

Факултет инжењерских наука Универзитета у Крагујевцу



Назив студијског програма: Машинско инжењерство

Ниво студија: Основне академске студије

Модул: Енергетика и процесна техника

Предмет: Мерење и управљање

Број индекса: 149/2007

Владета М. Вујадиновић

**Контрола основних мера радног кола
хидрауличких турбина и геометрије лопатица
коришћењем оптичких мерних система за
мерење дужине и углова**

завршни рад

Комисија за преглед и одбрану:

1. Др Петар Тодоровић - ментор

2. _____

3. _____

Датум

одбране: _____

Оцена: _____

У оквиру овог завршног рада кандидат треба да изврши поређење резултата мерења основних мера радног кола, геометрије свих лопатица и облика радног кола на каруселу радног кола турбине типа Францис. Резултати су добијени мерењем оптичким мерним системима ATOS и TRITOP и софтвером GOM Inspect. Кандидат треба да објасни принцип рада софтверског модула Blade за контролу лопатица који је користио у свом раду. У делу практичног рада кандидат треба да изабере репрезентативни узорак на коме ће моћи да изврши поређење резултата мерења дужине и углова горе поменутих метода.

Препоручена литература:

- [1] Blade Analzsys, V7.5 SR1 Manual, Units A-B, blade-v7-5-sr1_1st_en_rev-a, GOM mbH, 5-Sep-2012
- [2] ATOS User Information, ATOS Probe/Adapter Set, GOM mbH, atos_probe-adapter-kit_en_rev-a 18-Dec-2007

Крагујевац,
01. 10. 2013. године

Ментор:
Проф. др Петар Тодоровић, дипл. инг.

Резиме: У оквиру овог завршног рада дате су основе теорије профилних решетки, дат је преглед стандарда за испитивање хидрауличких турбина, пумпи и пумпи/турбина и приказан је принцип рада софтверског модула Blade за контролу лопатица. У делу практичног рада извршено поређење резултата мерења дужина и углова (основне мере радног кола, геометрија свих лопатица и облик радног кола на каруселу) радног кола турбине типа Францис, на основу мерења оптичким мерним системима ATOS и TRITOP коришћењем верзија софтвера v6.02 (постојећи мерни извештај) и GOM Inspect.

Кључне речи:

- IEC 60193
- оптички мерни системи
- Упутства и алати за мерне системе
- Тачност мерних система

Summary: In this paper, the basic theory of profiled bars, an overview of standards for testing of hydraulic turbines, pumps and pump/turbines and the working principle of software modules to control Blade blades are shown. In the practical part of the paper, comparisons of measured lengths and angles (basic measures impeller geometry, geometry of blades and shape of blades of the impeller on the carousel) impeller type Francis turbine, based on measurements of optical measuring systems ATOS and TRITOP using software version v6.02 (existing measurement report) and GOM Inspect.

Keywords:

- IEC 60193
- optical measuring systems
- Manuals and tools for measuring systems
- Accuracy of measuring systems

Садржај

1	Увод	1
2	Основне дефиниције и појмови теорије профилних решетки	3
3	Међународни стандард ИЕС 60193.....	8
4	Контрола димензија и толеранција облика и положаја	14
5	Основне могућности софтвера GOM Inspect при контроли квалитета проточних органа радних машина и аеропрофила	16
	Операције на једним профилном	16
	Креирање профила лопатице	16
	Мерење дебљине профила.....	18
	Радијус улазне и излазне ивице профила.....	22
	Улазни и излазни угао профила.....	23
	Угао постављања профила и тетива профила	26
	Геометријско витоперење профила	27
	Креирање кориснички дефинисаног принципа контроле (user-defined inspection principle)	29
	Операције на већим бројем лопатица.....	31
	Дефинисање пресека више профила	31
	Трансформација дигитализованог модела у координатни систем CAD модела.....	33
	Ширина међулопатичног простора	34
6	Мерење геометријских карактеристика Францисове турбине коришћењем софтвера GOM Inspect	36
	Контрола основних мера радног кола	40
	Контрола толеранција облика и положаја	41
	Цилиндричност.....	41
	Кружност обртања (бацање).....	42
	Концентричност	43
	Равност и паралелност	44
	Контрола геометрије лопатица	45

7	Закључак.....	48
8	Литература	50

1 Увод

Напредовањем разних грана технологије потребно нам је све више енергије како би се обезбедило коришћење и покретање те технологије. Због тога се све више користе обновљиви извори енергије, попут енергије сунца, ветра и воде. Искоришћавање енергије воденог потенцијала економски је конкурентно производњи електричне енергије из фосилних и нуклеарних горива, зато је хидроенергија најзначајнији обновљиви извор енергије. У задњих тридесет година производња у хидроелектранама је утростручена, а њен удео повећан је за 50%. Производња у хидроелектранама има одређена техничка и природна ограничења, а једно од њих је и захтев за постојањем извора воде током целе године јер је складиштење електричне енергије врло скупо. Хидроелектране или хидроелектричне централе су постројења у којима се потенцијална енергија воде најпре претвара у кинетичку енергију њеног струјања, а потом у механичку енергију окретања вратила турбине, и на крају у електричну енергију у електричном генератору. Како би се постигао што већи степен искоришћења претварања потенцијалне енергије воде у кинетичку енергију потребно је конструисати и изградити правилни облик лопатица турбине помоћу којег ћемо добити највећу специфичну снагу.

Поред правилног пројектовања са циљем да радне машине буду што ефективније и ефикасније неопходно је да израђени подсклопови и склопови буду што вернији својим CAD моделима. У том смислу методологија контроле проточних органа радних машина има веома велики значај. Веома дуго контрола се заснивала на употреби мерних шаблона, па је овакав вид провере тачности ушао и у важећи међународни стандард.

Развој и све већа употреба система за 3D дигитализацију омогућава снимање комплетне површине радног кола са великом тачношћу. Добијени модели омогућавају да се мерење сада не изводи непосредно на израђеном делу већ посредно на његовој верној копији модела. Захваљујући великој количини снимљених података иако стандард дефинише контролу у малом коначном броју тачака, сада је могуће поређење комплетне површине израђеног дела и његово цртање поља одступања у односу на CAD модел. До пре неколико година пре развоја специјализованих модула за контролу геоматрије лопатица контрола се сводила на дефинисање пресека на моделу и мерење одговарајућих величина (корак, пречник заобљења на нападној ивици, ширина међулопатичног простора) у CAD софтверима.

Циљ овог завршног рада је да упореди резултате мерења за Францисову турбину и агрегата број 3 хидроелектране Пива санирану након хаварије. Прво мерење односно снимање радног кола и прво мерење извеле су колеге са Факултета инжењерских наука. У овом раду извршено је поновно мерење на основу постојећег модела и верификација претходних резултата мерења.

У другој глави дате су основе теорије профилних решетки и дефинисани основни термини коришћени у раду. У трећем поглављу дат је осврт на међународну норму IEC 60193 са посебним освртом на мерење и контролу радних кола хидрауличних турбина (Жирардове, Францисове Пелтонове и Капланове). У четвртном поглављу приказан је модул за димензиону контролу и оцену квалитета лопатица коришћењем софтвера GOM Inspect. У петом поглављу приказана је метедеологија оптичког 3D мерења мерним системима ATOS и TRITOP и приказани су претходни и резултати добијени софтвером GOM Inspect. У шестом поглављу дата је дискусија и наведени основни закључци.

2 Основне дефиниције и појмови теорије профилних решетки

Проточне органе турбомашина чине међулопатични простори (радна кола, преткола, закола) и безлопатични простори [1]. У лопатичним радним колима врши се размена рада и она су покретна, а у претколима и заколима врши се скретање и убрзавање, или успоравање, струје радног флуида и она су непокретна. Између покретних и непокретних проточних органа, налазе се безлопатични простори.

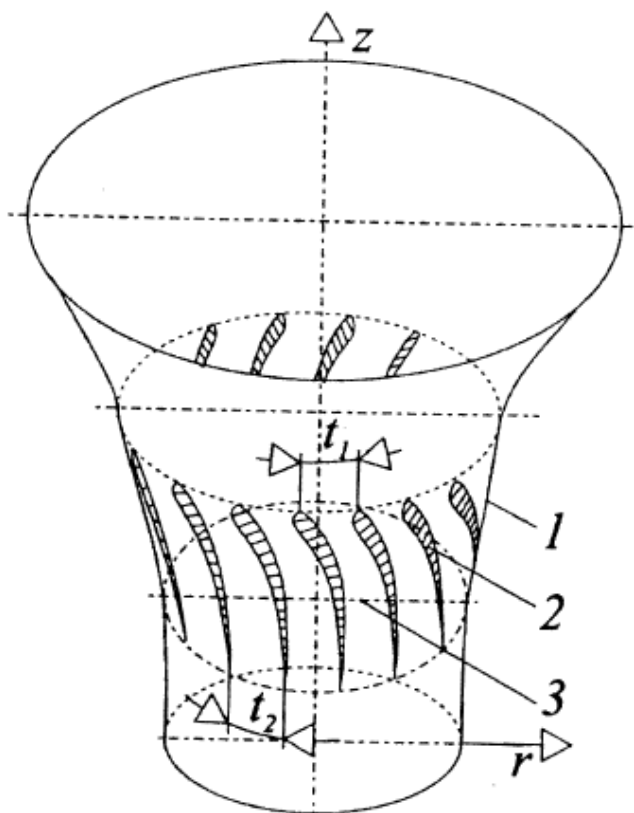
Струјање радног флуида у проточним органима турбомашина има просторни нестационарни карактер (сви струјни параметри су функције све три координате цилиндричног координатног система $Or\theta z$ и времена t). Уобичајено је да се оса z цилиндричног координатног система $Or\theta z$ везује за осу вратила радног кола. Резултати добијени мерењима показали су да се без велике грешке струјање радног флуида у проточним органима турбомашина може свести на стационарно струјање $[\frac{\partial}{\partial t}(\dots) = 0]$ по осносиметричним (обртним) струјним површинама $[\frac{\partial}{\partial \theta} \varphi(r, z, \theta) = 0]$.

Ако се осносиметричне струјне површи замисле као чврсте и неизмерно танке, онда ће њихови пресеци са радним (лопатице радног кола) и усмерним (лопатице преткола или закола) органима турбомашине дефинисати такозване просторне профилне решетки тих проточних органа, састављене од низа дводимензијских профила и одговарајућих међупрофилних празних простора који се наизменично смењују по одговарајућим осносиметричним струјним површима у правцу обимске координате θ (слика 2.1).

Сваку од бесконачно много могућих просторних профилних решетки проточних органа турбомашине могуће је разрезати по изводници и развити у раван, водећи рачуна да се новодобијена раванска слика, због тежње да се гранични услови не промене, не сме ограничавати у правцу који одговара обимској координати θ . Раванска слика пресека замишљене, чврсте осносиметричне струјне површи са лопатицама радног кола, или са лопатицама усмерних органа, представља низ узастопних подударних профила који образују раванску профилну решетку (слика 2.2 и 2.3). Линија која спаја аналогне тачке на профилима назива се осом решетки. У зависности од тога да ли је оса решетки права или кружна, решетка ће се назвати правом (слика 2.2) или кружном (слика 2.3), а у зависности од тога да ли је проточни орган покретан или непокретан, решетки се могу делити на покретне или непокретне.

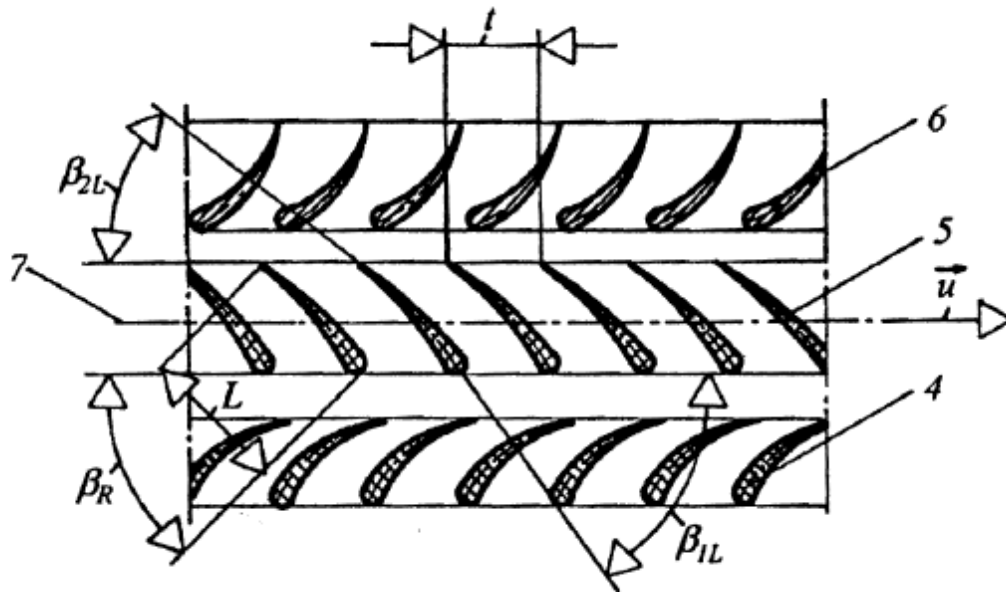
Ради потпуне дефиниције профилне решетки, поред величина везаних за профил, треба познавати још неке додатне параметре. Тако, на пример, за праве профилне решетки (слика 2.2) треба познавати релативни корак решетки (t/L) и угао нагиба решетки (β_R). Угао нагиба решетки представља угао између праве нормалне на тетиву L скелетнице и осе решетки. За потпуну дефиницију кружне профилне решетки потребно је познавати, поред

података о профилу, улазни D_1 , излазни D_2 пречник решетке и угаони корак решетке t . Често је за профилне решетке веома значајно познавати, поред побројаних величина, и углове профила на улазу и излазу решетке β_{1L} и β_{1L} (слика 2.2 и 2.3). Ови углови дефинишу правце тангенти на скелетницу профила на улазу и излазу профилне решетке у односу на негативне смерове одговарајућих обимских брзина профилне решетке.

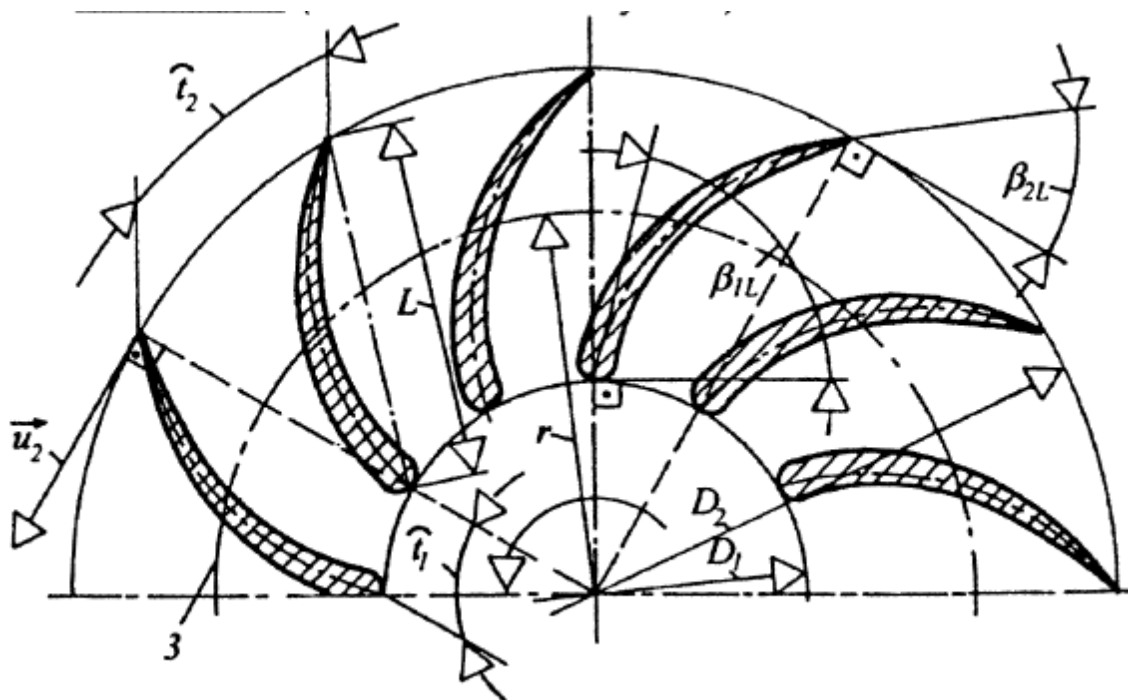


Слика 2.1 – Приказ просторне профилне решетке полуаксијалног проточног органа турбомашине:

1 – осносиметрична струјна површ, 2 – профили решетке, 3 – међупрофилни канал профилне решетке



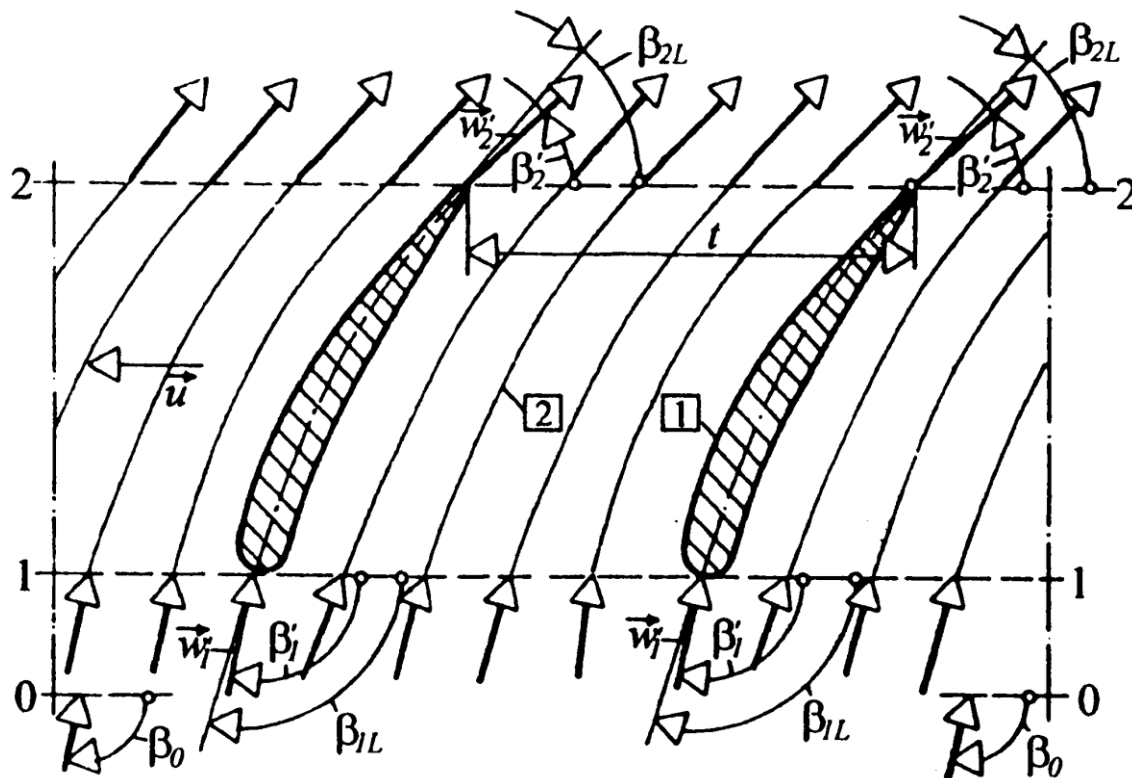
Слика 2.2 - Изглед развијеног стања пресека замишљене чврсте осносиметричне струјне површи са усмерним и радним органима аксијалне турбомашине
4 – пресек преткола, 5 – пресек радног кола, 6 – пресек закола, 7 – оса профилне решетке



Слика 2.3 – Изглед пресека замишљене чврсте осносиметричне струјне површи са лопатицама радног кола једне радијалне турбомашине
3 – оса решетке

Јасно је да ће струјање у неком лопатичном проточном органу бити потпуно познато уколико се проучи струјање у свакој од поменутих бесконачно много профилних решетки. Међутим, то је у пракси немогуће и најчешће се изводи за три пресека (уз главчину, на средњој струјној површи и уз кућиште) код аксијалних и полуаксијалних и за један пресек (на средњој струјној површи) код изразито радијалних проточних органа.

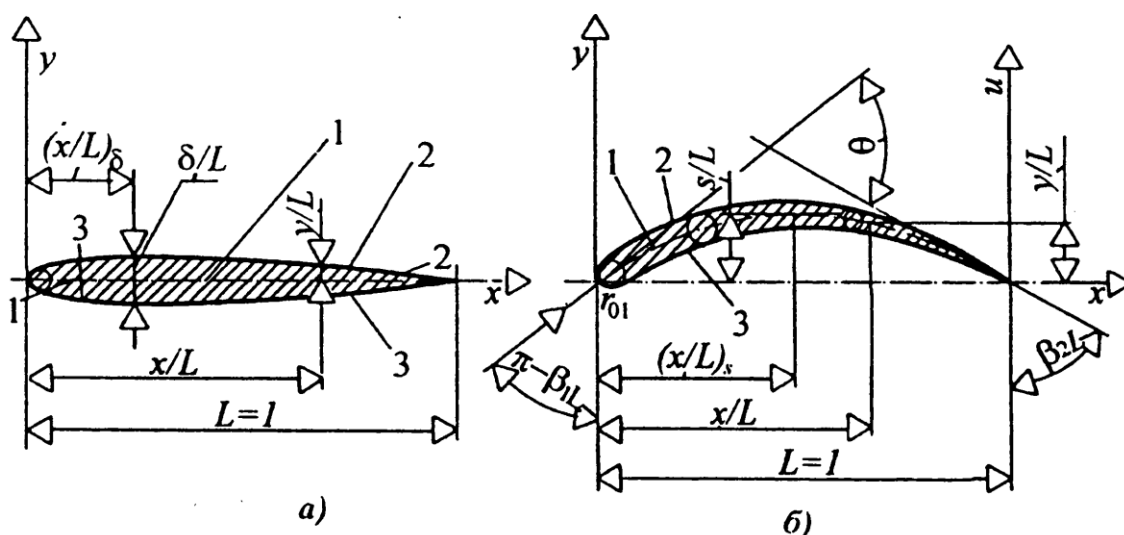
У сваком од међулопатичних канала просторне профилне решетке реалног преткола, радног кола или закола турбомашине може да стане бесконачно много струјница (слика 2.4). Ове струјнице ће следити геометрију профила лопатице. Због постојања инерцијских сила и сила трења флуидни делићи се опирају скретањима које диктирају профили решетке реалног проточног органа па њихове путање својим обликом редовно одступају од облика скелетница профила. Различити интензитети инерцијалних и вискозних сила које делују на различите флуидне делиће по попречним пресецима међупрофилних канала решетке условљавају различите износе скретања тих флуидних делића у односу на правац који диктирају профили решетке. Треба истаћи да ће најлошије пратити контуре профила флуидни делићи који се крећу средином међупрофилних канала, а да ће ситуација у том смислу бити боља код флуидних делића који се крећу у непосредној близини контура профила. Због тога ће путања флуидних делића у међупрофилним каналима бити међусобно неконгруентне по караку те решетке.



Слика 2.4 – Приказ релативног струјног поља у правој профилној решетки реалног радног кола турбомашине

1 – профил профилне решетке, 2 – релативна струјница

Профилне решетке се могу формирати од симетричних или несиметричних хидродинамичких/гасодинамичких профила, а код турбопумпи, турбокомпресора, и вентилатора и од профила константне дебљине. Да ли ће један профил бити симетричан или несиметричан одређује облик скелетнице профила. Уколико је скелетница права онда је профил симетричан а уколико је крива онда је профил несиметричан. Под скелетницом профила подразумева се геометријско место центара кружница које се могу уписати унутар профила. Профили који се најчешће користе у турбомашинама и хидродинамичким/гасодинамичким апаратима класификовани су, стандардизовани и знају им се хидродинамичке/гасодинамичке карактеристике. Симетрични профили се редовно дефинишу преко релативне апсцисе (x/L) и релативне ординате (y/L) јер се у каталозима редовно стандардизују симетрични профили дужине $L=1$ (слика 2.1а).



Слика 2.5 – (а) симетрични профил, (б) несиметрични профил

1 – скелетница профила, 2 – горњака профила, 3 – доњака профила, x/L – релативна апсциса профила, y/L – релативна ордината профила, δ – дебљина профила, s – стрела профила, θ – лучна кривина профила, L – дужина профила

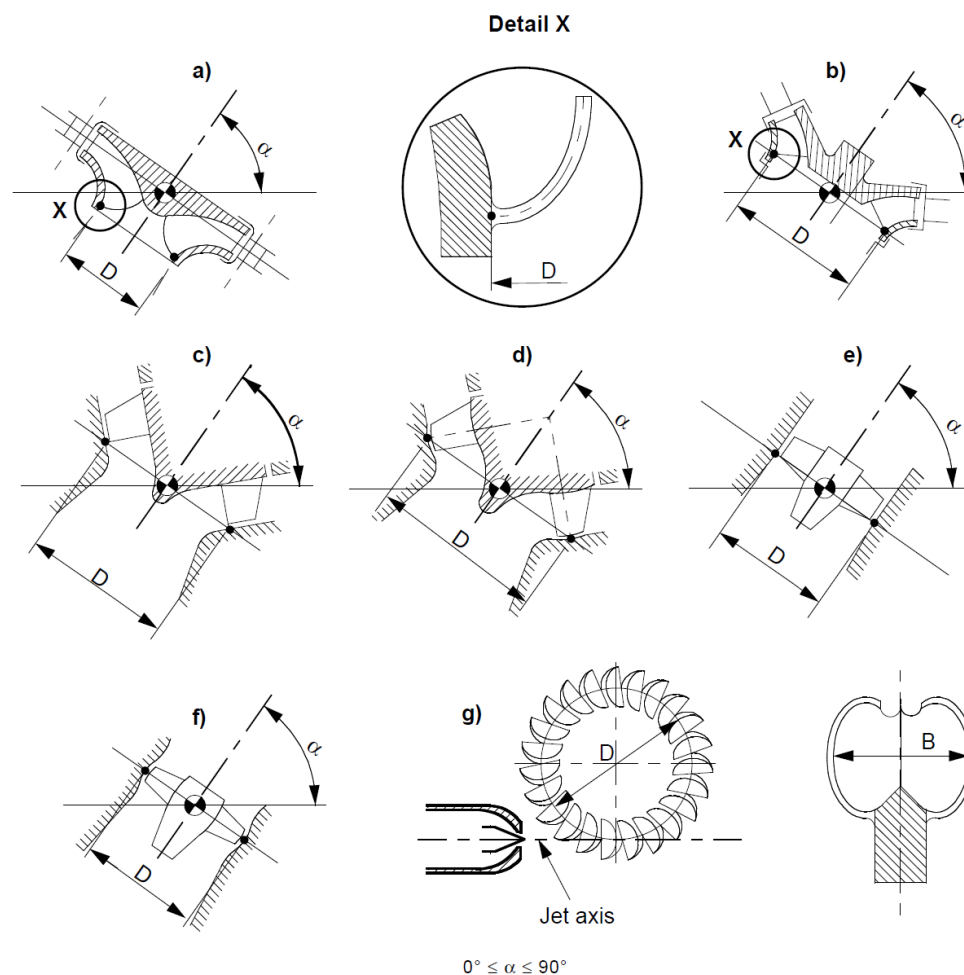
Међу важне податке о профилу убрајају се, још, и њихова највећа релативна дебљина $(\delta/L)_{\max}$ и местом где се она налази $(x/L)_{\delta}$. Криви профили се, сем тога, опсују и највећом релативном кривином $(s/L)_{\max}$ и местом где се она налази $(x/L)_s$. Ако скелетница кривог профила представља део кружног лука, онда се такви профили називају кружнолучним. Највећа кривина кружнолучног профила може се дефинисати и углом θ који заклапају тангенте повучене на почетној и крајњој тачки његове скелетнице (слика 2.5 б).

Подаци о профилу садрже, поред изнетих величина, и пречних заобљења чела и репа профила, мада се тежи да се реп профила што више стањи. Значајно је поменути да се несиметрични профили могу формирати и помоћу података за симетричне профиле, тако што се у одговарајућим тачкама, нормално на скелетницу наносе релативне дебљине симетричног профила, и то истим редом као за основни профил.

3 Међународни стандард ИЕС 60193

Међународни стандард ИЕС 60193 прописује поступак контроле радних машина (слика 3.1):

- a) Радијалне машине (францисове турбине, радијалне центрифугалне пумпе, пумпе/турбине; код вишестепених машина дефинише само поступак за степене ниског притиска),
- b) Дијагоналне машине (машине са фиксним лопатицама преткола/кола),
- c) Дијагоналне машине (машине са фиксним лопатицама преткола/кола),
- d) Дијагоналне машине (машине са променљивим углом лопатица преткола/кола),
- e) Аксијалне машине (турбине са пропелерима, цевне турбине, аксијалне пумпе и пумпе/турбине са фиксним лопатицама преткола и радног кола),
- f) Аксијалне машине (Капланове турбине, цевне турбине, аксијалне пумпе и пумпе/турбине са подесивим лопатицама преткола и радног кола),
- g) Пелтенове турбине.

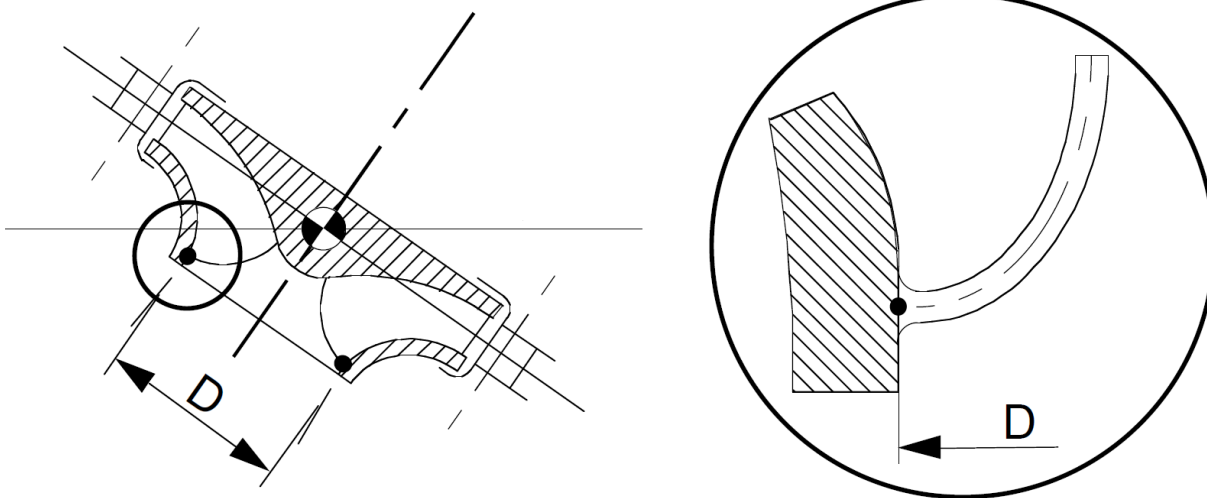


Слика 3.1 – Типови радних машина према ИЕС 60193

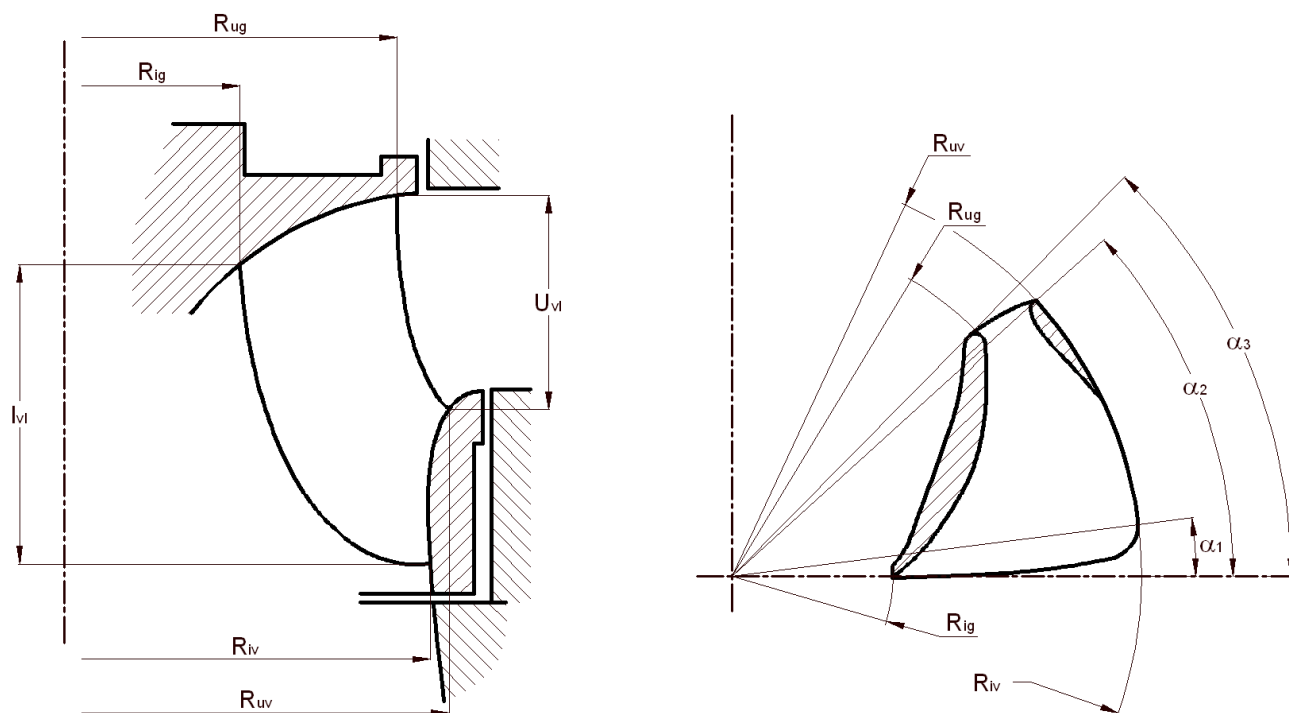
Основне мере радног кола које треба контролисати су дефинисане стандардом ИЕС [2], технологијом контроле геометрије обртног кола и цртежом радног кола. Контрола основних мера се врши за сваку лопатицу, према табели 3.1, при чему ознака D представља најмањи пречник на излазу из обртног кола, према слици 3.2. Контролисане величине од 1 до 6 и 11 из табеле 3.1, приказане су на слици 3.3. Контролисане величине од 7 до 10 приказане су на слици 3.4.

Табела 3.1 – Основне мере радног кола

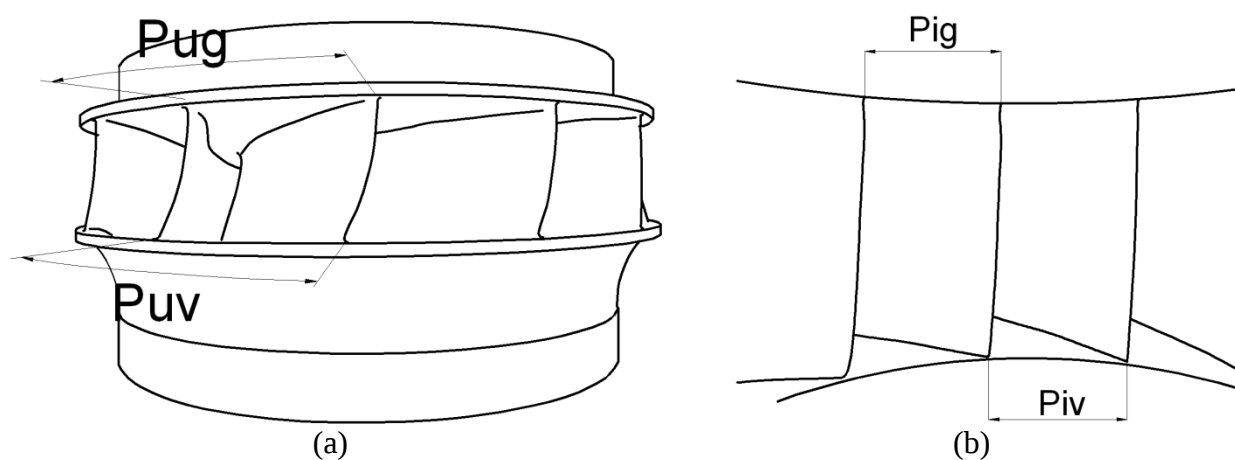
	Контролисана величина	Ознака	Толеранција	Вредност толеранције
1.	Улазна висина лопатице	U_{vl}	$\pm 0.5\% D$	± 14.6
2.	Излазна висина лопатице	I_{vl}	$\pm 0.5\% D$	± 14.6
3.	Радијус излазне ивице лопатице на главчини	R_{ig}	$\pm 0.5\% D$	± 14.6
4.	Радијус излазне ивице лопатице на венцу	R_{iv}	$\pm 0.5\% D$	± 14.6
5.	Радијус улазне ивице лопатице на главчини	R_{ug}	$\pm 0.5\% D$	± 14.6
6.	Радијус улазне ивице лопатице на венцу	R_{uv}	$\pm 0.5\% D$	± 14.6
7.	Корак лопатице на излазној страни на главчини	P_{ig}	$\pm 0.5\% D$	± 14.6
8.	Корак лопатице на излазној страни на венцу	P_{iv}	$\pm 0.5\% D$	± 14.6
9.	Корак лопатице на улазној страни на главчини	P_{ug}	$\pm 0.5\% D$	± 14.6
10.	Корак лопатице на улазној страни на венцу	P_{uv}	$\pm 0.5\% D$	± 14.6
11.	Углови простирања лопатица	α_1	/	/
		α_2	/	/
		α_3	/	/



Слика 3.2 - Одређивање пречника D код радијалних машина, према [2]



Слика 3.3 - Основне карактеристике лопатица

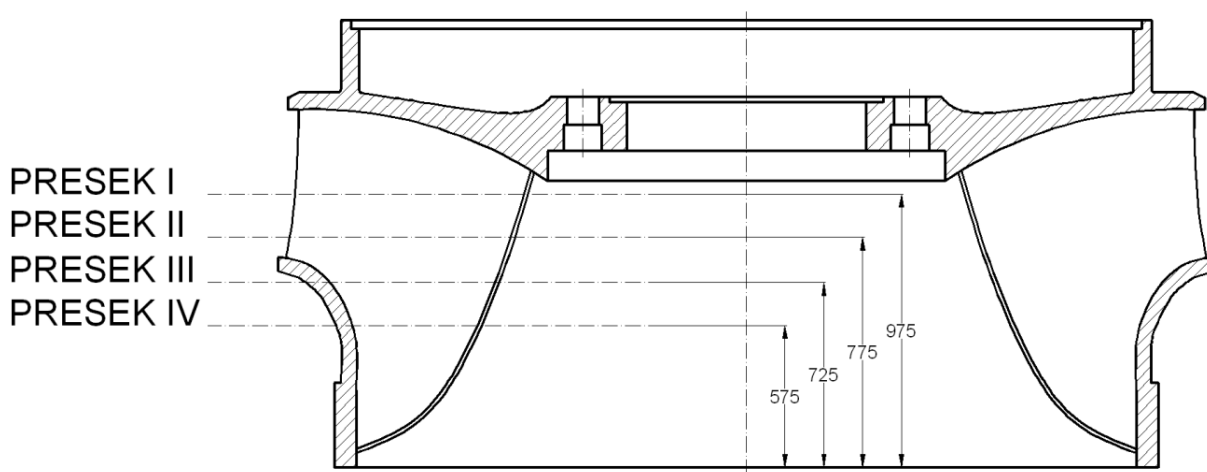


Слика 3.4 - Корак лопатице: (а) улазна страна, (б) излазна страна

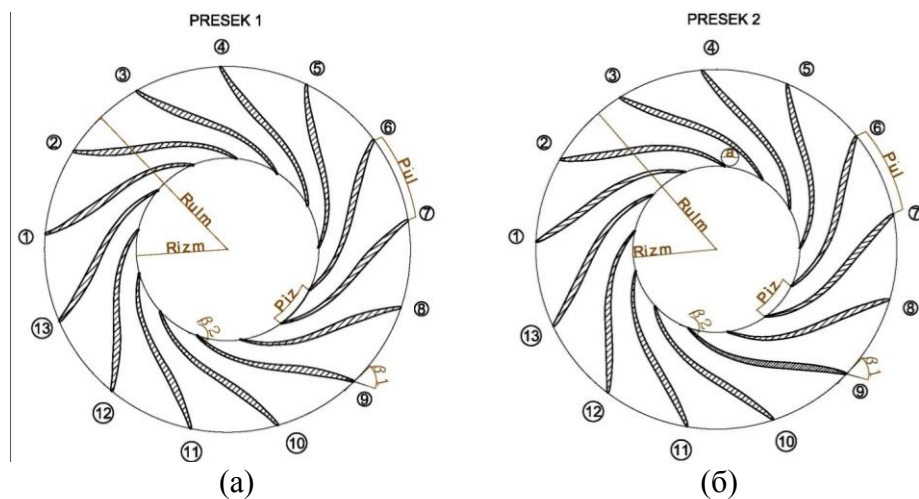
Геометрија свих лопатица контролише се у складу са стандардом ИЕС [2]. Геометрија лопатица радног кола дефинише се кроз равне хоризонталне пресеке, према примеру приказаном на слици 3.5. Мерене величине и њихове толеранције према ИЕС [2], приказане су у табели 3.2. За сваку величину, приказану на сликама 3.3 и 3.4, у случају када не постоји технолошка документација, одређује се средња вредност и одступање од средње вредности за посматрани пресек.

Табела 3.2 - Мерене величине и њихове толеранције према ИЕС [2]

	Контролисана величина	Ознака	Толеранција	Вредност толеранције
1.	Пречник улазне ивице лопатица	D_{ul}	$\pm 0.5\% D^1$	$\pm 14,6$
2.	Пречник излазне ивице лопатица	D_{iz}	$\pm 0.5\% D$	$\pm 14,6$
3.	Корак лопатица на улазној страни	P_{ul}	$\pm 0.5\% D$	$\pm 14,6$
4.	Корак лопатица на излазној страни	P_{iz}	$\pm 0.5\% D$	$\pm 14,6$
5.	Улазни угао лопатице β_1	β_1	$\pm 2^0$	$\pm 2^0$
6.	Излазни угао лопатице β_2	β_2	$\pm 1,5^0$	$\pm 1,5^0$
7.	Излазна ширина међулопатичног простора	a	+5% -3%	+5% -3%



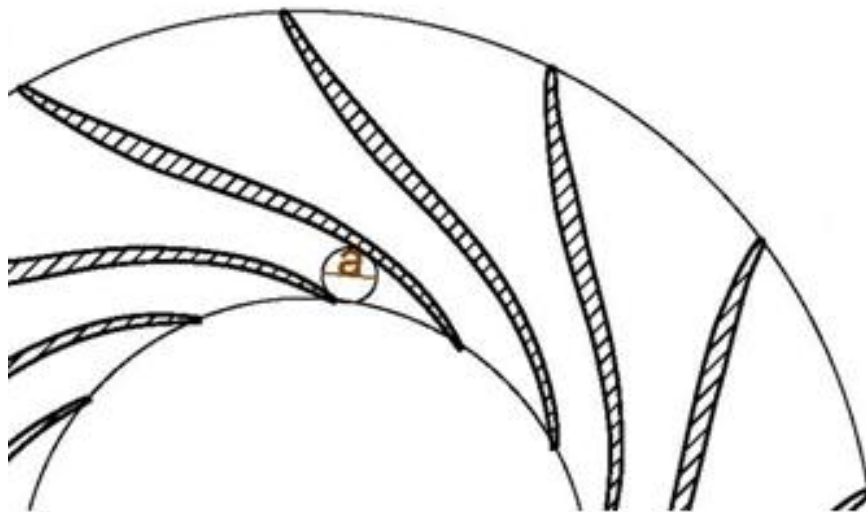
Слика 3.5 – Пример дефинисања пресека у којима се мере контролисане величине



Слика 3.6 - Профил свих лопатица за пресеке (а) 1 и (б) 2

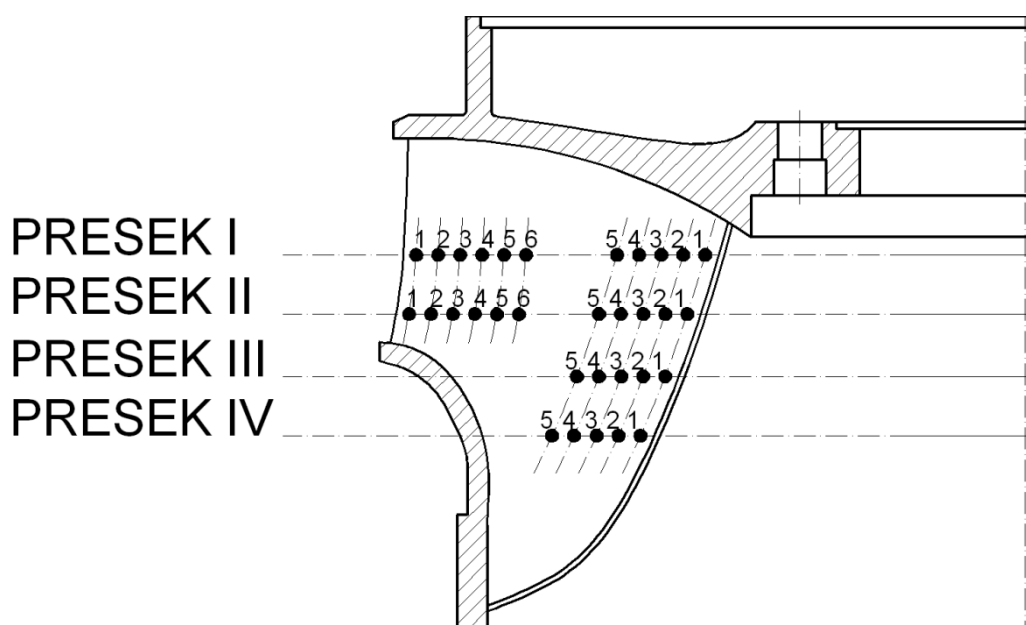
¹ Вредност пречника је одређена према слици 3.1 и износи $D=2920\text{mm}$

Вредности излазне ширине међулопатичног простора мере се према слици 3.7, у пресецима од 1 до 4, приказаним на слици 3.5.

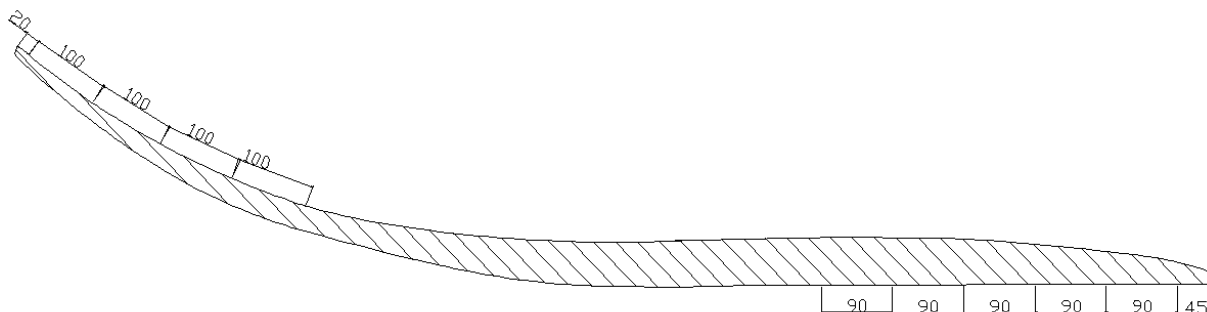


Слика 3.7 - Међулопатични простор

За пример пресека са слике 3.5, на слици 3.8 приказана су места на којима су мерене вредности дебљине лопатице на улазном и излазном делу лопатице. Положај пресека у којима се врши мерење дат је сликом 3.9.

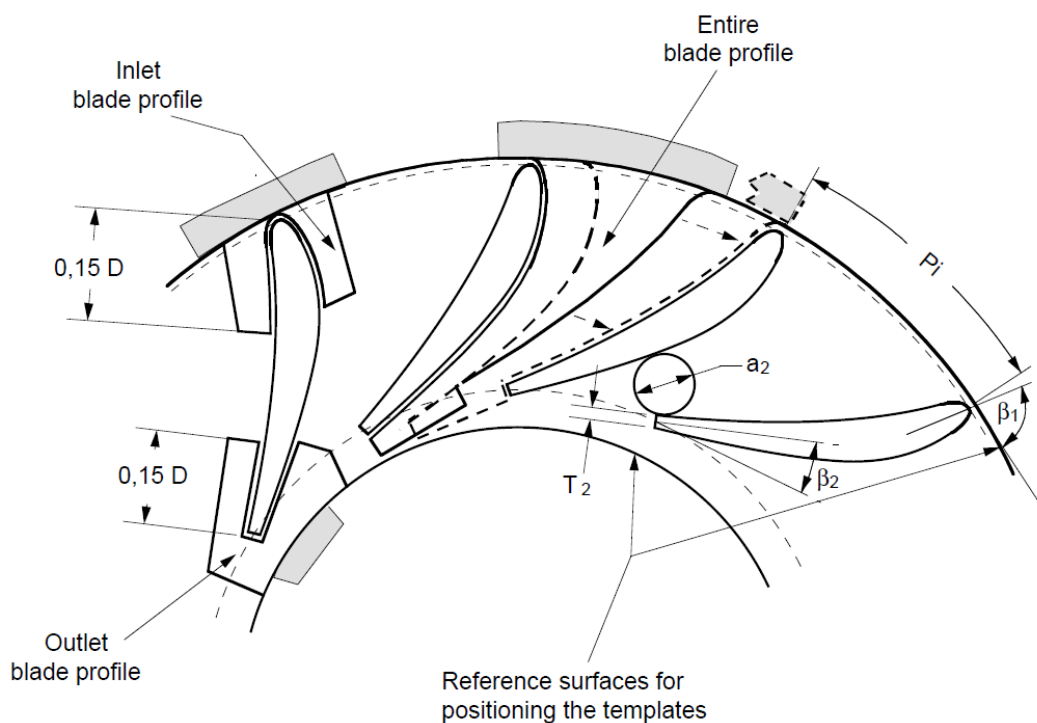


Слика 3.8 - Означавање мерних места по пресецима



Слика 3.9 - Положај мерних места по пресецима на улазу и излазу лопатице

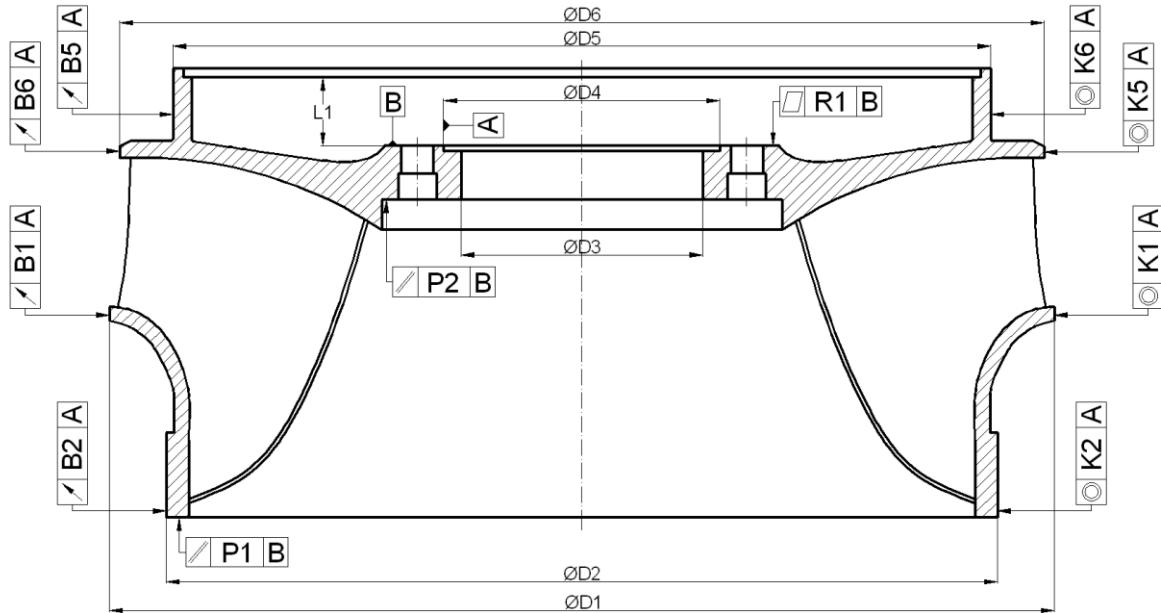
Међународна норма ИЕС 60193 контролу свих наведених величина предвиђа коришћењем шаблона (слика 3.10).



Слика 3.10 – Шаблони за контролу лопатица радног кола

4 Контрола димензија и толеранција облика и положаја

Контрола облика радног кола на каруселу обухвата контролу толеранција облика и положаја према стандарду ISO 1101. На слици 4.1. дефинисане су мере које обавезно треба контролисати при контроли радних кола Францисових турбина.



Слика 4.1 - Контрола основних мера и толеранција облика и положаја радног кола

Контрола димензија и толеранција облика и положаја треба да садржи најмање следеће:

- Пречник горњег и доњег заптивног прстена, ØD5 и ØD2 ,
- Улазни пречници главчине и венца, ØD6 и ØD1 ,
- Кружност обртања B1 улазног пречника венца у односу на осу цилиндричне површи A за центрирање вратила и обртног кола,
- Кружност обртања B2 пречника доњег заптивног прстена у односу на осу цилиндричне површи A за центрирање вратила и обртног кола,
- Кружност обртања B5 пречника горњег заптивног прстена у односу на осу цилиндричне површи A за центрирање вратила и обртног кола,
- Кружност обртања B6 улазног пречника главчине у односу на осу цилиндричне површи A за центрирање вратила и обртног кола,
- Концентричност/саосност K1 пречника венца у односу на осу цилиндричне површи A за центрирање вратила и обртног кола,
- Концентричност/саосност K2 пречника доњег заптивног венца у односу на осу цилиндричне површи A за центрирање вратила и обртног кола,
- Концентричност/саосност K5 пречника горњег заптивног венца у односу на осу цилиндричне површи A за центрирање вратила и обртног кола,

- Концентричност/саосност K6 пречника главчине у односу на осу цилиндричне површи A за центрирање вратила и обртног кола,
- Равност P1 површине B у споју са вратилом,
- Паралелност P1 чеоне површине венца у односу на површину B,
- Паралаленост P2 површине на којој належу навртке споја вратила радног кола у односу на површину B.

5 Основне могућности софтвера GOM Inspect при контроли квалитета проточних органа радних машина и аеропрофила

У различитим областима индустрије постоји потреба за анализом лопатица (на пример лопатице турбина, лопатице ветро-турбина, аеро профила, лопатице ротора, ...). Тип анализе, потребни елементи и приступ зависе од очекиваних резултата.

GOM софтвер омогућава различите функције које заједно омогућавају напредну анализу лопатица. Поред одступања дигитализоване површине у односу на површину CAD модела, представљене у облику поља одступања, могуће је извести и многе друге специфичне анализе. Анализа лопатица је увек заснована на пресеку који се у софтверу назива профил. Сви елементи за анализу креирају се на основу овог профила.

Анализу профила могуће је вршити коришћењем само измерених података или у комбинацији са CAD подацима. Примери приказани у овом делу приказују мерне задатке који се изводе са CAD моделом.

Операције на једним профилем

Креирање профила лопатице

За праћење текста који следи потребно је отворити пројекат

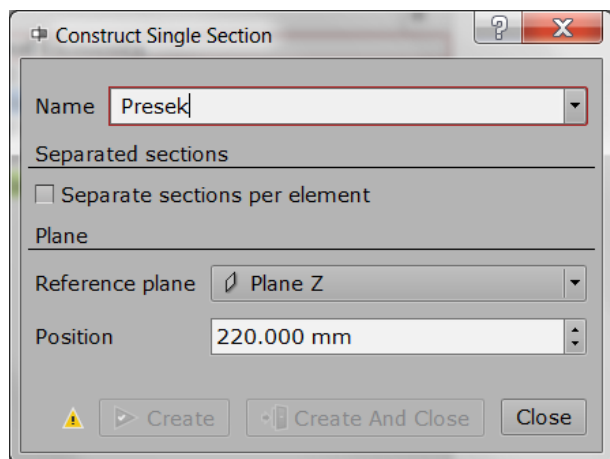
... ► **demo_data_blade** ► **single_blade.ginspect**

који се налази на диску који прати овај завршни рад и коришћењем функције

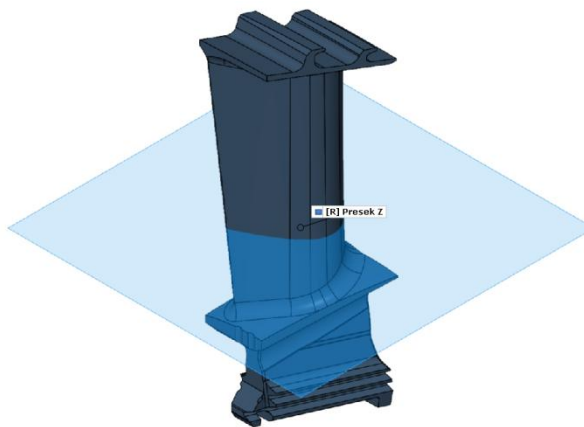
Construct ► **Section** ► **Single Section**

креирати пресек у равни Z кроз CAD модел лопатице (слика 5.1). У дијалогу на слици 5.1а дефинише се назив профила, раван којом се дигитализовани модел пресеца и померање пресека (offset) у односу на ту раван (слика 5.1б). На слици 5.1в приказан је добијени профил. Коришћењем тастера CTRL+RMB (десни клик миша) отвара се **I-Inspect** мени и пресеку се додељује мерни принцип **Referenced Construction** (слика 5.2а) да би се креирао одговарајући елемент на мерним подацима (слика 5.2б). Уколико за пресецање модела не користимо системске равни (X, Y, Z), већ неке корисничке дефинисане равни треба користити мерни принцип **Actual Section** да би се обезбедило да стварна раван или мерена раван потпуно одговара номиналној равни, независно од начина на који је креирана.

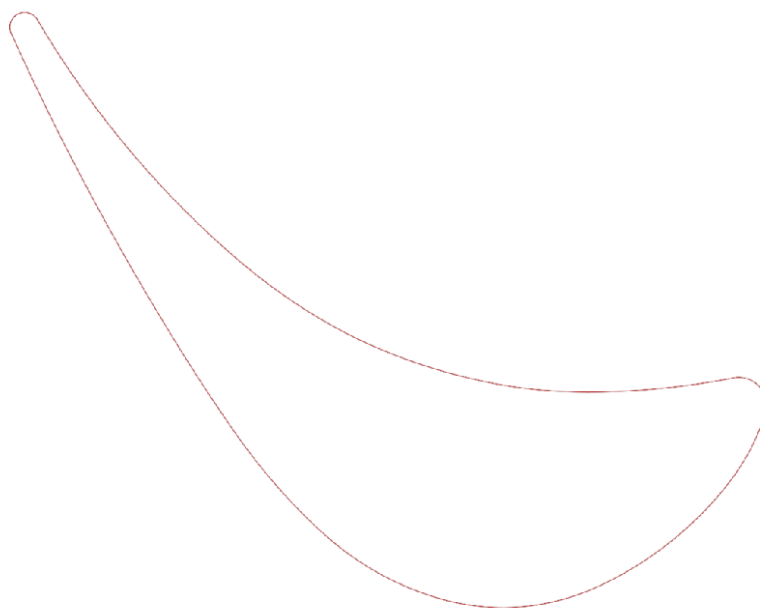
Код мерног принципа **Referenced Construction** софтвер претражује исту везу стварних-мерених података као што постоји међу CAD подацима. У случају да се користи **Actual Section**, везе које се користе за номиналне податке се аутоматски примењују директно на стварне податке.



(a)

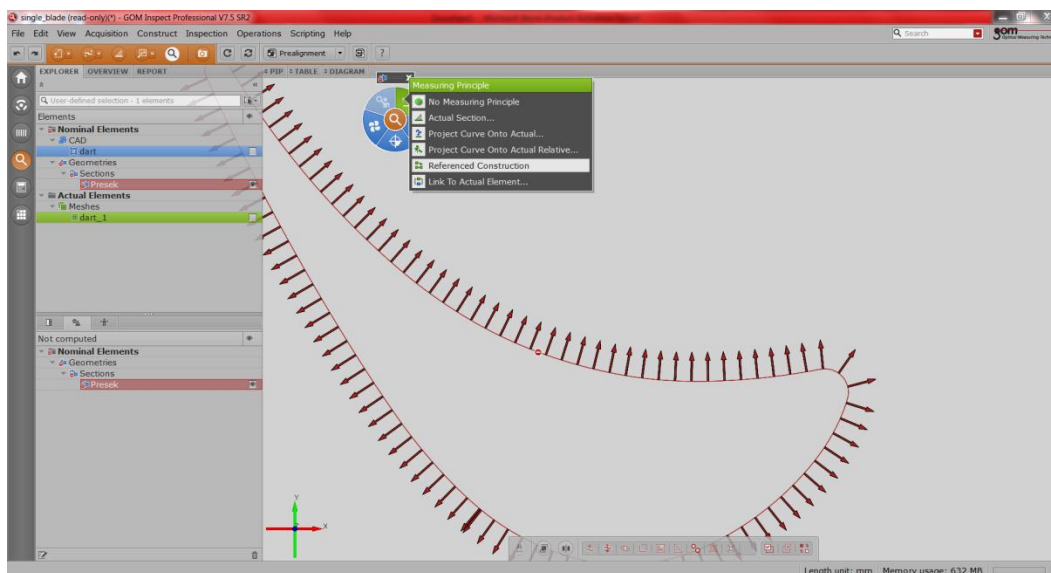


(б)

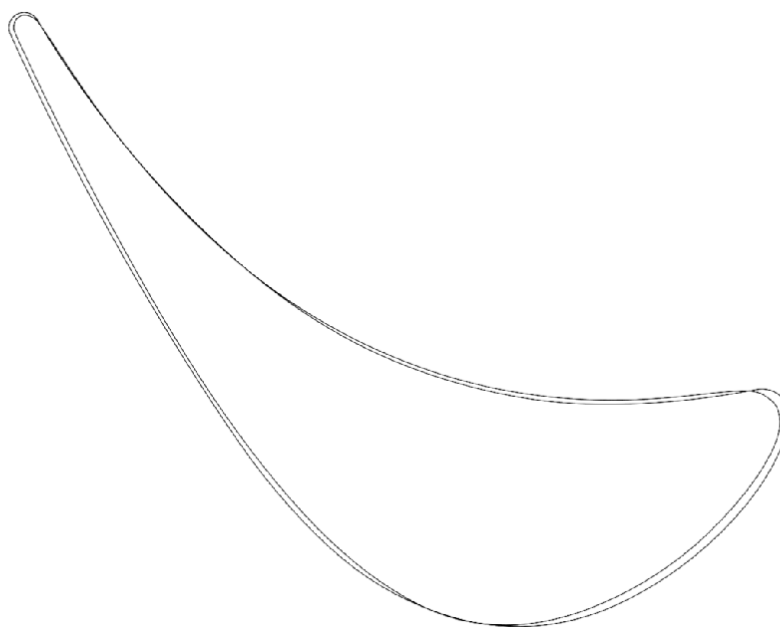


(в)

Слика 5.1 – Дефинисање пресека у софтверу GOM Inspect



(a)



(б)

Слика 5.2 – Дефинисање мерног принципа
и генерисање профила на дигитализиваном моделу

Мерење дебљине профила

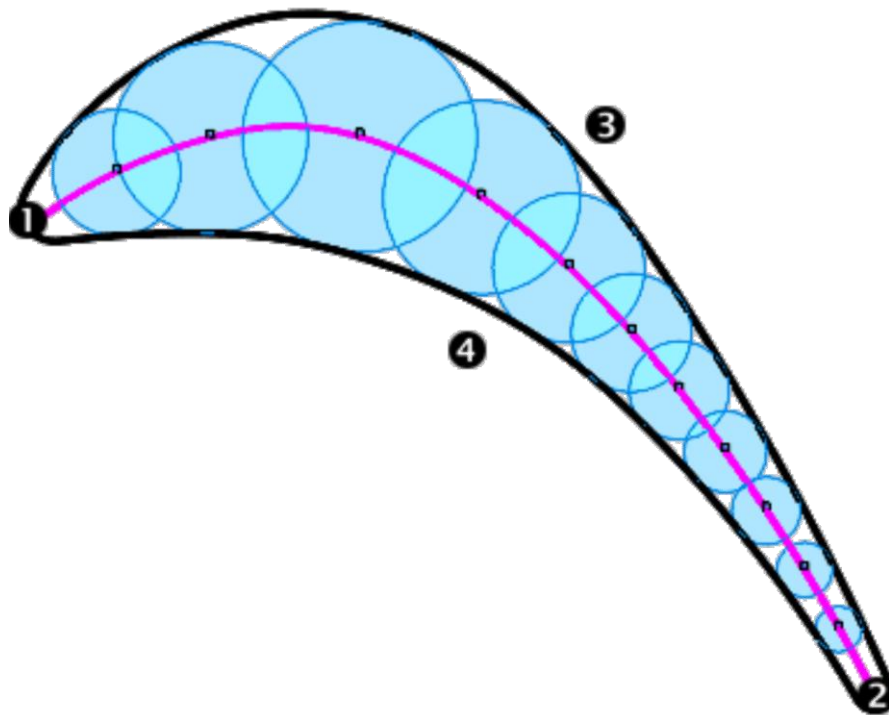
Дебљину профила могуће је мерити на два начина:

- Мерењем максималне дебљине профила,
- Мерењем дебљине профила на било ком месту у односу на грудну или леђну површину.

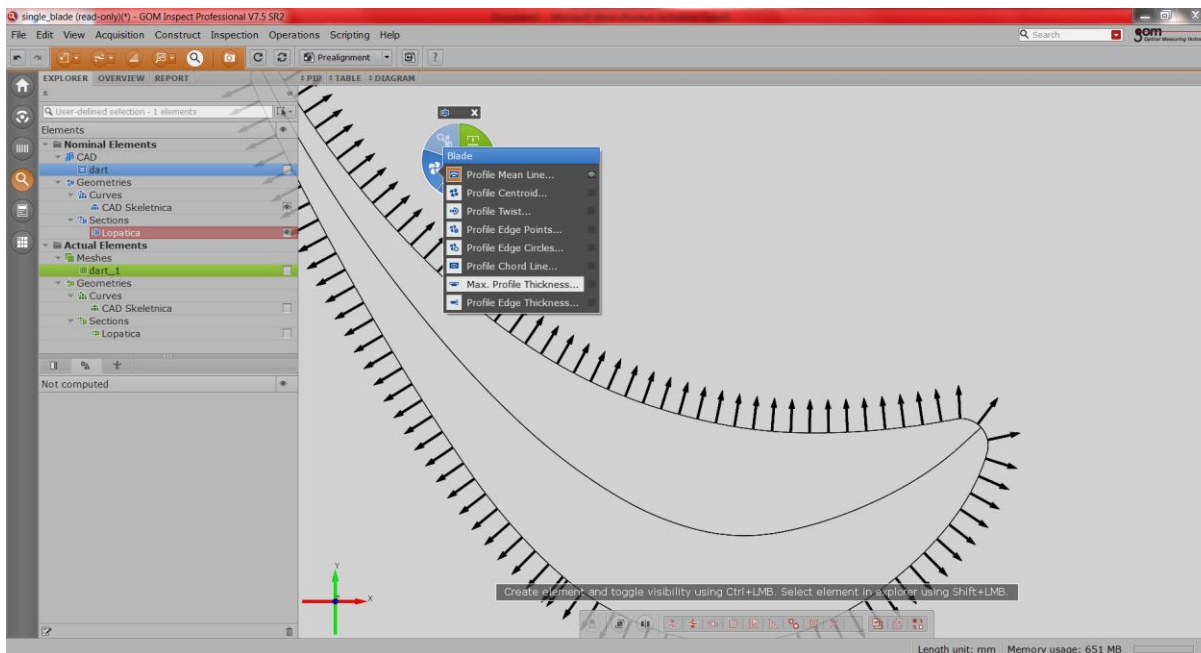
За мерење дебљине профила потребно је да буде креирана средња линија профила или скелетница профила (слика 5.3). Средња линија профила је геометријско место центара уписаних кругова унутар профила. Профил лопатице је ограничен (1) улазном-нападном ивицом (*leading edge*), (2) излазном ивицом (*trailing edge*), (3) горњом ивицом-горњаком (*upper side*) и (4) доњом ивицом-доњаком (*bottom side*).

За обављање било које операције неопходно је креирати средњу линију профила или скелетницу. Креира се селектовањем пресека профила и одабирањем функције **Profile Mean Line** у менију **I-Inspect** (слика 5.4). При томе, софтвер креира средњу линију профила која одговара CAD моделу и средњу линију профила која одговара дигитализованом моделу, захваљујући примењеном мерном принципу.

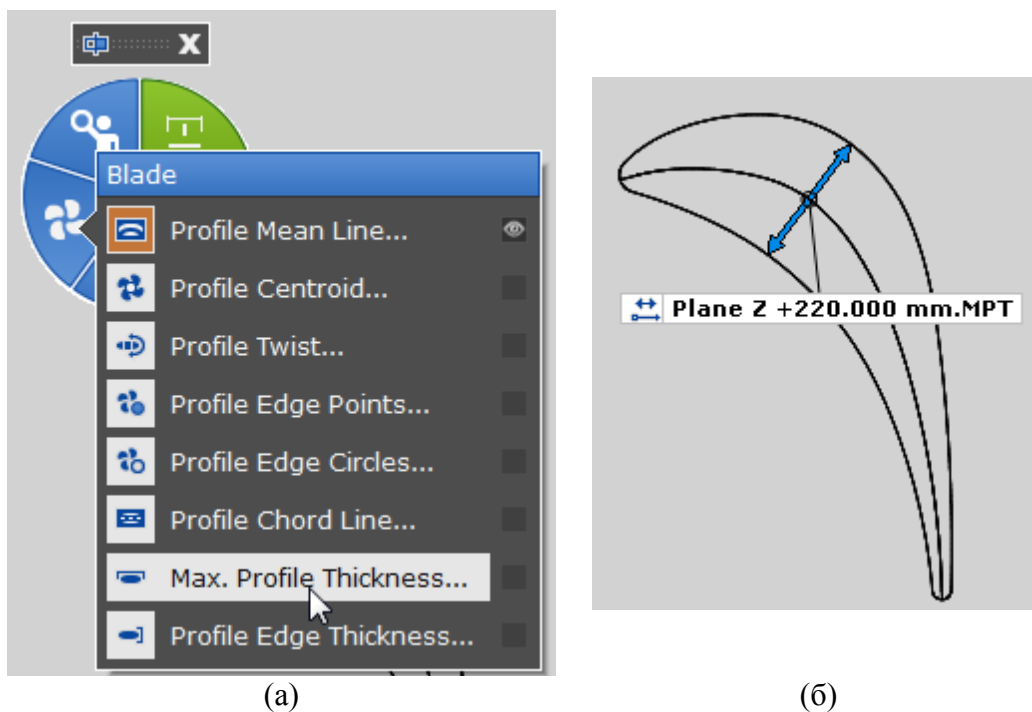
Максимална дебљина профила је пречник највећег уписаног круга унутар профила. Креира се селектовањем пресека профила (CAD) и одабирањем функције **Profile Mean Line** у менију **I-Inspect** (слика 5.5а). Софтвер генерише номиналну максималну дебљину профила која одговара CAD моделу (слика 5.5б), а на основу мерног принципа генерише и стварну максималну дебљину профила. Очекује се да се ове две вредности разликују због несавршеног процеса фабрикације. Да би приказали колико се ове вредности разликују одабирамо функцију **XY Distance** у менију **I-Inspect/Check** (слика 5.6).



Слика 5.3 – Дефинисање скелетнице профила
(1) улазна-нападна ивица (*leading edge*), (2) излазна ивица (*trailing edge*),
(3) горња ивица -горњака (*upper side*) и (4) доња ивица-доњака (*bottom side*)



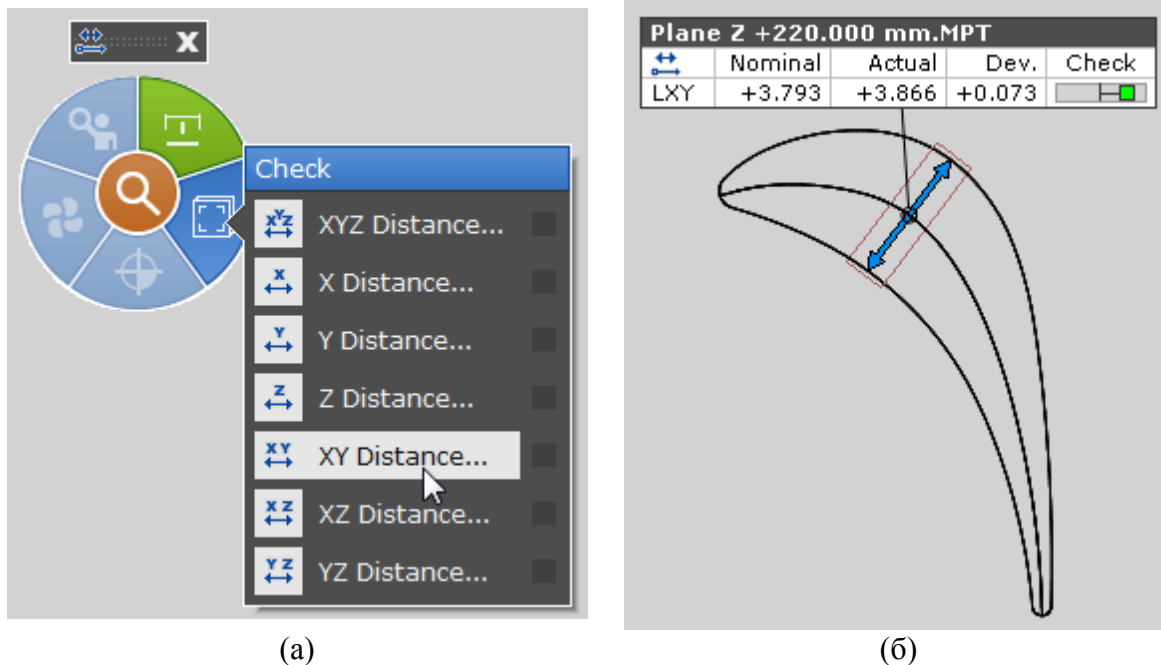
Слика 5.4 – Скелетница профила лопатице за CAD модел



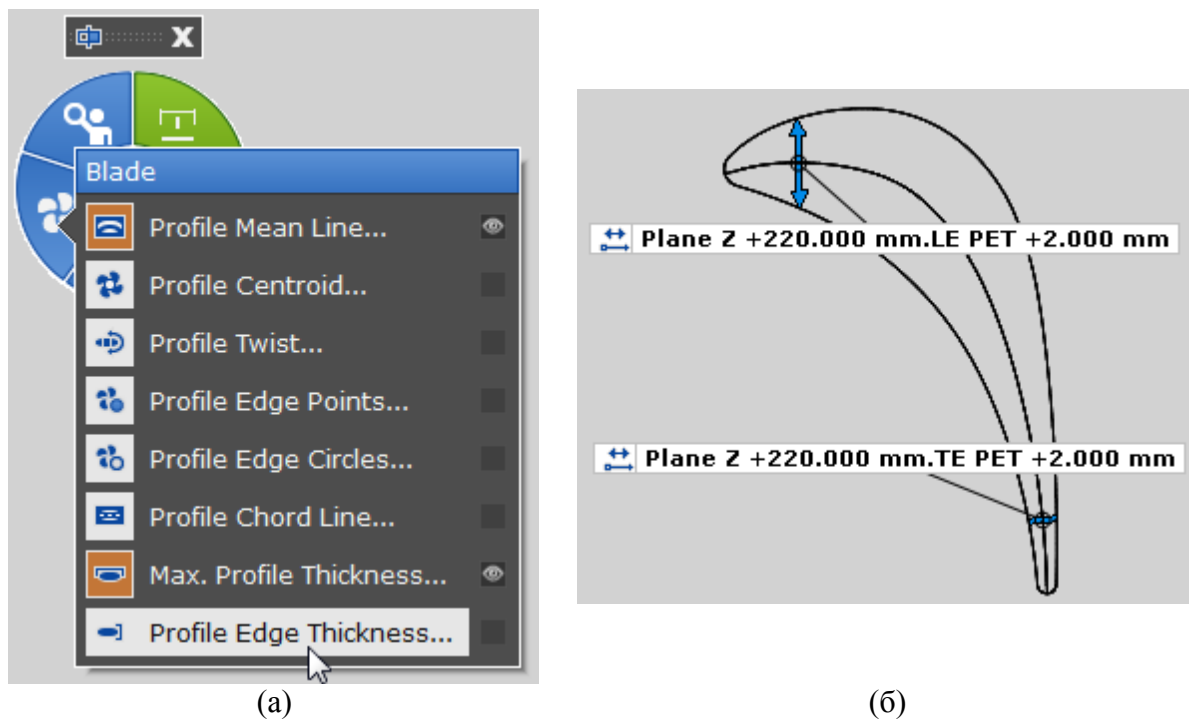
Слика 5.5 – Креирање максималне дебљине профила

Креирање дебљине профила на улазној и/или излазној ивици профила врши се одабирањем профила, а затим коришћењем функције **Blade ► Profile Edge Thickness...** из менија **I-Inspect** (слика 5.7a). У дијалогу се уноси вредност за колико помера тачка мерења дебљине профила дуж скелетнице од излазне и/или излазне ивице профила. Софтвер

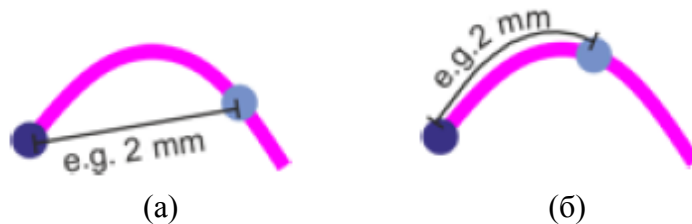
аутоматски креира номиналну и мерену дебљину лопатице на жељеном месту. Померање места мерења може да се врши по луку или најкраћим растојањем две тачке (слика 5.8).



Слика 5.6 Приказ измерене вредности максималне дебљине профила и одступања у односу на номиналну вредност



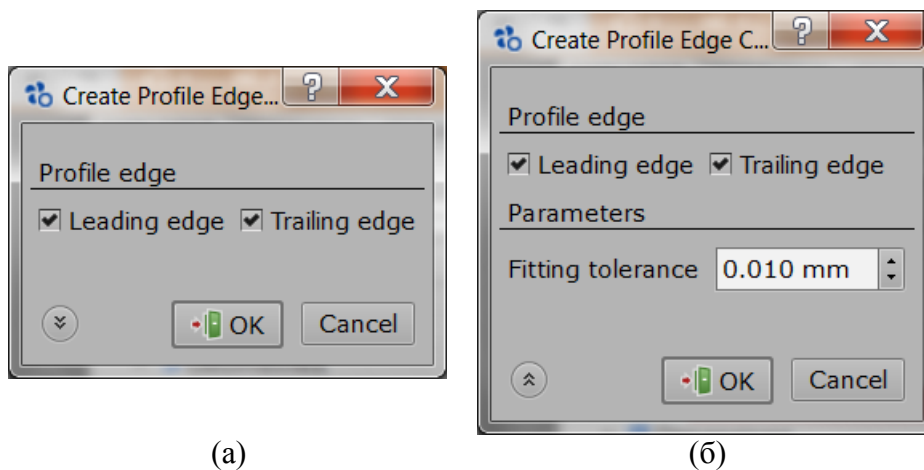
Слика 5.7 – Креирање дебљине профила на произвољном месту



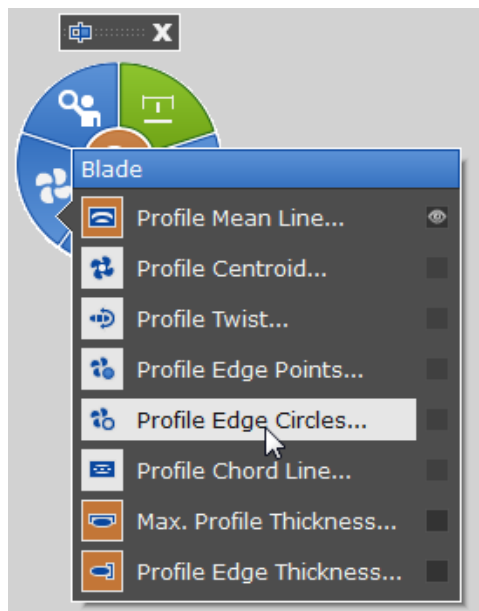
Слика 5.8 - Померање места мерења дебљине лопатице
(а) по тетиви скелетнице, (б) дуж скелетнице

Радијус улазне и излазне ивице профила

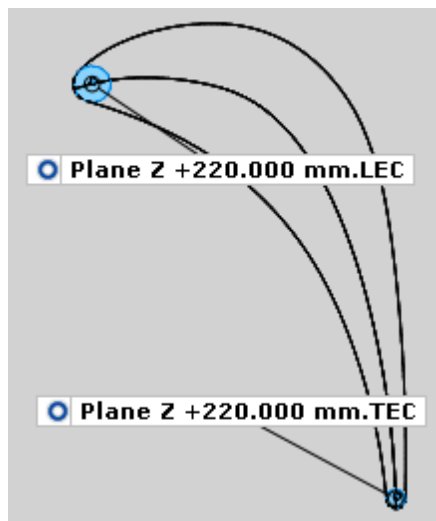
Уколико је потребно измерити радијус улазне и излазне ивице, неопходно је да буду креирани додатни елементи. Пошто је до сада већ креирана скелетница профила, неопходно је креирати само кругове на улазним и излазним ивицама. Они се креирају одабирањем номиналног профила (CAD модел) и коришћењем функције **Blade ► Profile Edge Circles...** из менија **I-Inspect**. Отвара се дијалог у коме се одабира ивица за коју се генеришу ови кругови(слика 5.9). Постоји могућност подешавања толеранције за генерисање кругова. На основу мерног принципа генеришу се и кругови који одговарају стварном профилу.



Слика 5.9 – Дијалог за креирање радијуса улазне и излазне ивице профила
(а) основне опције, (б) додатне опције

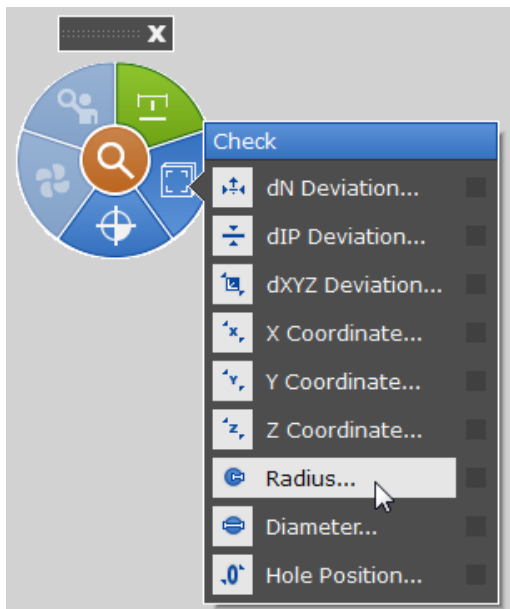


(a)

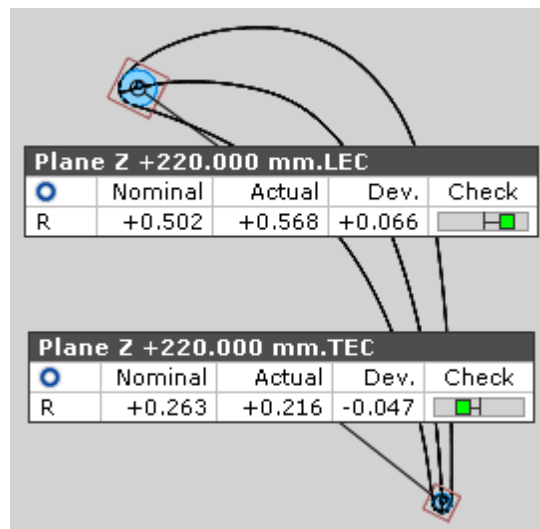


(б)

Слика 5.10 – Креирање радијуса на улазним и излазним ивицама профила



(a)



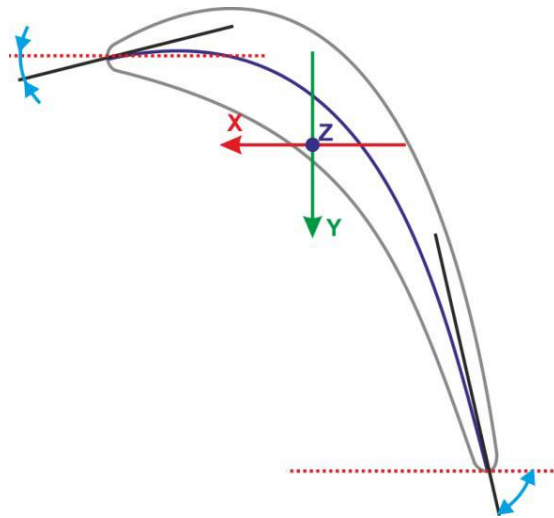
(б)

Слика 5.11 – Приказ измерене вредности дебљине профила на произвољном месту и одступања у односу на номиналну вредност

Улазни и излазни угао профила

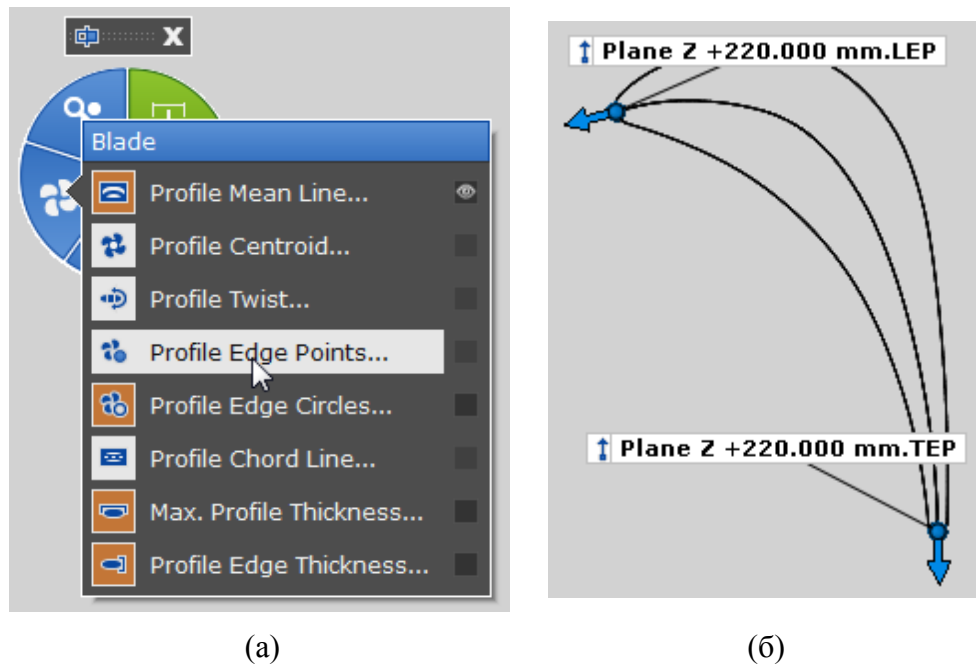
Улазни угао профила је угао између тангенте на скелетницу у ивичној тачки на улазној ивици профила и правца осе машине (на пример оса X). Излазни угао профила је угао између тангенте на скелетницу у ивичној тачки на излазној ивици профила и правца осе машине (на пример оса X). За одређивање улазног (на улазној ивици) и излазног (на

излазној ивици) угла профила потребни су скелетница профила и ивичне тачке профила. Као тангента се узима нормални вектор ивичне тачке профила (*profile edge point*).



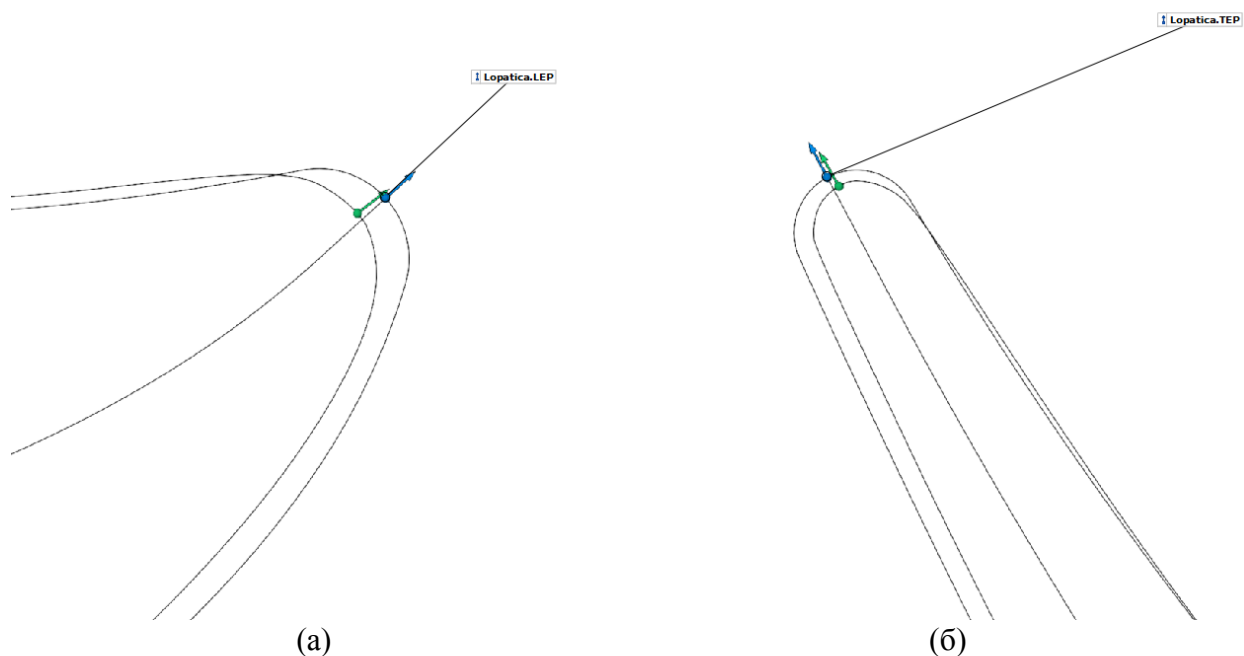
Слика 5.12 – Мерење улазног и излазног угла

На скелетници профила могуће је креирати ивичне или продорне тачке, у којима скелетница профила пресеца улазну-нападну ивицу (*leading edge*), и излазну ивицу (*trailing edge*). За креирање ових тачака користи се функција **Blade ► Profile Edge Points...** у **I-Inspect** менију (слика 5.13). Софтвер аутоматски креира номиналне тачке на CAD моделу као и њима одговарајуће тачке на дигитализованом моделу.



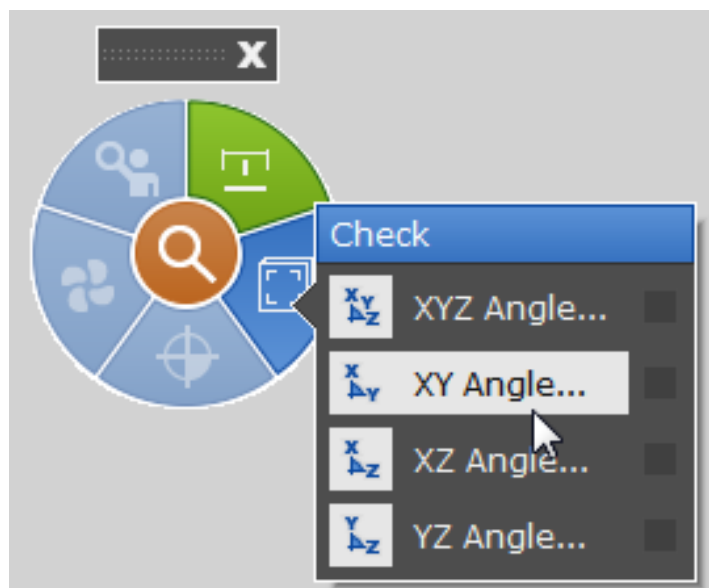
Слика 5.13 – Креирање ивичних тачака профила

Применом мерног профила на ивичне тачке креиране на CAD моделу креирају се ивичне тачке на реалном, дигитализованом моделу (слика 5.14).

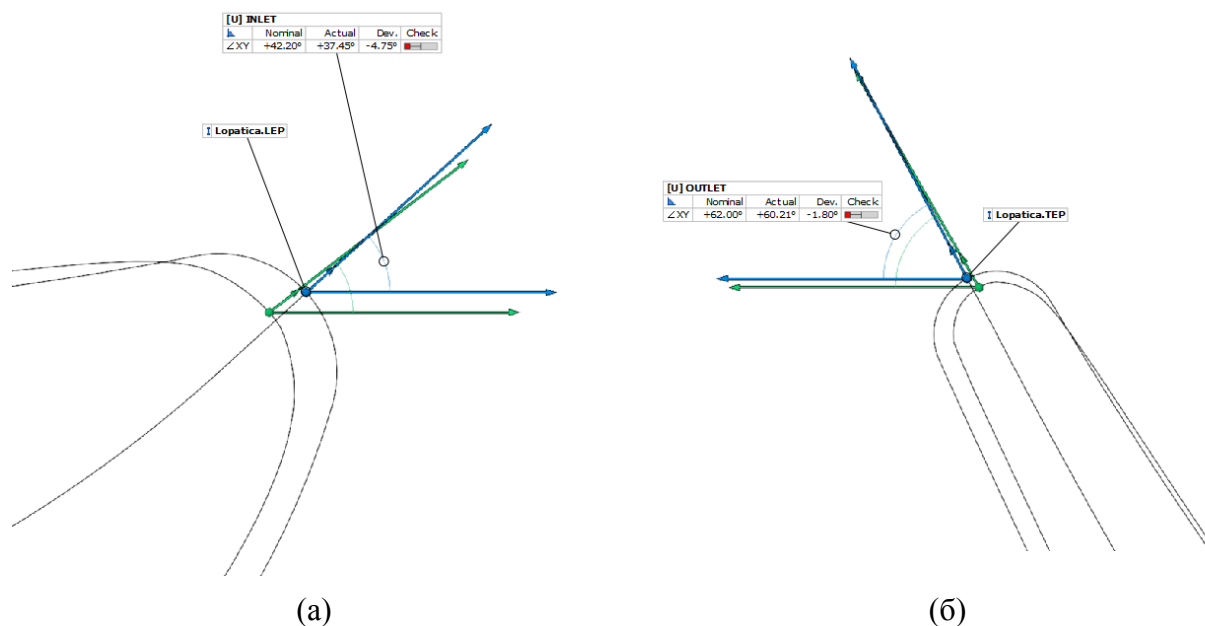


Слика 5.14 – Ивичне тачке на CAD и дигитализованом моделу

Приказивање углова (улазног и излазног) врши се коришћењем функције **Construct ► Angle ► 2-Directions Angle...** Приказивање вредности угла врши се коришћењем функције **I-Inspect** мени **Dimensions ► Angles** затим отварањем функције **Check ► XY Angle...** (слика 5.15). При томе се приказују номинална и измерена вредност, као и одговарајућа вредност одступања стварне од пројектоване вредности угла (слика 5.16).



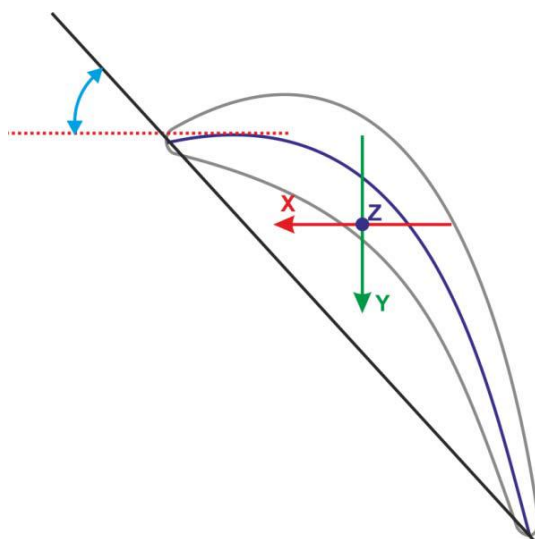
Слика 5.15 – Приказивање вредности улазног и излазног угла профила



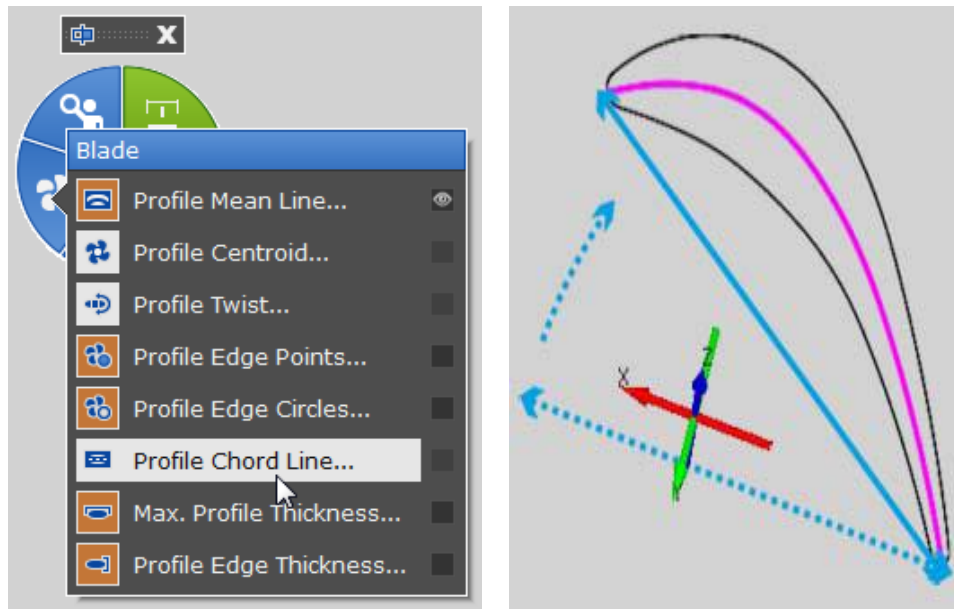
Слика 5.16 – Вредности улазног и излазног угла профила

Угао постављања профила и тетива профила

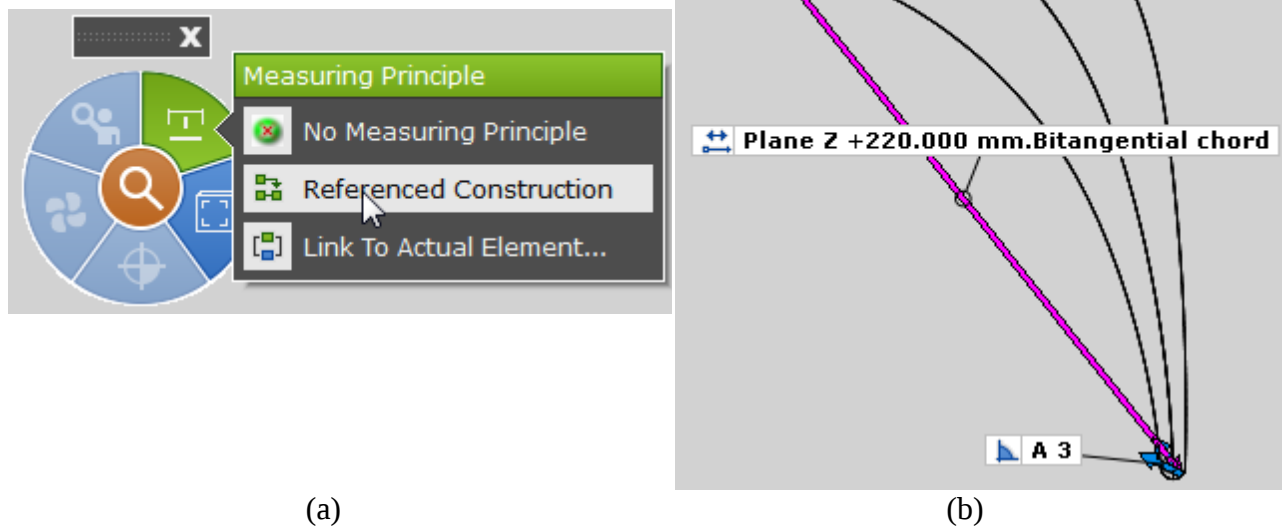
Угао постављања профила је угао између тетиве профила и осе радног кола (слика 5.16). За креирање и мерење угла постављања профила неопходна је скелетница и тетива профила [8,9]. Може се дефинисати на више начина: аксијална (у праву осе машине), нормална (спаја центре радијуса заобљења улазне и излазне ивице профила), битангента (тангира ивице профила дуж неког правца) и најдужа (највеће растојање између тачака профила). Дефинише се, на пример, коришћењем функције **Blade ► Profile Chord Line...** из менија **I-Inspect** (слика 5.18). За додељивање мерног принципа користимо функцију **I-Inspect ► Measuring principle ► Referenced Construction** (слика 5.19).



Слика 5.17 – Угао постављања профила



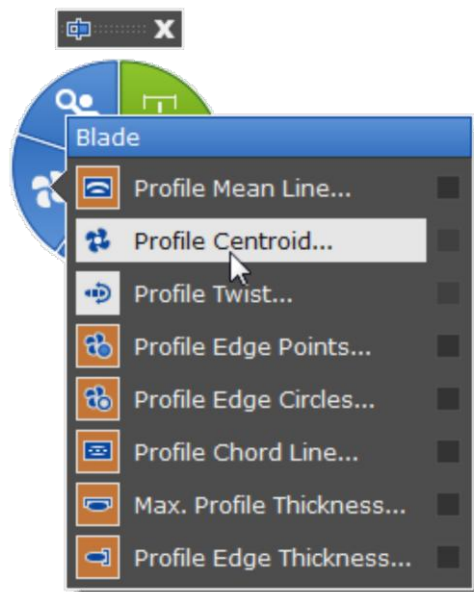
(a) (б)
Слика 5.18 – Креирање тетиве профила



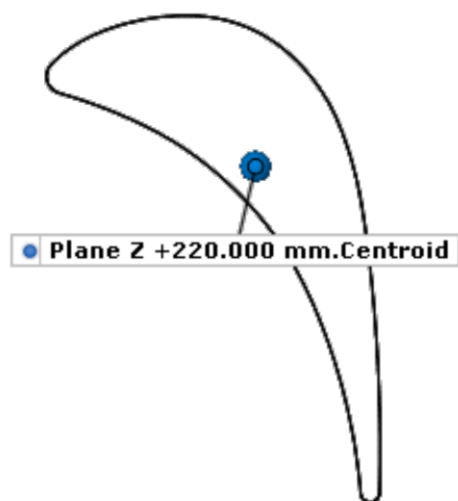
(a) (б)
Слика 5.19 – Додељивање мерног принципа креираном елементу на CAD моделу

Геометријско витоперење профила

Геометријско витоперење профила представља угао између реалног и CAD профила. За његово креирање потребно је постојање тежишта профила. Тежиште профила креира се коришћењем функције **Blade ► Profile Centroid...** из менија **I-Inspect** (слика 5.20). Софтвер аутоматски креира и одговарајућу тачку која одговара реалном профилу.



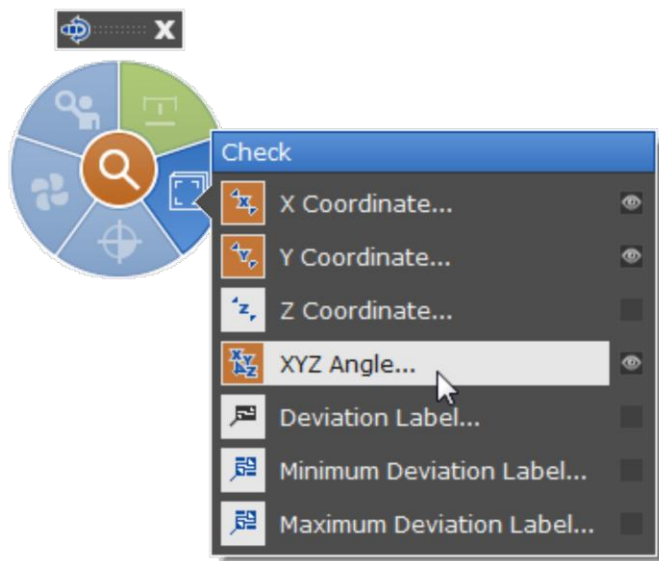
(a)



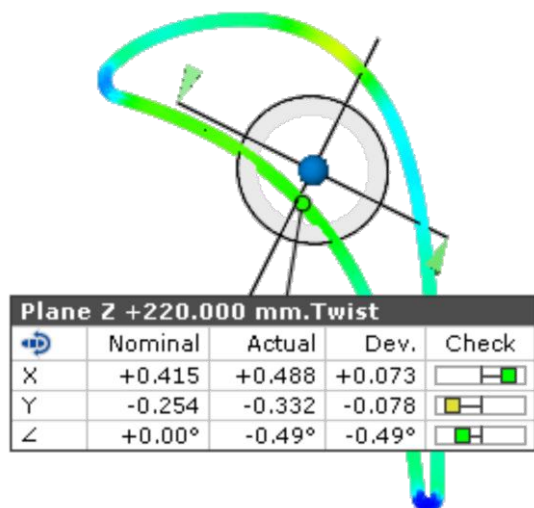
(б)

Слика 5.20 – Креирање тежишта пресека

Креирање геометријског витоперења профила врши се функцијом **Blade ► Profile Twist....** Према подразумеваним подешавањима тежиште релног пресека ссе користи за одреживање угла ротације пресека. Приказивање вредности геометријског витоперења профила (слика 5.21a) врши се приказивањем померања тежишта у правцима координатних оса и угла ротације пресека (слика 5.21б).



(a)



(б)

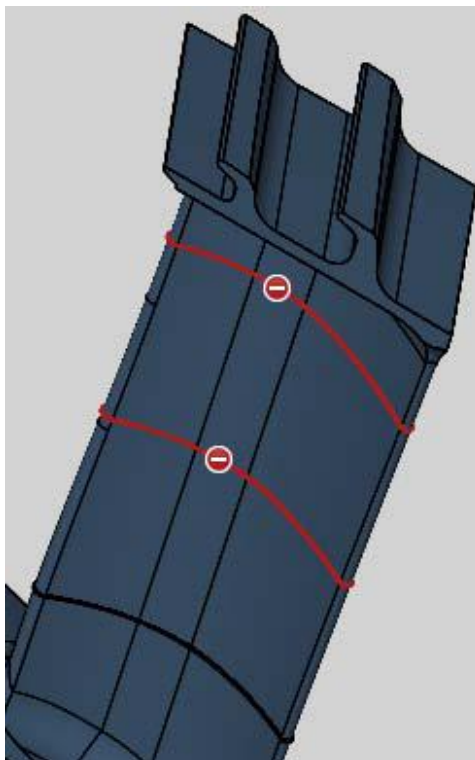
Слика 5.21 – Приказивање вредности геометријског витоперења профила

Креирање кориснички дефинисаног принципа контроле (user-defined inspection principle)

Контрола лопатице се заснива на контроли неколико пресека. Па је зато потребно поновити претходни поступак у сваком пресеку који се конструише. Због постојања параметарске контроле у GOM софтверу могуће је користити кориснички дефинисане принципе контроле. На тај начин поступак дефинисан за један профил могуће је применити за све остале новокреиране пресеке. За креирање кориснички дефинисаног принципа контроле веома је битан редослед креирања свих елемената на посматраном пресеку. Потребно је обезбедити да су све зависности јасно дефинисане и постоје сви потребни елементи. Ланац креирања основних елемената не сме бити двосмислен. Ако је нарушен, на пример, због тога што је номинални елемент обрисан али и даље постоји мерени елемент у пројекту кориснички дефинисан принцип контроле не може бити коришћен за следећи пресек.

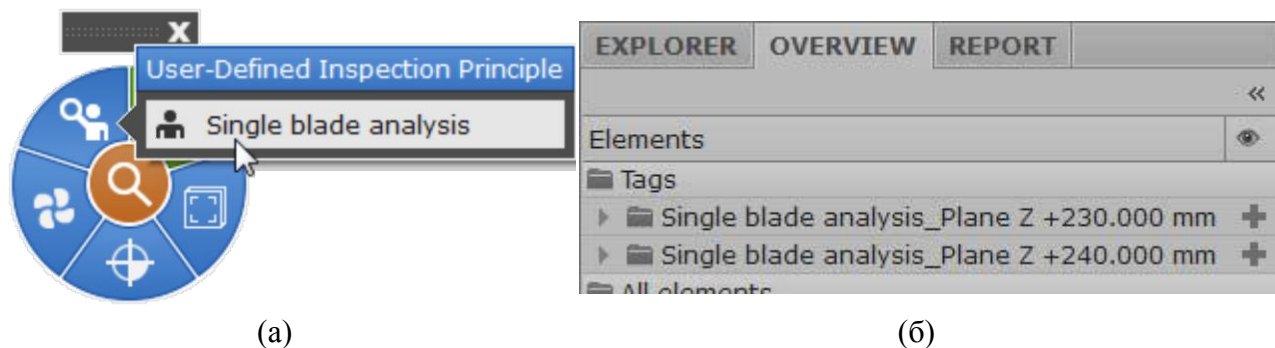
За дефинисање кориснички дефинисаног принципа контроле потребно је селектовати њен пресек и позвати команду **Inspection ► Define User-Defined Inspection Principle...**. Овом мерном принципу дајемо име “Single Blade analysis”.

Да би применили кориснички дефинисан принцип контроле треба креирати два нова пресека на лопатици паралална са равни Z на растојању 230mm и 240mm.



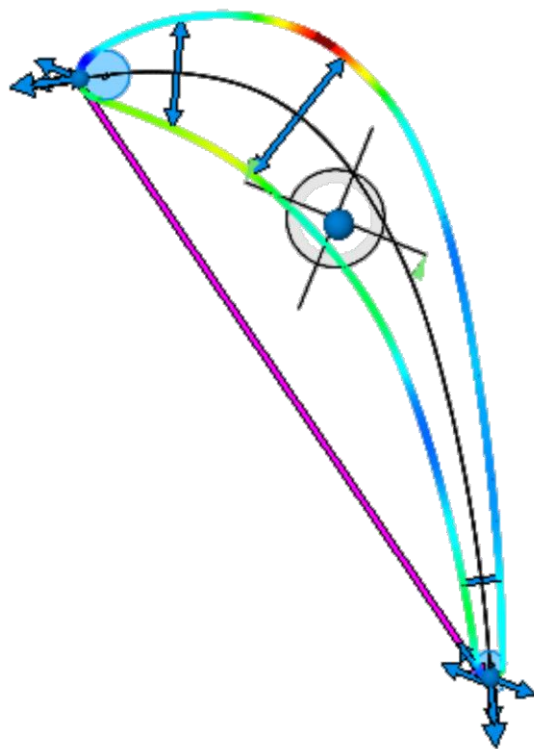
Слика 5.22 – Креирање пресека на лопатици паралалних са равни Z на растојању 230mm и 240mm

Да би применили овај мерни принцип одабирамо новокреиране пресеке и користећи **I-Inspect** мени одабира се функција **User-Defined inspection Principle** (слика 5.23).



Слика 5.23 – Примењивање кориснички дефинисаног мерног принципа

Софтвер за новокреиране пресеке креира све елементе који су дефинисани над првим пресеком. креира све елементе који су дефинисани за ове две секције. Током креирања сви елементи који припадају једном пресеку дебијају ознаку на основу које их је лако идентификовати у прокрету



Слика 5.24 – Анализа пресека коришћењем кориснички дефинисаног мерног принципа

Операције на већим бројем лопатица

Лопатице се могу анализирати појединачно или као интегрисане компоненте (пропелери, радна кола, ...). Поред тога може да се изврши и такозвана “тренд анализа” неколико снимљених лопатица у посебној врсти пројекта која се назива “stage” пројекат.

Дефинисање пресека више профила

У случају ротационо симетричних делова, какви су пропелери, импелери, радна кола турбина и слично, лопатице су постављене по кругу на једнаком растојању од осе. И у овом случају, централно место у анализи заузима анализа на основу пресека. Тај пресек треба поставити тако да на погодним местима пресече све лопатице. Због тога се овде обично користи пресек направљен цилиндром концентричним са осом радне машине, коришћењем функције **Cylinder-Based Section**.

За праћење текста потребно је отворити пројекат

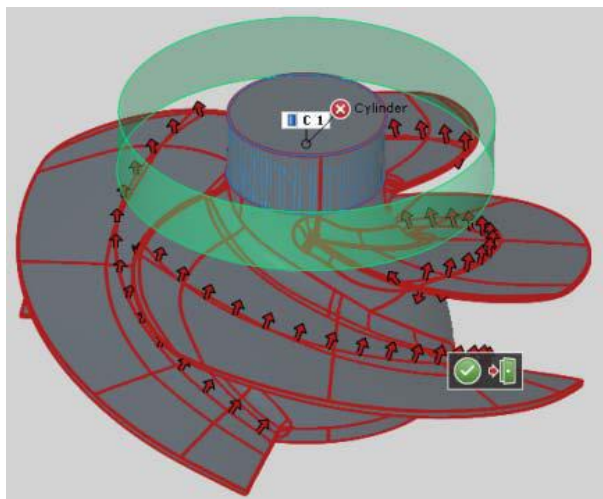
...>demo_data_blade>multi_blade.ginspect.

Коришћењем функције **Construct>Cylinder>Auto Cylinder (Nominal)...** дефинише се оса радног кола (комбинацијом тастера CTRL i LMB). Коришћењем тастера CTRL+RMB отвара се I-inspect meni којим се додељује мерни принцип **Fitting Element** на креираном цилиндру, чиме се креира цилиндар који одговара реалном, 3D дигитализованом радном колу. Затим се креира пресек по CAD моделу коришћењем функције **Construct>section>Cylinder-Based Section**. У дијалогу треба одабрати креирани номинални цилиндари подесити растојање 30mm од креираног до цилиндра којим се прави пресек. Треба обратити пажњу на место постављања пресека. Ако је лопатица пресечена делимично или ако због геометрије радног кола профил није затворен може се десити да у развијеном стању софтвер не може да постави коректно све елементе пресека. Креираном пресеку треба доделити мерни принцип **Actual Section** да би се креирали одговарајући пресеци над стварним, мереним подацима. Да би било могуће анализирати лопатице у једној равни поребно је да се пресек развије, односно да све добијене профиле доведемо у исту раван, коришћењем функције **Construct>Section>Unroll Cylinder-Based Section** (слика 5.26).

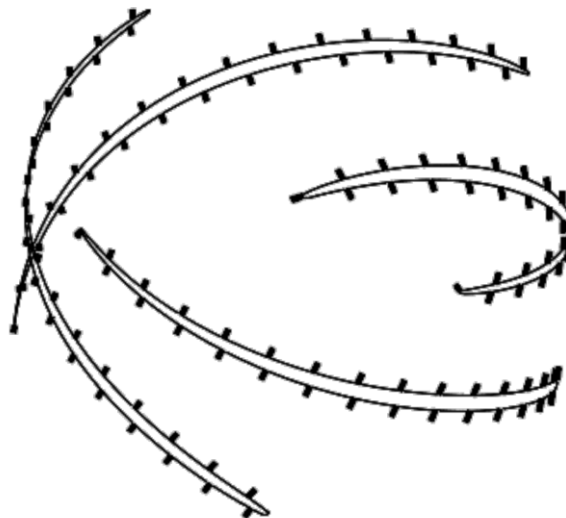
У дијалогу је потребно подесити следеће опције:

- Треба омогућити **Separate section per curve** чиме се омогућава да профил сваке лопатице буде засебан ентитет.
- За опцију **Cylindar-based section** треба одабрати креирани пресек
- За опцију **Projection plane** треба одабрати раван Z
- За опцију **Start point** бирамо тачку са координатама: 0,0000 0,0000 0,0000 mm
- За опцију **Start point offset** треба поставити вредност 0 степени.

У пројекту се појављују четири засебна профила којима треба доделити мерни принцип **Referenced Construction**.



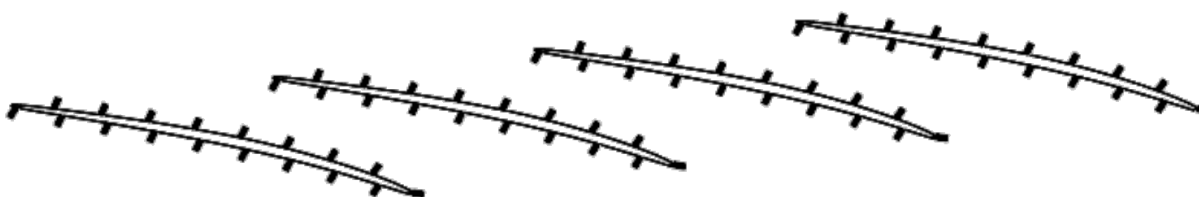
(a)



(б)

Слика 5.25 – Креирање пресека коришћењем цилиндра

Даља анализа спроводи се као што је већ објашњено у претходном тексту. Значи, треба креирати све елементе потребне за анализу пресека. Уколико поред тога креирамо и кориснички дефинисан принцип мерења све профиле је могуће анализирати у веома кретком времену.



Слика 5.26 – Пресек у развијеном стању

Најмања ширина међулопатичног простора (a – throat distance) одређује се коришћењем функције **Construct ► Distance ► 2-Curve Distance....** У дијалогу треба одабрати два суседна профила лопатица. А затим поновити процедуру за остале међулопатичне просторе. На овај начин креирани су елементи над CAD моделом а недостају одговарајући елементи над CAD подацима. Због тога треба селектовати креирана растојања и коришћењем **I-Inspect** менија треба додлеити мерни принцип **Referenced Construction**. Уколико треба проверити ово растојање оно лежи у равни YZ. За приказивање бројне вредности овог растојања

треба одабрати одговарајући елемент и коришћењем **I-Inspect** менија покренути функцију **Check ► YZ Distance....** У дијалогу треба подесити вредност толеранције на 0.2mm.

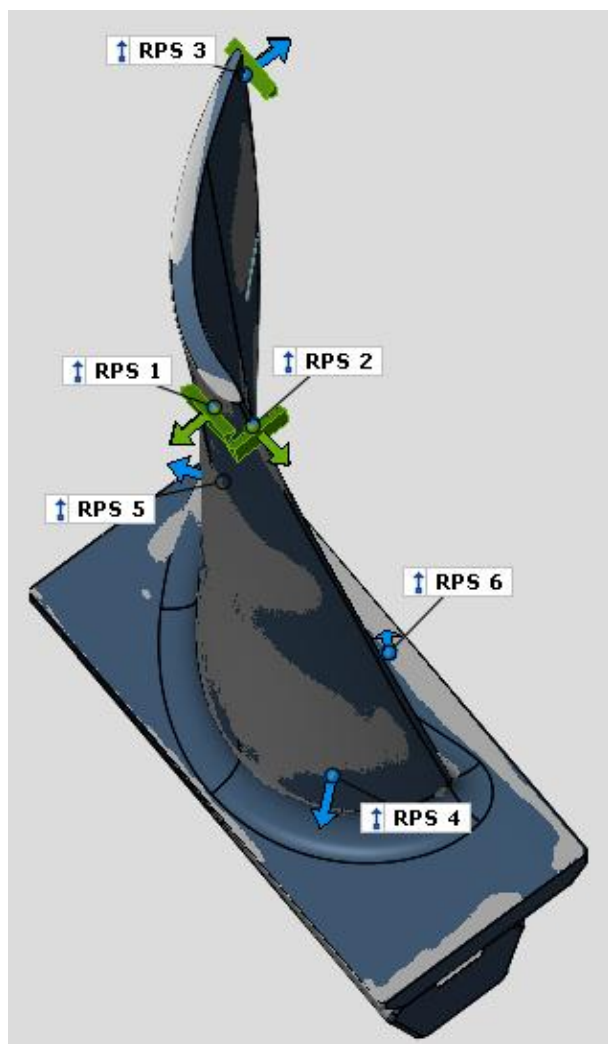
Трансформација дигитализованог модела у координатни систем CAD модела

Избор ове трансформације зависи од мерног задатка или од података датих у конструктивној документацији. Од избора трансформације директно зависи квалитет приказаних мерних резултата. У свакодневним применама тип трансформације најчешће одређује оператер на основу осећаја и претходног искуства. У главном менију **Operations** GOM софтвер нуди неколико функција за трансформацију. У примерима који следе претпоставља се да је извршена претходна трансформација (prealignment) мерених података у координатни систем CAD-а. Једна од погодних трансформација је RPS (слика 5.27). Омогућава да се дефинисаним паровима тачака ограниче померања тако да модели што реалније приђу један другом. За ову трансформацију потребно је најмање три тачке а обично се изводи са 6 и више.

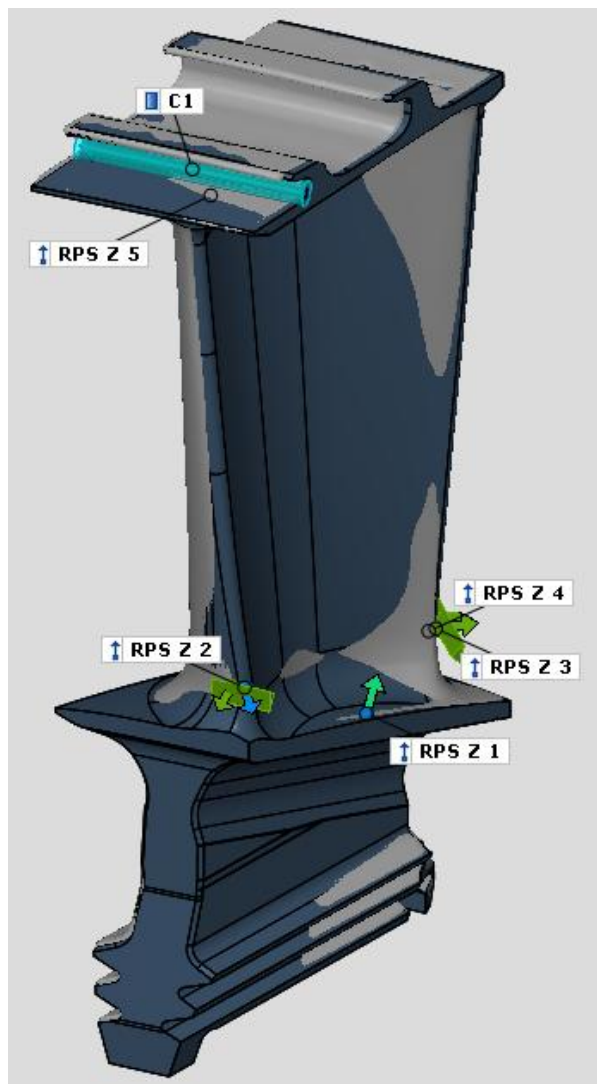
Ова трансформација може бити остварена ако се неке тачке означе као тачке на површини а мерним принципом им се доделе тачке из скупа мерених података. Мерни принципи који се најчешће примењују **Project Point Onto Actual** и **Touch Point (Edge)**. У дијалогу се врши задавање ограничења, односно, дефинисање у којим правцима поједине тачке могу да прилазе једна другој.

Уколико је потребно да се само одређени део лопатице користи за трансформацију могуће је конструисати цилиндар на одговарајућој локацији и користити га као такозвани RPS елемент.

Када је потребно хијерархијски дефинисати трансформацију погодно је користити трансформацију преко геометријских елемената. Код ове трансформације редослед навођења геометријских елемената нема исто дејство на трансформацију. Највећи приоритет има прво наведени елемент затим мањи приоритет има следећи елемент и најмањи приоритет има последњи елемент. Функција има дејство као добро позната метода трансформације Раван – Линија – Тачка, код кога је потребно да буду дефинисана ова три геометријска ентитета. Мађутим, за ову трансформацију могу да буду употребљене и три линије или било који други скуп геометријских елемената који потпуно дефинише положај крутог тела у простору.



(a)

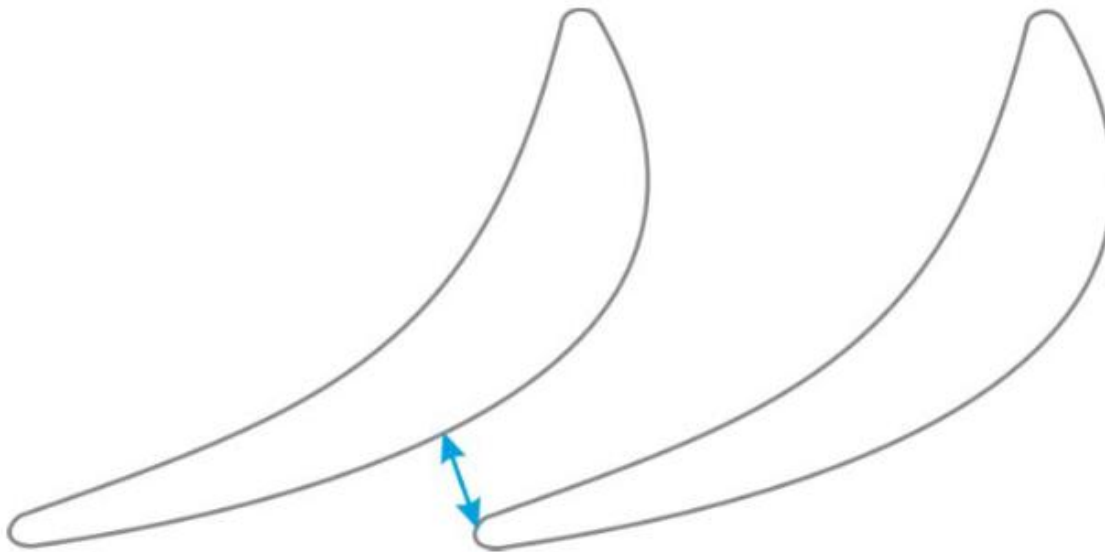


(б)

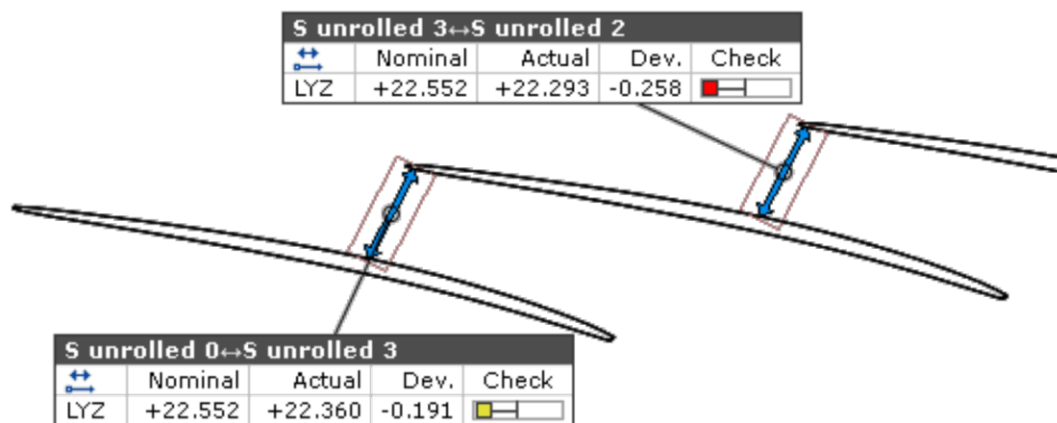
Слика 5.27 – Трансформација дигитализованог модела у координатни систем CAD модела коришћењем RPS трансформације

Ширина међулопатичног простора

Ширина мешђулопатичног простора (слика 5.28) може се одредити коришћењем функције **Construct ► Distance ► 2-Curve Distance...** У дијалогу треба одабрати два суседна профила. Процедuru понављамо над номиналним подацима све док не дефинишемо сва потребна међулопатична растојања. Применом мерног принципа **Referenced Construction** из менија **I-Inspect** креирамо одговарајућа растојања на скупу дигитализованих података. Приказивање измерене и номиналне вредности, као и одступања врши се коришћењем функције **Check ► YZ Distance** из **I-Inspect** менија, уз подешавање толеранције 0.2mm. На слици 5.29 приказан је пример измерених вредности ширине међулопатичног простора.



Слика 5.28 – Мерење ширине међулопатчног простора



Слика 5.29 – Пример измерених вредности ширине међулопатичног простора

6 Мерење геометријских карактеристика Францисове турбине коришћењем софтвера GOM Inspect

После завршене санације радног кола агрегата број 3 Хидроелектране Пива, извршена је:

- Контрола основних мера радног кола,
- Контрола толеранција облика и положаја,
- Контрола геометрије лопатица.

Фотограметријско мерење и 3D дигитализација геометрије радног кола извршена је у периоду 23. – 29. 08. 2011. године и 03. 10. 2011. године у фабрици Алстом (Карловац, Хрватска), где је изведена санација радног кола. Обрада резултата мерења извршена је на Машинском факултету у Крагујевцу.

Примењена методологија контроле геометрије радног кола турбине типа Францис заснована је на стандарду IEC [2], Технологији контроле геометрије обртног кола Францисових турбина у ХЕ Пива [3] и цртежу радног кола 278400.

Поступак мерења изведен је кроз следеће кораке:

1. Припрема објекта мерења (уклањање механичких нечистоћа, прашине и опиљака, као и одмашћивање површина),
2. Наношење некодираних референтних тачака на површину објекта мерења,
3. Наношење спреја TiO_2 у циљу матирања сјајних површина,
4. Аплицирање кодираних референтних објеката (кодирани референтне тачке, референтне мерне летве) на објекат мерења,
5. Фотограметријско снимање објекта оптичким мерним системом TRITOP,
6. Обрада фотограметријских фотографија софтвером TRITOP,
7. Извоз положаја некодираних референтних тачака и увоз у ATOS пројекат,
8. Тродимензионална дигитализација целокупне површине радног кола оптичким мерним системом ATOS,
9. Обрада резултата мерења оптичким мерним системом ATOS,
10. Обрада резултата мерења оптичким мерним системом TRITOP.

Некодираним референтним тачкама покривена је целокупна површина објекта мерења – радног кола, при чему је залепљено преко 5000 тачака. Целокупна површина радног кола прекривена је финим спрејом титан диоксида, који онемогућава рефлексију светлости од фино обрађених, сјајних, површина радног кола. За мерење оптичким мерним системом TRITOP [7], референтни објекти (кодирани мерне тачке, летве, ...) су постављени на површину радног кола, слика 6.1.



Слика 6.1 - Радно коло ХЕ Пива припремљено за фотограметријско мерење и 3D дигитализацију

На слици 6.2 приказан је оптички мерни систем TRITOP (а) и лопатице припремљене за прецизно фотограметријско мерење (б). На слици 6.3 приказана је 3D дигитализација различитих области радног кола турбине ХЕ Пива оптичким мерним системом ATOS.



(а)



(б)

Слика 6.2 - Фотограметријско мерење оптичким мерним системом TRITOP

(а) Оптички мерни систем TRITOP

(б) Лопатице припремљене за фотограметријско мерење



(a)



(б)



(в)



(г)

Слика 6.3 - 3Д дигитализација оптичким мерним системом ATOS

(а) Дигитализација површине лопатица на улазној страни

(б) Дигитализација површине лопатица на излазној страни

(в) Дигитализација површине доњег заптивног прстена

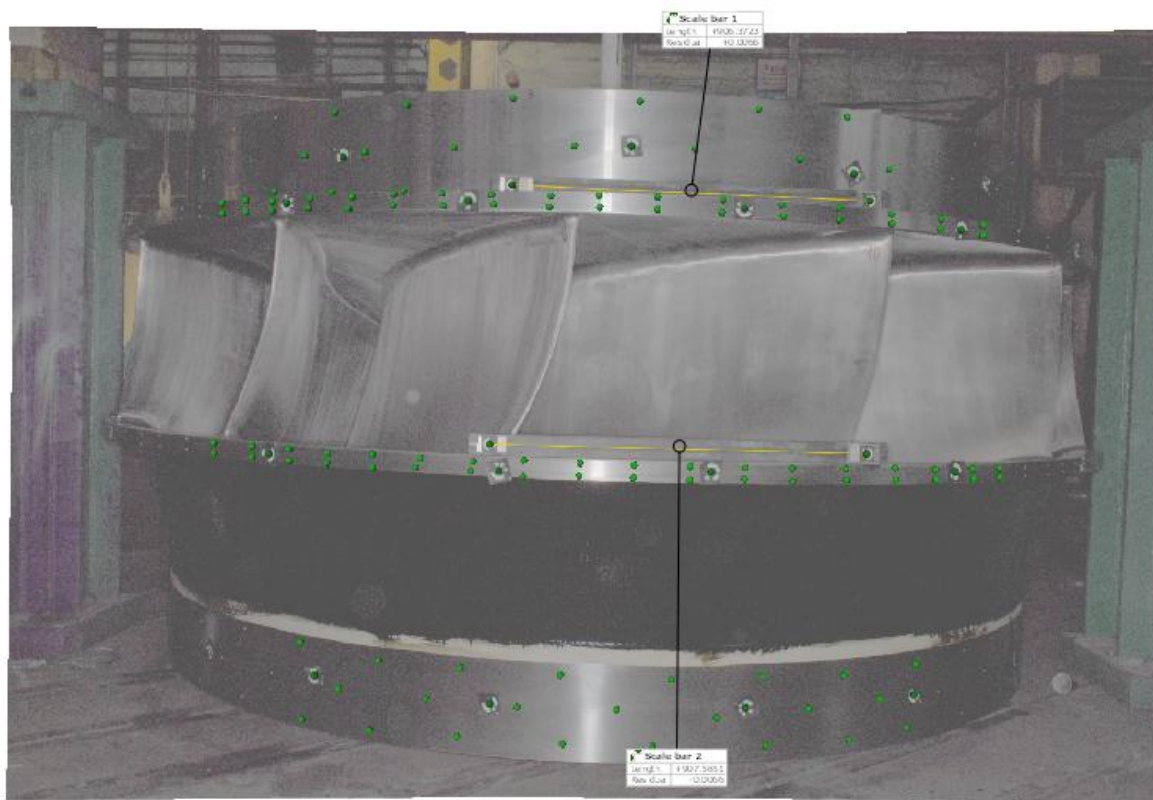
(г) Дигитализација видљивог дела леђне површине лопатица у зони доњег заптивног прстена

На лицу места, при микроклиматским условима мерења извршена је калибрација мерног уређаја. Извештај о калибрацији оптичког мерног система ATOS дат је табелом 6.1. Према литератури, [5,6,7], прихватљиве вредности основног параметра калибрације Calibration Deviation крећу се у границама 0.15-0.030 пиксела, што је и постигнуто калибрацијом.

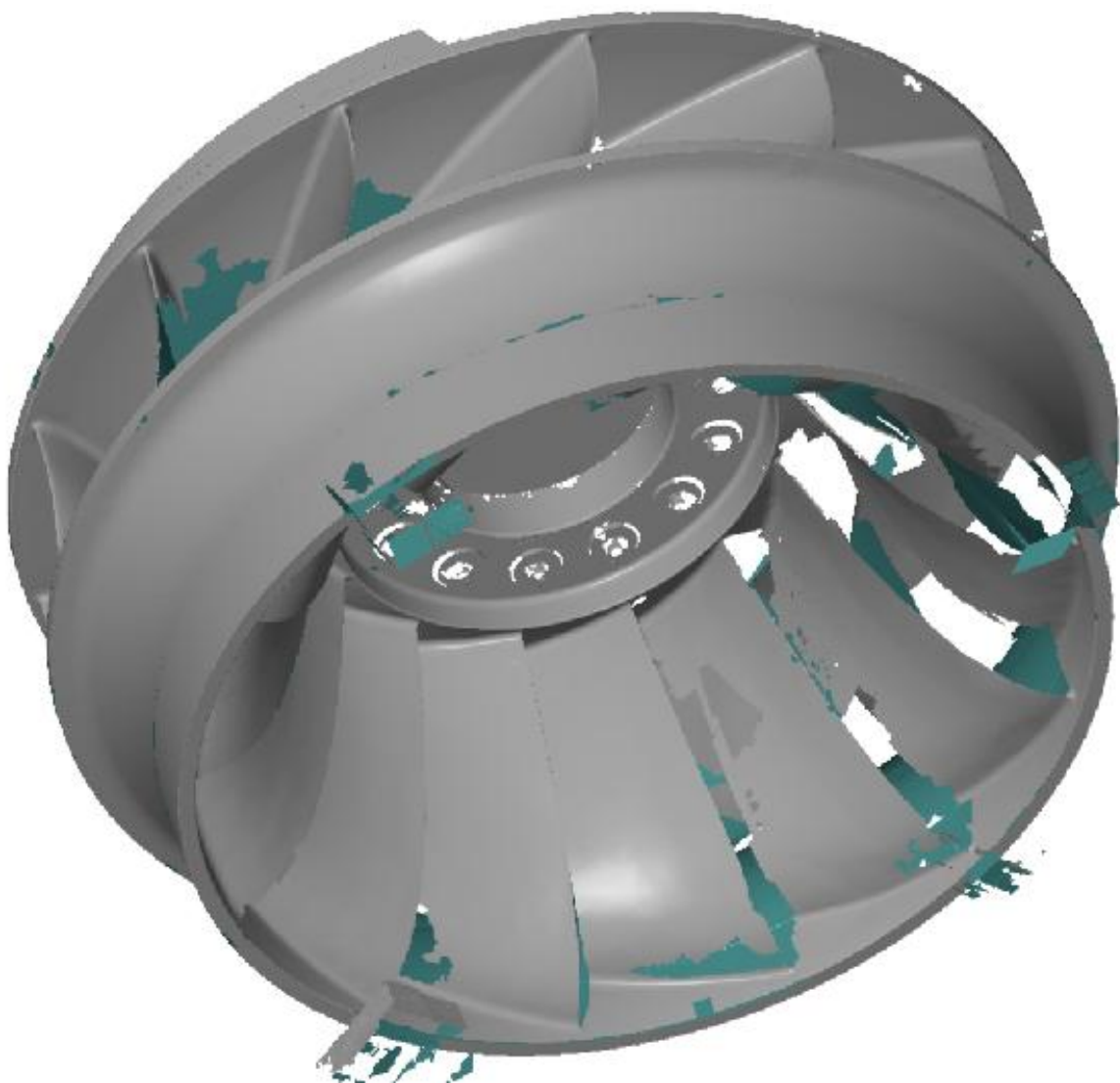
Резултат фотограметријског снимања оптичким мерним системом TRITOP је положај некодираних тачака, залепљених на површину објекта мерења (слика 6.4). Ове тачке коришћење су за прецизно одређивање мера на каруселу и као референтне тачке за оријентацију сензора приликом 3D дигитализације површина радног кола. Резултат 3Д дигитализације оптичким мерним системом ATOS је облак тачака високе тачности и резолуције, односно тачке које верно описују површину радног кола (слика 6.5).

Табела 6.1 - Извештај о калибрацији Оптичког мерног система ATOS

Стварна калибрација	
Општи	
Датум калибрисања	Sat Aug 27 11:12:24 2011
Обејкат калибрисања	
Тип објекта	Cross (coded)
Име	CC20/500/D05247
Скала калибрисања	Horizontal: 493.127 mm, Vertical: 493.964 mm
Температура	20.0 °C
Коефицијент	-0.85 x 10 ⁻⁶ 1/K
Мерна температура	28.0 °C
Подешавање калибрисања	
Сочива камере	12.00 mm
Резултат	
Девиијација калибрисања	0.018 pixels
Scale deviation	0.007 mm
Угао камере	31.4°
Варијација угла	-25.7 / 27.1°
Висина варијације	202 mm
Мерење запремине	480 / 380 / 380 mm



Слика 6.4 – Резултат оптичке 3D дигитализације: Облак тачака добијен оптичким мерним системом ТРИТОП

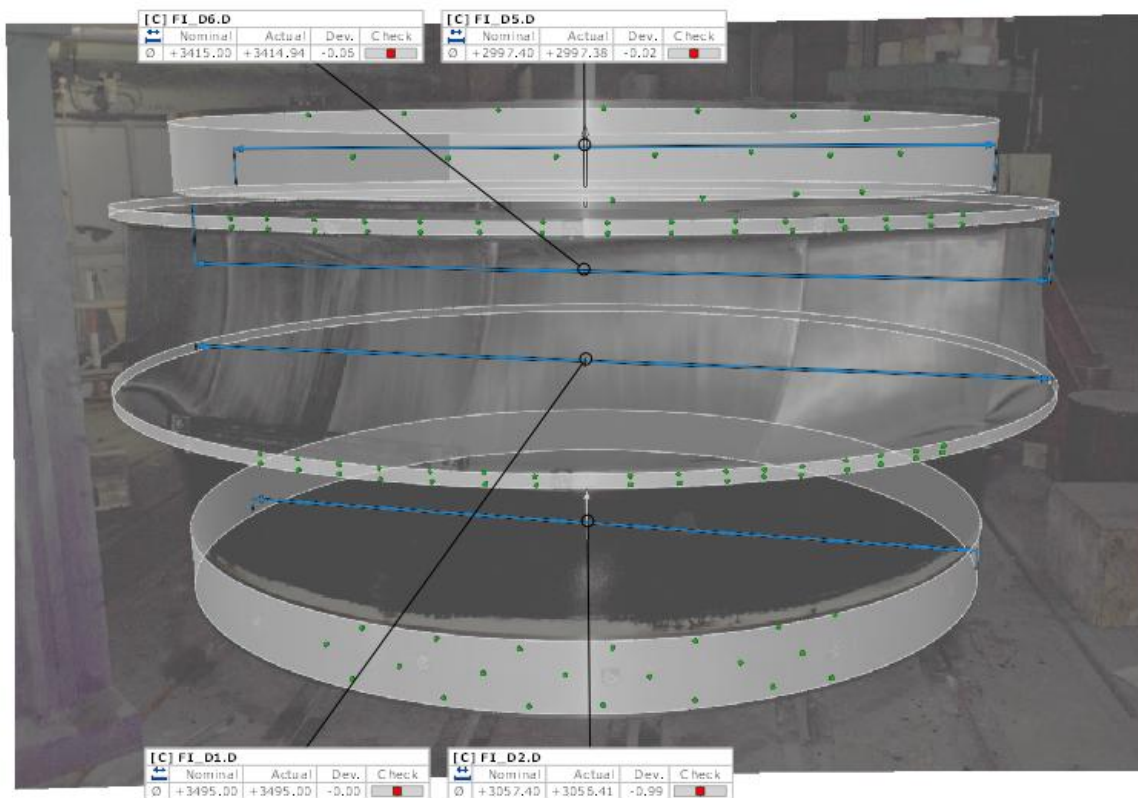


Слика 6.5 – Резултат оптичке 3D дигитализације: Полигонизовани модел радног кола турбине добијен оптичким мерним системом АТОС

Извршена је контрола основних мера за сваку лопатицу, према табели 3.1. У табели 3.1, ознака D представља најмањи пречник на излазу из обртног кола, који за посматрано радно коло износи 2920mm [3], према слици 3.1.

Контрола основних мера радног кола

Резултати мерења радног основних пречника радног кола дати су у на слици 6.6 и табели 6.2. Вредности толеранције су преузете из [2].



Слика 6.6 - Основне димензије радног кола измерене у софтверу GOM Inspect

Табела 6.2 - Основне димензије радног кола

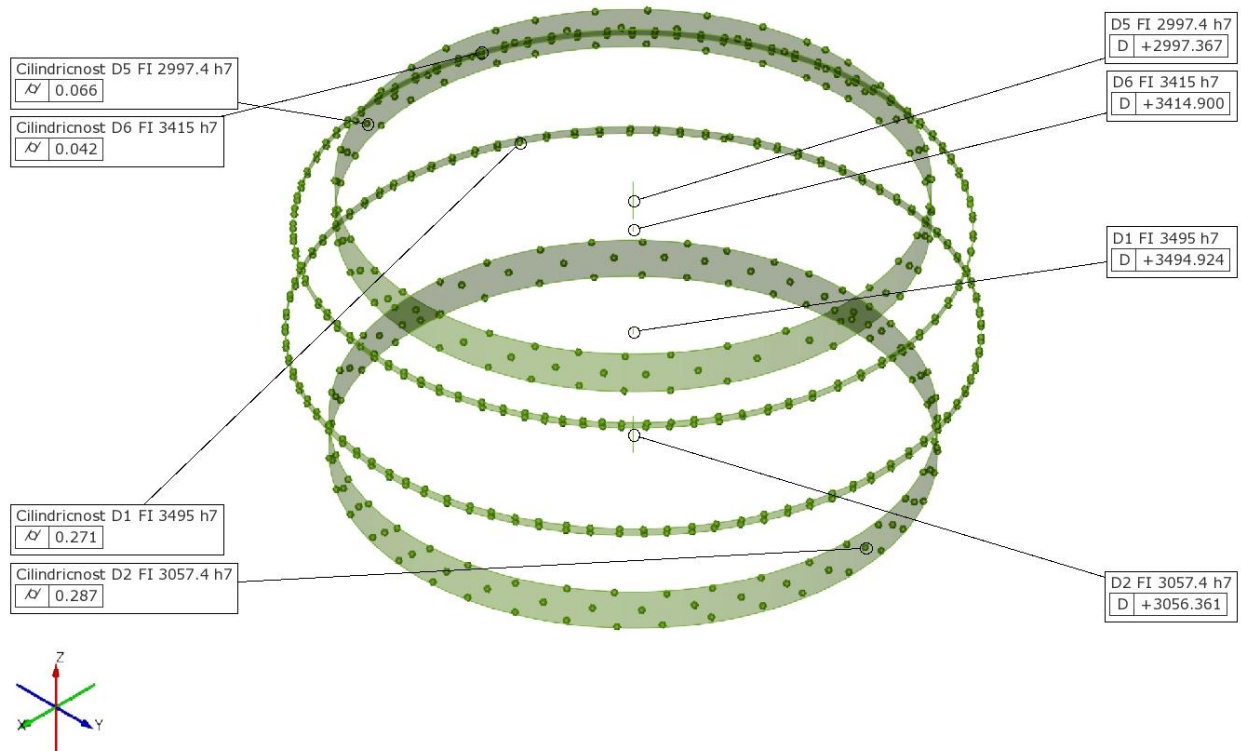
Ознака	Номинална мера	ГГО	ДГО	ГГМ	ДГМ	Мерни извештај	GOM Inspect	У толеранцији
ØD1	Ø 3495 h7	0	250	3495,000	3494,750	3494,924	3494.653	ДА/НЕ
ØD2	Ø 3057,4 h7	0	210	3057,400	3057,190	3056,361	3057.221	НЕ/ДА
ØD3	Ø 850 H7	131	0	850,131	850,000	/	/	/
ØD4	Ø 960 H7	84	0	960,084	960,000	/	/	/
ØD5	Ø 2997,4 h7	0	210	2997,400	2997,190	2997,367	2997.280	ДА/ДА
ØD6	Ø 3415 h7	0	250	3415,000	3414,750	3414,900	3414.899	ДА/ДА

Контрола толеранција облика и положаја

Цилиндричност

На слици 6.7 су дате цилиндричности основних пречника радног кола. Цилиндричност представља растојање између два концентрична цилиндра који обухватају све тачке посматраног пречника.

$$X+Y+Z+$$



Слика 6.7 - Цилиндричност основних пречника радног кола

Кружност обртања (бацање)

Софтвери ATOS [5,6] и TRITOP [7] у верзији v6.1 не поседују могућност одређивања кружности обртања (бацања). За потребе мерења, кружност обртања је одређена посредно. На цилиндру за који меримо кружност обртања познате су прецизно израчунате тачке на основу TRITOP мерења. На основу израчаног радијуса сваке тачке, одређујемо максималну и минималну вредност радијуса. Разлика максималне и минималне вредности пречника даје одступање посматраног пречника од кружности обртања. Резултати мерења кружности обртања дати су у табели 6.3. Вредности толеранција су преузете из толеранција [2].

Табела 6.3 - Посредно измерене вредности кружности обртања радног кола

Ознака толеранције	Толеранција	Измерена вредност	GOM inspect	У толеранцији
--------------------	-------------	-------------------	-------------	---------------

B1	0,1	0,397	0,391	НЕ/НЕ
B2	0,1	0,389	0,384	НЕ/НЕ
B5	0,1	0,090	0,086	ДА/ДА
B6	0,1	0,045	0,042	ДА/ДА

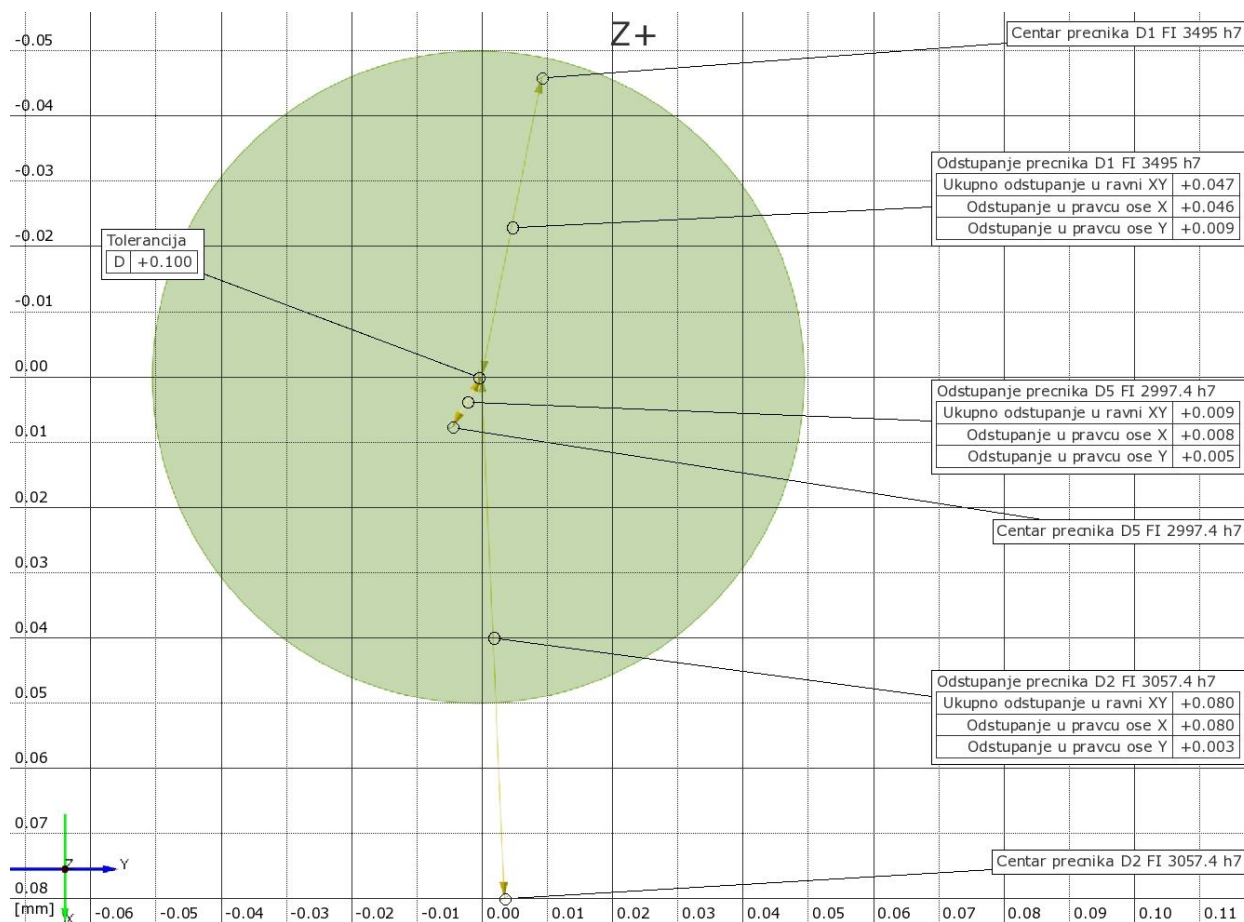
Концентричност

Вредности концентричности измерене су на основу тачака чији је положај прецизно одређен оптичким мерним системом TRITOP [7] и потврђена оптичким мерним системом ATOS [5,6], на основу великог броја тачака са тих површина, добијених 3D дигитализацијом. Резултати мерења концентричности дати су у табели 6.4.

Табела 6.4 - Концентричности/саосности основних пречника радног кола

Ознака толеранције	Мерни извештај	GOM Inspect
K1	0,047	0,045
K2	0,080	0,081
K5	0,009	0,010
K6	0,010	0,009

На слици 6.8 приказани су положаји оса основних пречника радног кола у односу на осу цилиндричне површи А за центрирање вратила и обртног кола. Зеленим кругом представљено је толеранцијско поље од 0,1mm.



Слика 6.8 - Концентричност основних пречника радног кола

Равност и паралелност

Измерена вредност равности и паралелности одређена је на основу великог броја тачака са тих површина, добијених 3D дигитализацијом оптичким мерним системом ATOS [5,6]. Резултати мерења равности и паралелности дати су у табели 6.5. Вредности толеранција су преузете из [2].

Табела 6.5 - Паралелност и равност површина радног кола

Ознака толеранције	Толеранција	Мерни извештај	GOM Inspect	У толеранцији
P1	0,1	1,640	1,628	HE/HE
P2	0,02	0,520	0,499	HE/HE
R1	0,01	0,068	0,059	HE/HE

У табели 6.6 приказани су резултати контроле основних мера радног кола.

Табела 6.6 - Контрола основних мера радног кола

Поглавље у мерном извештају	Контролисана мера	Мерни извештај		GOM Inspect		Дозвољена вредност одступања	у толеранцији
		Средња вредност	Максимално одступање	Средња вредност	Максимално одступање		
3.1	Улазна висина лопатице U_{vim}	572,161	+1,725 -1,736	-	-	±14.6	ДА/-
3.2	Илазна висина лопатица I_{vl}	1072,470	+8,951 -8,606	-	-	±14.6	ДА/-
3.3	Пречник излазне висине лопатице на главчини R_{ig}	758,584	+3,552 -4,015	758,580	+3,554 -4,014	±14.6	ДА/ДА
3.4	Пречник излазне ивице лопатице на венцу R_{iv}	1462,779	+2,627 -1,373	1462,781	+2,625 -1,373	±14.6	ДА/ДА
3.5	Пречник улазне висине лопатица на главчини R_{ug}	1672,181	+1,586 -1,997	1672,179	+1,588 -1,996	±14.6	ДА/ДА
3.6	Пречник улазне ивице лопатице на венцу R_{uv}	1716,239	+0,776 -1,387	1716,236	+0,774 -1,388	±14.6	ДА/ДА
3.7	Корак лопатице на излазној страни на главчини P_{ig}	365,640	+8,844 -9,557	365,642	+8,842 -9,559	±14.6	ДА/ДА
3.8	Корак лопатице на излазној страни на венцу P_{iv}	706,659	+7,095 -9,278	706,657	+7,094 -9,277	±14.6	ДА/ДА
3.9	Корак лопатица на излазној страни на главчини P_{ug}	808,202	+8,818 -9,914	808,200	+8,821 -9,916	±14.6	ДА/ДА
3.10	Корак лопатица на улазној страни на венцу P_{uv}	829,496	+8,422 -11,452	829,490	+8,420 -11,451	±14.6	ДА/ДА
3.11	Углови простирања лопатица α_1	0,077	+0,523 -0,677	0,076	+0,524 -0,678	/	/
		61,746	+0,554 -0,546	61,744	+0,553 -0,548	/	/
		66,954	+0,346 -0,554	66,952	+0,347 -0,555	/	/

Контрола геометрије лопатица

У табели 6.7 приказано је средње вредности основних мера радног кола, а у табели 6.8 дата је дебљина лопатица по мерним местима на улазу.

Табела 6.7 - Средње вредности основних мера радног кола

Поглавље у мерном извештају	Контролисана мера	Мерни извештај		GOM Inspect		Дозвољена вредност одступања	у толеранцији
		Средња вредност	Максимално одступање	Средња вредност	Максимално одступање		
ПРЕСЕК 1							
4.1	Пречник улазне ивице лопатица R_{ul}	3368,662	+4,540 -1,172	3368,660	+4,539 -1,173	± 14,6	ДА/ДА
4.2	Пречник излазне ивице лопатице R_{iz}	1560,193	+4,605 -7,461	1560,191	+4,606 -7,463	± 14,6	ДА/ДА
4.3	Корак лопатица на улазној страни P_{ul}	813,502	+4,799 -6,126	813,500	+4,800 -6,130	± 14,6	ДА/ДА
4.4	Корак лопатица на излазној страни P_{iz}	377,039	+3,334 -6,340	377,042	+3,337 -6,338	± 14,6	ДА/ДА
4.5	Улазни угао лопатице β_1	57,638	+0,553 -0,780	57,635	+0,555 -0,779	± 2 ⁰	ДА/ДА
4.6	Излазни угао лопатице β_2	26,797	+1,332 -1,270	26,780	+1,333 -1,273	± 1,5 ⁰	ДА/ДА
4.7	Међулопатично растојање a	180,881	+3,955 -4,406	180,883	+3,958 -4,406	+9,04 -5,43	ДА/ДА
ПРЕСЕК 2							
4.1	Пречник улазне ивице лопатица R_{ul}	3408,23	+1,336 -1,394	3408,25	+1,333 -1,390	± 14,6	ДА/ДА
4.2	Пречник излазне ивице лопатица R_{iz}	1694,57	+5,054 -5,068	1694,54	+5,058 -5,070	± 14,6	ДА/ДА
4.3	Корак лопатица на улазној страни P_{ul}	823,700	+6,543 -5,445	823,699	+6,541 -5,444	± 14,6	ДА/ДА
4.4	Корак лопатице на излазној страни P_{iz}	408,373	+2,860 -13,412	408,368	+2,863 -13,410	± 14,6	ДА/ДА
4.5	Улазни угао лопатице	62,166	+1,587 -0,987	62,161	+1,586 -0,990	± 2 ⁰	ДА/ДА
4.6	Излазни угао лопатице β_2	21,813	+1,403 -1,012	21,810	+1,400 -1,010	± 1,5 ⁰	ДА/ДА
4.7	Међулопатично растојање a	162,919	+7,838 -4,250	162,916	+7,835 -4,247	+8,14 -4,88	ДА/ДА
ПРЕСЕК 3							
4.2	Пречник излазне ивице лопатице R_{iz}	1808,297	+6,005 -5,183	1808,299	+6,008 -5,181	± 14,6	ДА/ДА
4.4	Корак лопатице на излазној страни P_{iz}	436,920	+4,008 -5,723	436,918	+4,005 -5,720	± 14,6	ДА/ДА
4.6	Излазни угао лопатице β_2	18,086	+1,356 -1,275	18,088	+1,354 -1,274	± 1,5 ⁰	ДА/ДА
4.7	Међулопатично растојање a	151,15	+5,878 -4,184	151,11	+5,874 -4,186	+7,55 -4,53	ДА/ДА
ПРЕСЕК 4							
4.2	Пречник излазне ивице лопатице R_{iz}	1939,890	+5,508 -5,320	1939,888	+5,505 -5,323	± 14,6	ДА/ДА
4.4	Корак лопатице на излазној страни P_{iz}	468,647	+9,592 -9,981	468,641	+9,596 -9,986	± 14,6	ДА/ДА
4.6	Излазно угао лопатице β_2	14,731	+0,965 -0,639	14,737	+0,969 -0,640	± 1,5 ⁰	ДА/ДА
4.7	Међулопатично растојање a	141,375	+2,505 -2,106	141,374	+2,503 -2,104	+7,06 -4,24	ДА/ДА

Табела 6.8 - Дебљина лопатица по мерним местима на улазу

Поглавље у мерном извештају	Мерно место		Мерни извештај		GOM Inspect		Дозвољена вредност одступања	у толеранцији
			Средња вредност	Максимално одступање	Средња вредност	Максимално одступање		
4.8	Пресек 1	1	26,15	+0,81 -0,77	26,13	+0,80 -0,76	±3,92	ДА/ДА
		2	39,25	+1,12 -1,84	39,27	+1,15 -1,85	±5,89	ДА/ДА
		3	47,71	+2,26 -2,21	47,73	+2,28 -2,23	±7,16	ДА/ДА
		4	55,27	+1,63 -1,37	55,25	+1,65 -1,34	±8,29	ДА/ДА
		5	58,95	+2,51 -1,88	58,92	+2,49 -1,90	±8,84	ДА/ДА
		6	59,60	+4,62 -2,61	59,59	+4,60 -2,63	±8,94	ДА/ДА
	Пресек 2	1	23,31	+1,02 -2,27	23,29	+1,05 -2,25	±3,5	ДА/ДА
		2	31,51	+1,14 -1,45	31,48	+1,11 -1,47	±4,73	ДА/ДА
		3	44,00	+2,23 -2,25	44,04	+2,27 -2,21	±6,60	ДА/ДА
		4	56,28	+1,70 -1,17	56,29	+1,72 -1,19	±8,44	ДА/ДА
		5	62,85	+2,63 -1,59	62,78	+2,62 -1,56	±9,43	ДА/ДА
		6	64,92	+1,96 -2,66	64,89	+1,94 -2,62	±9,74	ДА/ДА

7 Закључак

Према стандарду ИЕС 60193 предвиђено је да се контрола свих лопатица обавља посредно, коришћењем шаблона који су направљени према конструктивној документацији и имају неку грешку израде. Шаблони одговарају профилима на одређеној висини радног кола. И међусобно се разликују од пресека до пресека на различитим висинама радног кола. Контрола сагласности израђеног и пројектованог профила заснива се на методи светлосног процепа.

У ери савремених мерних метода, оваква методологија је непрецизна. Толеранције тачности израде зависе од димензије радне машине, па грешка која се прави коришћењем овог приступа није толико очигледна. Код радних кола великих машина какве су на пример Францисове турбине, толеранције износе и до 15mm. Међутим, код радних машина мањих габарита, какве су вишестепене турбине, ове толеранције су мале, па метода светлосног процепа не даје довољно тачне и поуздане резултате.

У овом раду обрађен је софтверски модул Blade имплементиран у софтверски пакет GOM Inspect. Омогућава лако и једнозначно дефинисање основних параметара профилних решетки, чиме се знатно скраћује време потребно за анализу и генерисање мерног извештаја.

У практичном делу рада поређени су резултати обављеног мерења радног кола хидрауличке турбине типа Францис инсталиране у хидроелектрани Пива (агрегат број 3). Са једне стране били су доступни резултати мерења генерисани софтверским пакетима GOM ATOS и TRITOP, верзија 6.02. Функције које у време израде мерног извештаја нису биле доступне у наведеним софтверима (на пример, аутоматско конструисање скелетнице профила, аутоматско конструисање улазног и излазног угла, ...) надомештене су конструисањем и мерењем величина везаних за њих у софтверу CATIA. Са друге стране, над истим моделима примењена је савремена методологија имплементирана у модулу Blade софтверског пакета GOM Inspect.

На основу искуства стеченог у раду са модулом Blade софтверског пакета GOM Inspect и искуства колега ангажованих на изради прве верзије мерног извештаја, закључено је да је методологија примењена у овом завршном раду вишеструко бржа захваљујући аутоматског генерисању свих потребних геометријских ентитета везаних за анализу просторних профилних решетки. Поређење мерних резултата, постојећих и оних који су настали као резултат овог завршног рада, показује да и једна и друга методологија дају сагласне резултате, који се разликују у границама мањим од 1%.

На основу свега наведеног, може се закључити да је приказана методологија веома корисна и примељива за контролу основних мера радног кола, контролу толеранција облика и положаја и контролу геометрије лопатица у складу са важећим међународним нормама које регулишу ову област. С обзиром да је софтвер GOM Inspect спрегнут са

оптичким мерним системима ATOS и TRITOP, а могуће га је користити и за обраду модела добијених другим мерним машина у циљу генерисања мерних резултата, сасвим је сигурно да ће задовољавати и захтеве будућих ревизија међународне норме IEC 60193.

8 Литература

- [1] Милун Бабић, Светислав Стојковић, Турбомашине – теорија и математичко моделирање, Универзит у Крагујевцу, Машински факултет Крагујевац, Крагујевац, 1997.
- [2] International Standard IEC 60193: Hidraulic turbines, storage pumps and pump-turbines – Model acceptance tests, Second edition, 1999.
- [3] Извештај број 2025 – 006/3 IMS-a od 28. 08. 1991. god.
- [4] Мирослав Живковић, Милан Благојевић, Драган Ракић, Александар Дишић, Контрола геометрије радног кола Францисове турбине, Универзитет у Крагујевцу, Машински факултет у Крагујевцу, Крагујевац, 2011,
- [5] Atos User Information, Atos IIe Hardware, 2008.
- [6] ATOS User Manual – Software, Atos v6.1, 2008.
- [7] TRITOP User Manual – Software, Atos v6.1, 2008.
- [8] <http://www.vtg.mod.gov.rs/arhiva/2009/vojnotehnicki-glasnik-2-2009-1.pdf>
- [9] <http://www.scribd.com/doc/119832358/Aeroprofil>