části od grafického zobrazení slouží k přepínání mezi jednotlivými rovinami zobrazení.

Pod tlačítka které se týkají rovin, se nachází tlačítka pro změnu geometrických pozic nominálních dat. Můžeme otočit nominální data po směru hodinových ručiček či tyto data zrcadlit. Nalevo od tlačítek rovin se dále nachází tlačítko „Filter“ pro různé filtrování bodů v měřeném řezu. Tlačítko „Resampling“ nám umožňuje vytvořit profilový segment pro který můžeme předefinovat rozdělení bodů.

Tlačítkem „Accept“ (přijmout) finálně přijmeme nominální data a tlačítkem „close“ (zavřít) toto okno zavřeme. K těmto datům se lze vrátit z pozdějších kroků.

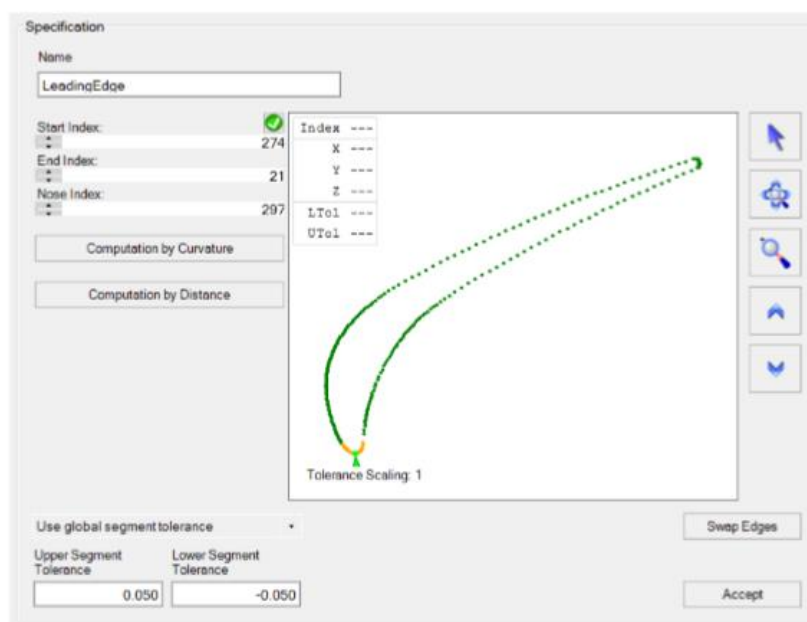


Obrázek 41::Dialogové okno řezu[12]



Obrázek 40::Vykreslení nominálních dat[12]

V dolní části programu Blade Pro je klikneme na náš požadovaný řez pro grafické prohlédnutí nominálních dat. Na obrázku níže vidíme modré nominální body, každému tomuto bodu patří zelené normála, která nám označuje směr měření. Šedý pruh nám



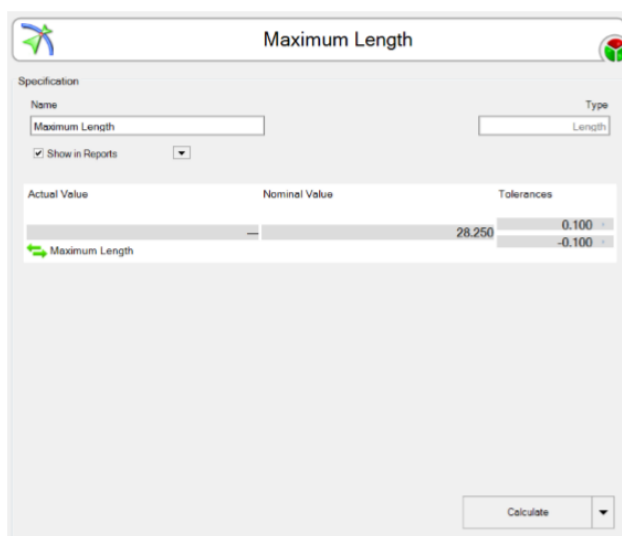
Obrázek 42: Specifikace náběžné hrany[12]

vyjadřuje toleranční pole. Při nahrávání nominálních dat je náběžná a odtoková hrana určena automaticky.[12]

8.4.1 Kontrola nominálních dat a definování tolerance

Zde je možné upravit jednotlivé části profilu pod tlačítkem „Characteristic geometries“ (charakteristická geometrie). Pro uzavřený profil jsou důležité 2 prvky, náběžná a odtoková hrana. Tyto prvky jsou tvořeny automaticky při nahrávání nominálních dat. Tyto prvky je doporučeno zkontrolovat. Pomocí tlačítek „Start index“ a „End index“ je možné upravit začátek a konec náběžné či odtokové hrany dle nastavení konkrétních bodů. Při výběru „Use global segment tolerance“ (globální tolerance) je možné rovnoměrnou toleranci změnit pomocí zadání přesné dolní a horní hodnoty tolerance. Tolerování pomocí horní a dolní hodnoty je možná i pro celý profil a nejen pro konkrétní část. Místo výběru „Use global segment tolerance“ je možné vybrat „Use pointwise tolerance“ (bodová tolerance), to nám umožňuje přiřazení bodových tolerancí, například z programu Calypso zejména ze sekce Calypso Curve. Dále je možné zde vybrat „Interpolate segment tolerances“ (interpolární tolerance), která využívá lineární interpolaci. Veškeré úpravy je nutné potvrdit tlačítkem „Accept“ a zavření dialogového okna s „close“.[12]

8.5 Charakteristiky řezu

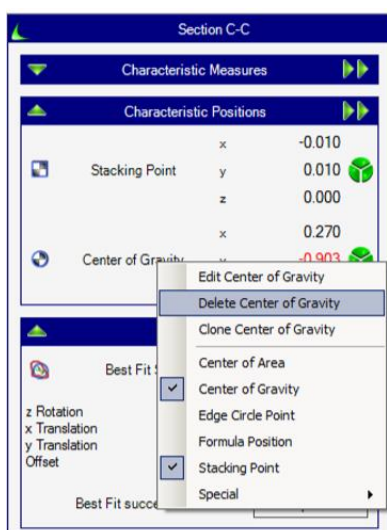


Obrázek 43: Maximální délka[12]

Po definování a zkontrolování všech segmentů je třeba konfigurovat požadované charakteristiky měření nebo geometrické charakteristiky. Tyto charakteristiky jsou přidávány přes tlačítko „Edit“ (upravit) a dále „New characteristic measure/New characteristic position“ (charakteristiky měření/charakteristické pozice).

Ke každé nově vytvořené charakteristice náleží dialogové okno, ve které můžeme zadat velikost nominální hodnoty a její tolerance. Tlačítko „Nominal calculation“ (nominální výpočet) nám umožňuje pro mnoho charakteristik spočítat nominální hodnotu. Tyto hodnoty mohou být přepsány, slouží jako výchozí hodnoty. V obou dialogových oknech se nám zobrazuje status měření. V horním okně se nám zobrazuje barevná aktuální naměřená hodnota. Zelená znamená výsledek validní a červená znamená nevalidní výsledek. Validita udává, zda test skutečně měří měřenou vlastnost. V okně dole se nám zobrazuje status měření nominální hodnoty a tolerance.

Výsledek měření můžeme zobrazit graficky, v souboru html nebo v textovém souboru.[12]



Obrázek 44: Status měření[12]

8.6 Vyhodnocování naměřených dat

8.6.1 Nahrání naměřených dat



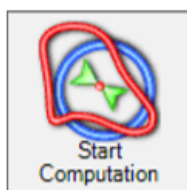
Obrázek 45: Nahrání aktuálních dat [12]

Před importem naměřených hodnot musíme nejdříve vybrat odpovídající charakteristiku lopatky. Nahrání charakteristiky provedeme přes „File“ (soubor) – „open“ (otevřít) – „specifikace“ (specifikace). Po rozkliknutí ikonky daného řezu přepneme pomocí ikonky „Actual data“ (aktuální data) na skutečné naměřené data. Pomocí tlačítka „Load“ (nahrát) importujeme naměřená data ve formátu XML. Data se vykreslí graficky. Přiřazená data musíme potvrdit tlačítkem „Accept“. [12]

8.7 Vyhodnocení

Stisknutím tlačítka „Start computation“ (začít vypočítávat) se nominální data vloží do aktuálních.

Výsledky jsou zobrazeny pod „Characteristic measures“ (charakteristické měření) nebo „Characteristic positions“ (charakteristické pozice). Červené hodnoty jsou mimo toleranci. Černé hodnoty leží v toleranci. Výsledky můžeme zobrazit i graficky. [12]

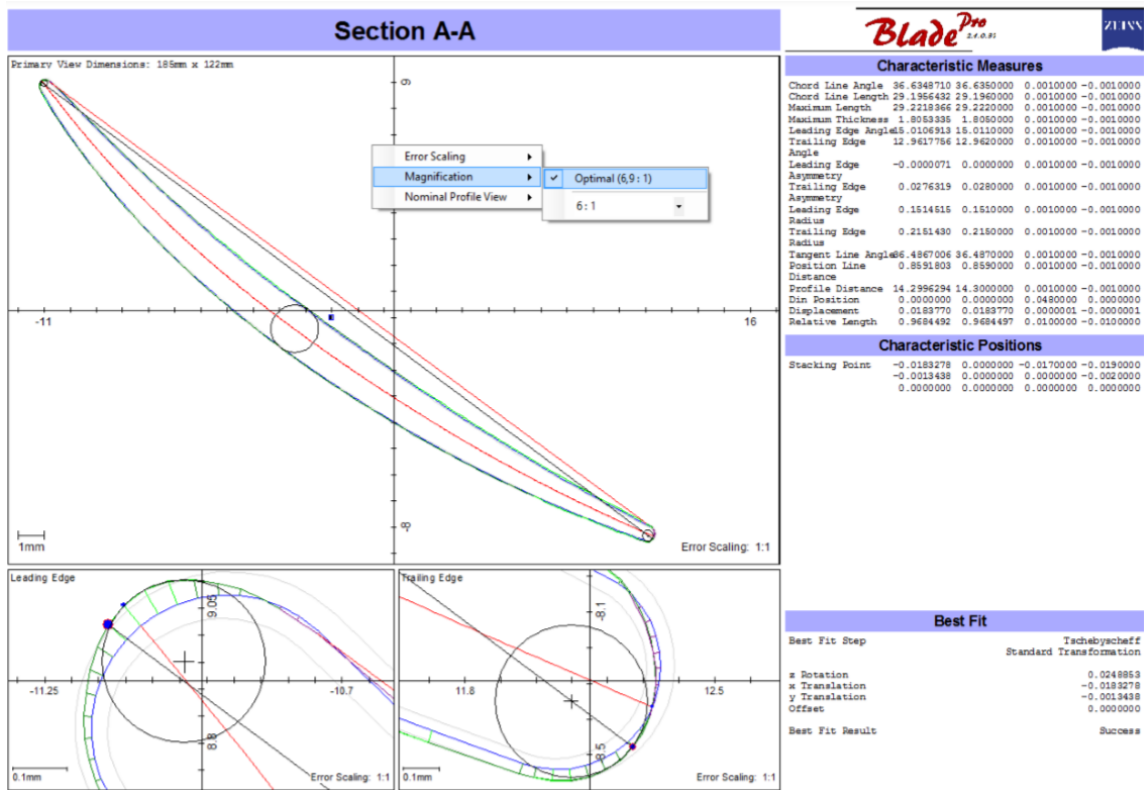


Obrázek 46: Ikona startu měření [12]

8.8 Export dat

Měřená data můžeme exportovat pomocí kliknutím na „File“ (soubor) – „Export“. Měřená data jsou ve formátu XML. [12]

8.9 Příklad formuláře z měření

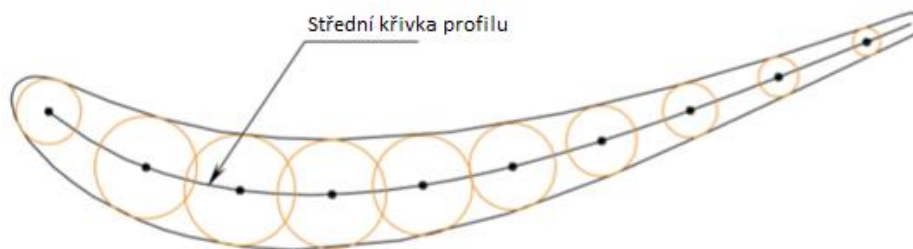


Obrázek 47: Formulář z měření[12]

8.10 Vybrané geometrické charakteristiky

8.10.1 Střední křivka profilu

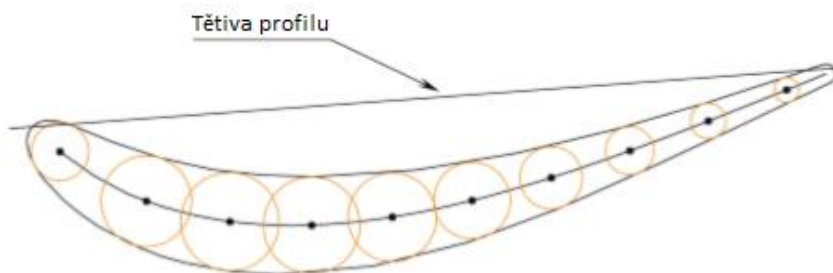
Střední křivka profilu propojuje středy všech vepsaných kružnic, které jsou umístěny v profilu.[12]



Obrázek 48: Střední křivka profilu[12]

8.10.2 Tětiva profilu

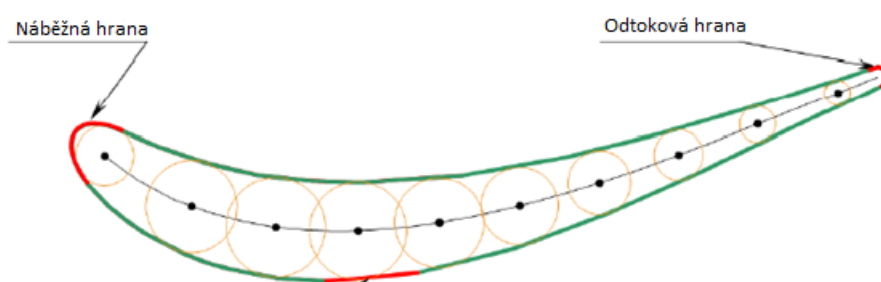
Tětiva profilu je přímka spojující body dotyku prodloužené střední křivky s profilem lopatky.[12]



Obrázek 49: Tětiva profilu [12]

8.10.3 Náběžná a odtoková hrana

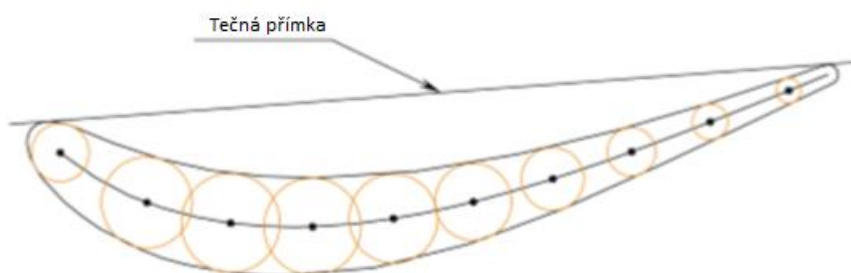
Náběžná a odtoková hrana je definována začátečním a koncovým bodem. Musí být tvořena minimálně třemi body. [12]



Obrázek 50: Náběžná a odtoková hrana [12]

8.10.4 Tečná přímka

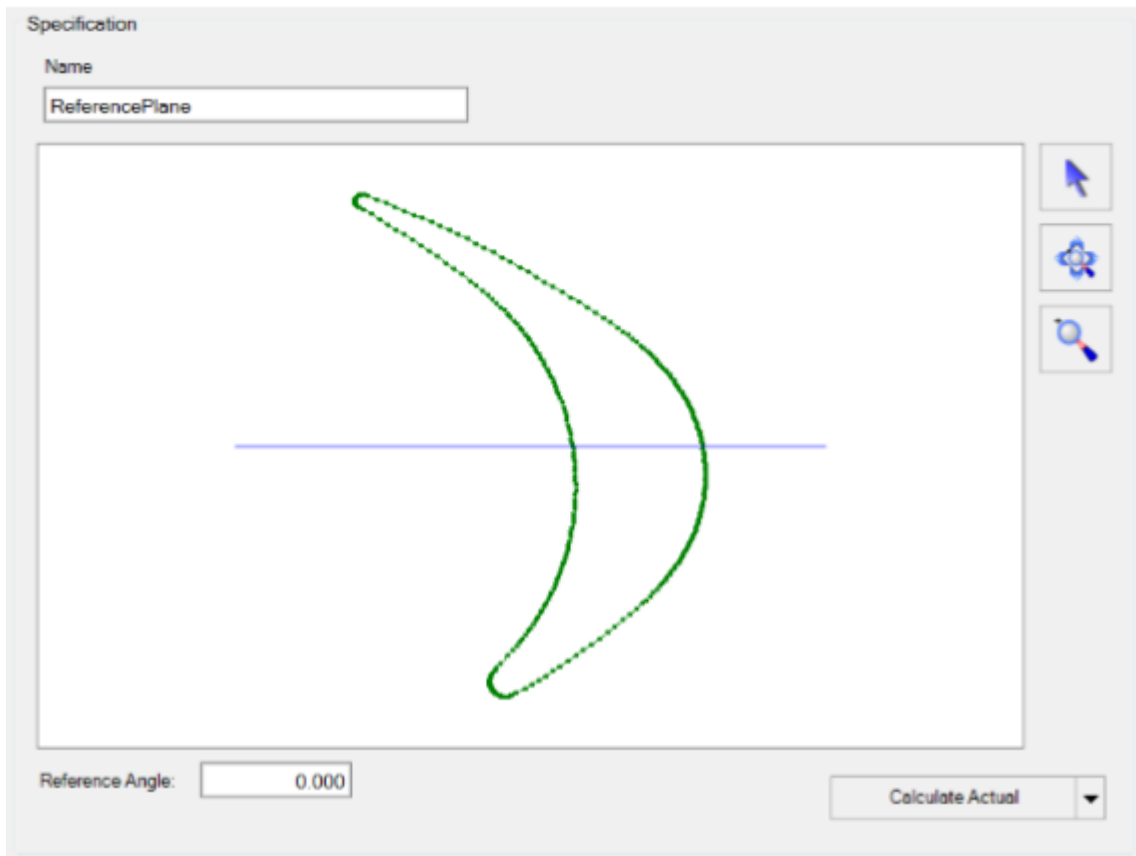
Tato křivka je tvořena body na jedné straně profilu a je určena minimálně dvěma body. Křivku z opačné strany uzavírá konkávní strana. Tečna je 2D křivka. [12]



Obrázek 51: Tečná přímka [12]

8.10.5 Referenční rovina

Referenční rovina je obecně vložena, aby indikovala výhodný směr v rovině řezu lopatky. K této rovině se vztahují charakteristiky jako K bod, vzdálenost bodu K, maximální

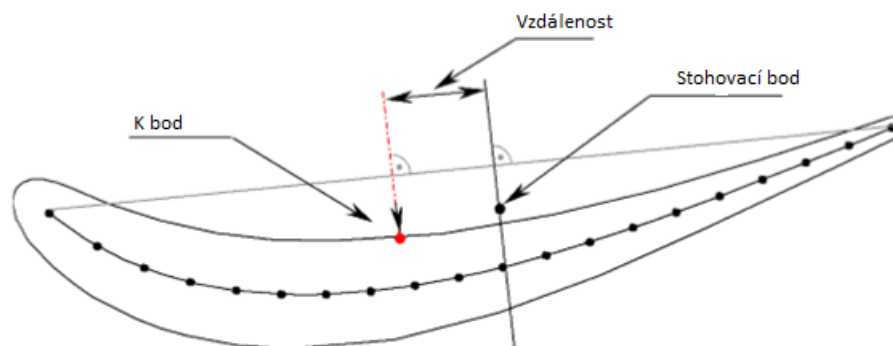


Obrázek 52:Obrázek:Referenční rovina[12]

vzdálenost a délka referenční roviny. Tuto rovinu je potřeba definovat úhlem s osou x. Referenční bod této roviny je stohovací bod.[12]

8.10.6 Stohovací bod

Stohovací bod je nominálně určen jako bod průniku osy Z rovinou uvažovaného řezu lopatkou leží na referenční rovině).[12]



Obrázek 53:Stohovací bod a K-bod[12]

8.10.7 Bod K

Bod K nám představuje bod v řezu , který je definován jeho vzdáleností od stohovacího bodu který leží na referenční rovině. Jeho poloha je odvozena od průsečíku normály se skutečným profilem.[12]

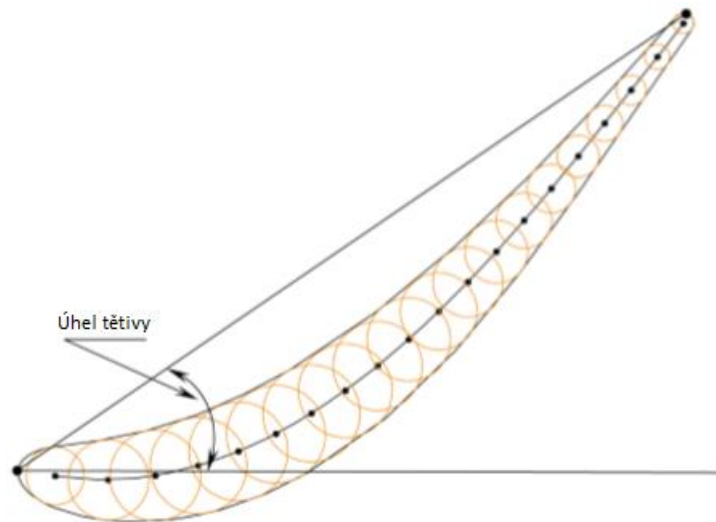
8.11 Charakteristické měření

8.11.1 Povrch

Toto měření vyhodnocuje kvalitu povrchu zkoumané sekce povrchu lopatky a porovnává ji se zadanou nominální hodnotou.[12]

8.11.2 Úhel tětivy

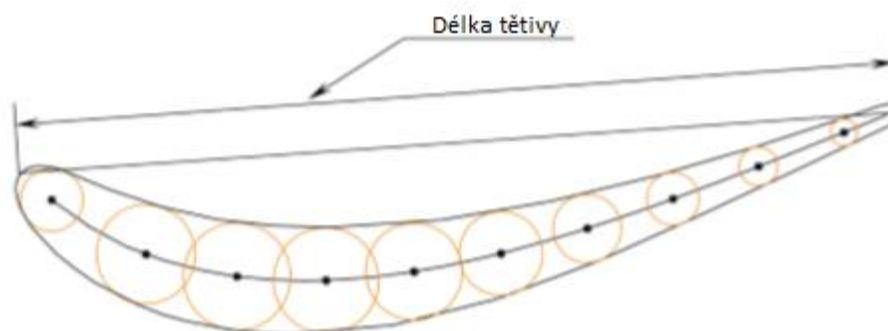
Úhel tětivy je úhel který svírá osa X a tětiva profilu. Aktuální hodnota se porovnává vůči nominální hodnotě, která je opatřena tolerancí. [12]



Obrázek 54: Úhel tětivy[12]

8.11.3 Délka tětivy

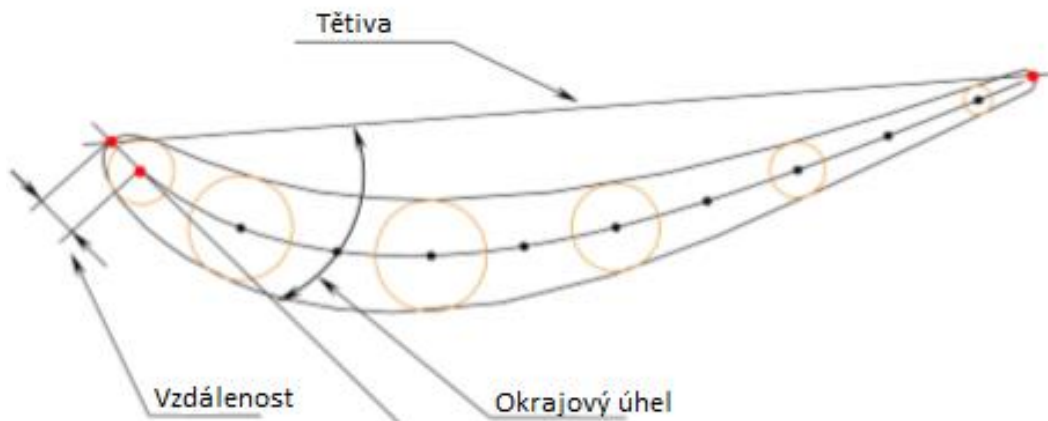
Dále se vyhodnocuje délka aktuální tětivy oproti nominální s tolerancí. [12]



Obrázek 55: Délka tětivy[12]

8.11.4 Měření okrajového úhlu

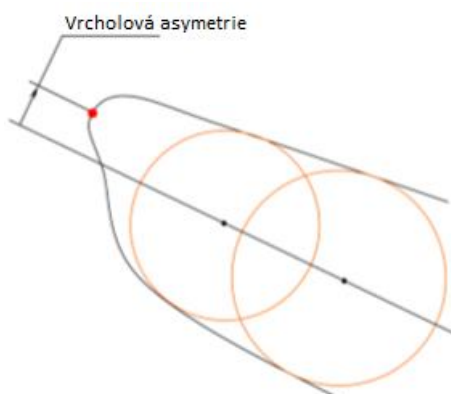
U tohoto měření měříme úhel, který svírá tětiva profilu a přímka spojující okrajový bod střední křivky s bodem na střední křivce v určité vzdálenosti. Tuto hodnotu porovnáváme vůči nominální s tolerancí. [12]



Obrázek 56: Měření orajového úhlu [12]

8.11.5 Vrcholová asymetrie

Toto měření udává vzdálenost mezi vrcholovým bodem na náběžné nebo odtokové hraně se střední křivkou. Vzdálenost je měřena kolmo na střední křivku profilu. [12]



Obrázek 57: Vrcholová asymetrie [12]

8.11.6 Poloměr náběžné a odtokové hrany

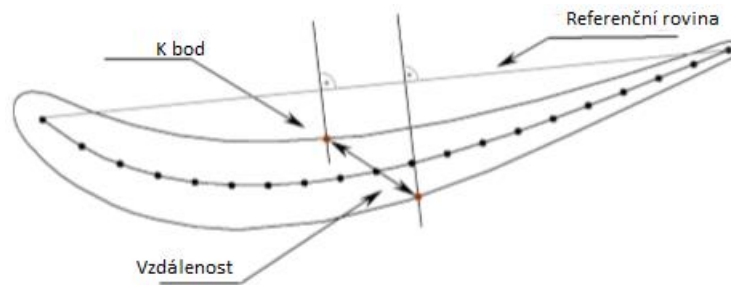
Tento poloměr je určován z nejmenší kružnice, která se vepíše do profilu v náběžné či odtokové hraně. Jedná se o aproximaci náběžné či odtokové hrany rádiusem. Porovnáváme s nominální hodnotou a tolerancí. [12]

8.11.7 Krajiní tloušťka

Toto měření odpovídá největšímu průměru vepsané kružnice do měřeného profilu který je porovnáván s nominální hodnotou a tolerancí. [12]

8.11.8 Vzdálenost bodů K

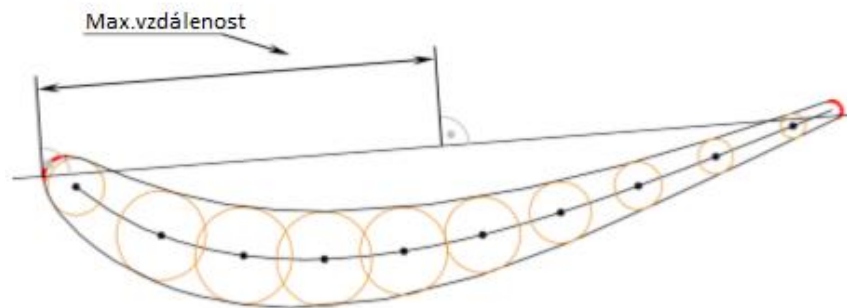
Tato vzdálenost reprezentuje vzdálenost dvou K bodů. Aktuální hodnotu porovnáváme s nominální a tolerancí. [12]



Obrázek 58:Vzdálenost bodů K[12]

8.11.9 Maximální vzdálenost roviny od náběžné či odtokové hrany

Toto měření vyjadřuje největší vzdálenost stohovacího bodu (leží na referenční rovině) od nejvzdálenějšího bodu na náběžné či odtokové hraně profilu. Aktuální hodnotu porovnáваме vůči nominální s tolerancí. [12]



Obrázek 59:Vzdálenost roviny od náběžné či odtokové hrany[12]

8.11.10 Maximální vzdálenost roviny od náběžné či odtokové hrany

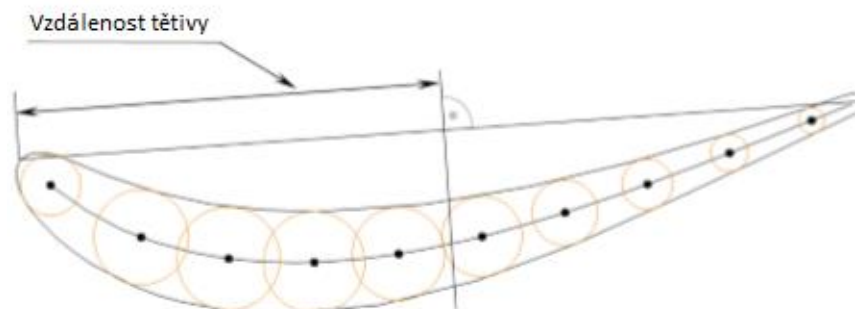
Toto měření vyjadřuje největší vzdálenost dvou bodů z nichž jeden leží na náběžné a druhý na odtokové hraně profilu. Aktuální hodnotu porovnáваме vůči nominální s tolerancí. [12]

8.11.11 Vzdálenost střední křivky

Toto měření vyhodnocuje vzdálenost střední křivky profilu. Aktuální hodnotu porovnáваме vůči nominální s tolerancí. [12]

8.11.12 Vzdálenost tětiny od stohovacího bodu

Toto měření vyhodnocuje vzdálenost tětiny od stohovacího bodu k náběžné či odtokové hraně. Aktuální hodnotu porovnáваме vůči nominální s tolerancí. [12]



Obrázek 60:Vzdálenost tětiny od stohovacího bodu[12]

8.11.13 Vzdálenost pozic

Toto měření vyhodnocuje vzdálenost dvou vybraných bodů nebo dvou definovaných přímk. Aktuální hodnotu porovnááme vůči nominální s tolerancí. [12]

8.11.14 Vzdálenost profilu

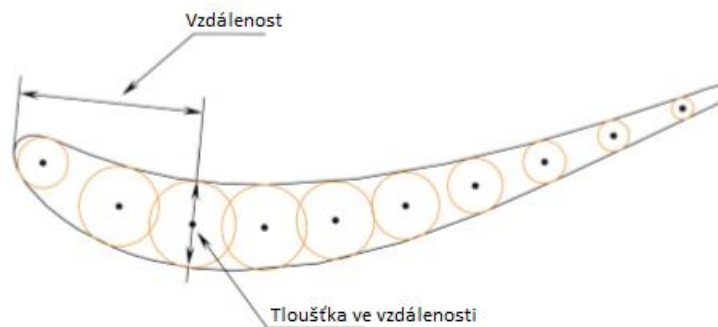
Toto měření popisuje vzdálenost mezi vybraným segmentem profilu a stohovacího bodu v definovaném směru. Aktuální hodnotu porovnááme vůči nominální s tolerancí. [12]

8.11.15 Úhel tečny

Toto měření vyhodnocuje úhel, který svírá tečna profilu a osa x. Aktuální hodnotu porovnááme vůči nominální s tolerancí. [12]

8.11.16 Tloušťka ve vzdálenosti

Toto měření vyhodnocuje tloušťku profilu v určité vzdálenosti od náběžné hrany. Aktuální hodnotu porovnááme vůči nominální s tolerancí. [12]



Obrázek 61: Tloušťka ve vzdálenosti [12]

8.11.17 Vlnitost

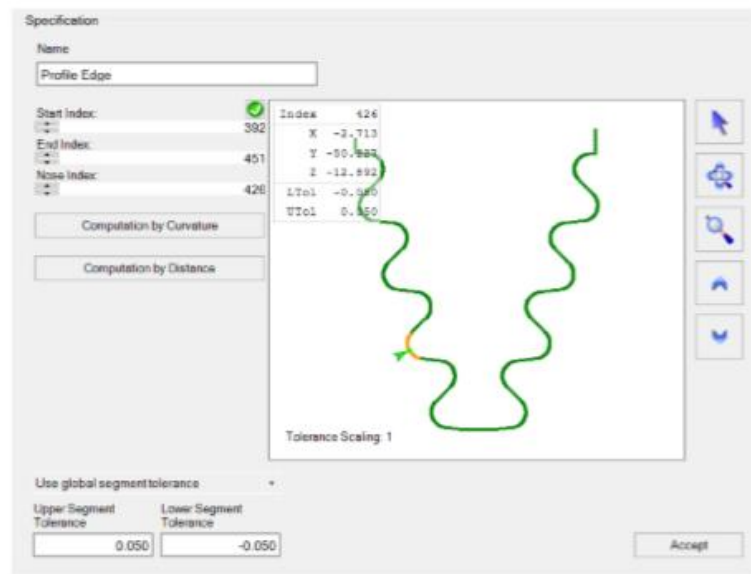
Vlnová charakteristika vypočítává vlnitost skutečného profilu. Vlnitost se stanoví měřením zvýšení odchylek vzhledem k jmenovitému profilu. V konfiguraci lze stanovit příslušnou toleranci pro toto zvýšení. Tato tolerance musí být interpretována jako přípustná změna odchylky na milimetr. Nominální hodnota je nula a tolerance je zadávána. [12]

8.11.18 Vlnitost 2

Jako výsledek je zobrazena křivka odchylek zvolené části profilu (konkávní / konvexní strana). Na tuto křivku se pak použije Fourierova transformace. Výsledek se pak zobrazí vynesím hodnoty amplitudy proti frekvenci. [12]

8.11.19 Vrchol profilu

Toto měření koresponduje s měřením náběžné či odtokové hrany. Je možné tedy definovat jakýkoliv vrchol na profilu pro převážně otevřené profily. Tento vrchol je třeba

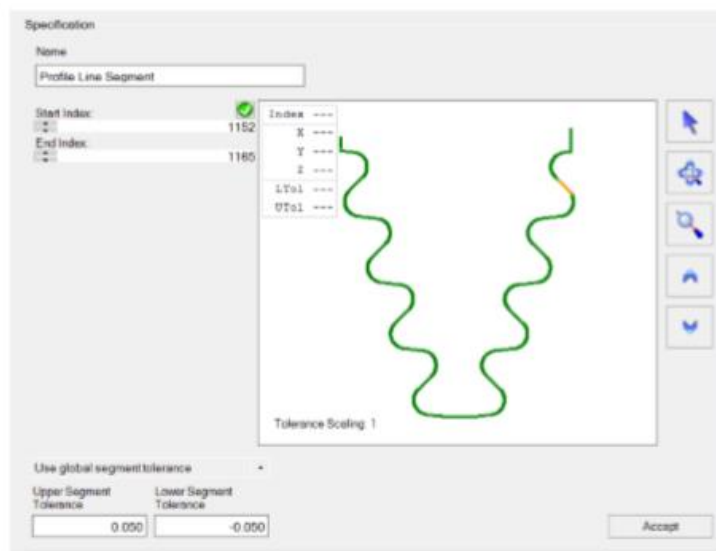


Obrázek 62: Měření vrcholu profilu [12]

definovat pomocí počátečního a konečného bodu. Vrchol musí být tvořen minimálně třemi body. Toleranci lze určit pro všechny body současně nebo pro každý zvlášť. [12]

8.11.20 Segment profilu

V tomto měření je možné vyhodnocovat určitý segment profilu. Nastavení je zase přes počáteční a koncový bod (minimálně 3 body). Toleranci lze určit pro všechny body současně nebo pro každý zvlášť (vzhledem k nominálním bodům). [12]



Obrázek 63: Měření segmentu profilu [12]

9 Závěr

Z uživatelského hlediska je program Blade Pro přehledný a má jednoduché prostředí. Před započítím měření je důležité mít dva soubory s nominálními a aktuálními hodnotami. Nominální hodnoty vygenerované z programu Calypso byly do Blade Pro nahrané bez problému. Při nahrávání měřených bodů jsem ale bohužel nebyl úspěšný, export bodů z Calypso 2017 a následné nahrání do Blade Pro se nepovedlo z neznámého důvodu. Možná zde mohl být problém s kompatibilitou mezi těmito programy při exportu měřených bodů. Dále je třeba mít aspoň základní přehled o měřených vlastnostech, důležitých charakteristikách měřeného profilu a základní práci s programem, jelikož tento program není vybaven přehlednou nápovědou přímo v programu, pouze je zde odkaz na manuál. Výpis měřených charakteristik a geometrických charakteristik v této BP ale není kompletní. Tato práce slouží jako zjednodušený návod a úvod do problematiky měření v programu Blade Pro. V tomto programu je možné vykonávat více měření, v rámci této BP jsem se ale rozhodl uvést měření spíše základní. Vyhodnocení náběžné hrany z důvodu neúspěšného nahrání bodů jsem bohužel nebyl schopný uskutečnit. Při zvládnutí výše popsaných problémů bude mít Blade Pro velký přínos při měření velmi specifických součástí. Rozsah možných měření bude zajišťovat vysokou úroveň kontroly vyráběných leteckých lopatek.

10 Zdroje

[1] TICHÁ, Šárka. Strojírenská metrologie. Ostrava: Vysoká škola báňská - Technická univerzita, 2004. ISBN 80-248-0672-x.

[2] HOCKEN, Robert J. a Paulo H. PEREIRA. Coordinate measuring machines and systems. 2nd ed. Boca Raton: CRC Press, c2012. ISBN 9781574446524.

[3] Technická univerzita v Liberci- katedra výrobních systémů a automatizace.

Souřadnicové měřicí stroje [online]. [cit. 2017-05-12]. Dostupné z <

<http://www.ksa.tul.cz/getFile/id:2522> >

[4] souřadnicový měřicí stroj. In: Mitutoyo [online]. Teplice: Mitutoyo, 2016 [cit. 2017-06-21]. Dostupné z: https://shop.mitutoyo.cz/web/mitutoyo/cs_CZ/mitutoyo/

[5] WILSON, Mark. What is a Voice Coil Actuator? Machinedesign [online]. 2018 [cit. 2019-11-10]. Dostupné z: <https://www.machinedesign.com/motion-control/what-voice-coil-actuator>

[6] ČEPOVÁ, Lenka a Lenka PETŘKOVSKÁ. Legislativa ve strojírenské metrologii a přesné měření 3D ploch: studijní opora. Ostrava: Vysoká škola báňská - Technická univerzita Ostrava, 2011. ISBN 978-80-248-2514-4.

[7] <https://www.zeiss.cz/metrologie/produkty/senzory/vast-xxt.html> obrázek a text (Propagační materiály společnosti Zeiss dostupné na <http://www.Zeiss.com>) [cit. 2020-07-17]

[8] <https://www.renishaw.cz/cs/upinaci-stavebnice-pro-cmm--20851> obrázky a text (Propagační materiály společnosti Renishaw dostupné na <http://www.renishaw.cz>)

[9] Svěrák. In: Gearbest [online]. [cit. 2020-07-23]. Dostupné z: https://cz.gearbest.com/other-tools/pp_365454.html

[10] Univerzální naklápěcí stůl. In: Cncupinani [online]. [cit. 2020-07-23]. Dostupné z: <https://www.cncupinani.cz/sveraky-a-upinace/delici-zarizeni/univerzalni-naklapeci-otocny-stul>

[11] Blade pro aplikace. In: Directindustry [online]. [cit. 2020-07-23]. Dostupné z: <https://www.directindustry.com/prod/carl-zeiss-industrielle-messtechnik-gmbh/product-5693-1555961.html>

[12] BLADE PRO Version2.4 Operating Instructions [online]. 2019 [cit. 2020-05-14].

[13] <https://www.renishaw.cz/cs/sp80-a-sp80h--6686> obrázky a text (Propagační materiály společnosti Renishaw dostupné na <http://www.renishaw.cz>)]. [cit. 2020-07-17]

[14] Production Machining [online]. 2015 [cit. 2020-07-23]. Dostupné z: [<https://www.productionmachining.com/>](https://www.productionmachining.com/).

Seznam obrázků

Obrázek 1:Schéma stroje CMM[2].....	12
Obrázek 2:Princip strojů CMM[2].....	13
Obrázek 3:Základní geometrické útvary [6].....	14
Obrázek 4: Senzory CMM dle principu[2].....	15
Obrázek 5:Nekomutovaný DC lineární aktuátor[5].....	16
Obrázek 6: Spínací dotykové senzory[2].....	16
Obrázek7:Kinematické schéma sondy s elektrokotaktním snímačem[6].....	17
Obrázek8:Piezoelektrická sonda[6].....	18
Obrázek9:Renishaw SP80[13].....	18
Obrázek 10:Měřicí dotyková hlava[2].....	18
Obrázek 11:Carl Zeiss VAST Gold[7].....	18
Obrázek 12:Měřicí element[6].....	19
Obrázek 13:Materiály měřících elementů[6].....	20
Obrázek 14:Mostová konstrukce s pohyblivým mostem[2].....	20

Obrázek 15:Mostová konstrukce s nepohyblivým mostem[2]	21
Obrázek 16:Portálová konstrukce[1]	21
Obrázek 17:Stojanová konstrukce[1].....	22
Obrázek 18:Výložníková konstrukce[2]	22
Obrázek 19:Horizontální rameno[2]	23
Obrázek 20: Upínací deska Renishaw[8].....	24
Obrázek 21:Upínka[8]	24
Obrázek 22:Podpěra[8]	24
Obrázek 23:Magnet[8].....	25
Obrázek 24:Stavitelná kloub[8]	25
Obrázek 25:Stavěcí věž[8].....	25
Obrázek 26:Příklad upnutí lopatky turbínového kola[8]	25
Obrázek 27:Svěrák[9]	26
Obrázek 28:Univerzální naklápěcí otočný stůl [10]	26
Obrázek 29:Výuková součást	27
Obrázek 30:Tvorba roviny	28
Obrázek 31:Ikona křivky	28
Obrázek 32:Vytvořený řez.....	28
Obrázek 33:Tvorba křivky	28
Obrázek 34:Export dat 1	29
Obrázek 35:Export dat 2	29
Obrázek 36:Blade pro aplikace [11]	30
Obrázek 37:Specifikace lopatky[12]	30
Obrázek 38:Měřené řezy[12]	31
Obrázek 39:Vlastnosti řezu[12]	31
Obrázek 40::Vykreslení nominálních dat[12].....	32
Obrázek 41::Dialogové okno řezu[12]	32
Obrázek 42:Specifikace náběžné hrany[12]	33
Obrázek 43:Maximální délka[12]	34
Obrázek 44:Status měření[12]	34
Obrázek 45:Nahrání aktuálních dat[12].....	35
Obrázek 46:Ikona startu měření[12]	35
Obrázek 47:Formulář z měření[12]	36
Obrázek 48:Střední křivka profilu[12]	36
Obrázek 49:Tětiva profilu[12]	37
Obrázek 50:Náběžná a odtoková hrana[12].....	37
Obrázek 51:Tečná přímka[12]	37
Obrázek 52:Obrázek:Referenční rovina[12].....	38
Obrázek 53:Stohovací bod a K-bod[12]	38
Obrázek 54:Úhel tětivy[12]	39
Obrázek 55:Délka tětivy[12]	39
Obrázek 56:Měření orajového úhlu[12]	40
Obrázek 57:Vrcholová asymetrie[12].....	40
Obrázek 58:Vzdálenost bodů K[12]	41
Obrázek 59:Vzdálenost roviny od náběžné či odtokové hrany[12].....	41
Obrázek 60:Vzdálenost tětivy od stohovacího bodu[12].....	41
Obrázek 61:Tloušťka ve vzdálenosti[12].....	42

Obrázek 62:Měření vrcholu profilu[12]	43
Obrázek 63:Měření segmentu profilu[12]	43