

УНИВЕРЗИТЕТ У КРАГУЈЕВЦУ
ФАКУЛТЕТ ИНЖЕЊЕРСКИХ НАУКА

Драган Лазаревић

**РЕГЕНЕРИСАЊЕ NS КОДА ПРИМЕНОМ
3D ИДЕНТИФИКАЦИЈЕ И АНАЛИЗЕ
ГЕОМЕТРИЈСКИХ ОДСТУПАЊА**

Докторска дисертација

Крагујевац, 2017. година

ИДЕНТИФИКАЦИОНА СТРАНИЦА ДОКТОРСКЕ ДИСЕРТАЦИЈЕ

I. Аутор
Име и презиме: Драган Лазаревић
Датум и место рођења: 03.10.1974. год., Зубин Поток
Садашње запослење: Факултет техничких наука, Косовска Митровица
II. Докторска дисертација
Наслов: РЕГЕНЕРИСАЊЕ NS КОДА ПРИМЕНОМ 3D ИДЕНТИФИКАЦИЈЕ И АНАЛИЗЕ ГЕОМЕТРИЈСКИХ ОДСТУПАЊА
Број страница: 239
Број слика: 211
Број библиографских података: 268
Установа и место где је рад израђен: Факултет инжењерских наука, Универзитет у Крагујевцу, Крагујевац, Србија
Научне области (УДК): 621.914; 004.896
Ментор: др Богдан Недић , редовни професор
III. Оцена и одбрана
Датум пријаве теме: 01.07.2015. године
Број одлуке и датум прихватања теме докторске дисертације: 01-1/2942-12 од 27.08.2015.
Комисија за оцену научне заснованости теме и испуњености услова кандидата:
<ol style="list-style-type: none">1. др Милан Зељковић, редовни професор, Факултет техничких наука Универзитета у Новом Саду, Уже научне области: Машине алатке, флексибилни технолошки системи и аутоматизација поступака пројектовања,2. др Горан Девеџић, редовни професор, Факултет инжењерских наука Универзитета у Крагујевцу, Уже научне области: Производно машинство и Индустијски инжењеринг,3. др Миладин Стефановић, редовни професор, Факултет инжењерских наука Универзитета у Крагујевцу, Уже научне области: Производно машинство и Индустијски инжењеринг,4. др Милан Ерић, ванредни професор, Факултет инжењерских наука Универзитета у Крагујевцу, уже научне области: Производно машинство и Индустијски инжењеринг,5. др Богдан Недић, редовни професор, Факултет инжењерских наука Универзитета у Крагујевцу, Ужа научна област: Производно машинство.
Комисија за оцену и одбрану докторске дисертације:
<ol style="list-style-type: none">1. др Милан Зељковић, редовни професор, Факултет техничких наука Универзитета у Новом Саду, Ужа научна област: Машине алатке, флексибилни технолошки системи и аутоматизација поступака пројектовања,2. др Горан Девеџић, редовни професор, Факултет инжењерских наука Универзитета у Крагујевцу, Уже научне области: Производно машинство и Индустијски инжењеринг, председник комисије,3. др Миладин Стефановић, редовни професор, Факултет инжењерских наука Универзитета у Крагујевцу, Уже научне области: Производно машинство и Индустијски инжењеринг,4. др Милан Ерић, ванредни професор, Факултет инжењерских наука Универзитета у Крагујевцу, Уже научне области: Производно машинство и Индустијски инжењеринг,5. др Мирослав Радовановић, редовни професор, Машински факултет Универзитета у Нишу, Ужа научна област: Производни системи и технологије.
Датум одбране дисертације:

ПРЕДГОВОР

Ова докторска дисертација је настала као резултат мог вишегодишњег научно - истраживачког рада са наставницима и сарадницима на Катедри за производно машинство Факултета инжењерских наука Универзитета у Крагујевцу. У дисертацији су приказани резултати стручног и научног истраживања који су реализовани кроз програм докторских студија Факултета инжењерских наука у Крагујевцу.

Првенствено се захваљујем свом ментору, проф. др Богдану Недићу, на стручној помоћи, указаном поверењу, саветовању и подршци током израде докторске дисертације. Привилегија је сарађивати са овако добрим и великим човеком и научником.

Захвалност за професионално спровођење експеримената дугујем истраживачима сарадницима Факултета инжењерских наука у Крагујевцу: Милану Раденковићу за помоћ приликом обраде делова на *CNC* глодалици, Саши Ранђеловићу и Бојану Богдановићу за помоћ приликом мерења на координатној мерној машини и Милану Благојевићу за указану помоћ током снимања на оптичким мерним уређајима *ATOS*.

Захвалност за стечено знање из области реверзног инжењерства дугујем проф. др Горану Девецићу, редовном професору Факултета инжењерских наука, Универзитета у Крагујевцу.

Проф. др Милану Мишићу дугујем велику захвалност на иницијативи приликом уписа и непресталној подршци током студија и израде дисертације. Проф. др Срђану Јовићу захваљујем на корисним саветима и моралној подршци. Проф. др Живчету Шаркоћевићу хвала на техничкој подршци када је најпотребније било.

Алекси и Анђелини, којима посвећујем свој рад, захваљујем на разумевању мог честог одсуства и недостатка пажње током година истраживачког рада, а посебно у фази израде дисертације.

Мојим драгим, најближим пријатељима захваљујем на подршци, помоћи и бодрењу када ми је било тешко и када сам посустајао.

Крагујевац, мај 2017.

Драган Лазаревић

САДРЖАЈ

1	УВОД	1
1.1	Мотивација	2
1.2	Циљеви истраживања	3
1.3	Проблем истраживања	3
1.4	Структура рада	5
2	ГЕОМЕТРИЈСКО ДИМЕНЗИОНИСАЊЕ И ТОЛЕРИСАЊЕ	12
2.1	Основни концепти, термини и дефиниције	14
2.2	Симболи толеранција	16
2.3	Дефиниције геометријских толеранција	17
2.4	Толеранцијски оквир	23
2.5	Толерисани елементи	24
2.6	Зона толеранције	25
2.7	Референтни елемент	25
2.8	Теоретски тачна димензија	26
3	РАЧУНАРОМ ПОДРЖАНО ТОЛЕРИСАЊЕ	27
3.1	Основни концепти, термини и дефиниције	28
3.2	Моделирање и презентација геометријских толеранција	29
3.2.1	Моделирање толеранције мануелним графиконима	31
3.2.2	Параметарско моделирање толеранције	31
3.2.3	Моделирање толеранције изведеном геометријом и мултиваријантим регионима	33
3.3	Алати за рачунаром подржано толерисање	35
3.4	Спецификација, додела и анализа геометријских толеранција	37
3.5	Анализа 3D геометријских толеранција	38
4	КООРДИНАТНА МЕТРОЛОГИЈА И КООРДИНАТНЕ МЕРНЕ МАШИНЕ	40
4.1	Основни термини у индустријским мерењима	40
4.2	Координате мерне машине	42
4.3	Мерне сонде	45
4.3.1	Контактне сонде	46
4.3.1.1	Контактни сензори са контактним окидачем	47
4.3.1.2	Аналогни сензори	48
4.3.2	Контактно - оптички сензори	50
4.3.3	Контактно - оптички сензор профила	51
4.3.4	Ласерске сонде	52
4.3.5	Вишесензорска технологија	53
4.4	Мерење на координатној мерној машини	53
4.4.1	Софтвер за координате мерне машине	56
4.4.2	Интегрисање CAD података	56
4.5	Мерна несигурност	57
5	РЕВЕРЗНО ИНЖЕЊЕРСТВО, 3D ДИГИТАЛИЗАЦИЈА, СКЕНЕРИ	60
5.1	Реверзно инжењерство	61
5.2	3D дигитализација	62
5.2.1	Подела метода 3D дигитализације	62
5.2.2	Оптичке (бесконтактне) методе 3D дигитализације	64
5.2.3	Фотограметријске методе	65
5.2.4	Методе пројекције светла	67

5.2.5	Ласерско 3D мерење	68
5.2.5.1	Ласерски триангулацијски скенери	69
5.2.5.2	Ласерска интерферометрија	70
5.2.5.3	Теодолит	72
5.2.6	Рачунарска рендгенска томографија	72
5.2.7	Поређење различитих уређаја за скенирање	74
5.3	Облак тачака	76
5.3.1	Контактни облак тачака наспрам бесконачног	77
5.3.2	Типови облака тачака	77
5.3.3	<i>STL/MESH</i> датотека облака тачака	80
5.3.4	Карактеристике облака тачака	81
5.4	Пре-процесирање резултата 3D дигитализације	83
5.5	Сегментација облака тачака	87
5.6	Реконструкција површине - генерисање CAD модела	89
5.6.1	Полигонизација	90
5.6.2	<i>Delaunay</i> -јева триангулација	90
5.6.3	<i>Voronoi</i> -јев дијаграм	92
5.6.4	Криве и површи за генерисање површина	93
5.6.4.1	Кубне криве	94
5.6.4.2	<i>Bézier</i> -ове криве	94
5.6.4.3	<i>B-Spline</i> -ови	95
5.6.4.4	<i>NURBS</i> криве	96
5.6.4.5	Параметарске површине	96
6	РАЧУНАРОМ ПОДРЖАНО МЕРЕЊЕ	98
6.1	Поступци мерења	99
6.1.1	Мерење на машини	101
6.1.2	Системи за планирање рачунаром подржаног мерења за <i>ОМ</i> и <i>СММ</i>	103
6.2	Уређаји за рачунаром подржано мерење	105
6.3	Софтвер за мерење	107
6.3.1	<i>PC DMIS</i> софтвер	108
6.3.1.1	Верзија <i>PC DMIS</i> софтвера	109
6.3.1.2	Генерисање програма за мерење	110
6.3.1.3	<i>PC DMIS</i> извештај мерења	110
6.3.2	<i>GOM Inspect</i> софтвер	111
6.3.2.1	Могућности <i>GOM Inspect</i> софтвера	112
6.3.2.2	Верзије <i>GOM Inspect</i> софтвера	112
6.3.2.3	<i>Gom Inspect</i> извештај мерења	113
6.4	СТЕР и СТЕР-НС стандарди	114
7	КВАЛИТЕТ ОБРАДЕ	115
7.1	Врсте грешака обраде	116
7.2	Грешке димензија	117
7.3	Грешке облика и положаја површина	117
7.4	Грешке површинске храпавости	120
8	ГЕНЕРИСАЊЕ ПОВРШИНЕ ГЛОДАЊЕМ	123
8.1	Фактори који утичу на формирање површинске топографије	123
8.2	Генерисање површинске топографије	124
8.2.1	<i>Martellotti</i> -јев модел за генерисање површинске топографије добијене обимним глодањем	125
8.2.2	Модел идеалне путање зуба	127

8.2.3	Модел који узима у обзир грешке постављања глодала	130
8.2.4	Модел који узима у обзир радијално одступање зуба глодала	134
8.3	Моделирање отпора резања	136
8.4	Угиб глодала	138
9	CNC ПРОГРАМИРАЊЕ И РЕГЕНЕРИСАЊЕ NC КОДА	140
9.1	Принципи NC програмирања	140
9.2	CAM системи	143
9.2.1	Генерисање NC кода применом софтвера <i>FeatureCAM</i>	144
9.2.1.1	Креирање припремка дела за обраду	144
9.2.1.2	Програмирање обраде аутоматским избором параметара обраде	146
9.2.1.3	Програмирање обраде корисничким уносом параметара обраде	147
9.3	Компензација грешке корекцијом NC кода	150
9.3.1	Компензација корекцијом путање алата	150
9.3.2	Модел за компензацију путање алата применом мапе померања	150
9.4	Оптимизација технолошких параметара обраде	152
10	ЕКСПЕРИМЕНТИ, РЕЗУЛТАТИ И АНАЛИЗА	153
10.1	Испитивање утицаја ширине резања на димензионалну тачност обраде вретенастим глодалом	153
10.1.1	Материјали и опрема	153
10.1.2	План експеримента	156
10.1.3	Резултати и анализа резултата	156
10.2	Испитивање утицаја брзине резања и брзине помоћног кретања на површинску храпавост и тачност обраде	158
10.2.1	Материјали и опрема	158
10.2.2	План експеримента	161
10.2.3	Резултати и анализа резултата мерења храпавости	162
10.2.4	Резултати и анализа резултата мерења тачности обраде	165
10.2.4.1	Димензионална одступања	165
10.2.4.2	Одступања од равности	167
10.2.4.3	Одступања од управности	169
10.2.4.4	Одступања од паралелности	170
10.2.4.5	Поређење геометријских одступања	171
10.3	Испитивање утицаја грешке стежања и радијалног одступања зуба глодала на површинску топографију	172
10.3.1	Материјали и опрема	172
10.3.2	План експеримента	176
10.3.3	Резултати и анализа резултата	177
10.4	Утицај промене дубине резања (корекције путање алата) на димензионална и геометријска одступања	183
10.4.1	Материјали и опрема	183
10.4.2	План експеримента	184
10.4.3	Резултати и анализа резултата	185
11	ГЕНЕРИСАЊЕ ПОВРШИНЕ, МЕРЕЊЕ ОДСТУПАЊА И АНАЛИЗА	190
11.1	Добијање облака тачака	190
11.1.1	Добијање облака тачака на <i>CMM</i>	190
11.1.2	Добијање облака тачака помоћу скенера	193
11.2	Генерисање површине из облака тачака	194
11.2.1	Генерисање површине у програму <i>CATIA</i>	194

11.2.1.1	Пре-процесирање мреже	195
11.2.1.2	Процесирање мреже	196
11.2.1.3	Генерисање површине	196
11.2.1.4	Генерисање површине дела 1 ($\phi 6$ <i>VHM</i>)	197
11.2.2	Генерисање површине из облака тачака у <i>GOM Inspect</i> -у	199
11.2.3	Генерисање површине из облака тачака у <i>MatLAB</i> -у	201
11.3	Мерење одступања	206
11.3.1	Мерење одступања облака тачака дела 1 ($\phi 6$ <i>VHM</i>) добијеног на <i>CMM</i> у <i>GOM Inspect</i> -у	207
11.3.2	Мерење одступања облака тачака дела 1 ($\phi 6$ <i>VHM</i>) добијених на скенерима у <i>GOM Inspect</i> -у	209
11.3.3	Поређење измерених резултата одступања дела 1 ($\phi 6$ <i>VHM</i>) добијених на <i>CMM</i> у <i>PC DMIS</i> -у и <i>GOM Inspect</i> -у	210
11.3.4	Поређење измерених резултата одступања дела 1 ($\phi 6$ <i>VHM</i>) добијених на <i>CMM</i> у <i>PC DMIS</i> -у и резултата добијених скенерима у <i>GOM Inspect</i> -у	212
12	РАЗВОЈ МОДЕЛА ЗА РЕГЕНЕРИСАЊЕ NC КОДА	215
12.1	Елементи модела	216
12.2	База података модела грешака процеса	217
12.3	База података грешака обраде	219
13	ЗАКЉУЧАК	221
	ЛИТЕРАТУРА	227

РЕЗИМЕ

Производња делова на нумерички управљаним машинама алаткама једна је од најзаступљенијих техника коришћених у савременим производним процесима. Чак и код прецизног хладног и топлог обликовања делова или ливења делова, многи од завршних поступака обраде и делова се обављају резањем на машинама алаткама, а такође се и алати за ове машине, овим технологијама обрађују.

CAD/CAM системи могу да генеришу *NC* програме на основу геометрије дела, али не помажу програмерима у избору одговарајућих стратегија резања, геометрије алата и других параметара процеса. Комерцијални *CAM* софтвери генеришу *CNC* програме углавном са математичке тачке гледишта и обично садрже константне параметре резања за одређену путању алата и не симулирају очекивани квалитет и тачност обрађених површина, а такође не узимају у обзир механичке аспекте процеса глодања као што су силе резања и девијација резног алата.

Савремена мерна опрема је све присутнија у машинској индустрији, па се може рећи да су координатне мерне машине постале стандард и да се производња и документација великим делом прилагођава координатним мерним машинама. Са друге стране се још интензивније развијају бесконтактни (оптички и ласерски) мерни системи. Ови мерни системи подразумевају као резултат мерења облак тачака, који захтева процесирање и генерисање површина у циљу мерења и контроле.

У оквиру дисертације дат је преглед савремене мерне опреме и представљени су поступци генерисања површина и мерења одступања помоћу софтвера, као што су *CATIA*, *GOM Inspect*, *PC DMIS* и сл.

Експериментална истраживања обухватају веома велики број експеримената. У оквиру првог експеримента анализиран је утицај ширине резања на тачност обрађеног дела. Следећим експериментом обухваћен је утицај брзине резања и помоћног кретања на храпавост обрађеног дела као и на димензионална и геометријска одступања: равност, управност и паралелност. Наредним експериментима истраживан је утицај грешке постављања (паралелне померености осе и нагнутости осе) глодала као и радијалног одступања зуба глодала, на топографију површине. Последњим експерименталним испитивањима одређиван је утицај промене дубине резања, односно путање глодала на добијене дужинске и геометријске мере.

Реализована експериментална истраживања су показала корелативну зависност између параметара обраде и добијених параметара квалитета обрађеног дела.

Одступања обрађених делова идентификована су и мерена помоћу координатне мерне машине и различитих оптичких мерних система (*ATOS*) уз примену одговарајућих софтвера за мерење. Такође су извршена поређења добијених резултата са различитих мерних уређаја.

Развијен је алгоритам за регенерисање постојећег *NC* кода у циљу корекције одступања обрађеног дела које се јављају услед грешака обраде. Алгоритам предвиђа постојање базе података које се потрешљују експерименталним истраживањима, подацима из обрадних процеса, резултатима моделирања и симулација зависности параметара обраде од тачности обраде. Регенерисањем *NC* кода врше се корекције грешака обраде, односно предупређују се узроци настанка грешака обраде.

Кључне речи: мерење, одступање, грешка обраде, *NC* код, координатна мерна машина, облак тачака

Научна област: Машинство

Ужа научна област: Производно машинство

ABSTRACT

The production of parts using numerically controlled machine tools is one of the most used techniques in modern production processes. Even at the precise cold and hot shaping of parts or casting of parts, most of fine machining and parts are performed with cutting on machine tools, and the tools for these machines are also processed with these technologies.

CAD/CAM systems can generate NC programs based on the geometry of a part, but do not help programmers in the selection of the proper cutting strategies, tool geometry and other processing parameters. Commercial CAM software develop CNC programs mostly from the mathematical point of view and commonly contain constant cutting parameters for a specific tool path and they do not simulate the expected quality and accuracy of the machined surfaces, and they also do not take into consideration the mechanical aspects of milling process such as cutting forces and cutting tool deviation.

Modern measurement equipment is more present in manufacturing industries, so it can be said that the measuring machine coordinates have become the standard and that the manufacturing and documentation are adjusting to the coordinate measuring machines in a great deal. On the other hand, the non-contact (optical and laser) measuring systems are more intensively developed. These measuring systems as a result include a point cloud, which requires the processing and generating of surfaces for the purpose of measuring and control.

In the framework of the dissertation is given the review of modern measuring equipment and the surface generating procedures and deviation measurements using the software, such as CATIA, GOM Inspect, PC DMIS, etc, are presented.

Experimental researches include a very large number of experiments. Within the first experiment, the impact of cutting width on the accuracy of processed part was analyzed. The following experiment included the impact of cutting speed and auxiliary movement of the roughness of the processed part as well as on the dimensional and geometrical deviations: flatness, perpendicularity and parallelism. Subsequent experiments examined the impact of error setup (parallel offset of axis and inclination of the axis) of the milling cutter as well as the radial deviation of mill tooth on the surface topography. In the final experiments the impact of the change of cutting depth, i.e., milling cutter path, on the obtained longitudinal and geometrical measures is determined.

Conducted experimental researches have shown the correlative dependence between the cutting parameters and obtained quality parameters of machined part.

Deviations of machined parts are identified and measured using the coordinate measuring machine and different optical measuring systems (ATOS) with the application of corresponding measuring software. The comparisons of the results obtained from the different measuring devices are also performed.

An algorithm for generation of the existing NC code for the correction of the machined part deviations that occur due to machining error is developed. The algorithm predicts the existence of database that is supported by experimental research, data from machining processes, results of modeling and simulation of machining parameters dependence on the accuracy of the processing. Regeneration of NC code By regenerating the NC code the correction of processing errors is made, i.e., the causes of processing errors are prevented.

Keywords: measuring, deviation, machining error, NC code, coordinate measuring machine, point cloud

Scientific discipline: Mechanical engineering

Scientific sub discipline: Manufacturing engineering

Енглеске скраћенице

GD&T – Geometric Dimensioning and Tolerancing
DT - Dimensional Tolerancing
MMC - Maximum Material Condition
TED - Theoretically Exact Dimension
CAT - Computer Aided Tolerancing
CAI - Computer Aided Inspection
KPC - Key Product Characteristics
CAE - Computer Aided Engineering
USL- Upper Specification Limit
LSL - Lower Specification Limit
CSG - Constructive Solid Geometry
TTRS - Technologically and Topologically Related Surfaces
FEM - Finite Element Method
CMM - Coordinate Measuring Machine
GUM - Guide to the Expression of Uncertainty in Measurement
MGPG - Measurement Good Practice Guide
NURBS - Non-Uniform rational B-Spline
RE - Reverse Engineering
RP - Rapid Prototyping
RT - Rapid Tooling
CT - Computed Tomography
LASER - Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation
ADM - Absolute Distance Meter
CAIP - Computer Aided Inspection Planing
STEP - Standard for the Exchange of Product Model Data
OMI - On-Machine Inspection
CAPP - Computer Aided Process Planning

Поглавље 1

УВОД

Упркос огромном развоју *CAM* софтвера, технологија производње и примене резних алата и савремених машина алатки, квалитет обраде код обимног глодања вртенастим глодалом, још увек зависи у великој мери од обима знања технолога и производних радника. Глодање вртенастим глодалом је сложен процес у смислу планирања процеса из разлога компликоване геометрије, еволуције нових материјала и високих захтева од финалног производа.

CAD/CAM системи генеришу *CNC* програме на основу геометрије дела, али они не помажу програмерима у избору одговарајућих параметара процеса (режими резања и др.) као што су корак, брзина резања, дубина резања, ширина резања, стратегија обраде и др.

Тачност *CNC* машине алатке је условљена постојањем геометријских грешака, неуниформне термичке експанзије елемената структуре машине и статичко/динамичког оптерећења елемената обрадног процеса алат - део - прибор - машина. Као последица наведеног, ствара се резултујућа грешка између резног алата и радног дела.

Грешке/нетачности могу да се коригују на два начина. Први начин је структурно побољшање машине алатке кроз боље пројектовање, прецизнију производњу и монтажу делова машине. Међутим, поступак резултира веома високим производним трошковима, нарочито када су захтеви за тачношћу изван одређених опсега. Други начин побољшања прецизности представља побољшање путем компензације грешке. Побољшање прецизности машине алатке кроз компензацију грешке укључује предвиђање и компензацију резултујуће грешке обраде. Систем не може да избегне грешке, али уз континуиран мониторинг стања алата и машине, било каква генерисана грешка се може компензовати. Упркос савршеном пројектовању, изради и монтажи, тачност машине алатке се мења када се подвргне различитим оптерећењима, стога је много лакши задатак измерити количину неправилности и кориговати их командама за

промену путање релативног кретања алата у односу на део, односно корекцијом (регенерисањем) *NC* кода [1].

Реализација поступка компензације може се извршити на два начина. Први начин представља *on-line* и захтева континуирану корекцију путање алата током процеса обраде. Овај приступ захтева проширене адаптивно управљане системе. Други начин тзв. *off-line* је заснован на корекцији елемената обрадног система применом мерних система ван машине (на основу мерења тачности обраде) [2].

Корекција путање алата састоји се из модификовања путање алата и обично се изводи за завршне операције у циљу смањења димензионалних и геометријских одступања, под претпоставком да су поновљива. Процес обраде се прво извршава некоригованом путањом алата. Након обраде, одступања се мере и на основу података о одступањима врши се корекција путање алата. Корекција се врши најчешће транслацијом контролних тачака на основу вредности измереног одступања [3].

Како су одступања најчешће поновљива и зависе од бројних фактора, тако се може претпоставити да ће корекција путање алата, при различитим условима обраде, дати задовољавајуће резултате у погледу тачности обраде.

За мерење грешака обрађених делова обично се примењују савремени мерни контактни уређаји (координатне мерне машине) или бесконтактни (оптички) уређаји. Оптички уређаји су бржи у односу на контактне и дају већу количину информација о површини која се мери, али су још увек мање прецизни у односу на контактне. Добијени резултати мерења се путем софтвера за мерење обрађују и добијају измерена одступања дела.

1.1 Мотивација

Примена *CNC* машина је последица потребе да се скрати време припреме и обраде, а повећањем тачности ствара се и могућност елиминисања других скувих технолошких поступака и поступака који захтевају додатно време. *CNC* машине пружају могућност повећања разноликости произведених делова и имају све значајнију улогу у флексибилној производњи.

Код глодања вретенастим глодалом, било која изабрана стратегија обраде и примена било ког *CAM* система, резултираће путањом алата која треба да обезбеди димензионалну и геометријску тачност и квалитет обрађене површине дела. Међутим, под утицајем многих контролисаних и неконтролисаних параметара процеса, услед интерактивног деловања алата и материјала, стварна путања разликоваће се од оне генерисане помоћу *CAM* софтвера и тиме довести до појединих грешака обраде.

Како је веома сложено моделирати процес обраде глодањем узимајући у обзир све параметре који утичу на повећање грешке обраде, у оквиру рада су анализирани само утицаји које су у међузависности са регенерисањем *NC* кода и то:

- технолошки параметри: дубина и ширина резања, број обртаја, брзина помоћног кретања и др.,
- геометријски параметри глодала: пречник,
- карактеристике материјала алата: врста материјала,
- параметри машине алатке: тачност позиционирања и стезање алата и
- стратегија обраде: смер глодања, прилаз алата и др.

Са друге стране, грешку обрађеног дела карактеришу грешке топографије површине (храпавост), димензионалне и геометријске грешке.

Анализом великог броја радова може се закључити да су експерименталним испитивањима већина аутора испитивали утицај многих фактора на тачност обраде и да су парцијално или комбинацијом одређених фактора изведене међусобне корелативне зависности.

Све наведено је указало на идеју о потреби формирања јединствене базе података за конкретне случајеве обраде. Односно, потребно је вршити одређена експериментална испитивања и користећи добијене резултате формирати базу података. Примена базе података би омогућила добијање информација које би се користиле при обради различитих материјала у различитим условима обраде, а у циљу изналажења оптималних параметара, регенерисања *NC* кода и елиминације грешака обраде. На овај начин би квалитет обраде био независан од индивидуалних знања оператера или програмера *CNC* машине алатке.

1.2 Циљеви истраживања

Циљ дисертације се може дефинисати као истраживање и развој модела за корекцију генерисаног *NC* кода у циљу смањења грешака код *CNC* обраде.

Наведени циљ је веома сложен и може се поделити на неколико парцијалних циљева:

- развој модела за идентификацију одступања дела,
- избор и евалуацију хардвера за *3D* дигитализацију добијеног дела (координатне мерне машине или *3D* скенера),
- формирање зависности између технолошких параметара обраде и излазних параметара тачности обраде,
- развој математичког модела топографије површине добијене глодањем,
- развој модела за идентификацију грешака услед нетачности стезања и одступања зуба алата,
- избор софтвера и реализацију софтверског решења за мерења савременом мерном опремом,
- развој модела за кориговање генерисаног *NC* кода променама путање алата (компензацијом) и
- развој модела за кориговање генерисаног *NC* кода променом технолошких параметара обраде.

Реализација дефинисаних циљева дисертације је остварена повезивањем датих парцијалних циљева у јединствен модел.

Развијени модели треба да помогну у развоју система за повећање тачности обраде и унапређење система управљања *CNC* машинама.

Теоријске поставке и експериментална испитивања међусобних зависности параметара процеса обраде, геометријских спецификација производа, генерисаног и регенерисаног кода, представљају значајан прилог подручју истраживања обраде на *CNC* машинама, при чему у свету многа питања из ове области нису разјашњена до нивоа потпуног разумевања и управљања појавама.

1.3 Проблем истраживања

Проблем истраживања обухвата комплексну анализу процеса глодања и регенерисања *NC* кода, применом савремене мерне опреме и софтверских решења за реконструкцију површина из облака тачака, мерење и анализу одступања са различитих аспеката.

Геометријска одступања су неминовна на сваком произведеном делу услед производне непрецизности и мерне несигурности. Из разлога праћења, ограничавања и контролисања геометријских одступања, у производњу је уведено геометријско димензионисање и толерисање. Геометријско димензионисање и толерисање је дефинисано бројним стандардима као што су: ASME Y14.5-2009 *Dimensioning and Tolerancing* (ASME 2009), ISO 1101:2012 *Geometrical Product Specifications (GPS). Tolerancing of form, orientation, location and run-out*, ISO 5458:1998 *Geometric Product Specifications (GPS). Positional tolerancing* (ISO 1998), ISO 286-1:1988 *ISO system of limits and fits* (ISO 1988), ASME Y14.41-2003 *Digital Product Definition Data Practices* (ASME 2003) и ISO 16792:2006 *Technical product documentation – Digital product definition data practices* (ISO 2006).

Развој и примена рачунаром подржаног толерисања заснованог на CAD моделу у процесу производње, данас је честа истраживачка тема. Развијени су разни приступи моделирања толеранције који нуде различите нивое софистицираности и могућности. Моделирање толеранција се обично постиже употребом алата за толерисање. Најчешћи начини моделирања толеранције на рачунару изведени су на принципу: мануелних графикона толеранције [4, 5], параметарског рачунаром подржаног толерисања [6, 7], толерисања изведеном геометријом [8, 9] и мулти-варијантних региона [10, 11, 12].

Током последње деценије напредак технологије хардвера и софтвера резултирао је машинама које су потенцијално способне за прецизна мерења, а координатна метрологија је постала есенцијална за индустријску димензионалну метрологију [13]. Координатна мерна машина је мерни уређај помоћу кога се врши мерење координата у простору на површинама дела који се мери. Рад, конструкција и све што је везано за координатну мерну машину дефинисано је стандардима серије ISO 10360:1999-2001. Перформансе координатне мерне машине су предмет веома обимног истраживања и стандардизације, између осталих [14, 15, 16].

Бесконтактни системи за мерење и скенирање свакодневно постају све присутнији у индустријском мерењу, иако су још увек мање тачности наспрам одговарајућих контактних система. Њиховим усавршавањем и интегрисањем у производњу омогућено је мерење директно на машини, а самим тим и стварање нових могућности за корекцију NC програма у циљу повећања квалитета обраде дела. Уређаји за бесконтактно мерење, као и поступци реверзног инжењерства су нова и широка област интересовања и тема опсежних истраживања [17, 18, 19, 20, 21, 22].

Планирање рачунаром подржаног мерења је тема истраживања дуже од 30 година [23, 24, 25, 26, 27, 28, 29]. Већина ових система је развијено за координатне мерне машине, док је истраживање мерења бесконтактним уређајима у порасту последњих година.

Грешке обраде, које карактеришу квалитет генерисане површине се могу сврстати у: грешке димензија (дужинске грешке), грешке облика и положаја површина (раванске и просторне) и грешке површинске храпавости (грешке топографије). Јављају се услед геометријских грешака машине и алата, неуниформне термичке експанзије структуре машине и статичко/динамичког оптерећења. Истраживачки радови који се баве грешкама обраде су између осталих [30, 31, 32, 33, 34], док стандард ISO 4287:1997 [35] даје основне дефиниције и параметре површинске храпавости.

Утицајни фактори на квалитет генерисања површинске топографије током процеса обраде глодањем, претпостављајући да су остали елементи машине алатке апсолутно крути, представљају: лоше постављање и стезање глодала, радијално одступање (грешка обртања), угиб, динамика система, као и нетачност израде резних ивица

глодала, односно хабања зуба глодала. Истраживачки рад на ову тему довео је до развоја модела који све наведене факторе узима у обзир [36-49].

У циљу побољшања тачности машине алатке од кључног значаја је смањење грешака које се јављају током обраде. Грешке/нетачности могу да се смање структурним побољшање машине алатке кроз пројектовање, производњу и монтажу. Међутим, поступак ће резултирати веома високим производним трошком, нарочито када су захтеви прецизности изван одређених нивоа. У циљу економичног побољшања прецизности машине алатке примењује се компензација грешке. Побољшање прецизности машине алатке кроз компензацију грешке укључује предвиђање и корекцију резултујуће машинске грешке. Поступцима компензације грешке бави се велики број истраживачких радова [31, 50-58].

Постојећа литература послужила је свеукупном развоју модела за регенерисање *NC* кода у циљу повећања квалитета обраде дела.

1.4 Структура рада

Дисертација је организована у 14 поглавља.

Преглед литературе се простира кроз поглавља засебно.

Како су геометријска одступања неминовна на обрађеном делу услед производне непрецизности и мерне несигурности, из разлога њиховог праћења, ограничавања и контролисања, у производњу је уведено геометријско димензионисање и толерисање. У традиционалној пракси, ограничења дозвољеног одступања су једноставно додељивана димензијама (линеарно толерисање) које се сматрају кључним за налагање и функцију. Ово више није довољно, јер је појава геометријског димензионисања и толерисања донела идеју да толерисани елементи дела треба да буду контролисани са више различитих геометријских карактеристика (као што су величина, облик, правац, место, профил и тачност обртања). Овде је зона толеранције просторна и у зависности од потребе, у сагласности са припадајућим референтним елементом. Геометријске толеранције се одређују у складу са функционалним захтевима али и на основу производње и захтева мерења. У поглављу 2 приказани су основни и додатни симболи, термини, стандарди и дефиниције које се примењују приликом геометријског димензионисања и толерисања. У складу са ISO 1101:2012 стандардом, кроз примере су приказани поступци толерисања облика и положаја са начином приказивања толеранцијског оквира и референтног елемента на цртежу дела. Дате су дефиниције и ближа појашњења *2D* и *3D* зоне толеранције за конкретне примере геометријског одступања.

Интеграција интелигентних захтева пројектовања у производњу, монтажу и мерење, подразумева да је информација о толеранцији на рачунару читљива. Ово није лак задатак, јер је геометријска информација о толеранцији изражена симболичким језиком који користи различите симболе и текст. Вођена индустријском потребом, напредком и интегрисањем рачунарства, актуелна истраживања су фокусирана на моделирање и презентацију информације о толеранцији, како би произвела геометријске толеранције читљиве од стране рачунара. Поглавље 3 се бави проблемом презентације и моделирања геометријског толерисања помоћу рачунара. Наведени су основни термини као што су кључне карактеристика дела, одговарајуће функције склопа и производни принос (преко најгорег случаја и статистичког толерисања). Хијерархијски је описан развој солид моделирања и презентације геометријске толеранције преко *CSG* и *B-rep* модела до хибридних *CSG/B-rep* презентација. Дат је опис и преглед литературе начина

моделирања толеранције који су у употреби код алата за моделирање (моделирање мануелним графиконима, параметарско моделирање, моделирање изведеном геометријом и моделирање мулти-варијантним регионима). Набројани су и упоређени неки од доступних комерцијалних алата за моделирање толеранције. На основу наведеног примера, описани су поступци спецификације, доделе и анализе геометријске толеранције.

Током последње деценије напредак технологије хардвера и софтвера резултирао је машинама које су потенцијално способне за мерења високих прецизности, а координатна метрологија је постала неизбежна за индустријску димензионалну метрологију. Поглавље 4 почиње основним појмовима везаним за координатну метрологију, као што су мерна несигурност, тачност и прецизност. Затим је дат опис координатне мерне машине. Наведени су постојећи типови координатних мерних машина, подручје њихове примене, тачност, као и одговарајући стандарди. Детаљно су описане контактне, оптичке и ласерске сонде и сензори које користе координатне мерне машине. Описане су стратегије мерења на мерној машини, дата је дефиниција мерне несигурности и наведени су фактори који утичу на мерну несигурност. Такође су наведени софтвери који користе мерне машине и поступци апроксимације који се користе приликом мерења.

Иако су још увек знатно мање тачности, бесконтактни системи за мерење и скенирање свакодневно постају све присутнији у индустријском мерењу. Поглавље 5 проучава поступке реверзног инжењерства: 3D дигитализацију, пре-процесирање, као и реконструкцију површине из облака тачака. Наведени су основни термини, појмови и дефиниције 3D дигитализације, као што су тачност, прецизност, резолуција, као и брзина дигитализације. Дати су предности и недостаци контактних наспрам бесконтактних уређаја. Детаљно су описане методе 3D дигитализације и то: фотограметријске методе, методе пројекције светла, дигитализација ласерским скенером, теодолитом, као и рачунарском рендгентском томографијом. Дат је и упоредни преглед са предностима, недостацима и применом уређаја за 3D дигитализацију. Типови облака тачака и карактеристике (густина узорковања, шум, тачке ван опсега, недостатак података и сл.) облака тачака, такође су овде наведени. Детаљно су описане методе пре-процесирања (филтрирање и редуковање тачака) и сегментације облака тачака засноване на ивици или расту региона. Реконструкција површине из облака тачака могућа је на основу кривих попречног пресека или на основу полигона. Кроз примере приказани су поступци децимације, редукације броја полигона, корекције ивица и попуњавања шупљина мреже. Описан је поступак *Delaunay*-еве триангулације, као и поступак креирања *Voronoi*-евог дијаграма. На крају је дат математички опис кривих (кубних, *Bezier*-ових, *B-Spline* и *NURBS*) линија и параметарских површина које се користе приликом реконструкције површине из облака тачака.

Рачунаром подржано мерење представља савремену технологију која омогућава мерење помоћу софтвера, поређењем одступања тачака добијених са површина физичког дела (мерним уређајем) од његовог номиналног (идеалног) 3D CAD модела. Поглавље 6 се бави изучавањем система рачунаром подржаног мерења. Прво су наведени основни поступци мерења и то: мерење на машини (истовремено, док машина врши обраду и квазиистовремено, када је машина искључена) и мерење ван машине (део се скида и мери у близини машине или у лабораторији за контролу квалитета). Затим је детаљно описан поступак мерења на машини који интегрише поступке пројектовања, обраде и мерења дела. Описани су системи за рачунаром подржано мерење (толеранцијом вођени и засновани на геометрији) и дат свеобухватан

хијерархијски преглед литературе ових система за мерење на машини контактним и бесконтактним уређајима. Следи преглед уређаја за рачунаром подржано мерење, односно њихов историјски развој, карактеристике, поређење и препоруке за избор адекватног уређаја. Дат је опис доступних комерцијалних софтвера за мерење који користе наведени контактни и бесконтактни уређаји. Детаљно је описан софтвер за бесконтактно мерење *PC DMIS*, наведене су карактеристике постојећих верзија овог софтвера, предности, подршке *CAD* форматима и приказан је извештај мерења. Такође је дат опис софтвера за контактано мерење *GOM Inspect*, доступне верзије, његов развој и карактеристике, подршке *CAD* форматима, као и могућности процесирања и реконструкције облака тачака. Приказан је извештај мерења *GOM Inspect*-а. На крају овог поглавља дат је краћи опис *STEP* и *STEP NC* стандарда за размену података о делу.

Поглавље 7 посвећено је грешкама обраде, односно димензионалним, геометријским и грешкама површинске храпавости. Наведени су извори резултантне грешке обраде (као што су угиб алата, машине, стезног прибора и дела, грешке израде и хабања алата, грешке позиционирања и сл.) и њихова међузависност. Утицајни параметри на грешку обраде су класификовани у параметре геометрије алата, технолошке параметре, параметре материјала дела и параметре стратегије обраде. Грешке обраде, које карактеришу квалитет генерисане површине сврстане су у грешке димензија (дужинске грешке), грешке облика и положаја површина (раванске и просторне) и грешке површинске храпавости (грешке топографије). На примерима су приказане грешке равности, цилиндричности, паралелности, управности, угловности и грешка места тј. локације осе. Посебно су описане грешке површинске храпавости. Наведени су стандардни параметри, симболи и терминологија који описују површинску храпавост, као и методе (упоредне и директне) мерења површинске храпавости. На крају је приказана зависност (циклоидне) путање зуба глодала и површинске храпавости. Дат је израз за одређивање висине максималне храпавости (неравнине) на примеру код истосмерног и супротносмерног обимног глодања.

Фактори који утичу на генерисање површинске топографије код обраде обимним глодањем вретенастим глодалом, уз претпоставку да су остали елементи машине апсолутно крути, су: лоше постављање и стезање глодала, радијално одступање (обртања), угиб глодала, динамика система и радијално одступање зуба глодала. У поглављу 8 изведен је математички модел који предвиђа површинску топографију узимајући у обзир грешку стезања глодала и (радијално) одступање зуба. Модел се заснива на постављеним параметарским једначинама са циклоидним путањама сечива зуба алата које је извео *Martellotti*. Приказани су *Martellotti*-јев модел са зупчаником и зупчастом летвом, варијанте криве линије циклоиде, као и трагови зуба у идеалном случају резања. Кроз преглед литературе, описан је развој модела који узима у обзир грешку стезања глодала (разложену на паралелну помереност и нагнутост осе глодала). Преко трансформационих матрица, прво је изведен модел идеалне путање зуба, на основу пречника глодала, броја зуба и корака у функцији угла ротације. Затим је у модел уведен утицај паралелне померености и нагнутости осе глодала. Модел је развијен преко матрица транслације, закошености и ротације референтних координатних система модела. Приказан је и пример појаве хетерогености *band*-а храпавости генерисане површине. У модел је уведен и утицај одступања мера зуба и добијене коначне једначине путања зуба глодала. На крају су приказани неки од постојећих модела за одређивање сила резања и модел за одређивање угиба вретенастог глодала услед отпора резања.

CNC програм садржи информације које управљачка јединица машине алатке „може да разуме“ и да их у одговарајућим фазама обраде саопштава машини, тј. њеним

извршним и другим органима. Поглавље 9 истражује принципе *CNC* програмирања, поступке корекције (регенерисања) *NC* кода и поступке компензације и оптимизације грешке обраде. Описани су поступци ручног програмирања и програмирања помоћу рачунара. Наведени су комерцијални софтвери за програмирање *CNC* обраде и описани *CAM* системи преко дефиниција, функција, генерисања *NC* кода, оптимизације путање алата, израчунавања времена обраде и симулације обрадног процеса. Истакнут је значај базе података (алата, прибора, параметара обраде и сл.) *CAM* система. Поступак генерисања *NC* кода, који је послужио приликом експерименталних истраживања, представљен је применом софтвера *FeatureCAM*, заснованог на типским елементима и знању. Након креирања припремка дела, приказан је поступак генерисања *NC* кода аутоматским избором параметара обраде, који овај софтвер нуди. Такође је описан и поступак генерисања *NC* кода корисничким уносом параметара обраде (броја обртаја и корака). Дат је и изглед извештаја обраде и приказан начин оптимизације параметара обраде. Затим су наведени основни модели компензације грешке корекцијом *NC* кода, а дат је и преглед литературе везане за компензацију. У наставку овог поглавља изведен је модел за компензацију путање алата применом мапе померања. Модел се заснива на *off-line* модификацији путање алата, односно, након обраде се врши мерење одступања путање алата за сваки пролаз и уноси у мапу померања, а односи се на призматичне делове коришћене у експерименталним испитивањима. На основу вредности очекиване (идеалне) и стварне (добијене) путање алата из мапе померања израчунавају се вредности померања које се (ручно или путем софтвера) уносе у *NC* код и врши његово регенерисање. Регенерисаним *NC* кодом, путање алата се померају за вредност потребног померања и добија жељена мера елемента дела. На крају поглавља описан је и поступак оптимизације параметара обраде и дат преглед литературе везане за оптимизацију параметара процеса обраде.

У поглављу 10 наведена су експериментална истраживања. У оквиру дисертације извршен је велики број експеримената. Истраживан је утицај технолошких параметара обраде, стратегије резања као и грешке постављања глодала на квалитет обраде и успостављање корелативних зависности и могућности корекције грешке обраде регенерисањем *NC* кода. Обрада је вршена на вертикалним *CNC* глодалима, док су коришћени алати вретенаста глодала различите геометрије.

Прва експериментална истраживања послужила су анализирању утицаја промене ширине резања на димензионалну тачност у циљу што квалитетнијег избора стратегије обраде. Обрађивани су призматични и цилиндрични изданци делова од легуре алуминијума, истосмерном и супротносмерном стратегијом обраде, уз промену ширине резања и непромењене остале параметре обраде. Обрађени делови су мерени на координатној мерној машини. Добијене су корелативне зависности и приказани дијаграми утицаја ширине резања на димензионалну тачност обраде.

Другим експерименталним истраживањима испитан је утицај промене брзине резања и помоћног кретања на храпавост, као и димензионална и геометријска одступања од равности, управности и паралелности. Коришћена су глодала различите геометрије, обрада је вршена истосмерном и супротносмерном стратегијом, а обрађивани су призматични изданци делова од легуре алуминијума. Анализиран је утицај промене параметара, прво на храпавост која је измерена уређајем за мерење храпавости. Добијене су корелативне једначине и дијаграми зависности параметара обраде и површинске храпавости. Вредности геометријских одступања добијене су мерењем изданака делова на координатној мерној машини и обрадом података мерења помоћу софтвера *PC DMIS*. Посебно је анализиран утицај промене параметара на димензионална и геометријска одступања (равност, паралелност и управност). Добијене

су корелативне једначине и дијаграми зависности параметара обраде и димензионалних и геометријских одступања. На крају је извршено поређење свих геометријских одступања за сва коришћена глодала, што је приказано на дијаграмима.

Трећим експерименталним испитивањима анализиран је утицај грешке постављања глодала (паралелне померености и нагнутоности осе) као и одступања полупречника зуба глодала на генерисану површинску топографију. Глодање је вршено са различитим корацима уз непромењене остале технолошке параметре једним глодалом. Изабрано је похабано глодало већег пречника (како би се минимализовао утицај угиба глодала) и компаратором су измерена радијална одступања зуба. Померање глодала из осе и његово искошење извршено је уметањем ослонаца одговарајућих дебљина. Обрада је вршена у пет комбинација. Прва узима у обзир само утицај радијалног одступања зуба, затим су додати утицаји паралелне померености осе, закошености осе као и комбинације свих одступања. Уређајем за мерење храпавости је измерена храпавост на одређеном дужинском сегменту профила и добијене су криве површинске топографије. Са друге стране, топографија површине (линије путања зуба) добијена је применом математичког модела изведеног у поглављу 8 помоћу софтвера *MatLAB*, уносом параметара одступања услед грешке постављања глодала и радијалног одступања зуба глодала. Упоредна је топографија добијена уређајем за мерење храпавости са топографијом добијеном из развијеног математичког модела. Приказане су и фотографије обрађених површина. Анализиран је утицај фактора обраде и показана је исправност математичког модела.

Последњим експерименталним истраживањима испитан је утицај промене дубине резања, односно претпостављене корекције путање глодала регенерисањем *NC* кода на димензионална и геометријска одступања дела. Обрађивани делови су изданци са призматичних плоча од легуре алуминијума. Обрада је вршена уз промену дубине резања једним глодалом и непромењеним осталим технолошким параметрима. Бочне површине изданака прво су обрађене (референтним) супротносмерним пролазом са истом дубином, а затим је сваки изданак обрађен другим пролазом са различитим дубинама истосмерном и супротносмерном стратегијом обраде. На координатној мерној машини је извршено мерење изданака, резултати мерења су обрађени помоћу софтвера *PC DMIS* и добијена су димензионална и геометријска одступања од очекиване мере. На основу добијених одступања стварне од очекиване димензионалне мере и модела за регенерисање *NC* кода (развијеног у поглављу 9) креирана је мапа померања и израчунате су вредности потребне корекције путање алата. Вредности корекције су унете у генерисани *NC* код обраде једног изданка и на тај начин је извршено регенерисање постојећег *NC* кода у циљу корекције дужинских одступања.

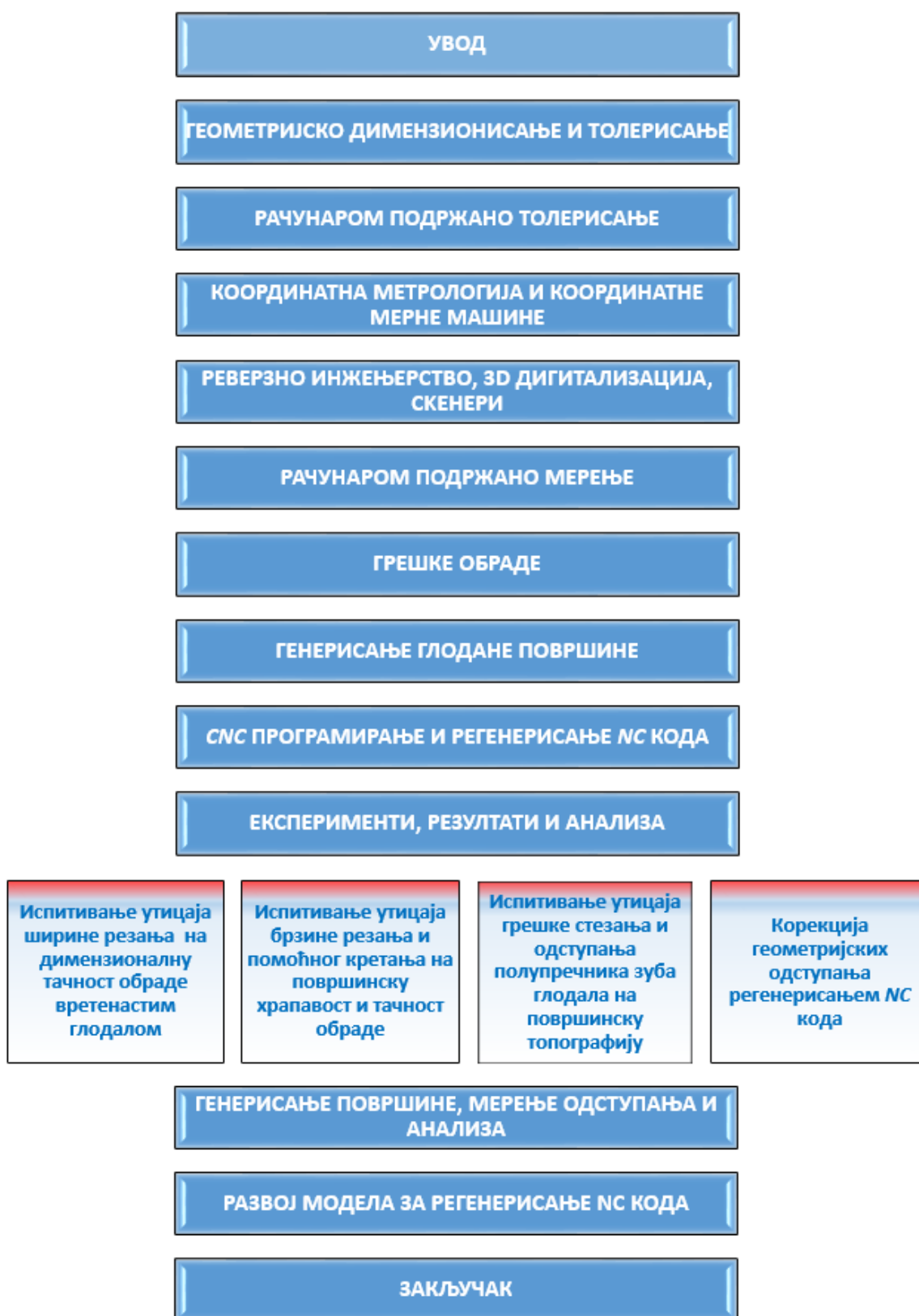
Генерисање површине, мерење одступања и анализа резултата, дати су у поглављу 11. Призматични делови са изданцима, обрађивани приликом експерименталних испитивања (потпоглавље 10.2), измерени су током експеримента на координатној мерној машини, подаци мерења обрађени су помоћу софтвера *PC DMIS* и добијена су димензионална и геометријска одступања. Ови подаци мерења су послужили за поређење у овом поглављу. Исти делови су скенирани помоћу три различита *ATOS* скенера. Поглавље почиње добијањем *STL* датотеке облака тачака на основу резултата мерења са координатне мерне машине. Затим су дате карактеристике коришћених скенера и описан је поступак добијања облака тачака помоћу три оптичка *ATOS* скенера. Следи поступак генерисања површине из добијених датотека облака тачака. Прво су развијени алгоритми за пре-процесирање и процесирање облака тачака у програму *CATIA*, а затим је у програму *CATIA* извршено генерисање површина *i*уданака дела. Поступак генерисања површине из облака тачака је описан и извршен у

програмима *GOM Inspect* и *MatLAB*. Након генерисања површине, приказан је поступак мерења одступања у софтверу *GOM Inspect*. Измерена су димензионална и геометријска одступања од номиналног *CAD* дела облака тачака добијеног са координатне мерне машине, а затим одступања облака тачака добијеног на скенерима. Упоређени су резултати мерења одступања облака тачака са координатне мерне машине, добијени помоћу програма *PC DMIS* и помоћу програма *GOM Inspect*. Такође су извршена поређења резултата одступања облака тачака добијених на скенерима, измерених помоћу *GOM Inspect*-а са одступањима резултата мерења са координатне машине добијених помоћу програма *PC DMIS*.

У оквиру поглавља 12 развијен је и анализиран модел за управљање улазним параметрима процеса обраде са аспекта решавања проблема регенерисања *NC* кода у циљу побољшања квалитета обрађене површине. Прво су наведени утицајни параметри на квалитет обраде глодањем вртенастим глодалом, на које може да се утиче регенерисањем *NC* кода и то: технолошки параметри, параметри геометрије алата, параметри материјала дела и параметри машине алатке. Затим је дат опис модела за компензацију путање алата и избор параметара обраде. У наставку је описан развој модела за регенерисање *NC* кода. Модел се састоји од *CAD/CAM* система који на основу технолошких параметара обраде, геометрије резног алата и *CAD/CAT* захтева пројектовања генерише стандардни *NC* код. Овакав *NC* код прелази даље у фазу дефинисања ограничавајућих параметара. На основу знања које се налази у бази података модела грешки процеса с једне стране и база података грешака обраде с друге и захтева пројектовања и утицајних параметара, систем предвиђа грешку и прелази у процес прилагођавања. У процесу прилагођавања се бира поступак (компензације или оптимизације) на основу ког ће се извршити корекција обраде. На основу ових информација у следећој фази врши се регенерисање *NC* кода. Део се обрађује на основу регенерисаног програмског кода и шаље на мерење. Констатује се исправност, односно неисправност дела, а део завршава процес обраде или се враћа на дораду, док се информације о измереним грешкама шаљу у базу података грешака обраде. У поглављу су детаљно описане база података модела грешака процеса и база података грешака обраде.

У закључку (поглављу 13) су истакнути кључни резултати остварени у раду, наведен је научни допринос и указано је на правце будућег истраживања.

Графички приказ садржаја докторске дисертације приказан је на слици 1.1.



Слика 1.1. Графички приказ дисертације по поглављима

Поглавље 2

ГЕОМЕТРИЈСКО ДИМЕНЗИОНИСАЊЕ И ТОЛЕРИСАЊЕ

Геометријска одступања су неминовна на сваком произведеном делу услед производне непрецизности и мерне несигурности. Из разлога праћења, ограничавања и контролисања геометријских одступања, у производњу је уведено геометријско димензионисање и толерисање (ен. *Geometric Dimensioning and Tolerancing - GD&T*). Међутим, поставља се питање шта *GD&T* представља у систему израде и тачности дела, препознавању елемената дела од стране машине и могуће корекције програмског кода у циљу побољшања квалитета. Све ово доводи до потребе за успостављањем зависности између захтева цртежа и пројектовања дела, израде дела, његовог мерења (на координатној мерној машини или на неком оптичком мерном уређају), добијања извештаја мерења и препознавања тачности односно нетачности, са програмским кодом машине алатке. Другим речима, да се путем програмског кода машине алатке индиректно утиче на геометријска одступања и тачност израде дела.

Да би се дошло до одговора на ова питања и реализовала њихова међузависност, неопходно је прво познавати принципе *GD&T*, терминологију, одговарајуће стандарде и истражити постојеће стање у овој области.

Први вид увођења толерисања у производњу представља толерисање димензија (*Dimensional Tolerancing - DT*), које одређује прихватљиву линеарну величину толерисаног елемента дела и неког задатог налагања између елемената упарених делова. Величина толерисаног елемента дела одређена је номиналном величином и придруженим доњим и горњим граничним одступањем. Толеранције које се могу задати су ограничене на дозвољено позитивно или негативно одступање на линеарним димензијама елемената. Метод *DT* је једноставан, али садржи и низ недостатака [59, 60, 61]:

- методе толерисања димензија обично резултирају правоугаоном зоном толеранције (толеранцијским пољем) која не може да обухвати планирану

функционалност склопа. На пример, правоугаоне зоне толеранција нису погодне за толерисање цилиндричних елемената,

- интеракција између толеранција није садржана. Ово може довести до случаја да је толеранција непотребно уска и
- толерисање димензија не садржи релативно важне референтне елементе.

Да би се превазишли недостаци *DT*, развијена је снажнија шема толерисања која се односи на дозвољена одступања геометријских величина дела, геометријско димензионисање и толерисање (*GD&T*). Геометријско толерисање омогућава дефинисање типова толеранција, које нису ограничене на линеарне димензије елемента дела, али садрже и геометријске карактеристике као што је одступање од равности површине (*flatness*). Шема *GD&T* развијена је и стандардизована на основу конвенција развијених из емпиријског знања и инжењерске праксе у индустрији, током више деценија [59, 60, 62].

GD&T приступ дефинише зоне толеранција унутар којих је толерисаном елементу дела дозвољено да одступа. Поред могућности толерисања димензија, приступ геометријског толерисања садржи специфичне врсте геометријских одступања, параметара толерисаних елемената као што су правац (*orientation*), место (*location*), облик (*form*), профил (*profile*) и тачност обртања, тј. одступање од кружности (*runout*).

Типови одступања се представљају стандардизованим симболима и нотацијама (табела 2.1). Додатни појмови као што су виртуелне и добијене условне границе и модификатори материјалног стања су такође дефинисани у *GD&T* шемама толерисања. Они су формализовани у бројним цртежима дефинисаним стандардима као што су:

- ASME Y14.5-2009 *Dimensioning and Tolerancing* (ASME 2009),
- ISO 1101:2012 *Geometrical Product Specifications (GPS). Tolerancing of form, orientation, location and run-out*,
- ISO 5458:1998 *Geometric Product Specifications (GPS). Positional tolerancing* (ISO 1998),
- ISO 286-1:1988 *ISO system of limits and fits* (ISO 1988),
- ASME Y14.41-2003 *Digital Product Definition Data Practices* (ASME 2003) и
- ISO 16792:2006 *Technical product documentation – Digital product definition data practices* (ISO 2006).

Смернице спецификовања геометријских толеранција су стандардизоване у два главна међународна стандарда: ASME (*American Society of Mechanical Engineers*) и ISO (*International Organization for Standardization*) стандард. ASME прихвата American Y14.5 национални стандард (претходни ANSI стандард) и уводи неке нове концепте, дефиниције, правила и симболе. Најновија ревизија стандарда је ASME Y15.5: 2009. Геометријске толеранције у ISO су дате стандардом ISO 1101:2012 која представља недавно ажурирану верзију ISO 1101:2004. Поред тога, ISO је издао низ докумената о геометријским толеранцијама и другим стандардима о инжењерским цртежима. По овом стандарду, геометријска толеранција се примењује на толерисаном елементу и дефинише зону толеранције у оквиру које толерисани елемент треба да буде садржан. ASME 14.5 се заснива на принципу услова максимума материјала (*Maximum Material Condition* - *MMC*), док су ISO стандарди усвојили оба принципа, *MMC* и принципе независности. Што се тиче коришћених симбола и концепата у оба стандарда, има око 90% сличности између њих. Разлике укључују терминологију и симболику, где ASME 14.5M:2009 спецификује додатне симболе који не постоје (још нису дефинисани) у ISO 1101:2012 [63].

2.1 Основни концепти, термини и дефиниције

У складу са ISO 1101:2012 [63], геометријска толеранција (*geometrical tolerance*) се дефинише као "међународни језик симбола који се налазе на техничким цртежима у циљу адекватног описа дозвољеног одступања геометрије дела". Другим речима, сврха геометријских толеранција је да се успостави несметана комуникација између корисника и стандарда. Сходно томе, језик геометријских толеранција користи добро дефинисан скуп симбола, правила, дефиниција и конвенција који треба да омогући потребну и laku комуникацију корисницима [64].

Геометријске толеранције се утврђују у складу са функционалним захтевима. На геометријско толерисање такође могу да утичу производња и захтеви мерења.

Геометријска толеранција се примењује на толерисани елемент, дефинишући зону толеранције (*tolerance zone*) у оквиру које то својство мора да буде садржано.

Толерисани елемент (*feature*) је спецификовани део обрадка, као што је тачка, линија или површина; ови елементи могу бити саставни (*integral*), нпр. спољна површина цилиндра, или изведени (*derived*)- средња линија или површина дела (слика 2.5).

Како у ISO 1101:2012 нису наведене основне дефиниције референтних елемената исте су преузете из ISO 5459:1981 [65] и дате у наставку.

Референтни елемент (*datum*) представља теоретски тачну геометријску референцу (као што су осе, равни, праве линије, итд), на које се позивају толерисани елементи. Референтни елемент се може односити на један или више толерисаних елемената дела.

Систем референтног елемента (*datum-system*) јесте група од два или више одвојена референтна елемента, који се користе као комбинована референца за толерисани елемент.

Референтни елемент толерисаног елемента (*datum feature*) представља реални толерисани елемент дела (као што је ивица, површина или отвор, итд), који се користи да се утврди место постављања референтног елемента. Како референтни елементи толерисаног елемента подлежу производним грешкама и одступањима, често је потребно на њима спецификовати толеранције облика.

Мета референтног елемента (*datum target*) је тачка, линија или ограничена област на обрађиваном делу, која ће се користити за контакт са производном и мерном опремом, да дефинише потребне референтне елементе, како би се задовољили функционални захтеви.

Симулирани референтни елемент толерисаног елемента (*simulated datum feature*), представља реална површина адекватно прецизног облика (као што је нпр. равна плоча за мерење, лежај или осовина и сл.), која додирује референтни елемент толерисаног елемента и користи се за утврђивање референтног елемента. Симулирани референтни елемент толерисаног елемента се користи при практичном одређивању референтних елемената током производње и мерења.

Зона толеранције (*tolerance zone*) је зона у којој морају лежати све тачке једног геометријског елемента (тачка, линија, површина, средишна раван) [66].

Према карактеристици која се толерише и начину на који је димензионисана, зона толеранције је једно од следећег [63]:

- простор унутар круга,
- простор између два концентрична круга,

- простор између две еквилистантне (са једнаким растојањем) линије или две паралелне праве линије,
- простор унутар цилиндра,
- простор између два коаксијална цилиндра,
- простор између две еквилистантне површине или две паралелне равни и
- простор унутар сфере.

Осим ако је потребно више рестриктивних показатеља, као на пример образложење, толерисани елемент може бити било ког облика или правца у овој зони толеранције.

Толеранција се односи на целокупан обим посматраног елемента, уколико није другачије наглашено.

Геометријске толеранције додељене толерисаним елементима, повезане са референтним елементом, не ограничавају облик одступања самог референтног елемента. Па може бити неопходно спецификовати толеранције облика и за референтни елемент толерисаног елемента.

Услов максимум-материјала допушта да се једна толеранција облика и положаја назначена на цртежу прекорачи, и то за износ разлике између мере спрезања и мере максимум-материјала [66].

Мера максимум-материјала је она гранична мера која даје максимум материје израђеног дела. То је, дакле, највећа мера осовине, односно најмања мера рупе.

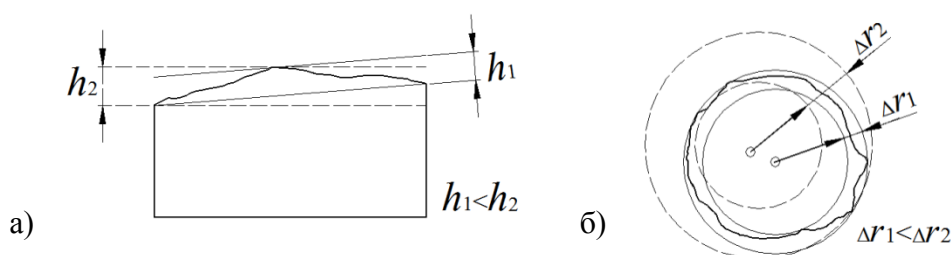
Сходно томе, мера минимум-материјала је она гранична мера која даје минимум материје. То је, дакле, најмања мера осовине, односно највећа мера рупе.

Мера спрезања је она мера геометријски идеалног супротног дела, који има дужину једнаку најмање дужини површине налегања посматраног дела и са којим се посматрани део без присиле још управо може спрегнути.

При мерењу, одступања од облика граничне линије, односно граничне површине, морају бити тако постављене према стварном облику, да се добије најмање одступање од облика. Овај услов назива се условом минимума, тј. то је услов да израђени комад, или дијаграм профила, буде поравнат (постављен у положај) према услову минимума (h_1 на слици 2.1-а и Δr_1 на слици 2.1-б).

Ако се не води рачуна о овом услову минимума, онда се добијају већа одступања (h_2 на слици 2.1-а и Δr_2 на слици 2.1-б), која доводе до погрешних резултата мерења.

При мерењу одступања од положаја важи услов минимума за референтни елемент, тј. ако је, на пример, референтни елемент оса, треба израђени комад изравнати према цилиндру, који референтну осу обухвата са најмањим могућим пречником тог цилиндра. Ако је референтни елемент једна равна површина, треба израђени комад изравнати према паралелним равнима које референтну раван обухватају са најмањим могућим растојањем између тих равни.



Слика 2.1. Услов минимума материјала за а) равну и б) цилиндричну површину [8]

2.2 Символи толеранција

Типови геометријских одступања представљају се стандардизованим симболима приказаним у табели 2.1. Табела садржи тип геометријске толеранције, конкретну карактеристику датог типа, симбол толеранције, као и потребу за референтним елементом (РЕ).

Додатни симболи приказани су у табели 2.2.

Табела 2.1. Символи геометријских одступања [63]

Толеранција		Карактеристика	Симбол	Потреба за РЕ
Облика		Правост		Не
		Равност		Не
		Кружност		Не
		Цилиндричност		Не
		Облик линије		Не
		Облик површине		Не
Положаја	Правца	Паралелност		Да
		Управност		Да
		Угао нагиба		Да
	Места	Локација		Да и не
		Концентричност и коаксијалност		Да
		Симетричност		Да
	Тачности обртања	Кружност и обртање		Да
		Равност и кружност обртања (укупно)		Да

Табела 2.2. Додатни симболи [63]

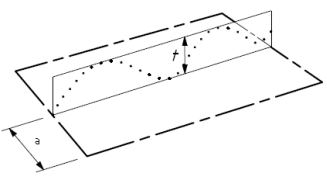
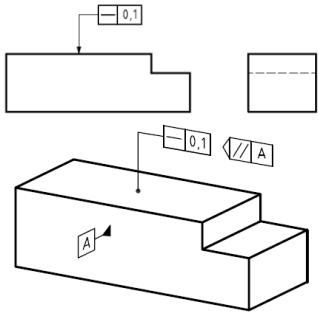
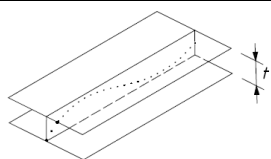
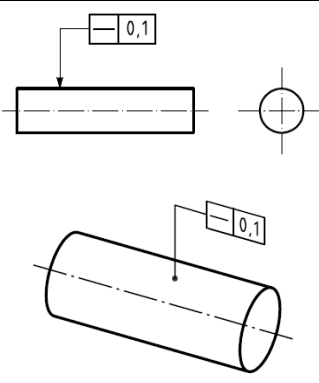
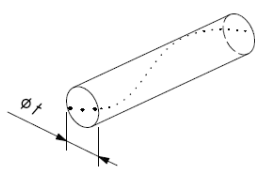
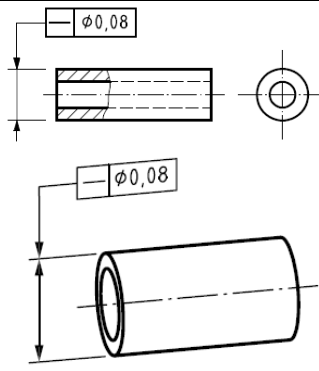
Опис	Симбол
Ознака толерисаног елемента	
Ознака референтног елемента	
Место мете референтног елемента	
Теоријски тачна мера	
Пројектована зона толеранције	
Услов максимума материјала	
Услов минимума материјала	
Заједничка зона	CZ
Мањи пречник	LD
Већи пречник	MD
Пречник круга	ϕ
Пречник сфере	$S\phi$
Линијски елемент	LE
Неконвексно	NC
Пресечна раван	
Оријентациона раван	


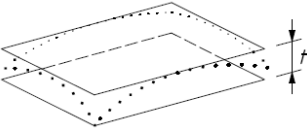
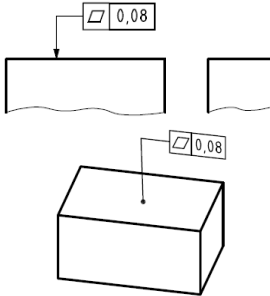
2.3 Дефиниције геометријских толеранција

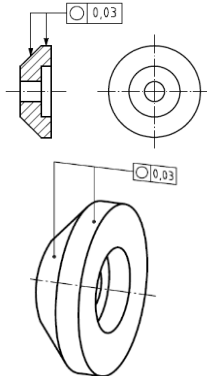
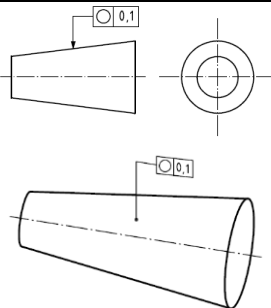
Толеранције облика ограничавају одступања стварног геометријског елемента дела од његовог идеалног геометријског облика и дефинишу зону толеранције у којој посматрани елемент дела мора лежати и у којој може имати произвољан облик. Толеранцијама облика одрађују се дозвољена одступања од тачног (идеалног) геометријског облика или од његовог референтног елемента (кружница, раван, профил и сл.).


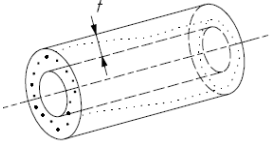
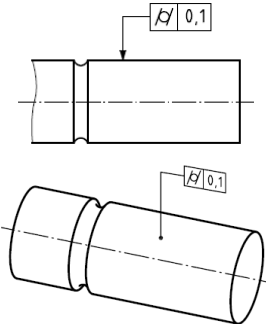
Толеранције положаја прописују допуштена одступања два или више елемента од њиховог задатог међусобног (идеалног) положаја у простору. Један од тих елемената је обично утврђен као референтни елемент (раван, оса и сл.).


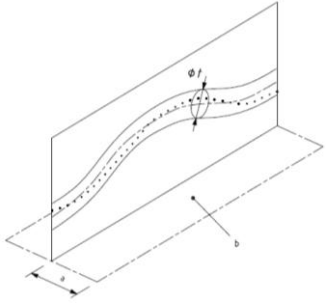
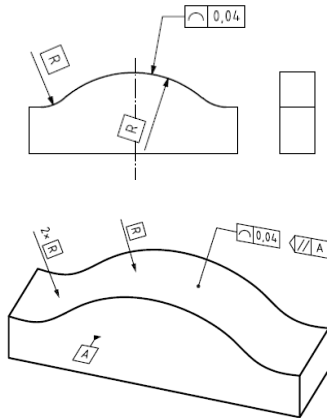
У наставку су табеларно приказане основне толеранције облика уз дефиницију зоне толеранције, пример кроз дводимензионални (2D) и тродимензионални (3D) приказ, као и додатно појашњење према ISO 1101:2012 [63].


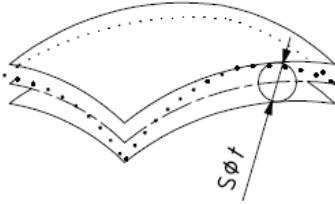
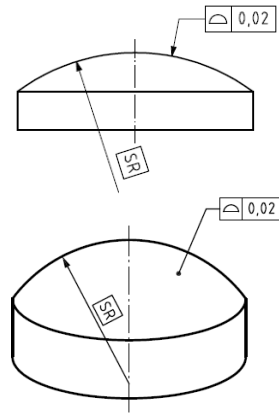
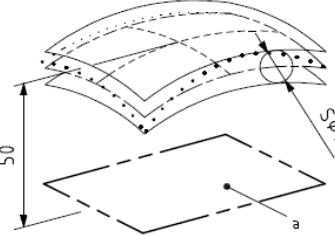
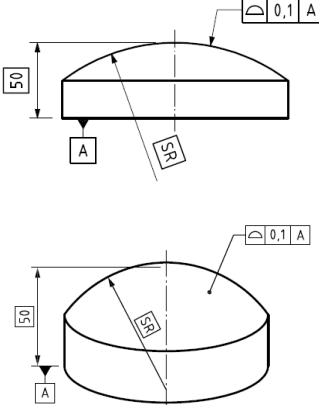
— Толеранција правости		
Зона толеранције	2D и 3D приказ	Појашњење
 <p>Налази се у посматраној равни ограничена двема паралелним правим линијама удаљеним за t, у задатом правцу.</p>		Свака изведена (стварна) линија на горњој површини, паралелна равни пројекције (2D) или референтне равни А (3D), мора лежати између две паралелне праве линије са растојањем од 0,1 mm.
 <p>Ограничена је са две паралелне равни са међусобним растојањем t.</p>		Свака изведена (стварна) линија на цилиндричној површини мора лежати између две паралелне равни са растојањем 0,1 mm.
 <p>Ограничена је цилиндром пречника t, ако толерисаној вредности претходи симбол ϕ.</p>		Изведена (стварна) средња линија цилиндра на коју је примењена толеранција мора се налазити унутар цилиндричне зоне пречника 0,08 mm.


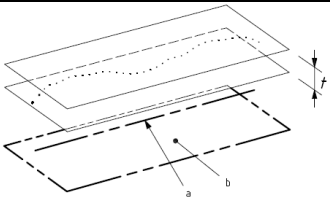
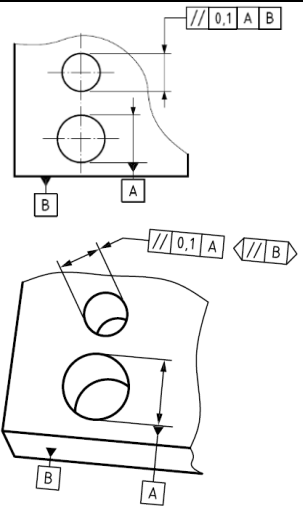
 Толеранција равности		
Зона толеранције	2D и 3D приказ	Појашњење
 <p>Ограничена је двема паралелним равнима са растојањем t.</p>		Изведена (стварна) површина мора се налазити између две паралелне равни са растојањем од 0,08 mm.


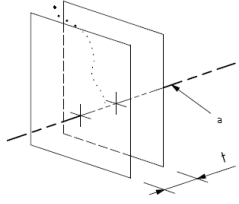
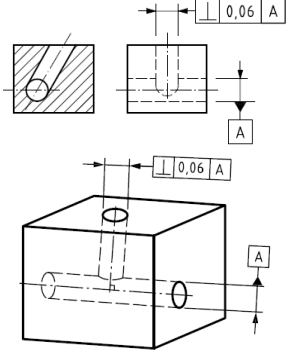
 Толеранција кружности		
Зона толеранције	2D и 3D приказ	Појашњење
 <p>У посматраном пресеку, ограничена је са две концентричне кружнице са разликом у пречницима од t.</p>		За цилиндричну површину, изведена (стварна) ободна линија у сваком попречном пресеку, мора се налазити између две копланарне концентричне кружнице са разликом у полупречницима од 0,03 mm.
<p>Зона није дефинисана у овом стандарду.</p>		Свака изведена (стварна) ободна линија, добијена пресеком (стварне) кружне површине и пресека конуса, мора бити садржана у коничној зони ограниченој двема кружницама удаљеним за 0,1 mm.


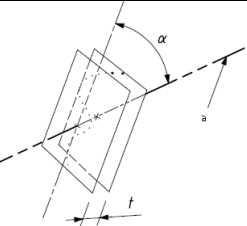
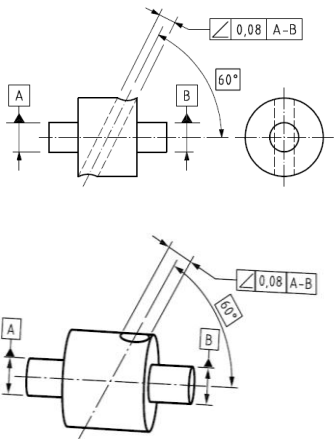
 Толеранција цилиндричности		
Зона толеранције	2D и 3D приказ	Појашњење
 <p>Ограничена је са два коаксијална цилиндра са разликом у полупречницима од t.</p>		Изведена (стварна) цилиндрична површина мора се налазити између два коаксијална цилиндра са разликом у полупречницима од 0,1 mm.


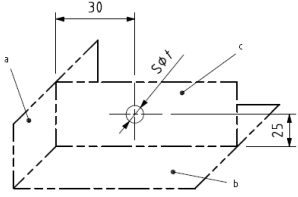
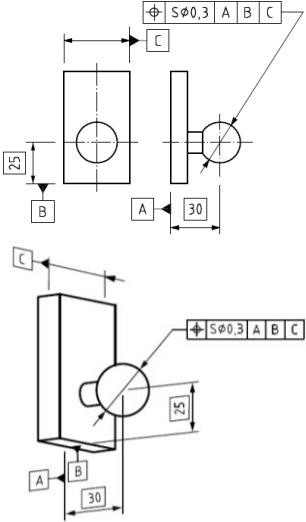
 Толеранција облика линије		
Зона толеранције	2D и 3D приказ	Појашњење
 <p>Ограничена је са две линије обвојнице кругова пречника t, чији центри се налазе на линији која има теоретски идеалан геометријски облик.</p>		<p>У било ком пресеку, паралелном пројектованој равни, у којој се види пројекција (референтна раван А за 3D), изведена (стварна) линија профила мора се налазити између две еквидалне линије, обвојнице кругова пречника 0,04 mm, чији се центри налазе на линији која има теоретски идеалан геометријски облик.</p>

 Толеранција облика површине		
Зона толеранције	2D и 3D приказ	Појашњење
 <p>Ограничена је са две површине обвојнице сфера пречника t, чији центри се налазе на површини која има теоретски идеалан геометријски облик.</p>		<p>Изведена (стварна) површина мора се налазити између две еквидалне сфере, сфера пречника 0,02 mm, чији се центри налазе на површини која има теоретски идеалан геометријски облик.</p>
 <p>Као у претходном случају.</p>		<p>Толеранција облика површине може се задати и с обзиром на референтни елемент, где је идеална површина с обзиром на референтну раван А.</p>


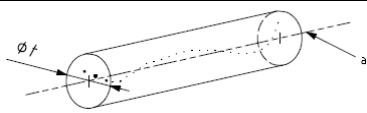
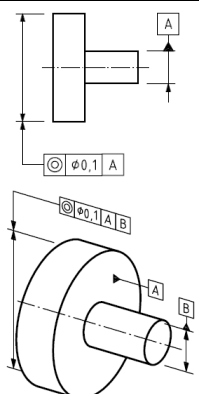
 Толеранција паралелности		
Зона толеранције	2D и 3D приказ	Појашњење
 <p>Ограничена је са две паралелне равни са међусобним растојањем t. Равни су паралелне референтним равнима и задатим правцима.</p>		<p>Изведена (стварна) средња линија мора се налазити између две паралелне равни са растојањем од 0,1 mm, које су паралелне референтној оси А. Равни које ограничавају зону толеранције су паралелне референтној равни В која је дефинисана превцем лидер линије и секундарне референтне равни (у случају 2D) или оријентисане помоћу приказане равни (3D).</p>


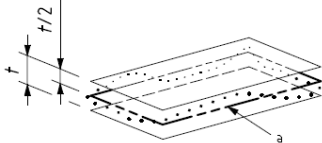
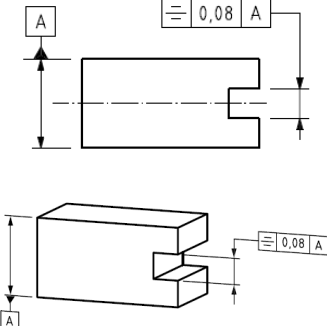
 Толеранција управности		
Зона толеранције	2D и 3D приказ	Појашњење
 <p>Ограничена је са две паралелне равни са међусобним растојањем t и управне на референтни елемент.</p>		<p>Изведена (стварна) средња линија мора се налазити између две паралелне равни са растојањем од 0,06 mm, које су управне на референтну осу А.</p>


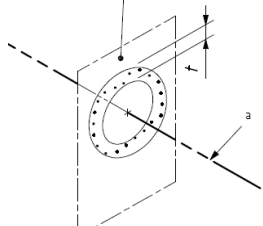
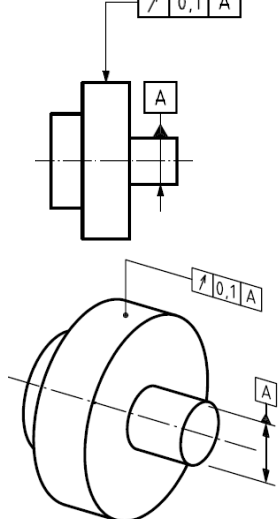
 Толеранција угла нагиба		
Зона толеранције	2D и 3D приказ	Појашњење
 <p>Ограничена је са две паралелне равни са међусобним растојањем t и нагнута под одређеним углом α у односу на референтни елемент. Линија и референтна линија су у истој равни.</p>		<p>Изведена (стварна) средња линија мора се налазити између две паралелне равни са растојањем од 0,08 mm, које су нагнуте под теоретски идеалним углом од 60° према заједничким референтним правим линијама А-В.</p>


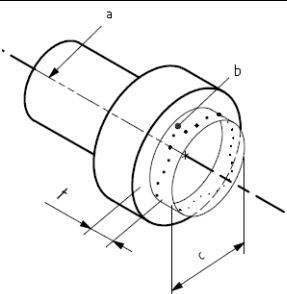
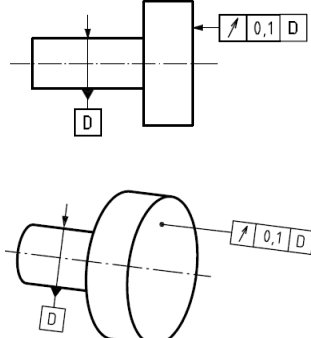
 Толеранција локације тачке		
Зона толеранције	2D и 3D приказ	Појашњење
 <p>Ограничена је сфером пречника t ако је вредности толеранције претходи симбол S. Центар сферичне зоне толеранције је фиксиран за теоретски идеалну димензију, с обзиром на референтне елементе А, В и С.</p>		<p>Изведени (стварни) центар сфере мора се налазити у сферичној зони пречника 0,3 mm, центра сфере који се поклапа са теоретски идеалним, с обзиром на референтне равни А и В и са средњом референтном равни С.</p>


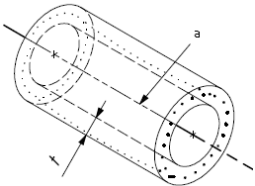
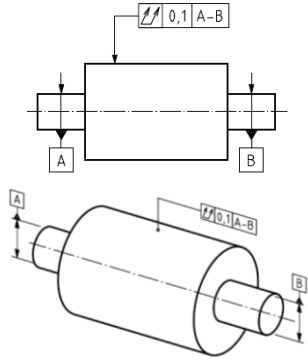
 Толеранција концентричности тачке		
Зона толеранције	2D и 3D приказ	Појашњење
 <p>Ограничена је кругом пречника t; вредности толеранције мора да претходи симбол ϕ. Центар кружне зоне толеранције подударара се са референтном тачком.</p>		<p>Изведени (стварни) центар унутрашњег круга у сваком пресеку налазиће се у кругу пречника 0,1 mm, концентричном са референтним елементом А, задатог у истом попречном пресеку.</p>

 Толеранција коаксијалности осе		
Зона толеранције	2D и 3D приказ	Појашњење
 <p>Ограничена је цилиндром пречника t; Вредности толеранције мора да претходи симбол ϕ. Оса цилиндричне зоне толеранције подударара се са референтним елементом.</p>		<p>Изведена (стварна) средња линија толерисаног цилиндра мора бити унутар цилиндричне зоне пречника 0,1 mm, чија оса је референтна оса А.</p>

 Толеранција симетричности средње равни		
Зона толеранције	2D и 3D приказ	Појашњење
 <p>Ограничена је са две паралелне равна са растојањем t; које се симетрично простиру с обзиром на референтни елемент.</p>		<p>Изведена (стварна) средња површина се налази између две паралелне равни са растојањем 0,08 mm, које су симетрично постављене око референтног елемента А.</p>

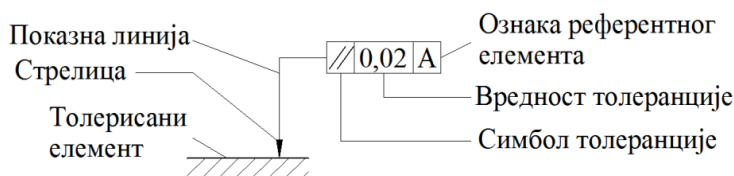
 Толеранција радијалне кружности и обртања		
Зона толеранције	2D и 3D приказ	Појашњење
 <p>Ограничена је унутар сваког пресека управног на референтну осу две концентричне кружнице са разликом у полупречнику од t, центри се подударају са референтним елементом.</p>		<p>Изведена (стварна) линија у свакој пресечној равни нормалној на референтну осу А, мора да се налази између две копланарне концентричне кружнице са разликом у полупречнику од 0,1 mm.</p>

 Толеранција аксијалне кружности и обртања		
Зона толеранције	2D и 3D приказ	Појашњење
 <p>Ограничена је унутар сваког пресека са две кружнице са међусобним растојањем t и лежи у цилиндричном пресеку, где се оса поклапа са референтним елементом.</p>		<p>Изведена (стварна) линија у свакој пресечној равни, чија се оса поклапа са референтном осом цилиндра D, мора да се налази између две кружнице са међусобним растојањем од 0,1 mm.</p>

 Толеранција укупне равности и кружности обртања		
Зона толеранције	2D и 3D приказ	Појашњење
 <p>Ограничена је са два коаксијална цилиндра са разликом у пречницима t, чија се оса подудара са референтним елементом.</p>		<p>Изведена (стварна) површина мора се налазити између два коаксијална цилиндра са разликом у пречницима од 0,1 mm, а оса се подудара са заједничком правом линијом референтних елемената А - В.</p>

2.4 Толеранцијски оквир

Толеранцијски захтеви се приказују у правоугаоном оквиру (*tolerance frame*), који је подељен на два или више поља (слика 2.2).

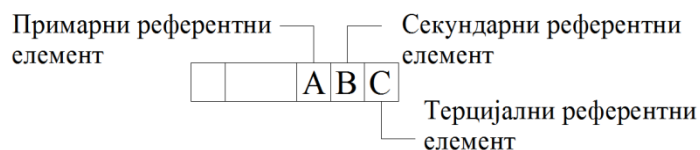


Слика 2.2. Елементи толеранцијског оквира [63]

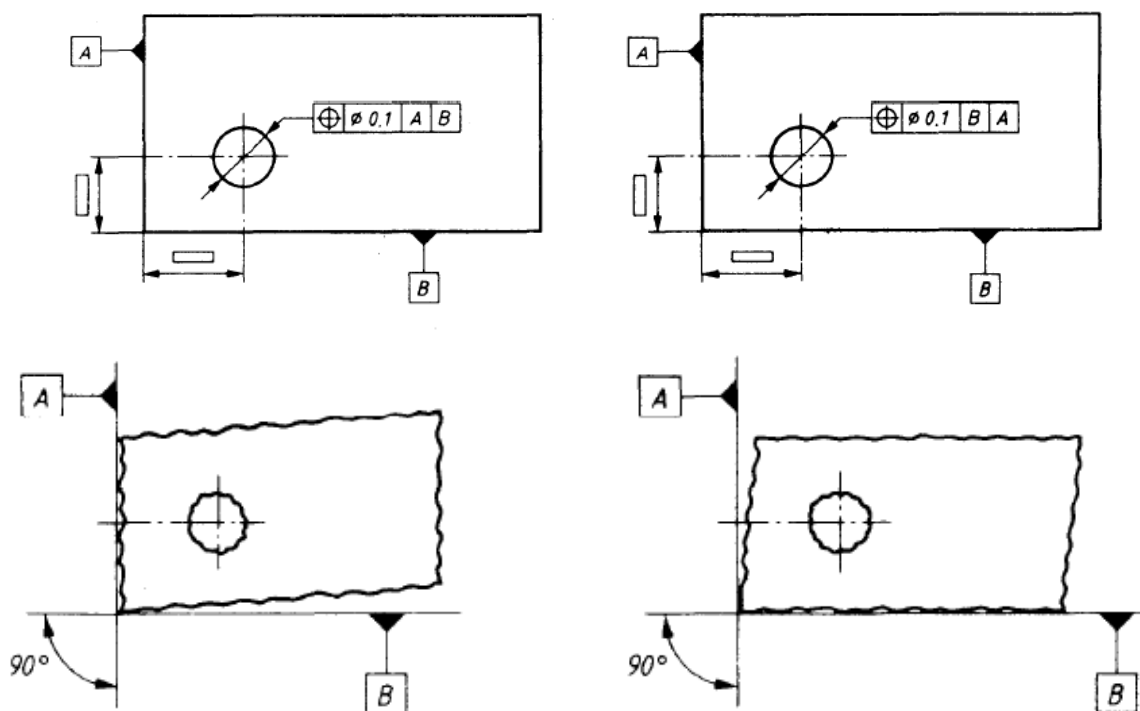
Ова поља садрже, с лева на десно, у следећем редоследу [63]:

- прво поље: симбол толеранције,
- друго поље: ширина зоне толеранције (вредност толеранције) у јединицама, које се користи за линеарне димензије и додатне захтеве (јединице које важе за цртеж, најчешће mm). Ако је зона толеранције кружна или цилиндрична, вредности толеранције претходи симбол " ϕ ". Ако је зона сферична, вредности претходи " $S\phi$ " и
- треће и накнадне преграде, по потреби: референтно слово, једно или више слова која идентификују референтни елемент или заједнички или референтни елемент система.

Када је систем референтних елемената успостављен од стране два или више толерисаних елемената, односно више референтних елемената, њихова референтна слова су означена у трећем и наредним пољима толеранцијског оквира (примарним, секундарним и терцијалним), у складу са редоследом референтних елемената (слика 2.3) [65]. Смисао примарног, секундарног и терцијалног референтног елемента, представља њихов приоритет при избору, што је приказано на слици 2.4.



Слика 2.3. Оквир са више референтних елемената [63]



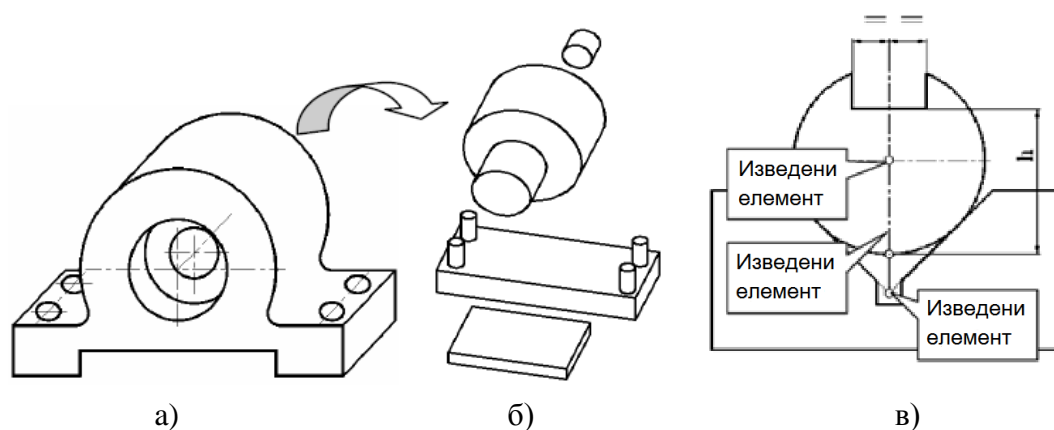
Слика 2.4. Толерисање са више референтних елемената [65]

2.5 Толерисани елементи

Сваки део који се израђује, састоји се од појединих геометријских елемената (раван, цилиндар, конус, кугла...).

ISO 14660:1999 [67] дефинише стандардизовану терминологију за геометријске елементе дела. Тако је:

- геометријски елемент - тачка, линија или површина (слика 2.5-а),
- саставни елемент - површина или линија на површини (слика 2.5-б) и
- изведени елемент - централна тачка, средња линија или средња површина једног или више елемената (слика 2.5-в).



Слика 2.5. Део и елементи дела [68]

Како није могуће израдити делове идеалног геометријског облика, јављају се одступања елемената од геометријски идеалног облика и положаја. Геометријски елементи од значаја за део и конструкцију су елементи који се толеришу тј. толерисани елементи (*toleranced features*), који такође могу бити саставни или изведени.

Геометријска спецификација се односи на један целокупан елемент, осим када је одговарајућим модификатором другачије назначено.

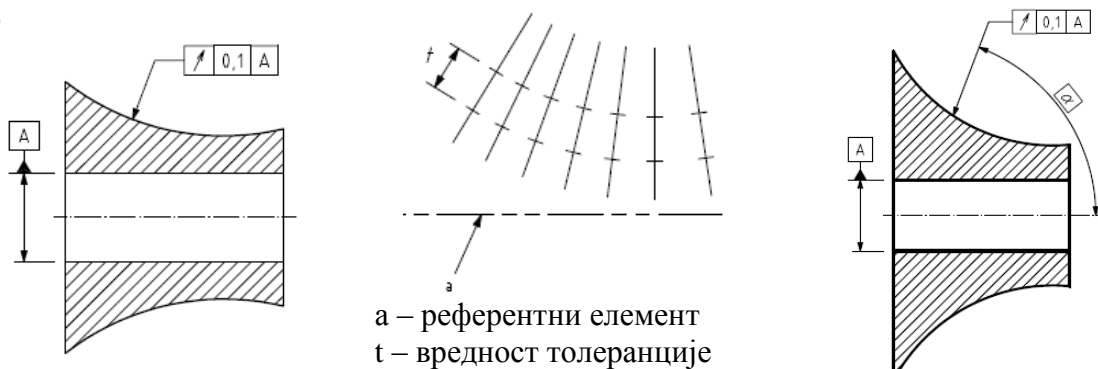
Када се геометријска спецификација односи на сам елемент (саставни), толеранцијски оквир мора бити повезан са толерисаним елементом, референтном стрелицом са линијом.

2.6 Зона толеранције

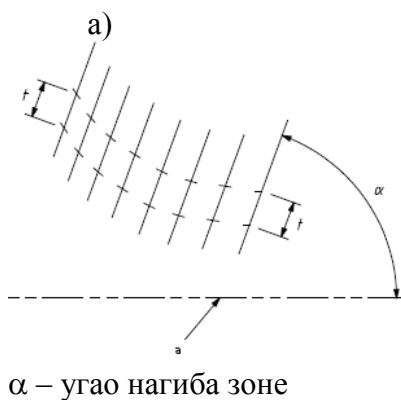
Зона толеранције (*tolerance zone*) је позиционирана симетрично из идеалног елемента ако није другачије назначено. Вредност толеранције дефинише ширину толеранцијске зоне. Ова ширина се односи нормално на спецификовану геометрију (слике 2.6-а и 2.6-б), осим ако није другачије назначено (слике 2.6-в, г и д), где је зона толеранције под задатим углом. Оријентација саме референтне линије не утиче на дефиницију толеранцијске зоне, осим у случају када је задата њена оријентација.

Толеранцијска зона је цилиндрична или кружна ако вредности толеранције претходи симбол " ϕ " или сферична ако јој претходи симболом " $S\phi$ ".

2D



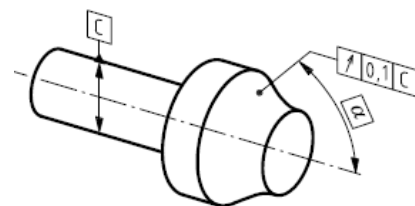
a – референтни елемент
t – вредност толеранције



α – угао нагиба зоне

г)

3D



д)

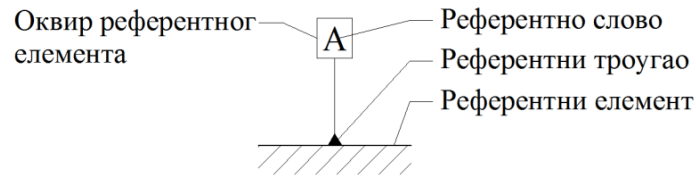
Слика 2.6. Зона толеранције за 2D и 3D геометријски толерисани елемент [63]

2.7 Референтни елемент

Референтни елемент (*datum*), као што је дато у уводу овог поглавља, представља теоретски тачну геометријску референцу (осу, раван, праву линију, итд), на које се односе толерисани елементи.

Референтни елемент се односи на толерисани елемент означен референтним словом у толеранцијском оквиру (слика 2.7). Велико слово се уноси у референтни оквир и повезује са референтним троуглом, да идентификује референтни елемент. Исто

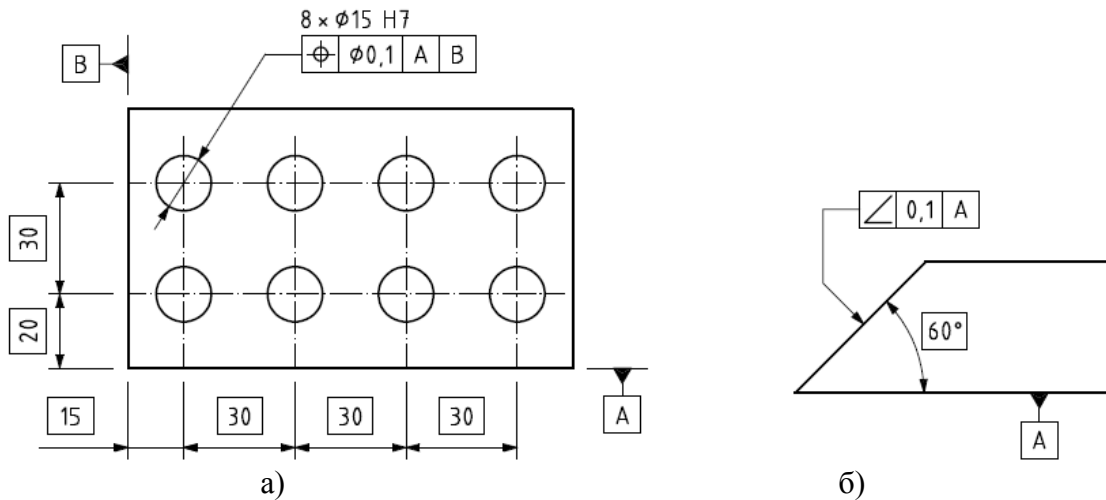
референтно слово које дефинише референтни елемент треба бити наведено у толеранцијском оквиру.



Слика 2.7. Означавање референтног елемента [63]

2.8 Теоретски тачна димензија

Теоретски тачна димензија (*Theoretically Exact Dimension - TED*) се примењују на коте које одређују релативну оријентацију референтних елемената једног система. *TED* се не толеришу. Оне се уписују унутар квадратног оквира. На слици 2.8-а, дат је пример *TED* за линеарне мере, док је на слици 2.8-б приказан пример за угаоне мере.



Слика 2.8. Представљање теоретски тачне димензије на цртежу [63]

Поглавље 3

РАЧУНАРОМ ПОДРЖАНО ТОЛЕРИСАЊЕ

С обзиром на интегрисање рачунара у целукупан животни век (*life cycle*) производа, логичан је и развој рачунарских алата који уводе толеранције и захтеве пројектовања у *CAD* модел дела.

У фази планирања процеса производње, делови се представљају номиналним димензијама и толеранцијама, користећи алате за рачунаром подржано пројектовање (*CAD*). Толеранција представља дозвољено одступање одређених геометријских димензија и облика. Ако је произведени део измерен и мере су унутар опсега толеранције, онда се сматра добрим производом. У супротном, представља неисправан производ. Због тога је веома важно да се разуме однос између пројектовања и производње у смислу спецификације толеранције [64].

Још увек се спецификација толеранције у великој мери ослања на инжењерским знањима, искуству и ручном рачунању. Утицај производног процеса на толеранције још увек није довољно истражен. Па се често, након фазе пројектовања, током производње, спецификације толеранција морају накнадно проверавати и мењати. Оваква накнадна промена може довести до негативног утицаја на производни процес. Из тог разлога веома је значајно истраживање и развој научне методологије за одређивање спецификација толеранција у фази пројектовања. Па је развој и примена рачунаром подржаног толерисања (*Computer Aided Tolerancing - CAT*) заснованог на *CAD* моделу у процесу производње (као типичне врсте производног процеса), данас честа истраживачка тема.

Свако одступање од идеалне геометрије представља губитак функционалности [69]. Тако, спецификацијом димензија и величином толеранција на цртежима, пројектанти преносе захтеве пројектовања (*design intent*), у вези са обликом и условима за производњу и контролу. Слично, геометријске толеранције преносе захтеве пројектовања у вези са обликом и функционалним захтевима.

У данашње време, поизводни процеси су под јаким притиском од стране све веће конкуренције захтевајући делове израђене са ужим толеранцијама, краћим временом изласка на тржиште и прецизнијом комуникацијом са захтевима пројектовања [61]. Ово је навело велики број компанија да препознају важност у способности толерисања својих цртежа преко геометријских толеранција. Постојећа производна пракса указује да постоје два главна изазова како би се добио несметан проток захтева пројектовања кроз производни процес. Првенствено, да практична примена правила, симбола и концепата геометријских толеранција буде добро успостављена. С обзиром на проширену употребу рачунара кроз скоро сваку активност животног циклуса производа, апсолутно је неопходна способност да се представи комплетан, постојан, и недвосмислен модел пројектовања. Друго, да представљање геометријских толеранција преко рачунара, симболима и текстуалним правилима, захтева развој сложених алгоритама. Кључно је да презентација пројектовања, која укључује информацију о толеранцији, омогућава лаку модификацију и оптимизацију пројектовања. Могућност преноса димензионалних података модела и додељених толеранција, укључујући обезбеђивање функционалних захтева *CAD* модела, важна су за будући напредак рачунаром подржаних мерних (*Computer Aided Inspection - CAI*) система.

3.1 Основни концепти, термини и дефиниције

Анализа толеранција представља студију ефекта одступања параметара облика дела, при функционисању једног произведеног дела или склопа више делова. Параметри проучавања су обично димензионални и геометријски и дефинишу се према конвенцијама шема толеранције.

Параметри, који су од посебног значаја за функционалност називају се кључне карактеристике дела (*Key Product Characteristics - KPC*) [70, 71]. *KPC* су дефинисане у смислу параметара у склопу, од стране одговарајуће функције склопа. Одговарајућа функција склопа је дефинисана у складу са методама моделирања толеранције. Осим тога, одговарајућа функција може бити или експлицитно дефинисана алгебарским изразом или се може наћи имплицитно у нумеричкој форми, као што су *CAD* склоп или рачунаром подржан инжењерски (*Computer Aided Engineering - CAE*) модел. Кључна карактеристика дела представља параметар дела или склопа, посебно важан за функционалност производа и чије одступање од циљне вредности даје релативно висок губитак квалитета. Одговарајућа функција склопа дефинише *KPC* у односу на параметре склопа.

Горња спецификациона граница (*Upper Specification Limit - USL*) и доња спецификациона граница (*Lower Specification Limit - LSL*) се примењују на параметрима и дефинишу дозвољене границе одступања. За склоп са *KPC* где све карактеристике леже у оквиру дефинисаних граница спецификација, каже се да задовољава све функционалне захтеве. Доња/горња спецификациона граница дефинишу прихватљиве границе одступања параметра.

Производни принос (*production yields*) је дефинисан као проценат склопова који су усклађени са спецификацијским границама свих *KPC*. Принос се обрачунава према најгорем случају, када сви произведени делови морају задовољити све функционалне захтеве и оваква анализа представља најгори-случај (*worst-case*) толерисања. Уколико је малом проценту произведених делова дозвољено да крши функционалне захтеве, такав поступак представља статистичко толерисање.

Најгори-случај толерисања има за циљ да задовољи неизвесну вероватноћу да сви параметри у оквиру склопа буду истовремено на неповољним крајностима њихових

очекиваних расподела. Савршена прилагодљивост (100% приноса производа) је загарантована, међутим приступ може захтевати изузетно уске толеранције и за резултат имати неекономичне трошкове производње.

Статистичко толерисање дозвољава не-савршену прилагодљивост (мање од 100% приноса), омогућавајући додељеним толеранцијама да буду блаже и смање трошкове производње. С тим у вези, јер је економичније у погледу производних трошкова, статистичко толерисање се обично примењује за масовну производњу [72].

Неизвесна квантификација (*uncertainty quantification*) представља процес утврђивања пробабилистичких (вероватних, могућих) ефеката, улазних параметара неизвесности на одговарајућој метрици од интереса у стохастичким (на основу случајних појава) системима.

Шема толерисања представља метод дефинисања дозвољене границе одступања параметара дела или склопа. У употреби су две шеме толерисања: димензионално толерисање (*DT*) и геометријско димензионисање и толерисање (*GD&T*), о којима је било речи у поглављу 2.

3.2 Моделирање и презентација геометријских толеранција

Интеграција интелигентних захтева пројектовања у производњу, монтажу и мерење, подразумева да је информација о толеранцији на рачунару читљива. Ово није лак задатак, јер је геометријска информација о толеранцији изражена симболичким језиком, који користи различите симболе и текст. Вођена индустријском потребом и напредком рачунарства, актуелна истраживања су фокусирана на моделирању и презентацији информације о толеранцији, како би произвела геометријске толеранције читљиве од стране рачунара. Моделирање и презентација геометријских толеранција представља истраживање које се може класификовати у зависни и независни систем [73]. Ова класификација се заснива на томе да ли се моделирање толеранције одвија унутар или ван окружења геометријског моделирања. Сходно томе, техника презентације која ће се користити, зависиће од геометријског моделирања и презентације. Чврсти (солид) модели могу бити засновани на имплицитном (непроцењивом) облику, као што су презентација конструктивне геометрије солида (*Constructive Solid Geometry - CSG*) или гранична презентација (*B-rep*). Док *CSG* изражава солид објекат симболично, користећи неке основне примитиве и Булове операције, *B-rep* користи топологију и структуру темена, ивица и површина да представи површину. Алгоритми за ове технике су углавном развијени у циљу израде математичке презентације солид модела и они су мање примењиви на представљању функционалних захтева, за које се геометријске толеранције залажу. Међутим, поједини истраживачи су покушали да уграде информације о геометријској толеранцији у геометријску презентацију која користи *CSG* [74], *B-rep* презентације модела [75] и хибридне *B-rep/CSG* презентације [7]. *B-rep* модели представљају објекат експлицитно и на тај начин пружају добру визуелизацију геометрије. С друге стране, *CSG* модели садрже информације о моделу у непроцењивој форми, тако добра визуелизација захтева процену форме у експлицитним теменима, ивицама и површинама. Хибридна *B-rep/CSG* презентација је фаворизирана у савременим *CAD* системима, како би се искористиле обе презентације.

Међу предложеним математичким алгоритмима за утврђивање математичке основе презентације толеранција, у употреби су приступ заснован на израчунавању геометрије (*computational geometry based*) [76, 77], метод променљиве геометрије (*variational geometry method*) [7, 78] и презентација заснована на графикону (*graph-based*) [75, 79].

Многи параметри геометријске толеранције укључују додатне спецификационе услове на цртежима, на графикону заснована и репрезентација променљиве геометрије, очигледно резултирају компликованим алгоритмама. На графикону засновани алгоритми, за комплексне геометрије и производне склопове са много делова, дају прилично незамисливу мрежу графикона. *Roу* и *Li* [80] су проучавали изазове укључивања геометријских толеранција у напредку *CAD* процеса и како би се аутоматизовао пренос захтева пројектовања, указали су да комплетан систем толеранције треба да:

- буде компатибилан са тренутним системом солид моделирања,
- представља стандардну праксу толеранције и
- подржи аутоматизовану анализу и синтезу толеранције.

Променљива геометрија је прикладнија у односу на постојеће системе моделирања солида. Она омогућава промену граничне површине површинског модела унутар спецификоване зоне толеранције. С друге стране, постојећи *CAD* системи немају способност да направе аутоматизовану анализу толеранције, већ само на нивоу саветовања пројектанта о правилној употреби толеранцијских симбола и услова примене.

Моделирање толеранције подразумева моделирање односа између информација дозвољеног одступања толерисаних елемената дела и њихове утицаје на функционалност склопа. Однос извучен из модела толеранције представља одговарајућу функцију склопа (*assembly response function*).

Развијени су разни приступи моделирању толеранције који нуде различите нивое софистицираности и могућности. Моделирање толеранција се обично постиже употребом *CAT* алата. Најчешћи типови моделирања толеранције у употреби код *CAT* алата данас су:

- мануелни графикони толеранције [4, 5],
- параметарско *CAT* [6, 7],
- *CAT* изведеном геометријом [8, 9] и
- мулти-варијантни региони [10, 11, 12].

Ове методе нуде различите нивое примене општег процеса анализе толеранције. Са напредком *CAD* моделирања солида, акценат је стављен на развој метода моделирања толеранције који садрже информације о толеранцији као суштински део *CAD* процеса пројектовања. Предложен је већи број различитих приступа моделирања толеранције, међутим било је мало консензуса према стандардном приступу у овој области. Истраживачки напори у овој области се настављају [72]. Поређење приступа моделирању толеранције приказано је у табели 3.1.

Табела 3.1. Поређење различитих метода моделирања толеранције [82]

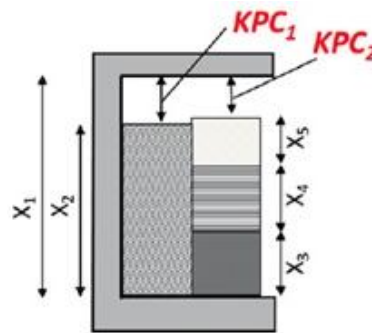
	Подржавање <i>GD&T</i> стандарда	Шема толерисања	Интегрисање са спољњим <i>CAE</i> алатима	Начин одређивања приноса	Ниво аутоматизације
Графикони толеранције	Комплетно	Димензионално Геометријско	Ограничено	Најгори случај	Мануелан
Параметарско <i>CAT</i>	Делимично	Димензионално Геометријско	Ограничено	Најгори случај Статистички	Аутоматизован
<i>CAT</i> изведеном геометријом	Делимично	Димензионално Геометријско	Ограничено	Најгори случај Статистички	Аутоматизован
Мулти-варијантни региони	Комплетно	Димензионално Геометријско	Ограничено	Најгори случај Статистички	Аутоматизован

3.2.1 Моделирање толеранције мануелним графиконима

Мануелни графикони толеранције (*manual tolerance charts*) су и основни системи анализе толеранције. Метода се такође назива линеарна *stack-up* анализа, што је мануелна *worst-case* процедура, базирана на обрачунању екстремних вредности зазора или преклопа од интереса у склопу (то су обично *KPC*). Референтни координатни систем успоставља се на углу склопа а анализирана димензија зазора или преклопа (*KPC*), одређује аритметички збир појединачних величина толерисаних елемената дела који чине склоп. Графикон толеранције је табела у којој се врши аритметичко сабирање. На слици 3.1 дат је приказ једноставног склопа са два зазора као *KPC* са свим параметрима од X_1 до X_5 са димензионалном толеранцијом од $\pm 0,1$ mm. Одговарајући графикон толеранције приказан је у табели 3.2. Графикон садржи назив параметра, одговарајуће горње или доње спецификационе границе, разлику између горње и доње спецификационе границе и знак којим се параметри додају у склоп *KPC*. Резултујуће вредности склопа *KPC* су приказане у доњем реду где (+) указује да добијена вредност даје зазор, док (-) значи да је резултат преклоп. Одговарајуће функције склопа се одређују преко израза:

$$KPC_1 = f(X_1, X_2) = X_1 - X_2$$

$$KPC_2 = f(X_1, X_3, X_4, X_5) = X_1 - X_3 - X_4 - X_5$$



Слика 3.1. Моделирање механичког склопа методом мануелног графикона [78]

Мануелни графикон толеранције је свеобухватно основан у оквиру толерисане заједнице и добро је покривен у литератури [4, 5]. Метод се лако имплементира али ограничен је на *worst-case* анализу толеранције и једноставне склопове за које се може експлицитно дефинисати функција склопа [83].

Табела 3.2. График толеранције за пример једноставног склопа са слике 3.1.

	<i>KPC</i> ₁					<i>KPC</i> ₂				
	Max		Min		Разлика	Max		Min		Разлика
	USL/LSL	Знак	USL/LSL	Знак		USL/LSL	Знак	USL/LSL	Знак	
X_1	40,1	+	39,9	+	0,2	40,1	+	39,9	+	0,2
X_2	36,9	-	37,1	-	0,2					
X_3						12,9	-	13,1	-	0,2
X_4						13,9	-	14,1	-	0,2
X_5						10,9	-	11,1	-	0,2
Σ	3,2	+	2,8	+	0,4	2,4	+	1,6	+	0,8

3.2.2 Параметарско моделирање толеранције

У параметарском, на *CAD*-у заснованом, рачунаром подржаном толерисању (*Parametric CAD based CAT*), за моделирање толеранције користе се једначине ограничења, својствене *CAD* моделима делова и склопова. Приступ моделирању у типичном *CAD*

софтверу се заснива на историји. Тродимензионални геометријски модели солида су креирани из дводимензионалних скица, које су предмет тродимензионалних операција као што су *extrusion*, *sweep* и *loft*. Ако нека димензија дела треба да буде промењена, модел се враћа на релевантну тачку промене (као што је скица), односи или димензије се ажурирају и накнадне операције се понављају у серијама [84, 85].

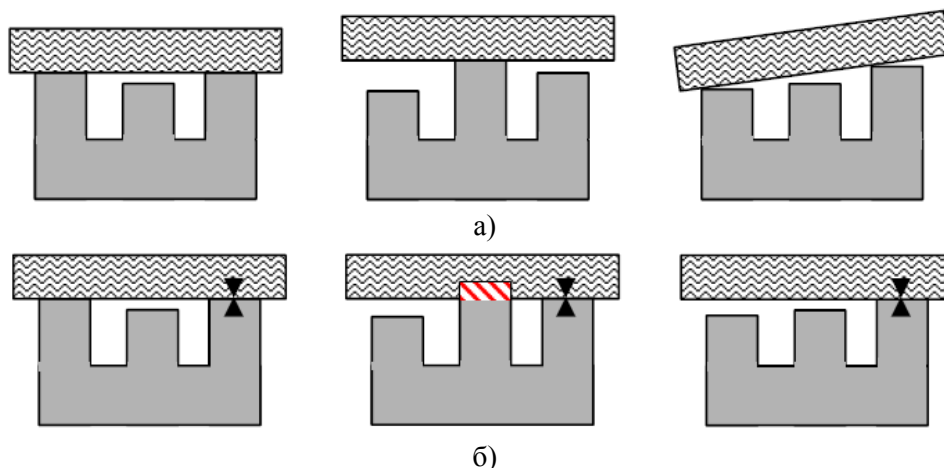
CAD склопови су дефинисани са више *CAD* делова чија је интеракција ограничена ограничењем степена слободе између делова. Ако се било која геометрија дела модификује, ограничења склопа се поново процењују како би се поново израдио модел склопа. Димензије, односи и операције могу се параметарски дефинисати, обезбеђујући средства за спровођење анализе толеранције, мењањем појединачних димензија, било у *worst-case* или статистичком приступу.

Параметарско на *CAD*-у базирано моделирање, може се применити за моделирање и анализу толеранције уз следећу методологију [81]:

- 1) Креирање номиналне топологије модела делова из *2D* скица и *3D* конструкцијских операција. Топологија модела мора да обухвати све жељене геометријске елементе и њихове могуће варијанте, услед било каквих повезаних толеранција;
- 2) Формулисање параметарских односа који повезују геометријске елементе модела дела са нумеричким параметарским променљивама;
- 3) Дефинисање склопа из појединачних модела делова са параметарским интерактивним односима између толерисаних елемената дела. Интерактивне односе ограничава степен слободе између делова са контактом, *offset*-а или ограничења поравнања. Све толеранције склопа треба да буду прилагођене интерактивним параметарским односима, који дозвољавају могуће варијанте у конфигурацији склопа услед свих повезаних толеранција;
- 4) Примена номиналних вредности за све параметарске променљиве;
- 5) Давање инструкција *CAD* софтверу система за моделирања за примену општег поступка, решење за параметарске једначине модела дела и склопа, које резултирају у обрађени модел у коме су дефинисани односи задовољени и
- 6) Креирање варијантних модела и склопова променом вредности параметарских варијабли, да би се одржале варијације у вези са постојећим толеранцијама и поступком накнадног реизвршавање решења модела.

Идеализоване ограничене могућности *CAD* моделирања обезбеђују прихватљиву репрезентацију склопа производа у многим случајевима. Међутим, комбинацијама параметара може се десити да није лако представити реалне услове спаривања (*mate*) за дати сет ограничења склопа [62]. На пример, карактеристике које номинално резултирају зазором могу се преклопити услед геометријске варијације (слика 3.2), реална интеракција делова приказана је на слици 3.2-а, док је интеракција делова представљена *CAD* ограничењима склопа приказана на слици 3.2-б.

За правилан модел оваквог сценарија на аутоматизован начин, неопходно је да се прилагоди наизменичан контакт дела. Такве могућности можда неће бити доступне у оквиру текућег *CAD* софтвера на аутоматски начин. Алтернативна ограничења склопа које ће моћи да прикажу различите сценарије контакта можда ће морати да се дефинишу и селективно, што је могуће кроз корисничке уносе, у зависности од *KPC* на основу анализе [85, 86, 87]. Са таквим корисничким уносом могуће је избећи преклапање дела и нереалну заступљеност физичке интеракције.



Слика 3.2. Промена услова контакта склопа услед производне варијације делова [82]

Осим тога, параметарски *CAD* приступ моделирања толеранције подлеже следећим ограничењима:

- статистичка анализа толеранција може да захтева разматрање великог броја пермутација модела. Због своје, на историји засноване природе, статистичка анализа толеранција параметарских *CAD* модела може бити рачунски скупа,
- ограничења склопа *CAD* система су обично на принципу тачка-по-тачка (*point-to-point*) ограничења. То их чини у супротности са важећим стандардима толеранције, који су засновани на зонама толеранције, а не на *point-to-point* варијацији и
- поједини облици геометријске варијације дефинисани су у *GD&T* стандардима и није их лако прилагодити користећи параметарске *CAD* моделе и још увек се развијају [88].

Упркос идентификованим ограничењима, параметарско *CAD* моделирање толеранције има предности које га чине атрактивним обликом моделирања толеранције, поготово када се разматрају спојеви под оптерећењем.

3.2.3 Моделирање толеранције изведеном геометријом и мулти-варијантим регионима

У системима *CAT* изведеном геометријом (*abstracted geometry CAT*), развијен је независтан геометријски модел који треба да ублажи ограничења параметарског *CAD* приступа, посебно у рачунском на историји заснованом ажурирању *CAD* модела. Приступ укључује кориснички увоз *CAD* модела у *CAT* систем и интерактивно креирање геометрије модела суперпонираног на оригиналним *CAD* подацима. Овај изведени модел описује могуће одступање дела, односе упаривања дела и резултујуће функције одзива склопа, без поновне грешке код израде модела с обзиром на историју креирања *CAD* модела [81, 88, 89].

Један од примера изведене геометрије моделирања толеранције представљају технолошки и тополошки повезане површине (*Technologically and Topologically Related Surfaces - TTRS*) [90]. *TTRS* се заснива на концепту парова површина, повезаних заједничким солидом, које су функционално повезане са склопом. Интеракције између површина различитих солида се користе за моделирање различитих врста толеранције. Приступ класификује различите могуће интеракције са неколико различитих типова површина и *TTRS* асоцијације (релативне могућности позиција површина). Зоне толеранција креиране одговарајућим површинама су представљене као матрице [91,

92]. *CAT* алат базиран на основу *TTRS* метода је развијен, међутим, његова применљивост је ограничена на специфичне сценарије за моделирање толеранција [93].

Толерисање векторском петљом (*vector-loop*) је још један пример методе моделирања толерисања изведеном геометријом [8, 9]. Приступ представља димензије дела и зазоре између толерисаних елемената дела унутар склопа у векторском запису. Толеранције се представљају варијацијом у векторској величини. Односи ослањања између делова су дефинисани коришћењем односа на основу тродимензионалних кинематских спојева. Ови спојеви дефинишу степен слободе с обзиром на интеракцију са делом. Одговарајућа функција склопа је аналитички описана разматрањем акумулације релација кинематског споја између вектора - ове одговарајуће функције се називају векторске петље. Предности овог приступа у поређењу са параметарским *CAT* моделирањем толеранција, су смањени трошкови рачунања у вези са ажурирањем геометрије модела и проценом одговарајуће функције склопа. *CAT* софтверски алат *SETOL* [94] је изворно заснован на моделу толерисања векторском петљом. Међутим, метод векторске петље дозвољава само један зазор склопа по вектору-петљи и има проблем у прилагођавању са пре-ограниченим склоповима. Ова ограничења спречавају применљивост ове методе у сложенијим сценаријима моделирања толеранције.

Остале, на изведеној геометрији засноване методе, развијене су за *CAT* анализу са заједничким циљевима смањења рачунских трошкова и проширења подршке за *GD&T* шеме толерисања [81]. Један од приступа представљен у литератури је *GapSpace* метод моделирања толеранције [95]. Метод разматра кинематику контаката склопа како би се утврдило да ли ће се делови уклопити без преклапања. У раду је наведена предност, посебно у односу на параметарско на *CAD*-у засновано моделирање толеранције, кроз прецизан модел који омогућава наизменичну интеракцију са делом и могућност да реално представи физичке интеракције између склопљених делова [96]. Међутим, напори да се поступак спроведе у софтверски алат, који нуди свеобухватну компатибилност са постојећим *CAD* софтвером за моделирање још су у току [97].

Још један алтернативни приступ моделирања толеранције који је развијен је *Attribute Graph* модел. Метод је на графикону заснован изведен *CAT* приступом, уз посебно разматрање линеарног и угаоног одступања и класификацију могућег одступања са изведеним степенима слободе између тачака, линија и равни [98]. Модел није доживео битне практичне примене, док су се аутори фокусирали на развој алтернативног модела на основу хипотетичког одступања запремина (*hypothetical variation volumes*).

Методе изведене геометрије, претходно поменуте, су углавном засноване на тачки (*point-based*) чије одступање геометрије дела је прилагођено само конкретно дефинисаним локацијама тачака. Због *point-based* природе, тешко је прилагодити све могуће аспекте одступања дефинисане *GD&T* стандардима [62].

Да би се решила ограничења моделирања толеранције на бази тачке, истраживања су усмерена на развоју свеобухватне математичке шеме, која представља све могуће облике одступања дефинисаних у *GD&T* стандардима, без стварања опција затворене форме. Методе у овој области су генерално класификоване као моделирање толеранције мулти-варијантним регионима. Најзначајнији од ових приступа је метод *T-taps*, који користи хипотетичка одступања запремина свих могућих локација и одступања која могу настати на делу изложеном *GD&T* типовима толеранција [10, 62, 99]. Преклапање *T-taps* индивидуалног дела омогућава да одговарајућа функција склопа буде дефинисана. Међутим, метод још увек није спроведен практично на лако доступном *CAT* софтверском алату.

Упркос многим развијеним методама, моделирања изведеном геометријом деле следећа ограничења:

- од модела изведеном геометријом тражи се да створи додатну експертизу, алате и време као и тумачење резултата анализе и
- тренутне методе моделирања толеранције изведеном геометријом нису у стању да се интегришу у спољним *CAE* алатима, за моделирање толеранције склопа изложеног оптерећењу.

3.3 Алати за рачунаром подржано толерисање

Бројни доступни комерцијални алати за толерисање помоћу рачунара (*CAT*), који се користе у анализи и синтези толеранција, могу бити независни софтверски пакети, или чешће, интегрисани са популарним комерцијалним *CAD* системима [100]. У доступне алате спадају:

- *CETOL (Sigmatrix)*,
- *eM-TolMate (Tecnomatix)*,
- *VisVSA (UGS)*,
- *3DCS (Dimensional control systems)*,
- *Mechanical Advantage (Cognition software)*,
- *TolAnalyst (Solidworks - Dassault Systemes)* и
- *CATIA.3D FDT (CATIA - Dassault Systemes)*.

Поједини алати су засновани на методама моделирања толеранције раније дискутованим. На пример, *CETOL* је првобитно урађен на основу методе *vector-loop*, док је *CATIA.3D FDT*, заснована на *TTRS* моделу. Међутим, тешко је разазнати у свим случајевима које се методе примењују, због власничке природе ових комерцијалних алата. Ипак у представљању толеранције одступања, већина *CAT* алата користи независан модел, изведен из основног *CAD* модела. Типичан приступ *CAT* софтвера за моделирање, анализу и синтезу толеранције укључује [81]:

- 1) Дефинисање *CAD* модела за сваки део склопа производа;
- 2) Увоз *CAD* модела у *CAT* систем и интерактивно стварање геометрије, за моделирање толеранције над оригиналним *CAD* подацима;
- 3) Спецификација типова толеранције за елементе од интереса на сваком делу у склопу;
- 4) Дефинисање релација између делова који чине склоп, као што су секвенце монтаже и услови упаривања;
- 5) Спецификација *KPC* (нпр. зазора склопа) који морају да се испуне како би се испунили захтеви пројекта;
- 6) Симулација ефекта толеранција дела на *KPC*, користећи стохастички или *worst-case* приступ анализе толеранције;
- 7) Снимање резултата попут приноса и одговарајућег трошка толеранције;
- 8) Могућност анализе осетљивости приликом одређивања најугрожаванијих делова толеранције, који доприносе одступању *KPC* у склопу и
- 9) Након тога, на основу резултата анализе и способности *CAT* алата, врши се прерасподела толеранција на елементе дела за циљано укупно дозвољено одступање *KPC*. Расподела се може урадити ручно или аутоматизовано, кроз синтезу толеранције, у циљу максималног повећања приноса и/или минимизирања трошка толеранције. Трошкови производње повезани са

одређеном толеранцијом се обично користе да предвиде функције трошкова толеранције.

Бројни упоредни прегледи и истраживања *CAT* система представљени су у литератури. Почетни радови фокусирани су на ограничења дводимензионалних геометријских могућности тадашњих савремених система [101]. Други прегледни радови били су фокусирани на *CAT* алатима и развијани су из истраживачке перспективе [102]. У неколико новијих прегледа, нуди се детаљнији преглед природе савремених комерцијалних *CAT* алата [62, 81, 88, 89, 103, 104]. Практично, свеобухватан преглед најпопуларнијих *CAT* алата навео је одређени број заједничких способности, као и недостатке [81]. Табела 3.3 представља сумиране резултате. Примећена ограничења алата су обележена подебљано.

Табела 3.3. Поређење комерцијалних *CAT* алата [82]

	Комерцијални <i>CAT</i> софтверски алат			
	<i>CETOL</i>	<i>eM-TolMate</i>	<i>VisVSA</i>	<i>3DCS</i>
Шема толерисања				
Димензионална	Да	Да	Да	Да
<i>GD&T</i>	Да	Да	Да	Да
Аутоматска употреба <i>CAD</i> модела дефинисаног <i>GD&T</i> подацима	Не	Не	Не	Не
Анализа толеранције				
Најгори случај	Да	Да	Да	Да
Статистички	Да	Да	Да	Да
Сензитивна анализа	Да	Да	Да	Да
Метод одређивања неизвесности				
Монте Карло	Да	Да	Да	Да
Аналитичка (напредна)	Не	Не	Не	Не
Могућност синтезе толеранције				
Могућност синтезе	Да	Да	Да	Да
Мулти-објективна оптимизација	Ограничена	Ограничена	Ограничена	Ограничена
Могућност поједностављања				
Круто тело	Да	Да	Да	Делимично
Ограниченост величине одступања	Да	Не	Не	Не
Интегрисање				
Компатибилни <i>CAD</i> алати	<i>SolidWorks Pro/E</i>	<i>CATIA, NX Ideas, Pro/E, NX</i>	Операције ван <i>CAD</i> окужења на преносу модела. STEP, IGES	<i>CATIA, Unigraphics, STEP, IGES</i>
Дељење/паралелно рачунање	Не	Не	Не	Не
Интеграција са спољашњим алатима за <i>CAE</i> моделирање	Не	Не	Не	Не
Прилагодивост оптерећењима склопа	Не	Не	Не	Ограничена (компатибилан у режиму <i>sheet metal assemblies</i>)

Упркос широким могућностима комерцијалних *CAT* система, остала су нека истакнута ограничења (табела 3.3). На пример:

- *GD&T* подаци дефинисани *CAD* моделом нису у стању да се аутоматски увезу у *CAT* систем, због ограничења са преводиоцем стандарда *CAD* геометрије као што су STEP или IGES (ISO 2002),
- ниједан од тренутно доступних алата не нуди дистрибуиране/паралелне могућности, које могу понудити краће време анализе, делећи симулацију преко више рачунара и
- проблеми са недостатком способности прилагођавања општој анализи и синтези толеранције склопова под оптерећењем.

3.4 Спецификација, додела и анализа геометријских толеранција

Проблем поступка генерисања спецификација толеранција из података о производу је нетривијалан из разлога усвајања све већег геометријског критеријума димензионисања који позивају на коришћење многих врста геометријских толеранција, које у потпуности и недвосмислено представљају захтеве пројектовања и многа ограничења која произилазе из производних, монтажних и мерних процеса. Сва ова питања морају бити моделирана и изричито дефинисана у генеративном спецификацијском поступку, што може захтевати велику количину улазних података.

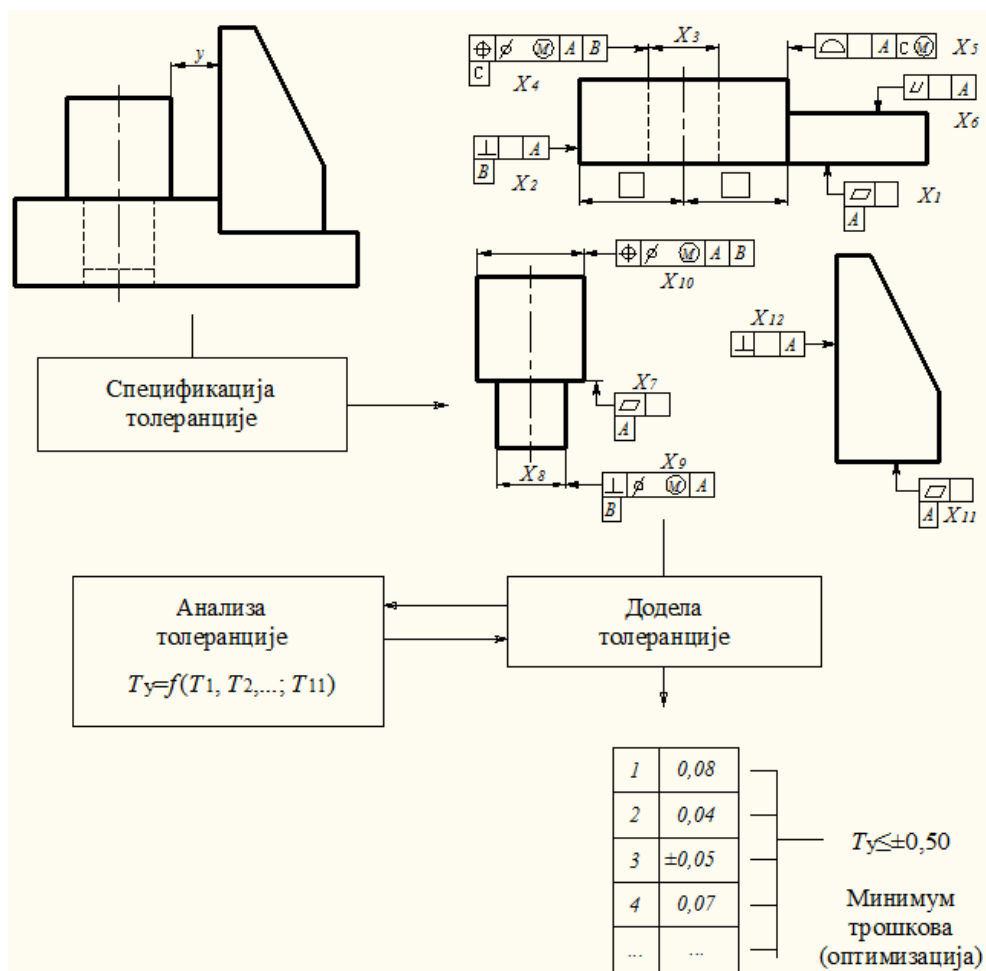
Начин спецификовања толеранција на индустријским производима се прогресивно променио током последње две деценије. У традиционалној пракси, ограничења дозвољеног одступања су једноставно додељивана димензијама које се сматрају критичним за налагање и функцију (линеарно толерисање). Ово више није довољно, јер је појава геометријског димензионисања и толерисања (*GD&T*) донела идеју да толерисани елементи дела треба да буду контролисани са више различитих геометријских карактеристика (величина, облик, правац, место, профил, тачност обртања). Како се питања превазилажења нејасноћа, непотпуности и неефикасности јављају код линеарних толеранција, овај приступ приморава пројектанта да се упозна са сложеним стандардима толеранције и да буде у стању да их примени на разноврсним случајевима пројектовања. Стога су главни задаци које извршавају *CAT* алати [105]:

- спецификација толеранције (*tolerance specification*), која представља избор типова толеранција за функционалне елементе и оквир референтног елемента за сваки део,
- додела толеранције (*tolerance allocation*): вредности свих спецификованих толеранција утврђују се било дорадом емпиријски могуће граничне вредности или оптимизацијом, у складу са функцијама трошкова толеранције и
- анализа толеранције (*tolerance analysis*): процењују се групне грешке дозвољене за изабране вредности толеранције и упоређују са захтевима пројекта (евентуално више пута у току поступка доделе).

До данас, постоји мало подршке за спецификацију и доделу толеранције, док су доступни софтверски алати за анализу толеранције у све већем броју *CAD* платформи.

Спецификација је мање проучавана од доделе и анализе, јер није била проблем код линеарног толерисања и заправо није повезана са геометријским приступом. Може се посматрати као карика која недостаје у ланцу толерисања, који предвиђа два надолазећа задатка за правилан и потпун геометријски опис захтева за пројектовање у *GD&T* језику.

Спецификација, додела и анализа толеранције кроз пример приказане су на слици 3.3.



Слика 3.3. Задаци укључени у геометријско толерисање САТ алата [105]

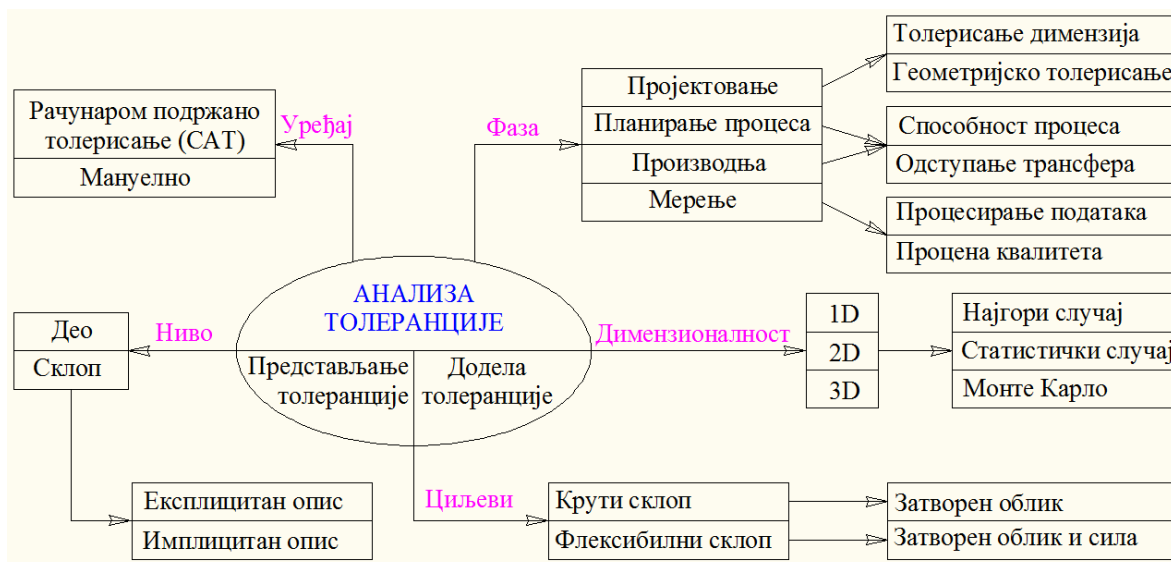
3.5 Анализа 3D геометријских толеранција

Како су нове генерације стандарда о толерисању, ASME Y14.5-2009 и ISO 1101-2012 издате и популаризоване, геометријске толеранције су опште прихваћене као индустријска пракса. Традиционални $1/2D$ модели анализе толеранције су недовољни да задовоље све строжије и све комплексније захтеве анализе толеранције у разним областима [72]. Прецизније, одступања елемената изазвана геометријским толеранцијама су тродимензионална и не могу се разматрати $1/2D$ методама. $3D$ методе анализе толеранције нуде значајан кључ за разумевање улоге толеранције сваког дела у смислу одступања.

Тродимензионална ($3D$) анализа толеранција је иновативна метода која презентује и преноси толеранције у $3D$ простор. Предност $3D$ метода узима у обзир и димензионалне и геометријске толеранције, у поређењу са традиционалним $1/2D$ методама толеранције, које разматрају само димензионалне толеранције [106].

Циљ анализе толеранције је да провери изводљивост (*feasibility*) и квалитет склопова или делова за дату $GD\&T$ шему. Резултати анализе толеранције укључују најгори случај одступања и статистичку расподелу функционалних захтева, стопе прихватања, доприносе и њихов проценат и коефицијенте осетљивости у односу на један допринос. Анализа толеранција је суштински део механичког пројекта и производње јер утиче не само на перформансе, већ и на трошкове производа.

Према *Chen*-у [106] анализа толеранције узима у обзир представљање (*representation*) и доделу (*propagation*) толеранције (слика 3.4). Према димензионалности, постоје једнодимензионална (1D), дводимензионална (2D) и тродимензионална (3D) анализа толеранције. За 1/2/3D анализу толеранције примењују се три приступа, и то најгори случај (детерминистички случај), статистички случај и Монте Карло симулација. Крута и флексибилна анализа толеранције су два различита модела у свету циља анализе. Раније је постојала само на површини заснована (*surface-based*) анализа и потреба само за затвореним обликом, касније се јавља на тачки заснована (*point-based*) анализа и потреба за затвореним обликом и силом (оптерећењем) истовремено, где се користи метода коначних елемената (*Finite Element Method - FEM*) како би се узеле у обзир деформације [107]. Подела на нивоу дела (*part*) и нивоу склопа (*assembly*) је још једна класификација. Склоп и део се могу описати на основу функције склопа, експлицитно или имплицитно, у зависности од метода и секвенце склопа, као и особине компоненти [108]. Анализа толеранције пролази кроз цео процес производа, укључујући пројектовање, планирање процеса, производњу, мерење, али циљ може бити различит у свакој фази. Тако се бирају и спецификују шема толеранције, а затим се, у фази пројектовања, одвија анализа толеранције за функционални захтев.



Слика 3.4. Категорије анализе толеранције [106]

Током последњих тридесет година, велика количина фундаменталних истраживачких напора је дата на истраживању математичке основе за анализу толеранције. За репрезентацију толеранције, модели или концепти укључују геометрију одступања [109], класу одступања [110], виртуелну границу [111], простор изводљивости [112], векторски приступ [113], виртуелне спојеве [114], степен слободе [115], мапу толеранције [99], тополошки и технолошки повезане површине [92], бескрајну матрицу [116], матрицу [117], мала померања торзора [118] и пропорционалну величину зазора склопа [119]. Слично, за доделу толеранције, приступи или методе су метод линеаризације [120], система момената [121], индекса поузданости [122], *Taguchi* методе [123], Монте Карло симулације [124] итд. Важно је напоменути да је горе поменута подела на две категорије приближна и заснива се углавном на њиховој јакој прилагодљивости, јер не постоји граница између репрезентације толеранције и распоређивања за ове моделе, као што је *TTRS* [125].

Поглавље 4

КООРДИНАТНА МЕТРОЛОГИЈА И КООРДИНАТНЕ МЕРНЕ МАШИНЕ

Место и улога мерења и инспекције у индустрији се мењала сагласно развоју и увођењу нових технологија у технолошке системе. Са порастом сложености облика производа, геометрија производа постаје све компликованија за мерење и контролу. Због тога је потребно у контроли и мерењу примењивати таква мерна средства која су прецизна, брзо извршавају велики број операција мерења, а при том је њихова примена економски оправдана.

Током последње деценије напредак технологије хардвера и софтвера резултирао је машинама које су потенцијално способне за мерења високих прецизности, а координатна метрологија је постала есенцијална за индустријску димензионалну метрологију [13]. Координатна мерна машина (*Coordinate Measuring Machine - CMM*) је мерни уређај помоћу кога се врши мерење координата у простору на површинама дела који се мери. Својом хардверском и софтверском структуром оне представљају флексибилне метролошке модуле, који омогућавају формирање сложених технолошких и/или метролошких структура. Аутоматизација мерења, манипулација мерним сензорима, деловима који се мере, добијање различитих мерних протокола, повезивање са софтвером по хоризонтали и вертикали (*CAD-CAM-CAI*), врши се на бази софтверске подршке.

4.1 Основни термини у индустријским мерењима

Мерење представља процес експерименталног добијања једне или више вредности које се разумно могу приписати количини нечега [126].

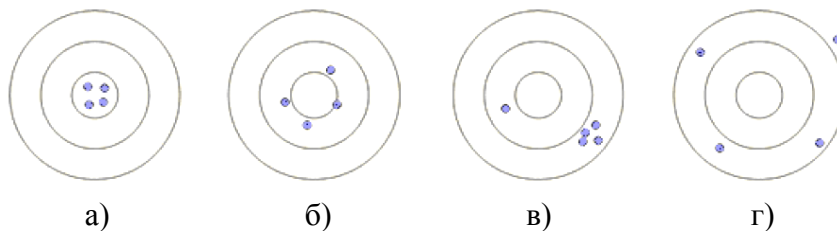
Према *GUM (Guide to the Expression of Uncertainty in Measurement)* [127] „несигурност“ је сумња у резултат, док је мерна несигурност параметар који карактерише расипање

вредности мерене величине и приписује се резултату мерења, док стабилност представља способност мерила да одржава своје мерне карактеристике сталним у времену.

Два најважнија термина помоћу којих се верификује мерна несигурност, стабилност и поновљивост поступка мерења су тачност и прецизност.

Тачност мерења (ISO 5725:1994) [128] представља степен сагласности резултата мерења и усвојене референтне вредности. Тачност уређаја за мерење представља његову способност да даје резултате мерења који су блиски правој вредности која је предмет мерења. Тачност треба разликовати од прецизности.

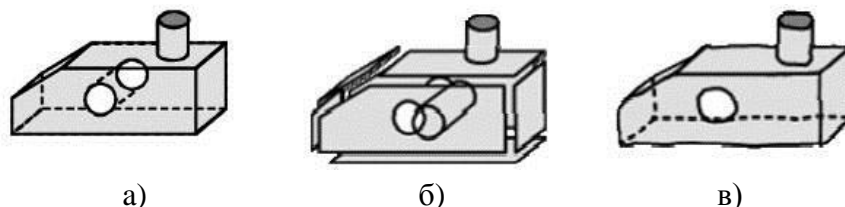
Прецизност (ISO 5725:1994) мерног система, звана репродуцибилност или поновљивост, јесте степен у којем поновна мерења под непромењеним условима показују исти резултат. Основни показатељ прецизности је стандардна девијација резултата вишеструко поновљене процедуре мерења, што значи да је стандардна девијација статистичка мера поновљивости резултата мерења. Разлика између прецизности и тачности приказана је на слици 4.1.



Слика 4.1. а) Тачно и прецизно, б) тачно и непрецизно, в) нетачно и прецизно, г) нетачно и непрецизно [128]

Најчешћа функција индустријске метрологије, без обзира којим се средствима мерења користила, јесте одређивање одступања стварног дела од пројектованог (идеалног). Одступања се јављају у погледу димензионалних карактеристика, облика и положаја.

Облик дела може се описати својим типским елементима (*features*), деловима који садрже истородне површине и просторним положајем једних елемената у односу на друге. Тако, спецификована, односно захтевана геометрија дефинише идеални облик дела што је прва карактеристика дела. Такав облик се представља пројектовањем производа (и геометријским цртежом) и тежи направити у производњи. Производњом се не добија део жељених димензија и облика, што је последица деловања различитих утицаја. Добијени део има актуелну (реалну) геометрију (друга карактеристика), што је последица свих утицаја који су се јавили, од пројектовања до израде дела. Разлика стварне-актуелне геометрије и жељене геометрије представља девијацију (одступање) што чини трећу карактеристику дела. Карактеристике дела приказане су на слици 4.2.



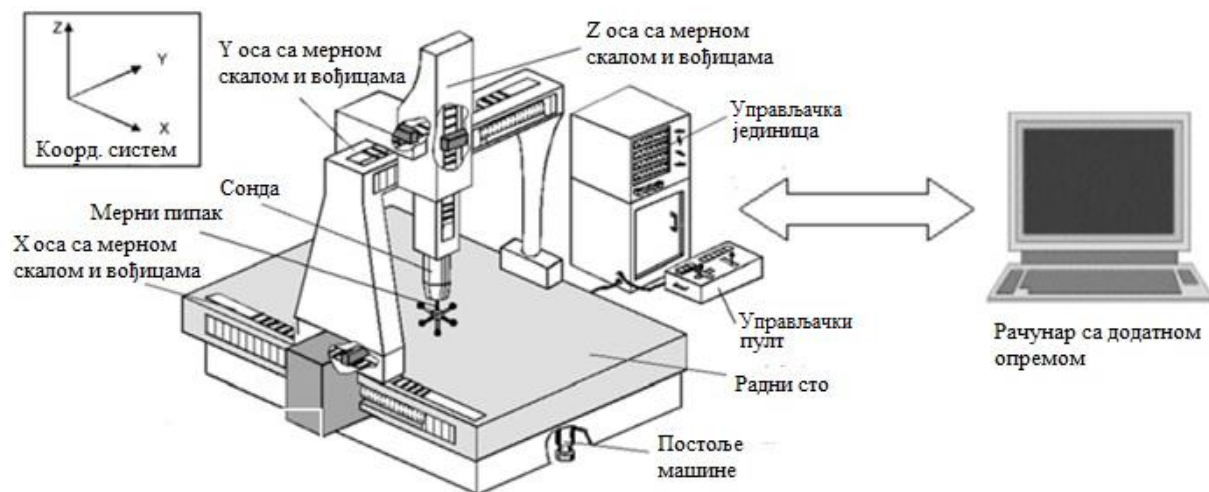
Слика 4.2. Карактеристике дела, а) идеални облик, б) део подељен на типске елементе и в) реалан облик [129]

За време мерења код координатне метрологије, стварна геометрија се описује стварним, појединачним тачкама које леже на површини дела.

4.2 Координате мерне машине

Координатне мерне машине (*СММ*) представљају мерни системи који се данас све више користе у производним погонима великих, али и малих производних предузећа. Помоћу њих је могуће симултано мерење координата истовремено у сва три правца. Координатна мерна машина користи Картезијев координатни систем.

Уобичајена конструкција машине састоји се од три међусобно управне вођице-осе означене са X , Y , Z (слика 4.3). Обично рам носи систем сонди којим се врши мерење и који садржи сензоре. Машина је постављена на постоље на коме је и погон машине. Прихватање дела врши се на плочи координатне мерне машине. Свака вођица има свој погон и систем за мерење и контролу кретања. Систем који контролише интеракцију између механичких делова координатне мерне машине представља управљачку јединицу.



Слика 4.3. Делови координатне мерне машине [129]

Свака конструкција координатне мерне машине састоји се од механичких склопова, погона, система за мерење дужина и система сонди и рачунара са периферним средствима за излаз резултата мерења. Зависно од типа машине постоје друга додатна средства као што су мобилни или ротирајући столови, механизми сонди, сензори температуре, механизми за причвршћавање и сл.

СММ могу бити сврстане у две групе: преносиве и стационарне. Преносиве (ручно вођене) *СММ*, које су обично стационарне на руци, су, како само име каже, лако преносиве и могу се пренети до дела који се мери, а не обрнуто као код стационарних. Оне су ручно управљане, и ниже тачности него стационарне. Коришћење преносивих *СММ*, захтева много мању обуку, могу се користити на веома великим деловима без потребе сложеног подешавања (слика 4.4-а). Преносива *СММ* је мале масе, има мерни систем сонде са могућношћу математичке корекције свих геометријских грешака, тј. мањих мерних несигурности (од 4 до 8 μm). Због коришћења специјалних керамика и фибром ојачаних пластика за израду скала машина, задржава се стабилност и неосетљивост и на температурама од 20-30 $^{\circ}\text{C}$.

Универзални типови стационарних координатних мерних машина (слика 4.4) су [130]:

- стубни тип,
- портални тип,
- хоризонтална рука и
- мосни тип.

Стубни тип *СММ* (слика 4.4-б) је намењен за мерење делова димензија које не прелазе $0,25 \text{ m}^3$. Тачност стубних координатних машина је висока, јер се кроз крутост и подешавање оса може постићи мала мерна несигурност (од $1 \mu\text{m}$). Подручје примене је у провери контролних алата и призматичних комада и комада облика вратила.

Портални тип је један од чешће коришћених типова, што покрива највећи број димензионално различитих комада, који се мере у производној метрологији (слика 4.4-в). Типични представник ове групе машина има могућност да мери запремину од 1 до 2 m^3 . Карактеристика овог типа је и велика крутост конструкције. Постоје две варијанте: а) носач сонде је мобилни склоп, а део је фиксиран на мерној плочи и б) мерна плоча је мобилна а део се за њу фиксира, док је носач непокретан и везан са основном структуром *СММ*. Подручје примене мерних машина порталног типа је за мерење делова и малих и средњих склопова машина и средстава у конструкцији возила.

СММ са хоризонталном руком (слика 4.4-г) има широку примену у аутомобилској индустрији. У овој конфигурацији, рука која подржава мерни инструмент је хоризонтална конзола са покретном вертикалном подршком. Доступна је и у дворукој конфигурацији, где је по једна рука постављене са обе стране дела који се мери, што двоструко скраћује поступак мерења. Оваква конструкција руке ограничава динамичку крутост машине што утиче на брзину и тачност мерења. Међутим, ова грешка се може компензовати корекцијом преко софтвера.



Слика 4.4. Типови координатних мерних машина [129]

Конструкција са покретним мостом намењена је за мерење великих објеката (слика 4.4-д). Ова *СММ* може мерити објекте у простору димензија до $16 \times 6 \times 4 \text{ m}^3$. Намењена је пре свега за мерење дугих возила и објеката, као што су велики алати за обликовање, авионске конструкције и компоненте турбо машина. Свака конструкција носи фиксни и

мобилни механички део. Средство које се користи као основа-база за мерење мора имати значајну крутост, осетљивост на вибрације и могућност да их минимизира што се постиже вибрационо изолационим лежајевима.

За делове координатне мерне машине користи се гранит, челик или челични лив. Сто машине је направљен од гранита. Гранит је тврђи, јефтинији и лакши, а има и нижи температурни коефицијент ширења у односу на челик, па су мање промене дужина.

Због слабе проводљивости адаптивност склопа *СММ* на промене температуре је добра, тако да нема ни деформација које су последица температуре. Да би се избегли утицаји краткотрајног деловања температуре на мерно средство, гранит се може заменити са алуминијумом. Са променом температуре, алуминијум мења своје димензије много више него камен, али због велике проводљивости деформације су му врло мале. Други материјали који се користе у координатној метрологији су керамике, јер имају нижи температурни коефицијент ширења као и композитни материјали чија је тежина мала, а висока стабилност. Што *СММ* има више компоненти, има и већу мерну несигурност. Свака компонента са собом носи и додатну мерну несигурност као што су вођице, лежајеви, погон мерног система и система сонде, итд.

СММ купују мала и средња предузећа, али и велике компаније. У средњим предузећима која имају флексибилну производњу *СММ* се користе у развоју и испитивању производа. Оне се употребљавају не само за контролу обраде делова добијених резањем, него и при другим технологијама израде делова. *СММ* се могу користити и у пријемном одељењу.

Координатне мерне машине треба да имају велики мерни опсег, средњу тачност и лакоћу руковања, што наравно треба посматрати заједно са ценом машине.

Перформансе *СММ* су предмет веома обимног истраживања и стандардизације, између осталих [14, 15, 16, 131]. *Hammad* и *Al-Ahmari* [132] наводе широко обухваћен преглед литературе, развоја и постојећег стања *СММ* у машинској индустрији.

За избор, ефикасан и поуздан рад *СММ* потребне су процедуре евалуације и верификације. Рад, конструкција и све што је везано за *СММ* дефинисано је стандардима серије ISO 10360:1999-2001:

- ISO 10360-1 (2000): *Vocabulary*,
- ISO 10360-2 (2001): *CMMs used for measuring size*,
- ISO 10360-3 (2000): *CMMs with the axis of a rotary table as the fourth axis*,
- ISO 10360-4 (2000): *CMMs used in scanning measuring mode*,
- ISO 10360-5 (2000): *CMMs using multiple-stylus probing system* и
- ISO 10360-6 (1999): *Estimation of errors in computing Gaussian associated features*.

Осе заједно са целокупном опремом намењеном за мерење дужине представљају системе за мерење дужине. Системи за мерење дужине обухватају носаче сонди и механизме који се постављају између мерених делова и система за додиривање, тј. сонди. За мерење се користе различити мерни системи, а најчешће индуктивни, оптоелектронски или ласерски. Мерни системи су директно одговорни за тачност *СММ*. Постављају се тако да показују величину у већој резолуцији него што је мерна несигурност *СММ*. Циљ мерних система је минимизирање одступања која настају при мерењу.

Компоненте механичке тачности мерних средстава су равност и управност вођица којима се означавају правци кретања мерног средства или референтног координатног система. За израду вођица се користе гранит или челик. Ваздушни лежајеви се користе

када су вођице израђене од камена или керамике. Вођице од керамике имају велику крутост, задовољавајуће термичке карактеристике, отпорност на корозију, високу отпорност на хабање. Антифрикцијски лежајеви се користе у случајевима када су вођице израђене од челика. Исто тако, антифрикцијски лежајеви могу носити велика оптерећења, а да се истовремено постигне и висока тачност мерења. Сви типови машина се покрећу погонима са електричним серво моторима. Контрола мотора врши се преко оперативног система путем контроле рада *СММ* или кроз контролне програме који се извршавају у рачунару мерне машине. Постоје различити преноси од погона до мобилног склопа као што су завојнице, зупчаници, фрикциони пренос и сл. Избор система преноса *СММ* зависи од цене и техничко-технолошких захтева као што су: крутост, динамичко понашање, хабање, толеранције итд.

4.3 Мерне сонде

Стандардом ISO 10360:2000, који се односи на координатну метрологију, дефинисан је термин који се користи за сензор, путем којег се остварује веза између површине мереног дела-објекта и мерног система за дужину. Користи се термин сонда (*probe*) што означава део који додирује, опипава део. Сонде које се користе код координатних мерних машина могу се поделити на:

- механичке (контактне) и
- оптичке (бесконтактне).

Многи мерни системи који се данас користе, раде са механичким, контактним сондама, док савремени системи у координатној метрологији раде на оптичким, бесконтактним принципима. Код механичких сонди остварује се физички контакт завршетка сензора, мерног пипка са делом. Мерни пипак (*stylus*) најчешће има лоптасти (сферни), а може имати различите облике као нпр: цилиндрични, конични, дискасти, шпицасти итд (слика 4.5-а). Лоптасти мерни пипак израђује се од рубина, стакла или челика и има високу отпорност на хабање, а његов пречник и просторни положај може се прецизно калибрисати. Да би се мерење убрзало може се више мерних пипака монтирати на једну сонду како би се мерење вршило у више праваца истовремено (слика 4.5-б).



а)



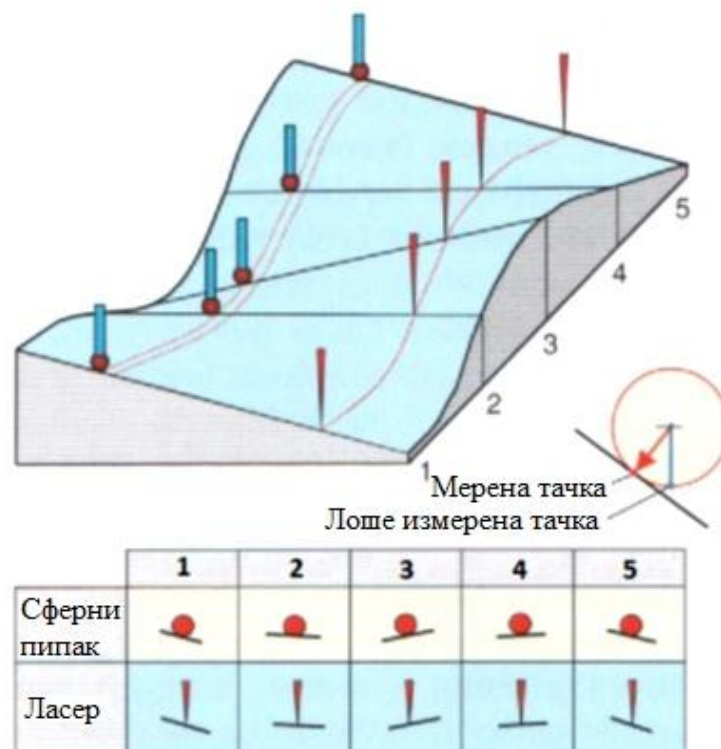
б)

Слика 4.5. Различити завршеци и постављање више мерних пипака на носачу сонде RENISHAW [133]

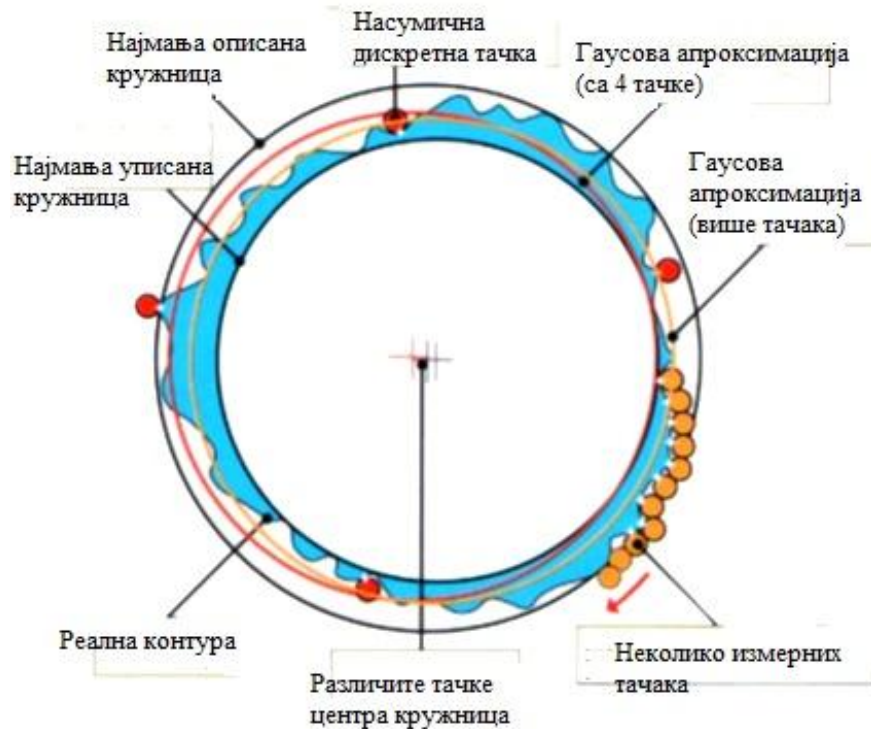
У зависности од принципа на ком врше мерење, сензори сонди могу бити контактни (са контактним окидачем и аналогни), контактано-оптички, контактано-оптички са сензором профила и ласерски.

4.3.1 Контактне сонде

Сензори контактних сонди функционишу на принципу механичког контакта мерног пипка са делом који се мери. Добијени сигнал се потом извлачи из тог контакта за даље процесирање. Са контактним сензором, геометрија (обично, облик и величина) облика мерног пипка (најчешће лопте), као и просторна позиција и геометријски облик површине елемента који се мери, саставни су део резултата мерења. Слика 4.6 приказује како се током контактног скенирања, позиција мерене тачке не може одредити без математичке корекције која се базира на познатим координатама тачке центра мерног пипка, за разлику од мерења ласерком сондом. Да би се спровела егзактна корекција, мерни пипак се мора пажљиво калибрисати. Даље, потребно је испитати већи број тачака било ког геометријског елемента који се мери. Ако се та корекција не изведе, резултујућа грешка ће бити зависна од пречника мерног пипка (што је пречник пипка мањи то ће грешка бити мања и обрнуто). Додатно, мерни пипак са великим пречником такође може направити утисак у површинској структури. Такво „механичко филтрирање“ може имати или пожељан ефект на мерни резултат или може резултирати „фалсификовањем“ резултата мерења. Утицај броја мерних тачака на резултате мерења приказан је на слици 4.7. Како *СММ* софтвери врше апроксимацију (најчешће Гаусову) мерних резултата, мањи број мерних тачака даће апроксимацију мање тачности.



Слика 4.6. Утицај облика мерног пипка при мерењу облик површина наспрам мерења ласерском сондом [134]

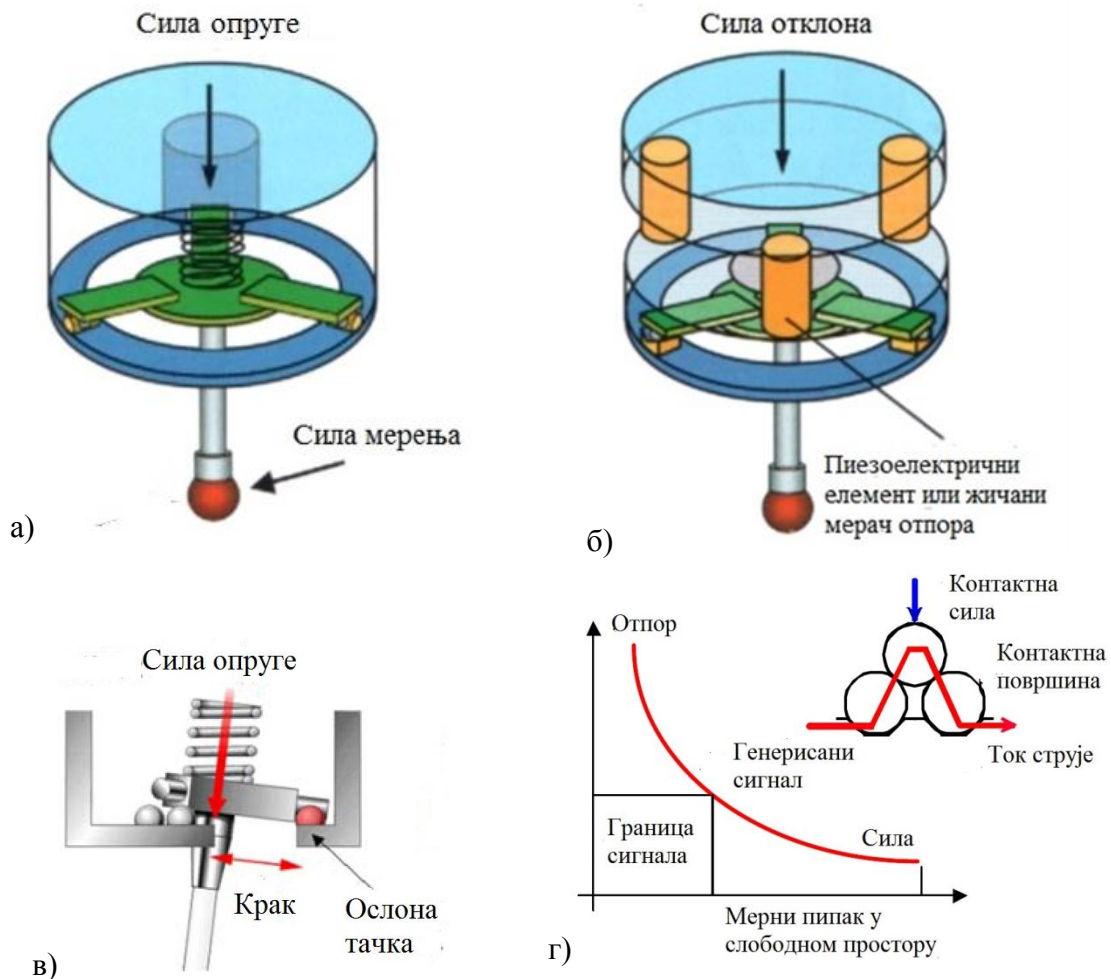


Слика 4.7. Утицај броја мерених тачака на мерни резултат [134]

4.3.1.1 Контактни сензори са контактним окидачем

Основна функција мерних система са контактним окидачем функционише на принципу “троношца” (слика 4.8-а). Ако мерни пипак дотакне мерени део, сигнал прекидача се генерише и шаље на исчитавање, систему скала координатног мерног уређаја. Измерена тачка је резултат координата мерног уређаја у односу на центар мерног пипка. Преко круте осовине, пипак на мерној игли-перу је спојен за лежај, учвршћен у три тачке, који има прекидаче на сваком од та три места. Ако се перо помери од заданог правца, најмање један од тих прекидача ће се активирати (слика 4.8-в). То се даље процесира као сигнал прекидача (слика 4.8-г). „Троноги“ лежај се помиче само након детекције мерне тачке. Главна мана тог система лежи у чињеници да промена силе испитивања у односу на смер испитивања, резултира извијањем са различитим фактором еластичности. То доводи до директних мерних одступања које је тешко кориговати.

Висококвалитетни мерни системи имају уграђене разне елементе за конверзију (нпр. пиезоелектрички елемент-мерач напрезања жичаним отпором), како би се механички сигнал претворио у електрички (слика 4.8-б). Електроника обезбеђује мерење које се изводи са веома малом мерном (контактном) силом, па је утицај сензора на мерну несигурност минималан. Чест недостатак код свих система са контактним окидачем је тај што се контактни елемент координатног мерног уређаја прво мора довести у контакт са мерним елементом, а касније се мора померити у супротну страну, како би се очитала тачка. Тако је потребно време испитивања у размаку од неколико секунди за сваку мерену тачку.



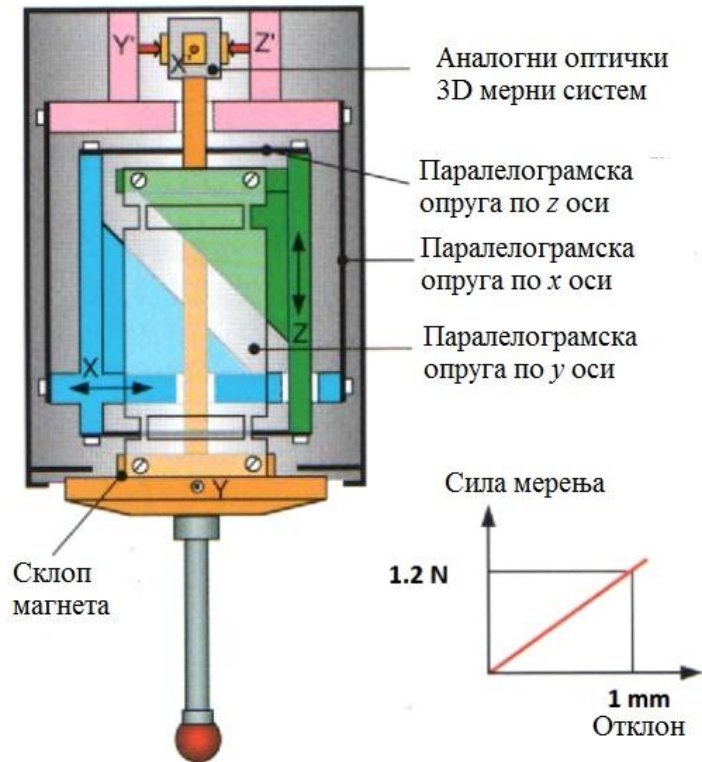
Слика 4.8. Принцип рада прекидача сонде са контактом [135]

4.3.1.2 Аналогни сензори

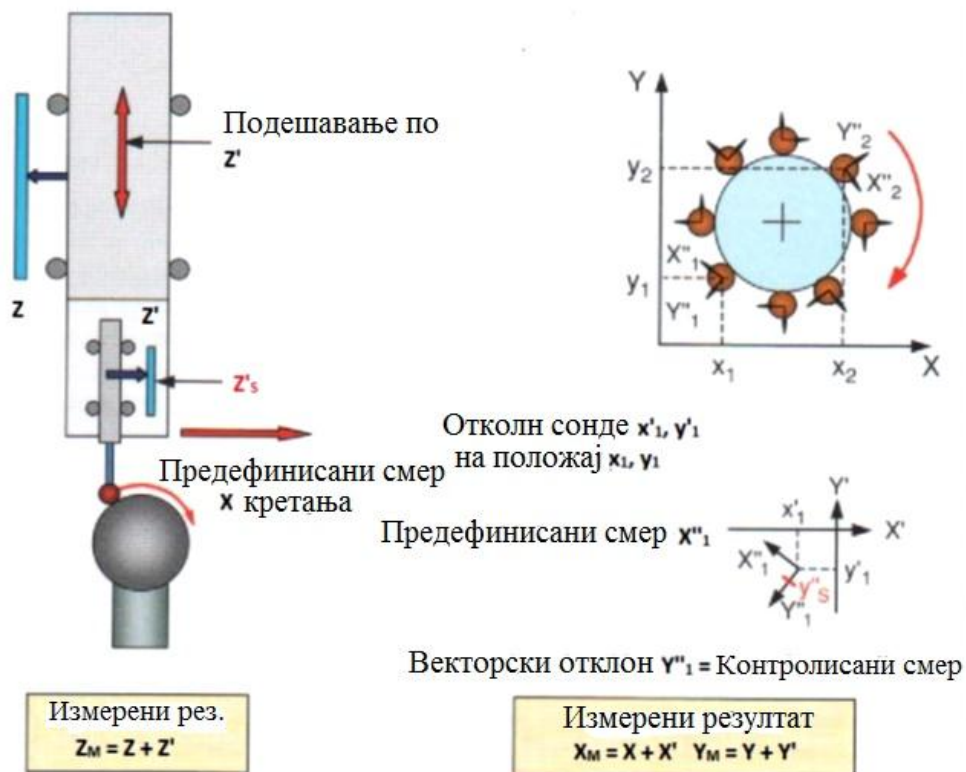
Код овог мерног система, сензор садржи систем који очитава кретање (као што је скала, индуктивни сензор, оптички мерни систем, итд.) углавном у све три координатне осе. Ако се, при контакту са мереним елементом, мерни пипак помери у било ком смеру, износ тог померања се може очитати из система који мери кретање (слика 4.9). Мерена тачка се генерише суперпозицијом координата сензора са координатама координатног мерног уређаја. Такође се узима у обзир корекција мерног пипка с обзиром на вектор позиције са површине која се испитује и еластично савијање пера.

Није потребно померати мерни пипак са мереног елемента ради мерења различитих површина истог објекта. Када се то повеже са квалитетним софтвером за управљање, тај принцип је основа за аутоматизовано скенирање површине објекта (слика 4.10). Координатним осама мерног уређаја се управља, па се сензор увек налази унутар мерног опсега, тако да прати површину мереног елемента при тангенцијалном кретању.

Управљачки софтвер помера сензор у виртуелном координатном систему чији координатни почетак се налази у тачки контакта између мерног и мереног елемента. Ако се изведе као управљачки процес, то ће резултирати скенирањем круга у приказаном примеру (слика 4.10). Слично, 3D скенирање је изводљиво у предефинисаним равнинама. Дакле, у случају мерења 3D површина, проблем корекције мерног пипка се такође мора узети у обзир.



Слика 4.9. Функционисање аналогног сензора [136]



Слика 4.10. Пример скенирања помоћу аналогног сензора [136]

4.3.2 Контактно - оптички сензори

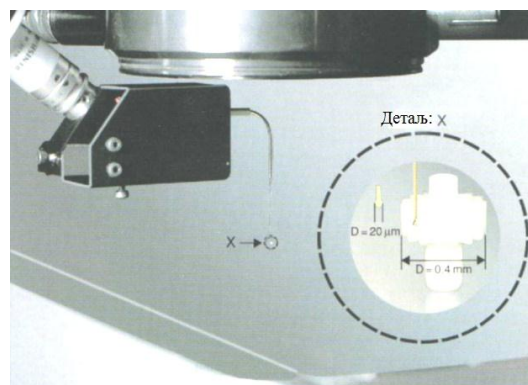
Сви конвенционални механички сензори, претходно наведени, имају једну заједничку ману: сигнал се шаље из мерног елемента преко круте игле (пера), до активаторског сензора (прекидача или пиезоелектричког елемента). Како свако померање игле утиче на мерни резултат, пожељно је коришћење игле са максималном крутошћу.

Са оптичком сондом, те се мане решавају коришћењем игле само у сврху позиционирања мерног пипка. Стварно мерење положаја се изводи сензором за процесирање слике који је интегрисан у систем (слика 4.11). Тако се извијање игле не узима у обзир у коначном мерном резултату. Како је сама оптичка сонда пројектована по дводимензионалном принципу, може се такође употребљавати за тродимензионална мерења, узимајући у обзир да се површина мереног објекта и оса оптичке сонде налазе под довољно малим углом. Положај мерног пипка у смеру осе оптике се такође може одредити, ако се интегрише други смер погледа сензора процесора слике (друга камера или огледало), на конструкцију оптичке сонде.

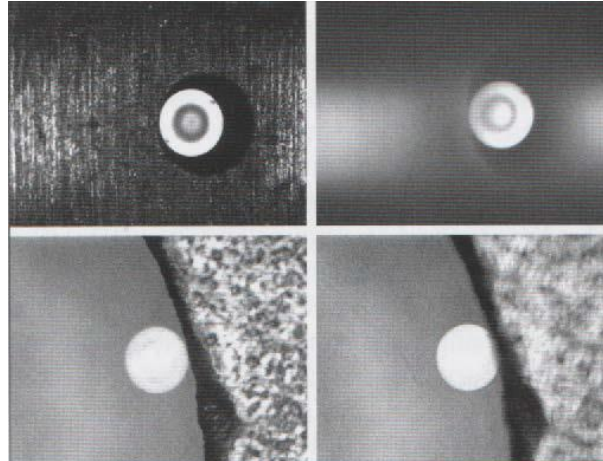


Слика 4.11. Принцип рада оптичке сонде [137]

Оптичке сонде се израђују од стакленог влакна у облику жице па се термичким поступком крај те жице загреје и истопи, па мерни пипак споји с тим крајем. Добро позиционирање оптичке сонде на локацији која се мери, се може постићи ако се мерни пипак угради на врх шупље металне игле (слика 4.12). Ако стаклено влакно шаље светло до мерног врха, мерење се може извести у самоосветљавајућем моду (слика 4.13). Такође је могуће коришћење оптичке сонде у релацији са послатим светлом. Због његових малих димензија, силе кретања сонде су занемарљиве (износе до неколико μN). Из овог разлога, она се може користити за мерење површина мереног дела које су осетљиве на контакт.



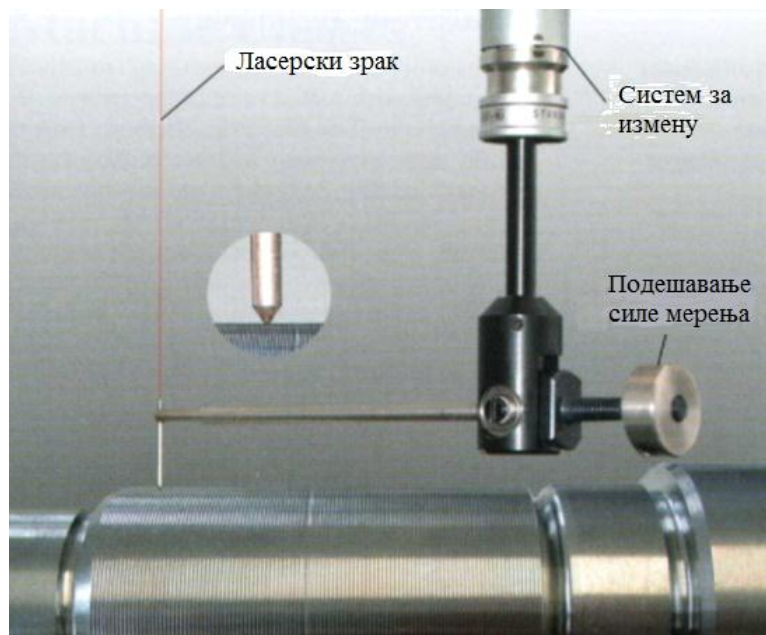
Слика 4.12. Магнетска оптичка сонда са окружењем за мерење микроструктура [137]



Слика 4.13. Примери мерења помоћу оптичке сонде у самоосветљавајућем режиму рада [137]

4.3.3 Контактно - оптички сензор профила

Контактано-оптички сензор профила представља спој мерне сонде са ласерским сензором даљине. Користећи такав сензор, могу се вршити мерења храпавости и профила са високом прецизношћу помоћу координатног мерног уређаја. Како је приказано на слици 4.14, ласер, који се углавном користи за директна мерења површине мереног комада, уочава померање контактне сонде. Једна од предности таквог распореда је усклађеност са принципом компарације. Коришћењем својства брзе измене, мерења су могућа или са профилном сондом или директно помоћу ласера.

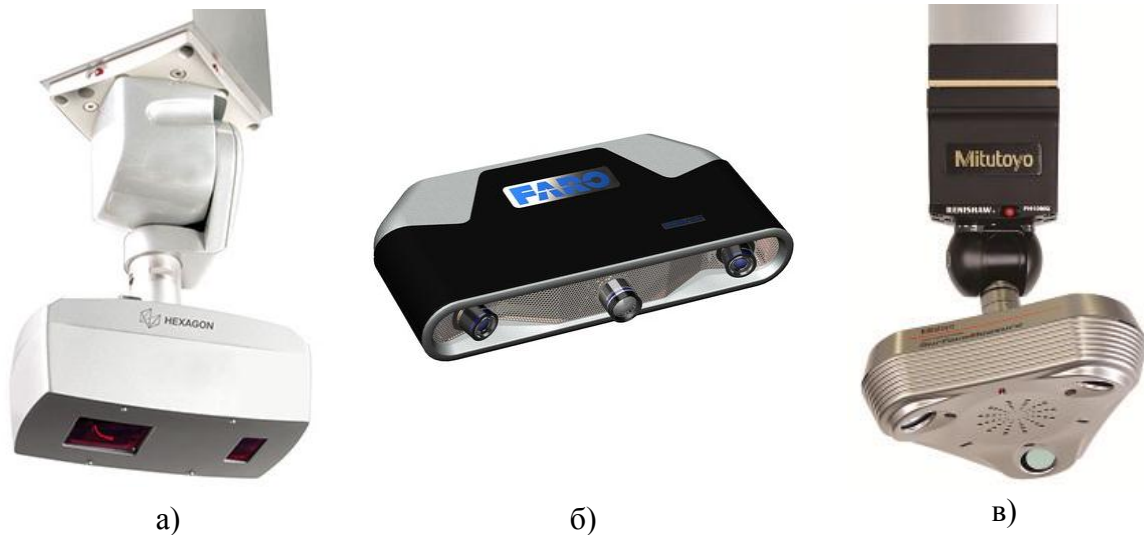


Слика 4.14. Сонда за контуре са ласерским сензором и системом за измену [137]

Интеграција контактано - оптичког сензора профила у координатни мерни уређај допушта потпуну аутоматизацију мерења профила у већини мерења. Још једна предност је велика тачност позиционирања координатног система мереног дела. То није могуће са класичним уређајима за мерење профила. Мерни подаци се процесирају софтверским функцијама у сврху одређивања храпавости, димензија, облика и положаја.

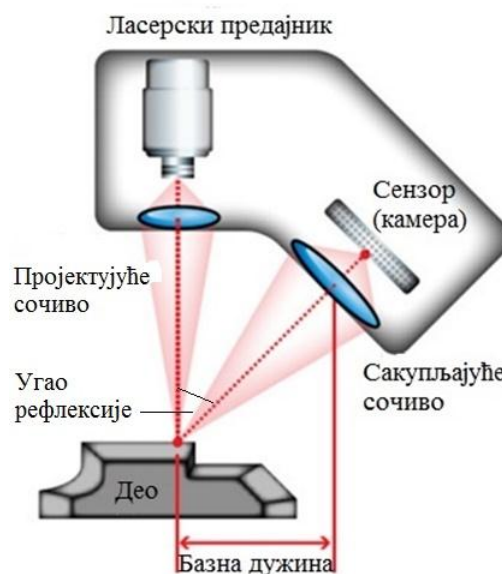
4.3.4 Ласерске сонде

Ласерски 3D скенери (о којима ће бити речи у 5 поглављу) су одавно оправдали своје постојање. Међутим, ласерске сонде такође могу да се монтирају на СММ и тако повећају њену ефикасност, првенствено преко смањења времена мерења, добијања облака тачака веће густине као и могућности узорковања делова са неприступачним елементима, као што су отвори, жлебови и слична неприступачна места на мереном делу, што представља изазов за савремено мерење. На слици 4.15 су приказане неке од постојећих ласерских сонди.



Слика 4.15. Ласерске сонде различитих произвођача; а) HEXAGON [138], б) FARO [139] и в) Mitutoyo [140]

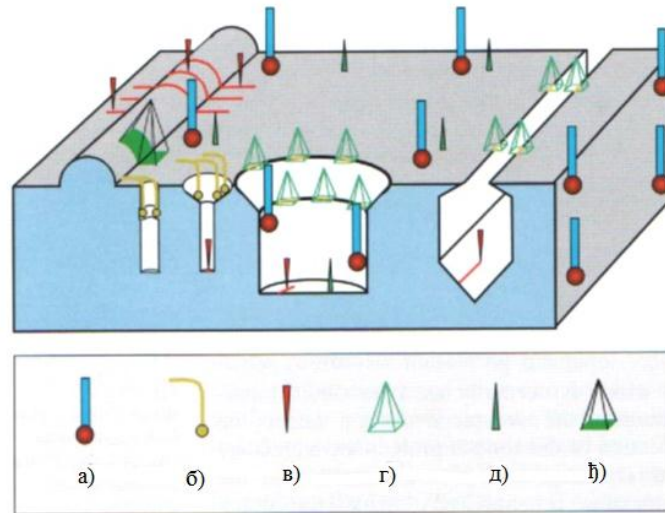
Ласерске сонде најчешће користе технику триангулације (*laser triangulation*). Ласерска триангулација подразумева пројектовање линије, тачке, или траке (*strip*), која се огледа у објекту и снима преко сензора који је фиксиран на одређеном растојању у односу на ласерски предајник (слика 4.16). Сензор детектује угао рефлексије, који се затим користи за 3D мерење.



Слика 4.16. Ласерска триангулација [141]

4.3.5 Вишесензорска технологија

Да би се задовољили захтеви које постављају мерења комплексних делова, са тачним односима између отвора и површина, у координатну метрологију су уведени вишесензорски системи. Ови системи комбинују различите врсте контактне и безконтактне сензорске технологије (слика 4.17). Разлог за примену вишесензорских система није само комплексност дела, већ и потреба за смањењем трошкова производње. Употреба једног система сонде са којим се могу извршити сва мерења може драстично смањити трошкове, као што су трошкови за: простор, руковање са деловима, транспорт између машина, оператере, време.



Слика 4.17. Вишесензорска технологија: а) контактна сонда; б) оптичка сонда; в) ласер; г) процесирање слике; д) аутофокус; ж) 3D снимање [142]

4.4 Мерење на координатној мерној машини

После контакта са радном површином дела, центар врха пера даје измерену вредност односно прослеђује је у рачунар за даље операције. Измерена вредност актуелне тачке припада реалном делу. Површине дела се могу описати елементима геометријског облика, а то су равни или просторни елементи. Математичко познавање ових елемената је услов за мерење. Нпр. ако се мери размак између отвора или пречник осовине.

Постоје три врсте елемената у координатној метрологији:

- једнодимензионални (тачка),
- дводимензионални (права линија или кружница) и
- тродимензионални (раван, сфера, цилиндар, конус).

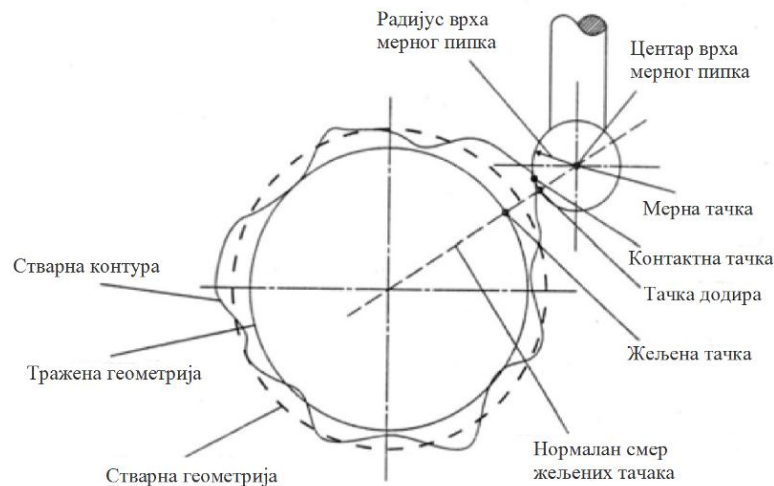
3D елементи представљени су својим површинама, па се рачунање нормале на површине познатих елемената може извести без других помоћних елемената. Тачка, линија и круг се не могу једноставно одредити поступком контакта. Равне или криве линије су само странице површина па се зато и користе површине за одређивање елемената.

Мерење на координатној машини може се класификовати на функционално оријентисано мерење и мерење елемената. Када се ради о провери димензија делова само на крају процеса производње, уместо случајне провере, треба након сваке фазе у изради дела вршити проверу. Ово је важно за постављање серије или за узорковање. Касније у току производње, провера се врши само на важним елементима делова. Због

тога се и зове мерење усмерено ка провери елемената за разлику од функционално оријентисаног мерења где се мере сви елементи. Видно је да први приступ мерења штеди време.

Стратегија мерења на *СММ* обухвата испуњење захтева за минималним бројем тачака за сваки геометријски елемент. Математички минимум тачака зависи од броја степени слободе који има сваки елемент. Други услов је везан за распоред тачака.

На примеру мерења пречника цилиндра (слика 4.18) приказани су контакт лопте-мерног пипка, са реалном површином дела и карактеристични елементи мерене површине.



Слика 4.18. Мерење пречника цилиндра

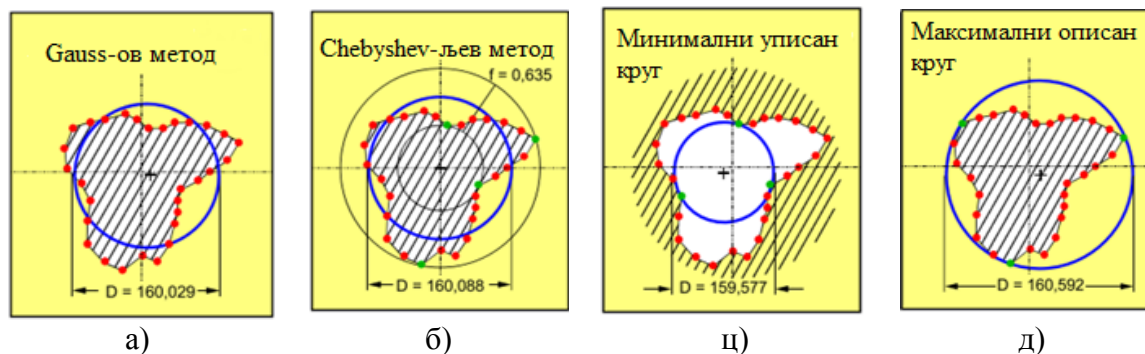
До недавно се сматрало да је довољно мерити геометријске карактеристике са само неколико тачака на површини дела. Нормала се одређивала са четири до осам тачака и прихватале су се велике празнине у резултатима. Координатна метрологија у то време није била спремна да пружи поуздану информацију за производни процес у разумном временском интервалу. Мерења добијена са малим бројем мерних тачака имају значајне недостатке. Резултати се могу сматрати:

- погрешним, јер не представљају стварну геометрију дела који се испитује и
- да нису функционално релевантна максимална уписана и минимално описана кружница за рачунање придружених карактеристика, па се користи нпр. *Gauss*-ов метод (сума најмањих квадрата управних растојања свих мерених тачака на површинама елемената).

У сврху одређивања адекватног пречника, данас се користе три методе апроксимације:

- *Gauss*-ова метода која најбоље смешта кружницу у критеријум најмања сума квадрата грешака. Примењује се као класични метод. Може се користити и за само неколико тачака. Одговара и за референтне системе и геометријске карактеристике без великих грешака облика, (слика 4.19-а),
- *Chebyshev*-љев метод рачунања података који одређује средњи пречник према критерију да буде најмања радијална разлика између концентричних кругова са минималним и максималним пречником (слика 4.19-б). Метод оговара стандардима за одређивање девијације облика према минималним условима материјала и захтева велики број тачака и
- метод минималних уписаних (слика 4.19-ц) и максималних описаних кругова; (слика 4.19-д), метод који рачуна минимални пречник, тј. да нема тачака унутар

круга и максимални пречник, тако да нема тачака изван круга. Дакле све тачке леже у простору између минималног и максималног пречника. Овај поступак примењује се за придруживање–упаривање димензија. Функционално оријентисано мерење одговара спецификацији датај у цртежу или уопште у документацији. Ово се може постићи само са јако великим бројем тачака.



Слика 4.19. Методе апроксимације круга приликом обраде резултата мерења [129]

Мерење представља одређивање положаја мерене тачке. На рачунање вектора мерне тачке утичу вектор положаја врха пера, тј. лопте, којим се додирују тачке на површини мереног комада, затим вектор сигнала и преносна матрица. Положај мерне тачке директно је зависан од вектора положаја врха пера, деформације пера и притиска при контакту. На увећаним контактним површинама виде се димензије пречника пера и приказана је компензација радијуса пера.

Водич кроз добру праксу мерења (*Measurement Good Practice Guide - MGP*) [13] покрива избор броја мерних тачака приликом коришћења координатних мерних машина и нуди савете о компромису између прецизности и брзине. Затим, даје смернице о критеријумима за узорковање стандардних елемената и савете о мерењима који укључују пројекције елемената преко дугих дистанци. Он обухвата утицај чистоће, оптерећења/поравнања дела и утицај температуре, завршне обраде површине и геометрију на резултат мерења. Такође садржи информације о основним принципима мерења, заједничке захтеве за мерење, функционалности *CMM* софтвера с обзиром на захтеве са цртежа и добру метролошку праксу приликом коришћења *CMM* са *CAD* подацима при мерењу делова.

Координатна метрологија је важна и у изради и мерењу површина произвољног облика (*free form*). Естетски и аеродинамички аспекти имају одлучујући утицај на креирање површина произвољног облика. Овакве површине не могу се описати стандардним геометријским особинама него се уместо *3D* тачака, математички описују *3D* криве или *3D* математички описане површине (*Non-Uniform rational Basis Spline - NURBS*) о којима ће бити речи у поглављу 5. Такве површине се мере на основу *CAD* података. Ако нема *CAD* података онда се површина генерише тако што се подаци узимају са модела који је, нпр. прототип направљен за потребе пројектовања. Подаци се узимају помоћу софтвера наменски развијених за те сврхе. *CAD* подаци се уносе у базу података за део који се израђује, а затим враћају у производни процес како би се извршиле корекције. Пример овог је дигитализација линија добијених ласерским сензором. Подаци за површину добијају се у облику случајних тачака и на крају се генеришу у *NC* програме за израду делова било поступком резања или поступцима брзе израде прототипова (*Rapid prototyping – RP*).

4.4.1 Софтвер за координате мерне машине

Да би се извело мерење на *CMM* неопходан је софтвер који управља покретним елементима мерне машине и сонде. Резултат мерења *CMM* представљају мерни подаци који се смештају у одговарајућу меморијску јединицу и мерни извештаји. Након извршеног мерења мерни подаци се накнадно могу увести у софтвер за рачунаром подржано мерење (*Computer Aided Inspection - CAI*) и извршити поређење *CAD* са моделом.

Софтвер који *CMM* користи за рад је универзални и покрива све стандардне функције *CMM*. Уколико је потребно мерити одређени елемент специјалног облика, основном софтверу се надограђују додатне функције. Сваки стандардни софтвер укључује:

- статистику и процесну контролу,
- мерење 2D и 3D кривих линија,
- мерење површина произвољног облика (*free form*),
- мерење базирано на карактеристикама производа,
- интеграцију и процесирање *CAD* података,
- мерење зупчаника,
- мерење цеви итд.

4.4.2 Интегрисање *CAD* података

Програмирање *CMM* мерења, ако се изводи без 3D модела дела, јако је сложен посао. Многе кораке у програму треба дефинисати и унети. Уводи се тзв. самопрограмирање што спада у домен интелигентних система и то је поступак којим се смањује процедура. За мерење радног дела, које се изводи на почетку, прво треба одредити карактеристике машине. Све релевантне информације смештају се у базу података у облику *CNC* мерног програма. Овај метод се не може једноставно прилагодити производњи, јер се производне машине не могу програмирати за време производног процеса нити у фази планирања. *CAD* системи су постали интегрални део пројектовања производа, па је логично да све што се даје у *CAD*-у може користити и у метрологији. Подаци о производу у раној фази пројектовања не садрже довољно геометријских карактеристика производа, као што су нпр. толеранције. Дакле, на почетку пројектовања производа није могуће размењивати податке. Зато треба доста података да би се *CAD* систем интегрисао у *CMM* као последња фаза у производном ланцу. Даљи развој *CMM* ићи ће у правцу интеграције података током целог процеса.

То би се одвијало на следећи начин:

- подаци се шаљу са конвенционалних *CAD* система као што су *CATIA*, *UNIGRAPHICS*, *CADDS*, *I-DEAS* или *PRO/Engineer* и читају на координатној мерној машини или рачунару који планира посао или поступак провере у неком од формата *IGES*, *VDA* или *STEP*,
- рачунар тада прорачунава податке и генерише мерне програме у чему су укључени зумирање, ротација, селекција, померање и сл. Процес се лакше одвија уколико је обезбеђена визуализација,
- мерење се врши на основу података унетих у *CAD* бази података. Подаци су углавном толеранције и информације о монтажи. Многи радни кораци извршавају се само на основу минималног броја података улаза,
- завршавање мерног програма, рачунарски контролисаног мерења, извршава се на *CMM* и
- подаци о мерењу се након тога поново враћају у производњу или уколико треба

у CAD, да би се нешто кориговало, па се на тај начин грешка аутоматски отклања. Један од начина је контрола затвореном спрегом у производном процесу. Састоји се од поновног подешавања параметара машине.

4.5 Мерна несигурност

У суштини, сва мерења су нетачна и захтевају исказ о мерној несигурности. Мерна несигурност означава сумњу у ваљаност резултата мерења. Резултати мерења се сматрају комплетним, само ако их прати квантитативни извештај о мерној неигурности. Мерна несигурност је карактеристика сваког процеса мерења и неопходно ју је разликовати од грешке која настаје у истом поступку. Грешка представља разлику између измерене и стварне вредности мерене величине.

Процеси мерења треба да буду планирани, верификовани, валидовани, реализовани, документовани и њима се мора управљати. Факторе који утичу на процес мерења треба идентификовати и узети у обзир при пројектовању свих мерења. Управљање процесом се обавља у складу са документованим процедурама.

У основи сви процеси мерења се састоје од:

- операција мерења (мерни задатак, услови околине у којој се мерење обавља),
- процедуре мерења (како се извршава мерни задатак),
- опреме за мерење или мерила (калибри, инструменти, софтвери) и
- особља за квантитативно и квалитативно утврђивање мерних карактеристика производа и мерног система.

Процеси мерења су дефинисани када се утврди мерни задатак, обим мерења и поступци поређења и обраде резултата.

Мерна несигурност се приписује мерној опреми која се користи, обучености особља и условима околине у којој се мерење изводи. Према стандарду ISO 10012:2012 за сваки процес мерења, из система управљања мерењем, процењује се мерна несигурност. Процене мерне несигурности морају да буду записане, а сви познати извори расипања резултата треба да су документовани. Концепт, методе процене мерне несигурности и приказивање резултата мерења наведени су у *GUM* [127].

Према *GUM*, основне компоненте мерне несигурности су:

- 1) Стандардна несигурност типа А - Компонента која се одређују из статистичке расподеле резултата мерења. Представља стандардну девијацију расипања резултата и одговара случајним грешкама мерења и
- 2) Стандардна несигурност типа Б - Компонента несигурности настала због очекиваних догађаја (очекиване вероватноће расипања, на пример несигурност читавања вредности и сл), одговара системским грешкама мерења у класичној терминологији. Одређује се појединачном анализом и не зависи од броја мерења. Укупна мерна несигурност може се одредити само ако су познати сви кључни фактори који утичу на процес мерења. Сви фактори се могу разврстати у неколико група: особље, методе, услови околине, опрема и начин поступања са делом који се мери.

Резултати поступка мерења зависе од утицаја спољашњих и унутрашњих фактора.

Под термином спољашњи фактори подразумевају се сви фактори који утичу на поступак мерења, а који нису директно повезани са основним принципима аквизиције (прикупљања) података, који се у одабраној методи примењују.

С обзиром на карактер узорака спољашњих утицаја, спољашњи фактори могу се поделити на:

- карактеристике објекта,
- утицај околине (температура, вибрације, влажност, осветљење, нечистоће),
- технолошки утицаји (дефиниција мерног задатка, планирање мерења и руковање опремом),
- програмске подршке,
- људског фактора и
- захтева накнадне обраде података.

Унутрашњи фактори представљају радне принципе на основу којих се у оквиру одабраног система за дигитализацију врши прикупљање података. Технолошки принципи на које се мерна метода ослања, при дефинисању мерне информације, представљају унутрашње факторе у ужем смислу. У ширем смислу то су фактори који имају реалан утицај на квалитет и расподелу дигитализованих података, а који произлазе из стварних конструкцијских решења уређаја за дигитализацију.

Унутрашњи фактори који утичу на квалитет резултата мерења су:

- структурални елементи мерног уређаја,
- начин дефинисања мерне тачке и мерног опсега,
- калибрација система и
- програмска грешка.

На мерење помоћу координатне мерне машине утицај имају фактори који су резултат спољних променљивих или константних услова и утицаји који долазе од саме мерне машине. Спољни утицаји су врло различити и по утицају и по величини и зависе од тога где је СММ постављена. Уколико су то погонски услови сигурно је да ће и утицаји бити значајнији у односу на оне који утичу на мерења која се врше у мерној соби.

Утицајни фактори на мерну несигурност сумирано су приказани на слици 4.20.



Слика 4.20. Утицај различитих фактора на мерну несигурност СММ [143]

Претходно спецификоване грешке дужине и грешке сонде укључене су у произвођачку спецификацију и дозвољавају довољно поуздану оцену мерних несигурности које се очекују. То се може применити како на делимична, тј. појединачна мерења тако и на

континуирана скенирајућа мерења. Постоји више начина за оцену мерне несигурности *СММ* као што је:

- поређење са калибром,
- метод суперпозиције,
- математичка симулација и сл.

Може се рећи да поступак одређивања мерне несигурности није само рутински посао и математика, већ потпуно познавање мерене величине и процеса мерења

Поглавље 5

РЕВЕРЗНО ИНЖЕЊЕРСТВО, 3D ДИГИТАЛИЗАЦИЈА, СКЕНЕРИ

Бесконтактни системи за скенирање свакодневно постају све присутнији у индустријском мерењу, иако су још увек најмање један ред величине мање тачности у поређењу са одговарајућим контактним системима. Њиховим усавршавањем и интегрисањем у производњу омогућено је мерење директно на машини, а самим тим отвара нове могућности за корекцију програма машине алатке у циљу повећања квалитета обраде дела. Смањењем времена мерења они такође омогућавају значајно мање трошкове производње.

Развој нових производа и алата често се темељи на већ постојећим деловима или физичким моделима. Њих је потребно реконструисати у неком од *CAD* софтвера, како би се добио рачунарски (електронски) модел, погодан за даље пројектовање, производњу и рачунаром подржано мерење (*CAI*).

Да би се добио рачунарски читљив - електронски модел жељеног објекта, потребно је кренути од поступка *3D* дигитализације, односно *3D* скенирања. У оквиру *3D* дигитализације врши се сакупљање података о *XYZ* координатама тачака, са површина физичког дела и њихово превођење у дигитални облик. Скуп овако добијених координата (којих може бити и до неколико милиона), назива се облаком тачака и представља дискретни облик објекта. Успешно се дигитализују делови величине од десетак милиметара, попут ситних пластичних делова, новчића или накита, па до неколико десетина метара (авиони, аутомобили, турбине, зграде, мостови итд.). За практичну употребу у *CAD/CAM/ CAE/CAI...*, најчешће је потребно од тачака формирати површински или *3D* чврсти (*solid*) модел. Процес којим се од физичког дела сакупљају *3D* дигитални подаци о геометрији објекта, а затим, одређеним софтверским технологијама за накнадну обраду добијених података, генерише електронски (*CAD*) модел, назива се реверзни инжењеринг (*Reverse Engineering - RE*). *RE* се врло често,

даље комбинује и са другим напредним технологијама, као што су брза израда прототипа (*Rapid Prototyping - RP*) или брза израда алата (*Rapid Tooling - RT*).

5.1 Реверзно инжењерство

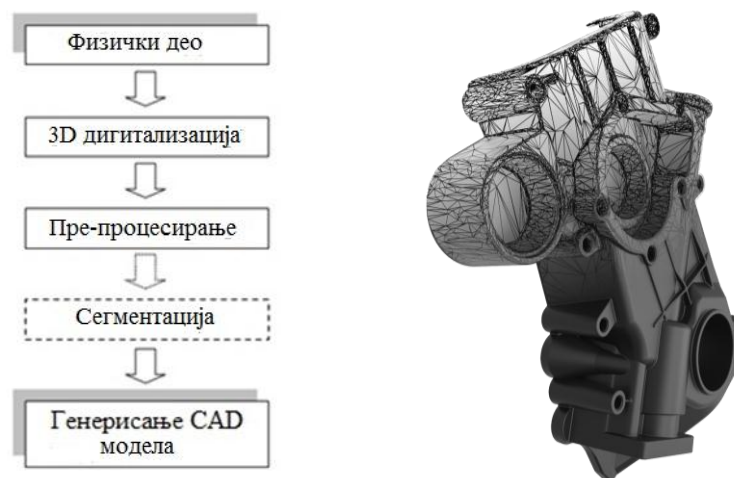
Реверзни инжењеринг се дефинише и као процес копирања постојећег дела, подскопа или производа без помоћи цртежа, документације или компјутерског модела [17].

Технике *RE* се данас, осим у металопрерађивачкој индустрији, често примењују и у: софтверском инжењерингу, стратешком менаџменту, филмској индустрији, индустрији забаве, маркетингу, хемијској индустрији, реконструкцији историјских објеката и културне баштине, електронској индустрији, војном инжењерству итд. Својим могућностима технологија *RE* пружа могућности сакупљања података, њихову свеобухватну анализу, валидацију и материјализацију у спровођењу истражних радњи и судских поступака (форензика), затим у обради и анализи разноврсних материјалних доказа као што су природно и вештачки изазване катастрофе, аутомобилски инциденти, балистичка вештачења, медицинске анализе итд. Такође је веома важна могућност архивирања података и могућност понављања и анализе.

Разлози коришћења реверзног инжењерства су најчешће у случају [18]:

- када оригинални део или произвођач дела више не постоји, а купцу треба производ,
- када је изгубљена документација пројектовања дела,
- када део наилази на честе промене у пројектовању у развојном циклусу и
- за мерење и/или контролу квалитета.

У самом процесу *RE* разликују се следеће фазе (слика 5.1): прва; коју чини дигитализација података или мерење посматраног дела, друга; где се обрађују скенирани подаци (пре-процесирање). Фаза везана за сегментацију података је означена испрекиданим линијама, јер се ради о процесима који се јављају само у појединим *RE* системима, односно који могу бити потребни у посебним случајевима, најчешће када се ради о врло сложеним облицима. У задњој фази се врши *3D* моделирање објекта, на основу података прикупљених у претходним фазама. Као резултат овог процеса добија се *STL (Stereo-Lithography)* датотека, која даље може послужити као улаз у *CAD/CAM/CAE/CAI* системе или у *RP/RT* процесе.



Слика 5.1. Фазе реверзног инжењерства (*RE*) [144]

5.2 3D дигитализација

Термин 3D дигитализација представља поступак у оквиру ког се са површине објекта врши сакупљање (аквизиција) података, у виду координата - тачака и њихово превођење у дигитални облик, који се у литератури, због облика који заузима у простору, назива облак тачака (*point cloud*) [145].

У зависности од техничких могућности уређаја, дигитализација може да се реализује у дводимензионалној (2D) и тродимензионалној (3D) форми. Основу дигитализације свих савремених CAD/CAM система представља 3D технологија мерења.

Појам дигитализација се у почетку односио на процес прикупљања дискретних података о тачкама са површине објекта, применом контактних сензора. Увођењем нових технологија за аквизицију података, са могућношћу континуиране аквизиције низа тачака (што се описује појмом скенирање), термин скенирање је почео паралелно да се користи за опис процеса дигитализације. С обзиром да је основни циљ процеса аквизиције података добијање 3D дигиталног модела површине, узимајући у обзир појаву нових метода за добијање дигиталног модела, за чији опис појам скенирање није адекватан, појам 3D дигитализација је данас опште прихваћен у светским оквирима.

Важно је нагласити разлику између координатне метрологије и 3D дигитализације. 3D дигитализација је шири појам од координатне метрологије, мање се користи и још увек са релативно малом тачношћу у поступцима мерења, док је координатна метрологија везана за поступак мерења делова у производњи, без обзира на тип сонде.

5.2.1 Подела метода 3D дигитализације

Развој технике, пре свега рачунарских и информационих система, условио је развој великог броја метода 3D дигитализације, заснованих на различитим технологијама. Преглед метода 3D дигитализације дата је на слици 5.2. У зависности од примењене технологије, све методе се могу сврстати у једну од две основне класе [146]:

- пасивне методе 3D дигитализације и
- активне методе 3D дигитализације.

Пасивне методе карактерише одсутност интеракције са делом и ка њима су углавном оријентисани истраживачи у области компјутерске визије, где се добијање облика врши на основу једне или више дигиталних слика. Тренутно достигнути ниво квалитета дигитализације, овим методама не доноси задовољавајућу тачност за примену у пракси, посебно за индустријско мерење.

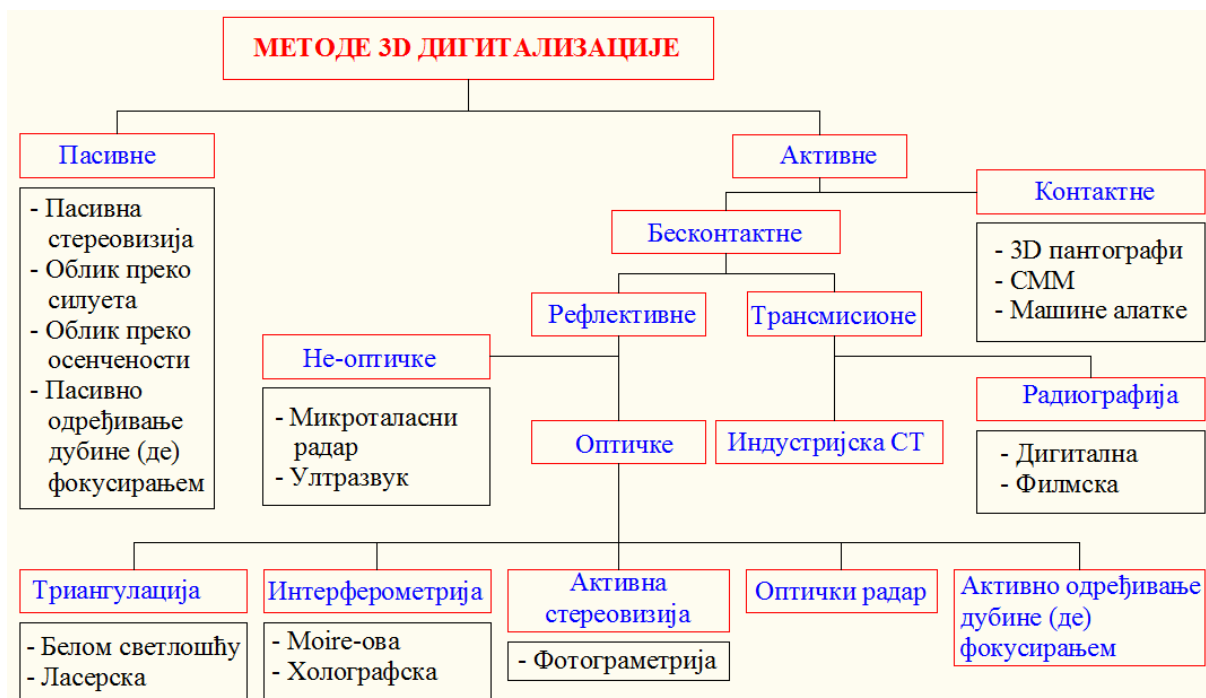
Код активних метода, где је, на супрот пасивним, присутна интеракција са објектом било остваривањем контакта са објектом, било пројектовањем (зрачењем) неке врсте енергије, разликују се два прилаза [146]:

- контактне методе и
- бесконтактне методе.

Основна карактеристика контактних метода (о којима је било речи у поглављу 4), као што и сам назив сугерише, јесте контакт између објекта и сензора (углавном је то пипак мерног сензора).

Принцип рада бесконтактних метода се заснива на пројектовању енергије, што представља снимање рефлектованог или трансмитованог сигнала, па је у складу са тим и извршена подела бесконтактних метода, на рефлективне и трансмисионе. Најбољи пример 3D дигитализације, која функционише на принципу трансмисије, је

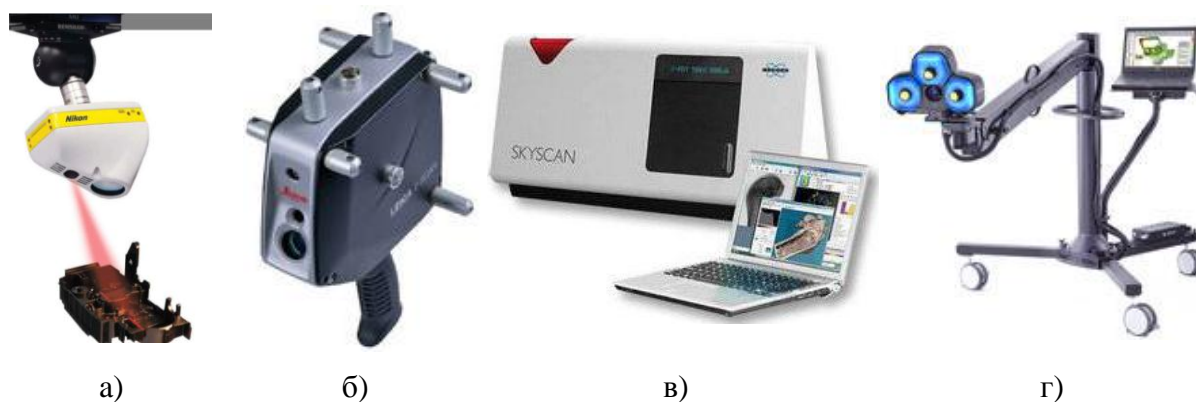
компјутеризавана томографија (*Computed Tomography - CT*), у оквиру које се врши детекција *X*-зрака који су пропуштени кроз део.



Слика 5.2. Подела метода 3D дигитализације [146]

Када је реч о рефлективним техникама 3D дигитализације, неопходно је истаћи, да извори електромагнетног зрачања могу да емитују светлосну енергију, звук (ултразвук) или неку другу врсту електромагнетних таласа (инфрацрвене, ултравиолетне и микроталасе). Принцип рада техника у којима се примењују звук, инфрацрвени, ултравиолетни и микроталаси заснован је на мерењу времена (*time of flight*), у току кога се емитовани зрак рефлектује са дела и региструје на сензору [19]. Код рефлективних техника које у поступку дигитализације користе светлост, облик дела се одређује на основу мерења интензитета светлости која се рефлектује са дела.

На следећој слици приказани су уређаји за бесконтактно мерење: координатна мерна машина (СММ) са оптичком сондом (слика 5.3-а), ручни ласерски скенер (слика 5.3-б), СТ скенер (слика 5.3-в) и скенер са пројекцијом светла (слика 5.3-г).



Слика 5.3. Уређаји за 3D дигитализацију [147]

5.2.2 Оптичке (бесконтактне) методе 3D дигитализације

Оптичке методе дигитализације имају дугу традицију у *CAD/CAM* технологијама. С обзиром на поменуте недостатке уређаја за бесконтактну дигитализацију и актуелне трендове у области технолошког развоја, *CAD/CAM* системи најновије генерације у поступку дигитализације примењују искључиво оптичке методе [148].

Оптичке методе у поступку дигитализације користе светлост. Подела на основу класификације извора светлости је на кохерентне и некохерентне. Типичан представник кохерентних светлосних извора је ласер. Некохерентни извори емитују светлост, различитих таласних дужина, из опсега видљивог дела спектра. Свим методама оптичке дигитализације заједничко је да виртуелни записи настају прикупљањем рефлектоване светлости, која се са светлосног извора пројектује на део.

Постоје три принципа на којима се заснивају ласерски скенери [20]:

- на времену (*time-of-flight*),
- на фази (*phase measurement*) и
- на триангулацији (*triangulation based*).

Скенери засновани на времену (*time-of-flight*), у току ког се емитовани зрак рефлектује са дела и региструје на сензору, омогућавају мерење растојања до неколико стотина метара. Предност дугих опсега подразумева мању тачност. Фазни (*phase measurement*) ласерски скенер, представља другу општу технику за средњи опсег и ограничен је на сто метара. Тачност измерених раздаљина је могућа у опсегу од неколико милиметара. На триангулацији заснован (*triangulation based*) ласерски скенер, такође познат као ласерски скенер за непосредне близине, углавном се користи у индустријским апликацијама и реверзном инжењерству. Обично, овај систем је погодан за мерење малих објеката, код којих је опсег мерења у распону до 2 m. Триангулацијским ласерским скенером може се постићи тачност од неколико микрометара [149].

Основни параметри који представљају мерило квалитета уређаја за оптичку дигитализацију су [149]:

- тачност,
- прецизност,
- резолуција и
- брзина дигитализације.

Тачност је разлика између сензорског читавања и стварне вредности мерене величине на мерном објекту.

Прецизност (у употреби су термини поновљивост и репродуцибилност) представља меру одступања резултата поновљених мерења у непромењеним условима.

Резолуција је минимална удаљеност између мерних тачака у хоризонталној и вертикалној равни. Резолуција се може дефинисати и као густину мреже тачака (број тачака у једном реду или колони) или као максималан број улазних података по јединици дужине. Такође, резолуција се изражава и бројем тачака по јединици мерене дужине (*dots per inch*).

Брзина дигитализације је дефинисана бројем мерених тачака које се сакупе у одређеном временском периоду [150].

Карактеристике уређаја за оптичку дигитализацију указују на њихове предности у односу на контактне [148]:

- одсуство контакта са делом,
- дигитализација меких, ломљивих и делова са комплексном морфологијом,
- бржа дигитализација (у поређењу са механичким уређајима),
- висока резолуција дигитализованих података и
- могућност дигитализације ситних детаља тешко доступних места.

Оптичке карактеристике делова могу да наруше тачност дигитализованих података [151]. Доказано је да су мат и равне површине погодније за дигитализацију. Честа појава у поступку оптичке дигитализације је некомплетно приказивање појединих делова објекта. Елиминацију овог недостатака могуће је постићи применом вишеструких мерења целог дела, која се затим коригују појединачним дигитализацијама делова, који немају адекватну резолуцију [152].

Предности уређаја за оптичку дигитализацију [148]:

- велика брзина и висока фреквенција дигитализације,
- већа прецизност дигитализације ситних детаља на деловима,
- могућност дигитализација делова различитог облика, степена тврдоће и текстуре површине,
- одсуство контакта са делом и
- висока резолуција дигитализованих података.

Недостаци уређаја за оптичку дигитализацију су:

- провидност,
- ефекат одсјаја,
- угао ласерских зрака у односу на елементе дела (мртав угао) и сл.

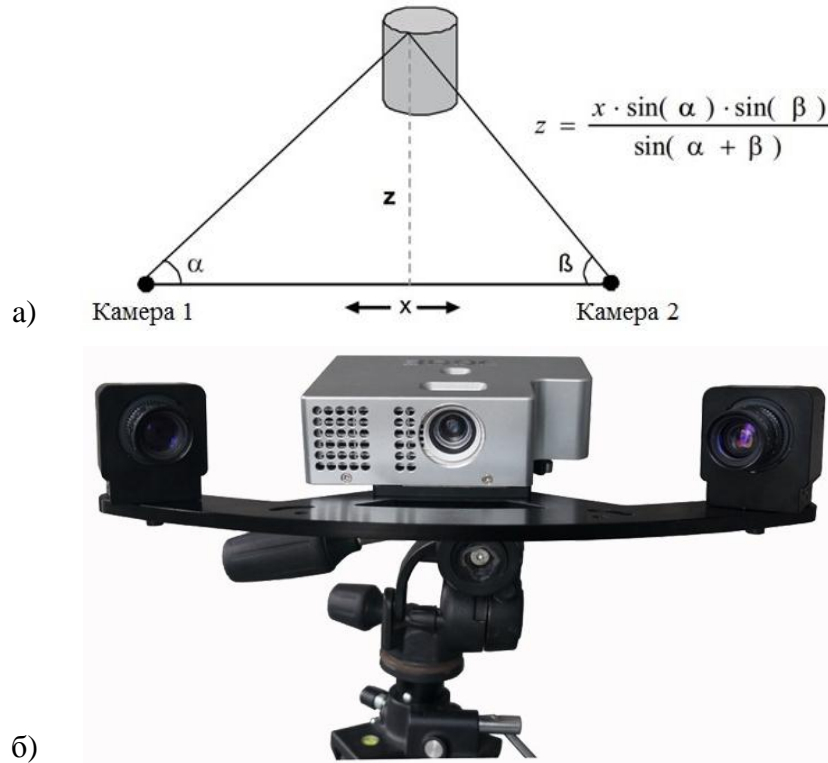
5.2.3 Фотограметријске методе

Фотограметрија је *3D* координатна мерна техника која користи фотографије као основу за мерење облика, величине и положаја дела. Више од 30 година, грађевинари и геодети користе фотограметрију за израду тополошких *3D* карти. Инжењери у индустрији такође користе фотограметрију за мерења, контролу, анализу деформација и сл. За индустријске потребе употребљава се блиско-предметна фотограметрија. Технологија се примењује у различитим производним индустријама као што су аутомобилска и ваздухопловна, у бродоградњи, итд. [153]. Триангулација је темељно начело које се користи у фотограметрији. Снимањем са најмање две различите локације (стерео пар фотографије), тзв. линије визира се могу развити од сваке камере па до тачака на објекту. Те линије, односно зраци, због њихове оптичке природе, математички се секу како би пројектовале *3D* координате жељених тачака. Слика 5.4-а приказује принцип одређивања удаљености на темељу триангулације.

Фотограметријско мерење спада у групу пасивних метода мерења. Одређивање положаја мерне тачке, базира се искључиво на површинске фотограметријске маркере и обраду слике. Док активне методе непосредно дефинишу положај мерне тачке, релативно у односу на мерни сензор, што се постиже пројектовањем неке врсте светла на површину.

Фотограметријска камера не мери објекат директно, већ мери средиште рефлектујуће ознаке. Како фотограметрија мери на принципу триангулације, у теорији су само 2 фотографије потребне за мерење. Међутим, најмање четири до шест фотографија се препоручује да би се могла добити поуздана мерења. Снимање се обавља и са једном камером, чији се положај у простору непрестано мења или са две фиксно постављене камере, релативно једна на другу (слика 5.4-б).

Након што су фотографије снимљене, софистицирани софтвер за обраду аутоматски прегледа прикупљене дигиталне фотографије и изводи положај одређене мерне тачке на снимцима, из различитих позиција камере применом триангулације. Осим за мерења, графичко окружење софтвера омогућује оператеру увид у тачке, позиције камере приликом снимања, пресечне углове линија визира.



Слика 5.4. Принцип триангулације [154] и фотограмметријски скенер модела PTS-C [155]

Затим, фотограмметријски уређај дефинише положај тачака на објекту преко фотограмметријских маркера на његовој површини. Ти маркери су израђени најчешће од 0,1 mm дебелог, равног, сивкасто рефлектирајућег материјала. Такав материјал има неколико предности у односу на конвенционалне мерне маркере који се састоје од белог круга на црној површини (или обрнуто). Ефикасније враћа светло према извору светала (обично 100-1.000 пута) од конвенционалних маркера. Слика 5.5 приказује машински део означен фотограмметријским маркерима [152].



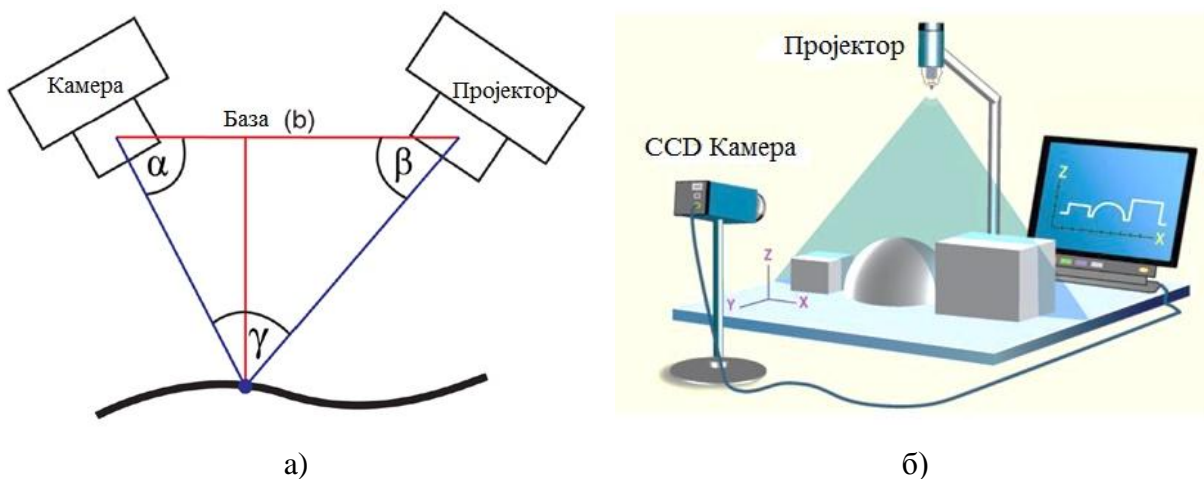
Слика 5.5. Фотограмметријске ознаке на делу [156]

5.2.4 Методе пројекције светла

3D оптичка метрологија која користи пројекцију структурираног светла је ефикасна метода за брзо добијање 3D координата детаља на мерном делу. То је бесконтактна метода мерења и погодна је за примену у подручјима аутоматизоване оптичке контроле.

Мерни уређаји који користе структурирано светло раде на принципу триангулације, код којих се серија светлосних тачака, пиксела, пројектује као узорак на површину мереног дела (слика 5.6-а). Деформација пројектованог узорака светла на објекту се снима камером и упоређује са оргиналним, односно референтним узорком који даје пројектор. Како су познати углови нагиба пројектора и камере, триангулацијом се може одредити удаљеност сваког пиксела.

Уређај за мерење на бази структурираног светлосног узорака се састоји од пројектора, детектора (једног или више) и јединице за процесирање/анализу података (слика 5.6-б). Синхронизација између пројектора и детектора (CCD камера) је битна за прецизно и квалитетно снимање слике [157].



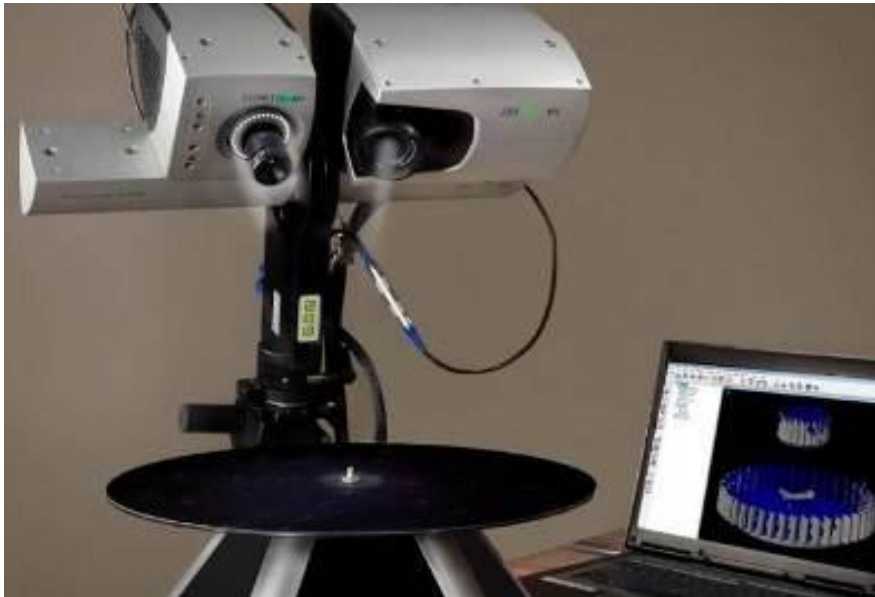
Слика 5.6. Принцип рада [158] и делови пројекцијског скенера [159]

Избор узорака структурираног светла је повезан са техникама обраде података, које се користе за рачунање 3D координата тачака. На избор узорака утичу параметри захтева као што су тачност, време циклуса мерења, површинске карактеристике објекта и сл.

Кораци код 3D оптичких мерења су [157]: поступак калибрације, пројекција узорака, снимање слике, декодирање узорака на темељу пиксела, триангулација и реконструкција површине.

На слици 5.7 приказан је пројекцијски уређај за скенирање помоћу белог светла.

Светлосни пројекцијски зраци при скенирању, у последњих неколико година, се могу наћи у различитим бојама. Позната бела светлост је најчешће замењена плавом, а могуће су варијанте и са црвеном и зеленом пројекцијом. Студије су показале да боја светла јако мало утиче на повећање тачности, тако да је промена боје више узрок маркетиншке природе. Ипак постоје неке предности плавог светла у односу на бело, а то су [161]: дуготрајнији извор светла, нижа температура због употребе LED светла као и способност скенирања у добро осветљеним просторијама због могућности филтрирања других извора светла.



Слика 5.7. Уређај за скенирање белим светлом [160]

На слици 5.8 приказан је уређај за скенирање плавим светлом.



Слика 5.8. Уређај за скенирање плавим светлом произвођача FARO [162]

Најчешћа примена пројекцијских скенера је код мерења сложене геометрије и реверзног инжењерства.

5.2.5 Ласерско 3D мерење

Ласер (*Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation - LASER*) је назив за оптички уређај, који емитује кохерентни сноп фотона. Ласер ради на принципу побуде атома, изазивајући светлосну емисију и апсорпцију, при проласку са једног на други енергетски ниво. Уколико се део атома или молекула ласерског медија доведе у побуђено стање, они ће емитовати фотоне спонтаном емисијом. Ти фотони се даље могу апсорбовати на непобуђеним атомима, или изазвати стимулирану емисију на преосталим побуђеним атомима. Ласерски зрак се може произвести једино ако стимулирана емисија доминира над апсорпцијом и спонтаном емисијом зрачења.

Основне карактеристике ласера су [163]: кохерентност, монохроматичност и линеарна поларизарност. Интензитет емисије ласерског снопа много је већи у односу на друге изворе светлости. Па су на бази ласерске технологије конструисани и мерни уређаји.

Ласерски мерни уређаји користе се у производним мерењима за [163]: најтачнија мерења димензија, позиционирање, дијагностику, подешавање и монтажу машина алатки, контролу квалитета, проверу управности површина и израду прецизних оптичких скала у оптичкој индустрији.

Ласерско мерење и контрола могу се вршити у статичким и динамичким условима, уз бесконтактно деловање мерног уређаја. Ласерски мерни уређаји су најтачнији у мерној техници па се користе и као еталони. Тачност ласера је 10 до 100 пута већа од осталих мерних уређаја. Ласерски интерферометри су најтачнији за мерење димензија свих других мерних уређаја, па се користе као интернационални и национални еталони за те намене. Штавише, ласерски интерферометри раде на принципу рефлексije или регистрације пролазећих зрака.

Ласерска метрологија се може поделити на основу принципа који користи на [163]:

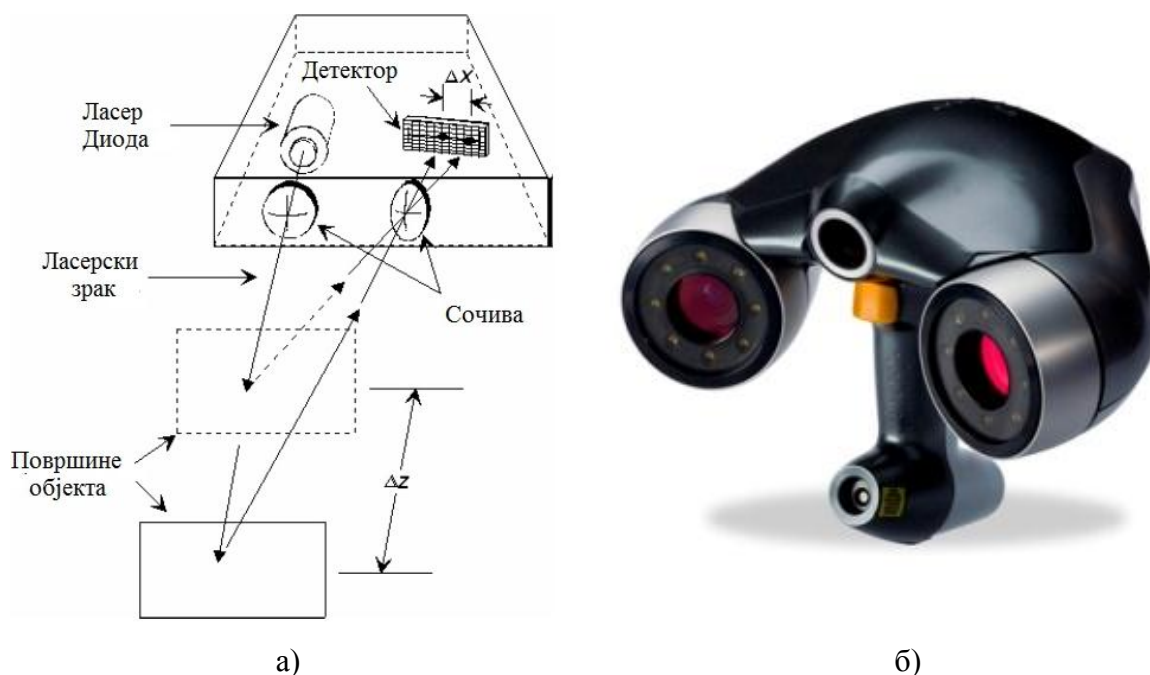
- принцип троугла код којег се користе триангулацијске методе рачунања удаљености,
- поступак мерења времена путовања зрака до мерног објекта и назад и
- поступак аутофокуса.

Процедуре мерења времена се користе када су у питању велики мерни делови и на великој удаљености. Мери се време потребно да ласерски зрак дође до мерног дела и да се врати. На основу времена и познате брзине светлости, може се тачно одредити удаљеност. Аутофокусне методе се користе углавном за мерење квалитета површине. Како су ласерски скенери на принципу триангулације најприсутнији код индустријског мерења, о њима ће бити речи посебно.

5.2.5.1 Ласерски триангулацијски скенери

Од 3D ласерских скенера у индустријским мерењима најприсутнији су они који раде на принципу триангулације. Триангулацијски 3D ласерски скенер је активни скенер, који користи ласерски зрак за снимање површине. За разлику од „*time-of-flight*“ 3D ласерског скенера, триангулацијски скенер пројектује зрак на површину и користи камеру да сними место где је ласерска тачка пала.

У зависности од удаљености ласера од површине дела, ласерска тачка ће се појављивати на различитим местима у видном пољу камере. Ова техника је названа триангулација зато што се ласерска тачка, камера и ласерски предајник налазе на теменима замишљеног троугла (слика 5.9-а). Дужина једне странице троугла, тј. удаљеност између предајника и камере је позната. Теме троугла на коме се налази ласерски предајник такође је познат. А теме на коме се налази камера може се одредити проналажењем места ласерске тачке у видном пољу камере. Ове три информације у потпуности одређују величину и облик троугла и дају место које представља треће теме троугла односно врх на коме се налази ласерска тачка. У већини случајева, због бржег снимања, ласер уместо појединачне ласерске тачке емитује више пруга-линија преко површине дела. Национално истраживачко веће државе Канада је развило триангулацијски ласерски скенер 1978. године. Ласерски скенери се на тржишту налазе као статични и преносни (ручни), чији је савремени ручни модел приказан на слици 5.9-б.



Слика 5.9. Принцип рада [164] и изглед преносног ласерског скенера марке GEFOS [165]

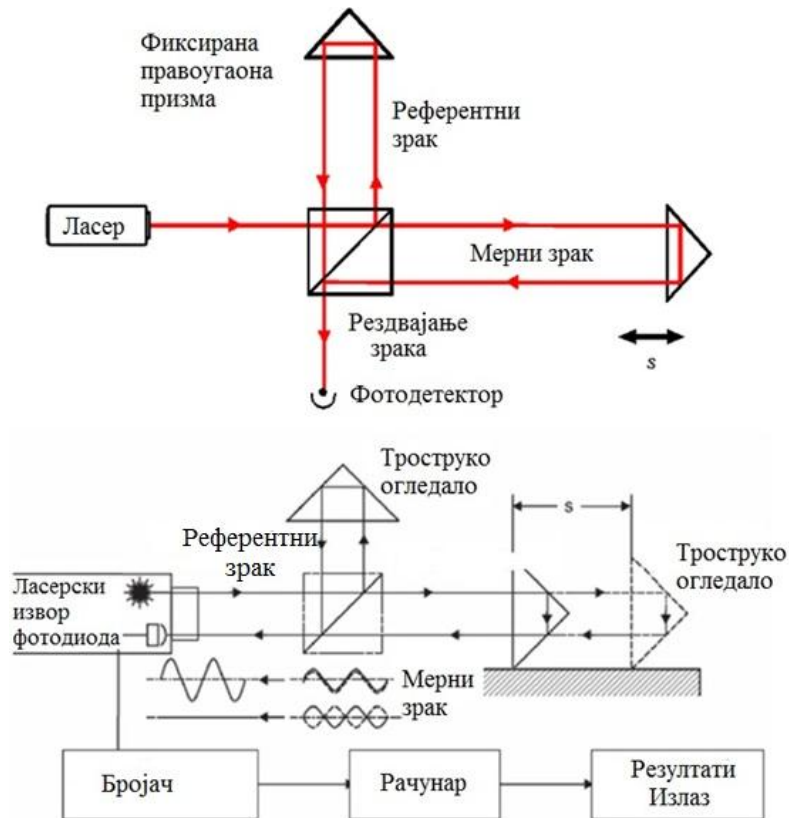
5.2.5.2 Ласерска интерферометрија

Ласерска интерферометрија је добро уходана метода за мерења удаљености и углова са одличном прецизношћу. Давне 1880. године, ласерска интерферометрија је први пут демонстрирана као метод мерења. Иако је технологија знатно напредовала кроз године, основни принцип коришћења није се знатно мењао [166].

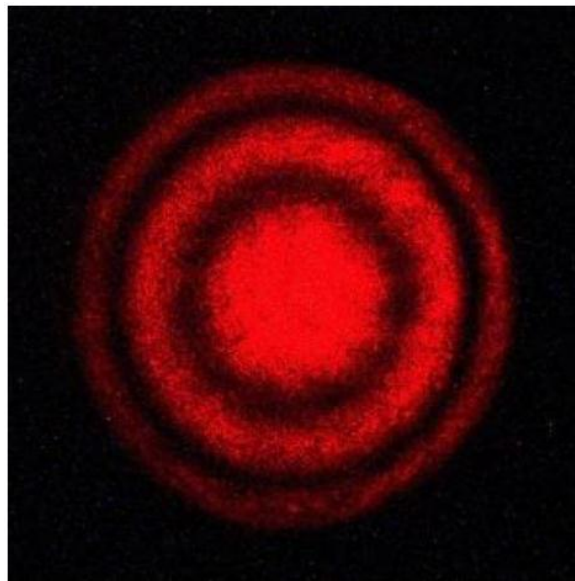
Физичка основа интерферометријских поступака су кохерентни светлосни таласи који путују различитим путевима. Основа рада ласерског интерферометра је раздвајање електромагнетних таласа, као и њихово поновно спајање након преласка различитих путева. Та појава спајања двају таласа који носе енергију, назива се интерференција, а настали талас добија облик и величину зависну од облика изворних таласа.

Основна идеја интерферометрије укључује сноп светла (или неку другу врсту електромагнетског зрачења) и његово дељење на два једнака дела коришћењем делитеља зрака. То је комад стакла чија је површина превучена врло танким слојем сребра. Ако се светло усмери на делитељ, половина зрака ће проћи кроз њега, а остатак ће се рефлектовати. Рефлектовани зрак, који се назива и референтни, путује до призме и од ње до фотодетектора. Други зрак путује до или кроз мерени комад, одбија се од другог огледала назад кроз разделник до камере и при томе прелази већу удаљеност од првог зрака, при чему му се мало мења фаза (слика 5.10).

Када се та два зрака сусретну на фотодетектору, они се преклапају и њихова фазна разлика ствара узорак светлих и тамних подручја. Светла подручја су узрок конструктивне интерференције, а тамна деструктивне, као што је приказано на слици 5.11. Тачан узорак интерференције зависи од додатног пута који је прешао други зрак. Прегледом и мерењем светлих и тамних подручја, односно колико се пута изменила интерференција из конструктивне (светле пруге) у деструктивну (тамне пруге), удаљеност се може одредити са великом тачношћу [168].

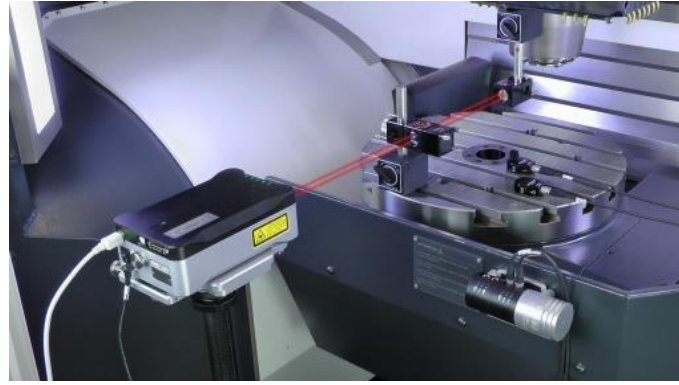


Слика 5.10. Принцип интерферометријског мерења дужине [167]



Слика 5.11. Приказ светлих и тамних пруга преклапања зрака [169]

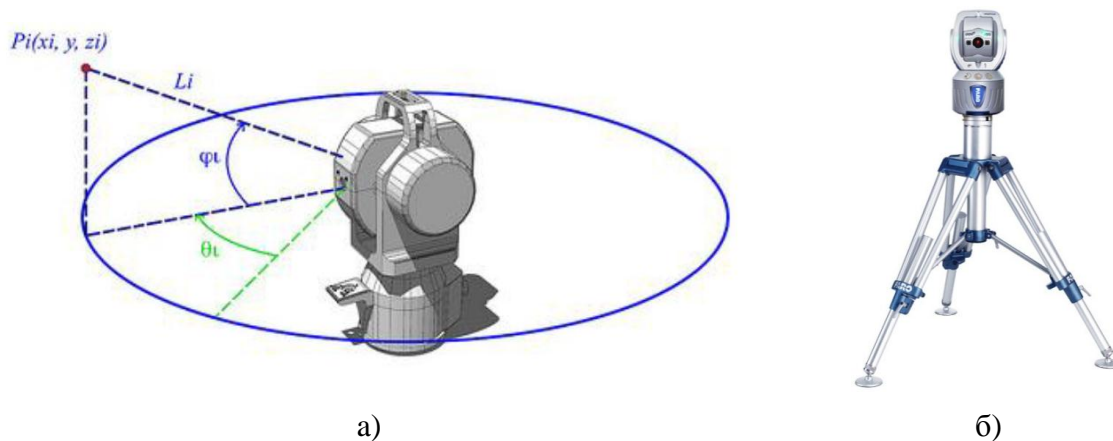
Ласерски интерферометри се користе за прецизна мерења дужине и прецизна мерења угла. Најчешће се примењују у производњи алата, посебно за високо прецизне машине. Маchine чији је погон контролисан ласерским интерферометрима, служе у производњи сложених компоненти са производним толеранцијама израженим у нанометрима. На слици 5.12 приказана је примена ласерског интерферометра у машинској индустрији, за одређивање линеарног померања алата.



Слика 5.12. Примена ласеског интерферометра код мерења померања [170]

5.2.5.3 Теодолит

Теодолит (*laser tracker*) представља преносни координатни мерни уређај. Његов велики мерни опсег омогућује једноставно и брзо мерење великих делова. Слика 5.13-а. приказује теодолит са припадајућим угловима, док је на слици 5.13-б приказан теодолит са стативом произвођача *FARO*.



Слика 5.13. Принцип рада теодолита и уређај марке *FARO* [171]

Принцип рада теодолита заснива се на мерењу два угла и удаљености. Удаљеност се мери ласерским интерферометром или *ADM* (*Absolute Distance Meter*) методом, а углови се мере угловним енкодерима који мере две механичке осе (азимутну осу и осу ротације). Теодолит шаље ласерски зрак на ретрорефлективну мету, која се поставља или је већ монтирана на део који се мери. Тај зрак се рефлектује од мете и враћа натраг у теодолит истим путем којим је и изашао. Уређај за мерење удаљености (ласерски интерферометар или *ADM*), анализира светлост која улази натраг у теодолит и израчунава удаљеност до мете [172].

Примена теодолита се најчешће среће код: уравнивања делова, монтаже, контроле, израде алата и реверзног инжењерства.

5.2.6 Рачунарска рендгенска томографија

Технологија рачунарске рендгенске томографије (*CT*) користи *X*-зраке за рачунарску реконструкцију попречног томографског слоја на бази вишеструког мерења апсорционих вредности *X*-зрака, односно израду *3D* приказа скенираног објекта.

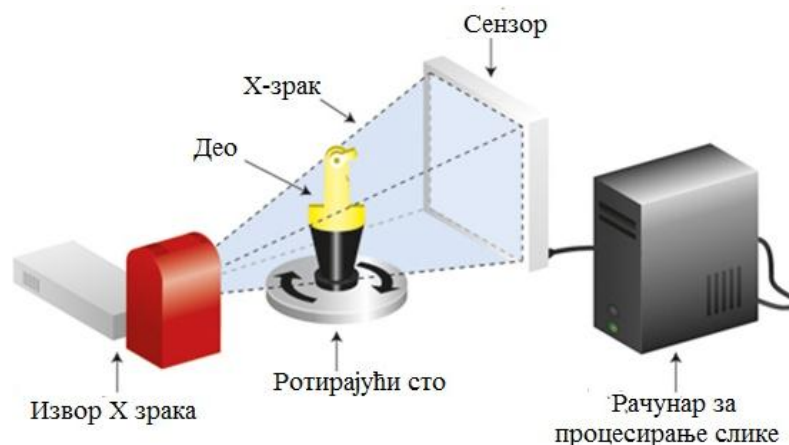
CT представља најнапреднији уређај за индустријско мерење и анализирање делова направљених од разних врста материјала. Коришћењем ове методе, могуће је добити

увид у унутрашњост одређеног дела како би се уочили евентуални недостаци и одступања, настала за време производње, осигурала доследност и како би се могла извући врло прецизна и детаљна мерења унутрашње конфигурације.

Да би анализирали и тестирали унутрашње карактеристике делова и склопова, произвођачи су морали резати или ломити прототипове, покушавајући идентификовати недостатке или растављати склопове. Такав приступ је био доста компликован, дуготрајан, али и скуп. Потпуна димензиона мерења, контрола унутрашњих карактеристика и поређење са *CAD* моделом истог дела могла је потрајати данима, па чак и недељама.

Примена *СТ* у индустрији допринела је идентификовању недостатака унутар делова или склопова без њиховог сечења или демонтаже, што је раније била пракса. Тако је омогућено потпуно мерење, унутрашња контрола и поређење са *CAD* моделом дела или склопа без њиховог растављања.

СТ мерење је врло прецизно и пружа поглед на све димензије и на најмање детаље. Ова технологија омогућава виртуални приказ пресека и анализу унутрашњих елемената без ломљења и растављања, мерење запремине делова, њихову удаљеност и приказ положаја, облик и величину шупљина и инклузије. Такође омогућава зумирање до неколико хиљада пута, посматраног дела [173]. Саставни елементи *СТ* уређаја и принцип рада приказани су на слици 5.14.



Слика 5.14. Принцип рада *СТ* скенера [174]

X-зраци су облик електромагнетског зрачења, као што је и светлост. Њихова специфичност је врло кратка таласна дужина, која је отприлике 10.000 пута мања од таласне дужине светла. Управо је та карактеристика одговорна за способност *X*-зрака да могу продрети кроз материјале који апсорбују или рефлектују обично светло.

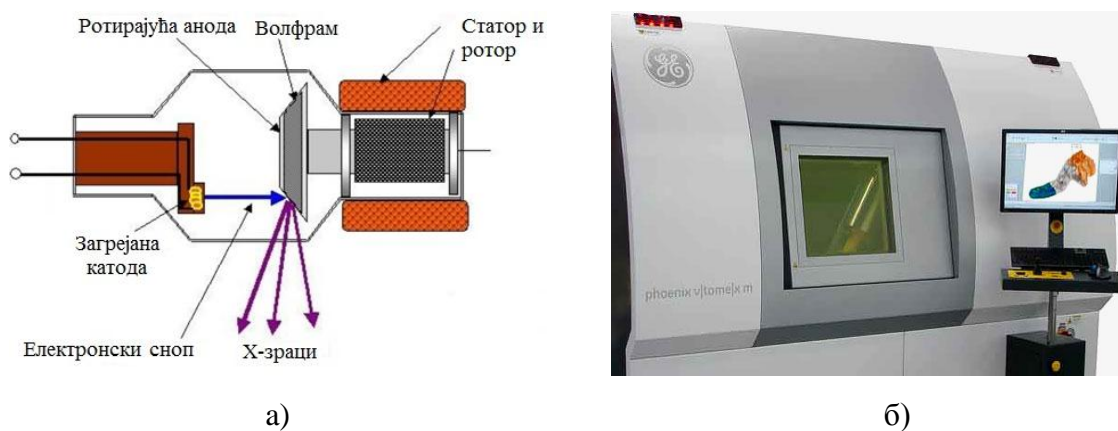
X-зраци имају сва својства светлости, али је врло тешко манипулисати њиховим понашањем. На пример, светлост се ломи при пролазу кроз стакло што значи да може бити усмерено употребом сочива у уређајима попут камере, микроскопа, телескопа и сличних уређаја. *X*-зраци се такође ломе, али јако благо при чему су потребни најнапреднији уређаји како би детектовали ту промену смера, што значи да је готово немогуће рефлектовати *X*-зрак [175].

Уобичајени начин добијања *X*-зрака је у рендгенској цеви. То је вакуумска цев у којој се са једне стране налази анода, а с друге катода, уз коју се налази ужарена нит. Катода је на вишем напону у односу на аноду. Када кроз ужарену нит тече електрична струја, она се ужари (волфрам се ужари на око 2600 K), па катода избацује електроне које се убрзавају у електричном пољу између катоде и аноде. Електрони ударају у аноду која је

сачињена од материјала који су отпорни на високу температуру, попут молибдена и волфрама, а уједно се и врти како би имала што боље хлађење. При томе се 99% енергије електрона претвара у топлоту, а само 1% одлази у облику јонизирајућег зрачења које под правим углом излази кроз мали отвор рендгенске цеви (слика 5.15-а).

Виши напон доведен катода резултује већом брзином електрона који погађају аноду, чиме се смањује таласна дужина емитованог X-зрака. Што је таласна дужина мања, већи је интензитет зрачења и његова продорност. Већи напони се користе за мерење дебљих и гушћих материјала. Снага извора зрачења креће се у границама од 100 kV до 400 kV [178].

СТ уређаји се израђују као отворени и затворени. Отворени СТ уређаји се обично користе за скенирање већих делова и њихова примена је доста честа у авио индустрији. Код отворених, постоји повећана опасност за људско здравље. На слици 5.15-б приказан је тип затвореног СТ уређаја.



Слика 5.15. Добијање X - зрака [176] и СТ скенер затвореног типа [177]

СТ скенирање се користи у сврхе: поређења са CAD моделом, испитивања материјала, анализу склопова и реверзног инжењерства.

5.2.7 Поређење различитих уређаја за скенирање

Код метода мерења које користе камеру за одређивање координата тачака, као што је случај код фотограметријских метода и пројекцијских скенера, на резултат мерења може утицати несавршеност оптичког система камере. Како би резултати мерења били тачнији, потребно је калибрисати камере. Калибрација се обавља поређењем слике добијене из камере с познатом сценом. Такође, код таквих уређаја резолуција може утицати на мерну несигурност ако камера не може мерити толико ниске вредности па због заокруживања резултата на већу вредност настају грешке.

Рефлективност површине код пројекцијских скенера може стварати проблеме, ако се пројцира бело светло, док код савремених пројекцијских уређаја плаво светло има могућност филтрирања других извора светла. Шупљине делова стварају проблеме код пројекцијских уређаја, јер камера и пројектор нису на истој оси па је у неким случајевима немогуће ухватити бочне делове цилиндра. Због тога се онда користи нека додатна метода, за мерење таквих облика.

Код фотограметријских метода, искуство оператера има значајну улогу, јер је потребно знати тј. проценити из којих углова фотографисати објекат због могуће појаве неједноликог осветљења, али и због потребног броја снимака, јер ако је тачка снимљена са више позиција њен положај ће бити боље дефинисан. Камера са већом резолуцијом и мањи објекат снимања, дају већу тачност.

Табела 5.1. Поређење различитих уређаја за скенирање [179]

	Вишесензорски 3D мерни уређај	Мерне руке	Фотограметрија Пројекцијски скенери	Пројекцијски скенери	Ласерски интерфероме- тар	Теодолит	Рачунарска рендгенска томографија
Детекција површине	Контактна / Бесконтактна	Контактна	Бесконтактна	Бесконтактна	Бесконтактна	Контактна	Бесконтактна
Вођење	Ручно/ аутоматизовано	Ручно	Ручно / аутоматизовано	Аутоматизовано	Ручно	Ручно	Аутоматизовано
Преносивост	Фиксни уређај	Преносиви уређај	Преносиви уређај	Преносиви уређај	Преносиви уређај	Преносиви уређај	Фиксни уређај
Контрола	<i>Off-line</i>	<i>Off-line</i>	<i>On-line</i> и <i>Off-line</i>	<i>Off-line</i> и <i>On-line</i>	<i>Off-line</i>	<i>On-line</i> и <i>Off-line</i>	<i>Off-line</i> и <i>On-line</i>
Мерни опсег	$\leq 1 \text{ m}^3$	R= 0,5 m до R= 2 m	$\sim 30 \text{ m}^3$	$\sim 1 \text{ m}^3$	$\leq 20 \text{ m}$	100 m x 360° x 270°	$\leq 1 \text{ m}^3$
Брзина мерења	Средња	Ниска	Једна камера - ниска; Више камера - средња до висока	Једна камера - ниска; Више камера - средња	Средња	Висока у једној тачки (<i>on-line</i> мерење), ниска при мерењу геометрије	Ниска
Резолуција	Зависи од сензора; Мерни пипак $\sim 1 \text{ }\mu\text{m}$	$\sim 50 \text{ }\mu\text{m}$ до 100 μm	10 μm до 100 μm	30 μm до 100 μm	$\sim 10 \text{ nm}$	$\sim 20 \text{ }\mu\text{m}$	1 μm

На тачност ласерских мерења велики значај имају атмосферски услови. Чак и мала промена температуре, притиска или влажности ће утицати на промену таласне дужине ласерског зрака, али и лом ласерског зрака проласком кроз атмосферу. Постоље на којем се налази извор ласерског светла током целог процеса мерења мора бити стабилно и добро учвршћено.

Код *СТ* уређаја на резултат мерења утиче величина ужарене нити и резолуција детектора. Како се сваки детектор састоји од ситних елемената, слика која се добија имаће број пиксела зависно од резолуције детектора што може стварати проблеме код мерења ивица. Такође је битно нагласити, да ако је снага извора зрачења већа, то ће зрак лакше продирати кроз материјал и апсорбовано зрачење ће бити мање, што ће резултирати светлијом сликом коју даје детектор.

Са аспекта мерног опсега, теодолит омогућава мерења највећих објеката. Због тога је њихова примена најчешћа у авио индустрији, за поравнавање крила авиона током монтаже и за постављање, као и за контролу великих делова.

Фотограметријске методе су такође погодне за мерење већих објеката. Оно што им омогућава таква мерења је првенствено преносивост. Уређаји који имају мањи мерни опсег омогућавају тачнија мерења. За најтачнија мерења се користе ласерски интерферометри, зато је њихова примена најчешће при изради алата за високо прецизне машине.

Најбржа мерења дају фотограметријске методе. Ручно снимање једном камером је доста споро, јер оператер мора кружити око објекта и из различитих углова снимати. Мерења теодолитом такође могу бити брза, ако се не мери геометрија већ специфичне тачке премештањем ретрорефлективне мете. Најспорија су *СТ* мерења, која могу потрајати по неколико сати, али једино она дају увид у унутрашњу структуру материјала. За добијање *3D* модела дела, ради поређења са изворним *CAD* моделом, најпрактичније је коришћење пројекцијских скенера, јер омогућавају прикупљање стотина хиљада тачака у секунди.

Пројекцијски скенери и фотограметријске методе се користе на производним тракама за контролу спољне геометрије. Пројекцијски скенери се могу попут *СТ* ротирати на покретном постољу око траке.

Убрзани развој мерних техника омогућио је и такве уређаје који истовремено користе више мерних метода за мерења.

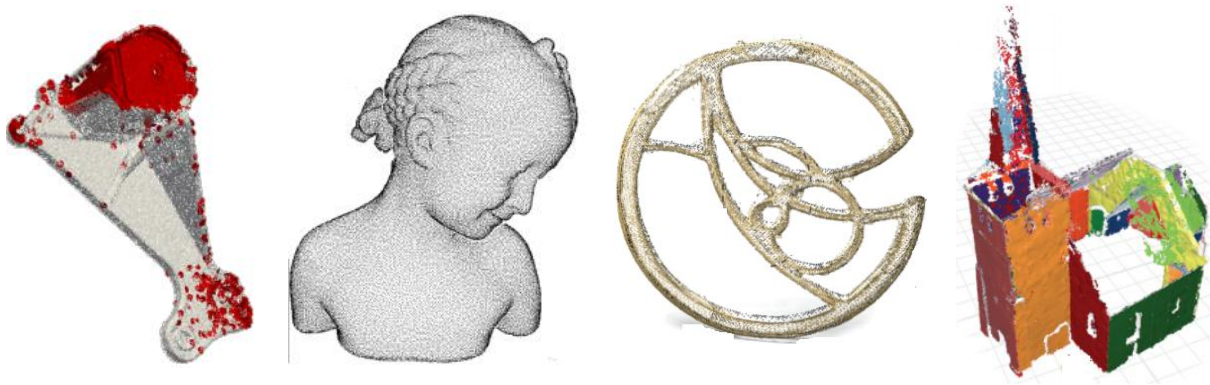
Поређење различитих уређаја за скенирање са аспекта детекције површине, вођења, преносивости, типа контроле, мерног опсега, брзине и резолуције мерења, дати су у табели 5.1.

5.3 Облак тачака

Облак тачака (*point cloud*) представља скуп тачака података у тродимензионалном координатном систему. Ове тачке се обично дефинишу у *XYZ* формату и представљају скуп *3D* мерења. Због положаја који мерене тачке заузимају у простору носи назив "облак". Један део се може мерити неколико пута из различитих тачака гледишта [21]. На слици 5.16 приказани су облаци тачака кроз примену у различитим областима.

Облаци тачака могу се добити из *3D* скенера, који мере велики број тачака са површине објекта, или *SMM* и обично као излаз дају облак тачака као датотеку података (*data file*). Осим тога, облак тачака представља скуп тачака мерног уређај. Као резултати *3D* процеса скенирања, облаци тачка се користе у многе сврхе, укључујући креирање *3D*

CAD модела у производњи делова, метрологији, инспекцији квалитета и мноштва визуализације, анимације, рендеринга и маси прилагођених апликација.



Слика 5.16. Облаци тачака код различитих апликација [22]

Мада се облаци тачака директно рендерују и испитују, они углавном нису директно употребљиви у већини 3D апликација. Они се обично конвертују у троугаоне мрежне (*mesh*) моделе (*STL* датотеке) или у *NURBS* (*Non-Uniform Rational Basis Spline*) површинске моделе кроз процес назван реконструкција површине.

5.3.1 Контактни облак тачака наспрам бескотактног

Процес реверзног инжењерства почиње од снимања података (*data capture*) са површине објеката помоћу контактне или бескотактне методе. Контактни тип уређаја обично даје прецизније мерење, али је спорији у процесу прикупљања података, посебно када делови имају комплексан 3D (*free form*) облик [180].

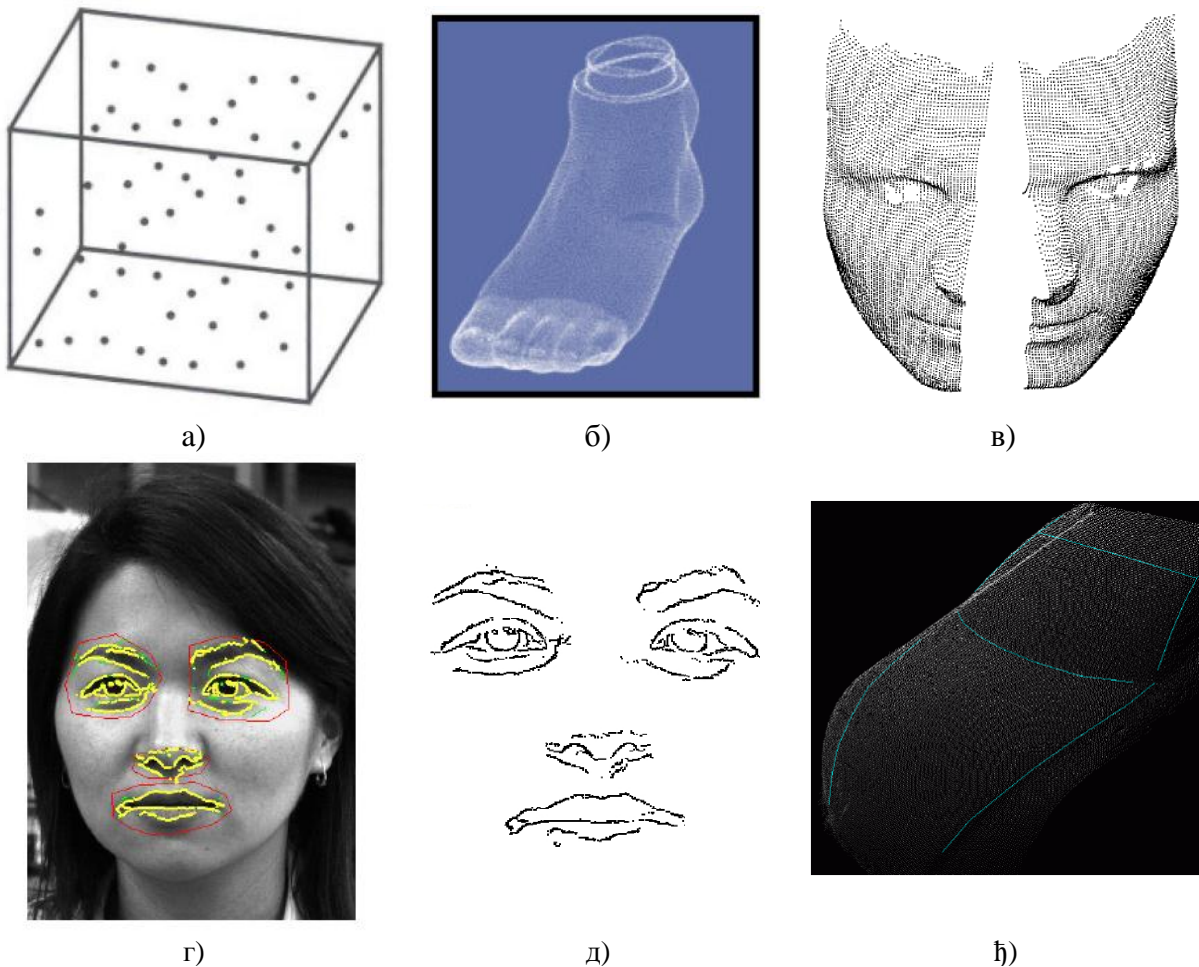
С друге стране, бескотактни уређаји могу убрзати процес снимања података са високом прецизношћу [154]. Коришћење ласерског скенирања обично производи облаке тачака високе густине како би се сачували фини детаљи површина. Тако је тешкоћа процесирања милиона тачака, добијених уређајем за ласерско скенирање, главни проблем у току креирања потребне површине дела. Већина софтверских пакета за ласерско скенирање не може олако да ради са великим бројем сета података облака тачака [181].

Скоро 80% од тачака у једном облаку тачака је сувишно у већини случајева реконструкције модела [157]. Штавише, нису све ове тачке неопходне за генерисање површинског модела. У практичним ситуацијама, генерисање површине модела из великог броја тачака траје сувише дуго. Поред тога, проблеми складиштења и манипулисања подацима такође могу бити изазвани услед великог броја тачака [182].

5.3.2 Типови облака тачака

С обзиром на положај који у простору заузимају, облаци тачака могу бити:

- запремински (слика 5.17-а),
- површински у континуитету (слика 5.17-б) или са дисконтинуитетом (слика 5.17-в),
- 3D криволинијски/линијски у простору (слика 5.17-г, д) и
- комбиноване структуре (слика 5.17-ђ).



Слика 5.17. Различити облаци тачака с обзиром на просторни положај [183]

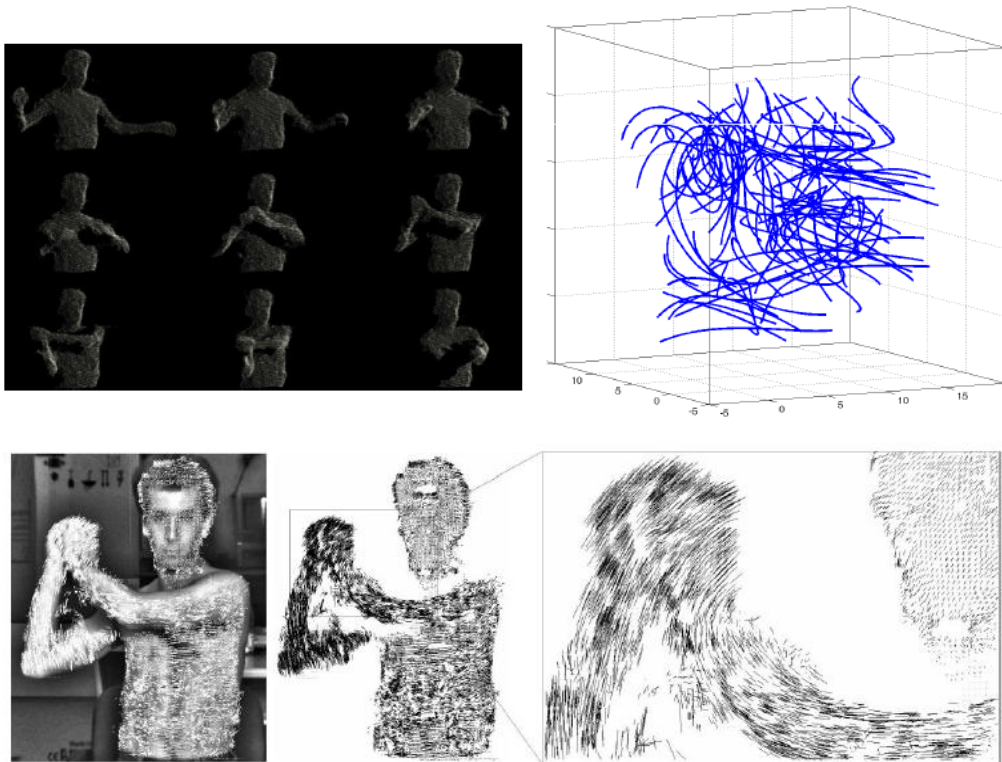
Према томе да ли су покретни или не, облаци тачака могу бити:

- статички 3D облаци тачака,
- динамички 3D облаци тачака и
- 4D облаци тачака (праћени током времена).

Статички облаци тачака су приказани на слици 5.17, док је на слици 5.18 приказан пример снимљених динамичких облака тачака.

У зависности од информација које датотека носи, облаци тачака, према *Point Cloud Library* [184] могу бити:

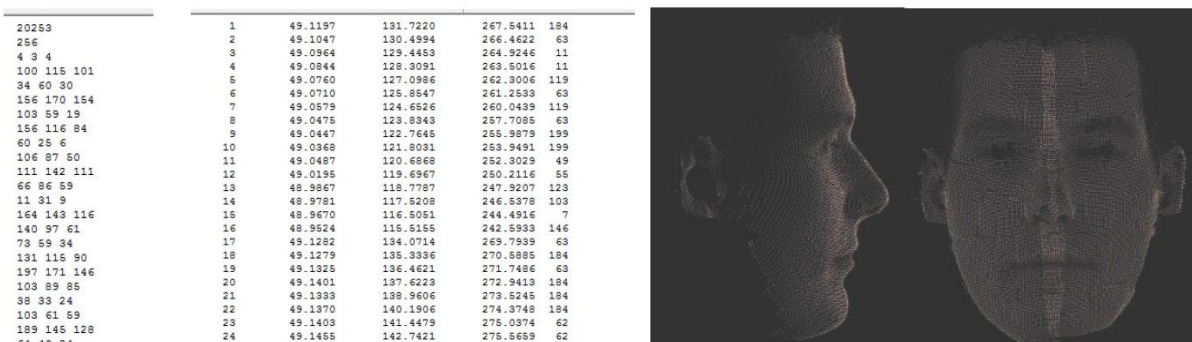
- *PointXYZ* - основни облаци тачака (са бројем и распоредом тачака) (слика 5.19),
- *PointXYZRGB* - са додатном информацијом о боји (слика 5.20),
- *PointXYZI* - са додатном информацијом о густини (*intensity*),
- *PointXYZNormal* - са додатном информацијом о нормали тачке,
- *PointXYZEDG* - са додатном информацијом о ивици (слика 5.21),
- *PointXYZFR* - динамички, са додатном информацијом о фрејму кретања (слика 5.22) и сл.



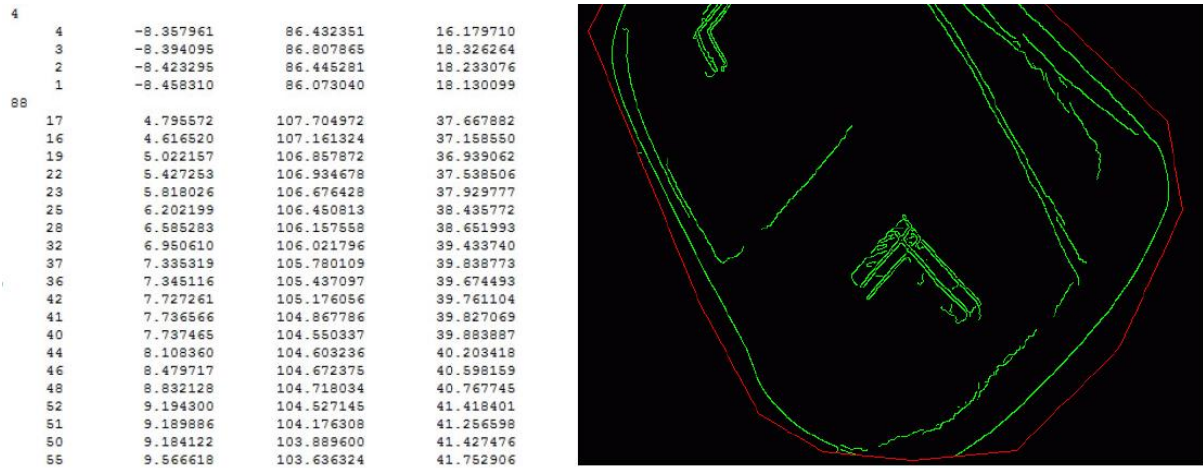
Слика 5.18. Динамички облаци тачака [183]

ID	Number	Y	X	Z
1	1	-27.031	-11.957	-1.890
1	2	-31.115	-11.463	-0.885
1	3	-8.504	-15.627	-1.776
1	4	-12.016	-2.723	-0.932
1	5	-8.995	-33.992	1.184
1	6	-9.158	-32.492	2.799
1	7	-9.223	-31.287	-1.775
1	8	-9.288	-29.820	-1.846
1	9	-31.890	-1.147	-0.889
1	10	-33.572	-32.425	-0.818

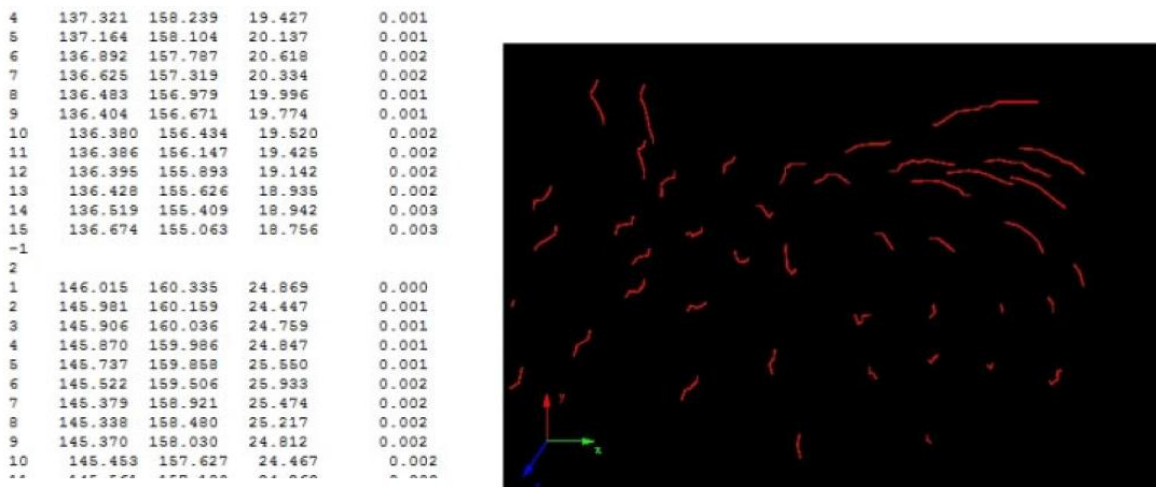
Слика 5.19. PointXYZ - датотека облака тачака [183]



Слика 5.20. PointXYZRGB - облак са обојеним тачкама [183]



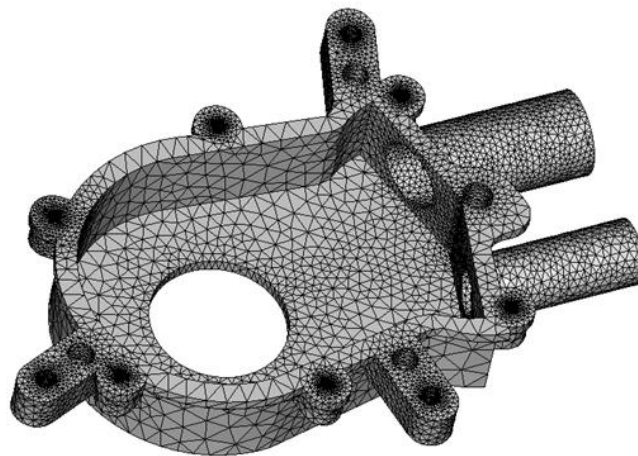
Слика 5.21. PointXYZEDG - облак тачака са ивицама [183]



Слика 5.22. PointXYZFR - динамички облак тачака [183]

5.3.3 STL/MESH датотека облака тачака

STL представља формат датотеке пореклом из стерео-литографског CAD софтвера, који је широко у употреби код 3D штампања и у CAD-у. Овај формат датотеке је подржан и од стране многих других софтверских пакета [21].



Слика 5.23. Пример изгледа STL датотеке [185]

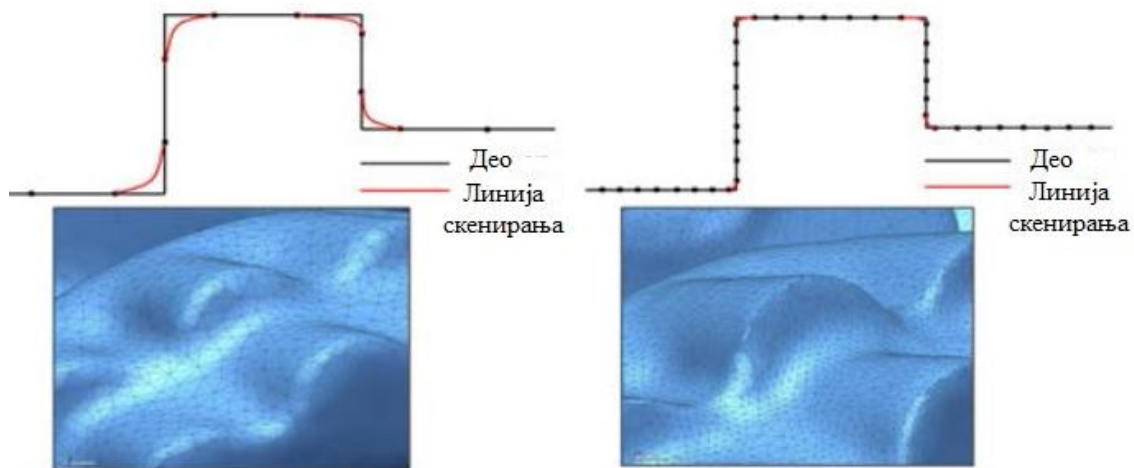
STL датотека садржи само површинску геометрију *3D* дела без боје, текстуре или других уобичајених атрибута *CAD* модела. Она такође садржи сирову неструктурирану триангулисану површину јединичне нормале и темена (поређану по правилу десне руке), користећи тродимензионални картезијански координатни систем (слика 5.23).

STL формат представља како *ASCII* тако и бинарну репрезентацију. Штавише, бинарне датотеке су још фреквентније јер су компактније. *STL* координате морају бити позитивни бројеви. Немају информацију о размери док су јединице произвољне.

5.3.4 Карактеристике облака тачака

Резолуција је једна од главних особина мрежне датотеке и дефинише ниво видљивих детаља скенираних података. Може се упоредити са резолуцијом екрана, која је дефинисана бројем пиксела. Величина страна троуглова мрежне датотеке назива се резолуција (изражен у милиметрима). Већа резолуција повећава број троуглова мрежне датотеке. За еквивалентан објекат, величина мрежне датотеке је стога пропорционална резолуцији.

Важно је запазити: резолуција и тачност су два различита фактора. Резолуција дефинише само ниво детаља. Мрежа може бити једнако тачна у односу на другу са нижом резолуцијом. Разлика је значајна у врло закривљеним областима и на ивицама (слика 5.24).



Слика 5.24. Разлика између резолуције и тачности облака тачака [21]

Сирова (*raw*) мрежа представља датотеку директно добијену од стране уређаја за скенирање, пре било какве операције након третмана. Датотека која се помиње као чист (*clean*) облак тачака, је датотека која је накнадно третирана поступцима препроцесирања и спремна за операције реверзног инжењерства.

Особине улазног (сировог) облака тачака су важан фактор у разумевању понашања метода реконструкције површине. Овде је дата карактеризација облака тачака у складу са особинама које имају највећи утицај на алгоритме реконструкције: густина узорковања (*sampling density*), шум (*noise*), тачке ван опсега (*outliers*), неусклађеност (*misalignment*) и недостатак података (*missing data*). Илустрација оваквих одступања дата је на Слици 5.25 за *2D* криву.

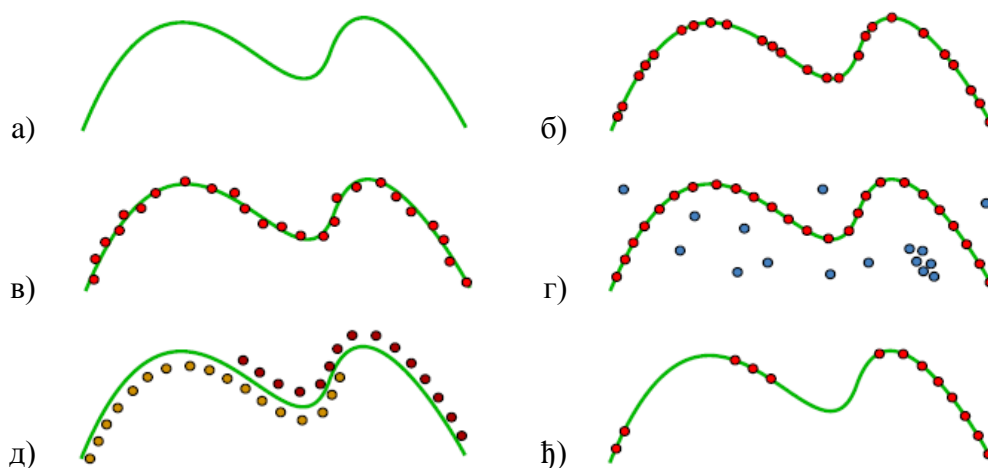
Расподела површински узоркованих тачака се назива густина узорковања. *3D* скенирање типично производи неуниформно узорковање по површини, што може бити због удаљености од објекта до положаја скенера, оријентације скенера, као и облика

геометријског елемента. Многи алгоритми површинске реконструкције морају бити у стању да процене појам густине узорковања у сваком тренутку.

Слика 5.25-а приказује оригинални облик $2D$ криве коју је потребно скенирати. Неуниформно узорковање на кривој приказано је на слици 5.25-б. Тачке које су насумично распоређене у близини површине се традиционално сматрају шумом (слика 5.25-в). Специфична расподела је обично функција скенирања дела, као што су сензор шума, дубина квантизације и удаљеност или оријентација површине у односу на скенер. За неке популарне скенере, шум се јавља дуж видног поља, и на њега могу утицати површинске особине, укључујући и карактеристике материјала као што је расипање (*scattering*). У присуству оваквог шума, типичан циљ алгоритма површинске реконструкције је да креира површину која пролази поред тачака, без апроксимације у односу на шум. Уобичајени начини за решавање шума су робусни алгоритми који намећу глаткоћу на излазу [186], као и методе које користе робусне статистике [187].

Тачке које су далеко од стварне површине су класификоване као тачке ван опсега. Тачке ван опсега се најчешће јављају у процесу аквизиције, захваљујући структури дела. У појединим случајевима су насумично распоређене по запремини, где је њихова густина мања од густине тачака које се узоркују са површине. Тачке ван опсега такође могу бити структурираније, међутим, тамо могу да постоје групе тачака високе густине далеко од површине (Слика 5.25-г). За разлику од шума, тачке ван опсега су тачке које не би требало да се користе за оцењивање површине, било експлицитно преко детекције [188] или имплицитно преко робустних метода [189].

Несавршена регистрација опсега скенирања доводи до неусклађености тј. недостатка уравниања. Неусклађеност се обично догађа при алгоритму регистрације, када је иницијална конфигурација сета домета скенирања далеко од оптималне усклађености тј. уравниања [190]. Неусклађеност је значајан изазов за реконструкцију површине, што уводи структурирани шум преко скенова који су незнатно офсетовани од површине. На пример, то може да изазове неприкладност при једноставном проналажењу површине која пролази поред скенова, што може довести до оштрих дисконтинуитета између различитих скенова. Слика 5.25-д илуструје овај случај, дисконтинуитет може постојати тамо где црвени и наранџасти узорци престају да се преклапају.



Слика 5.25. Различите форме облака тачака дела, датих у случају криве у $2D$ приказу [182]

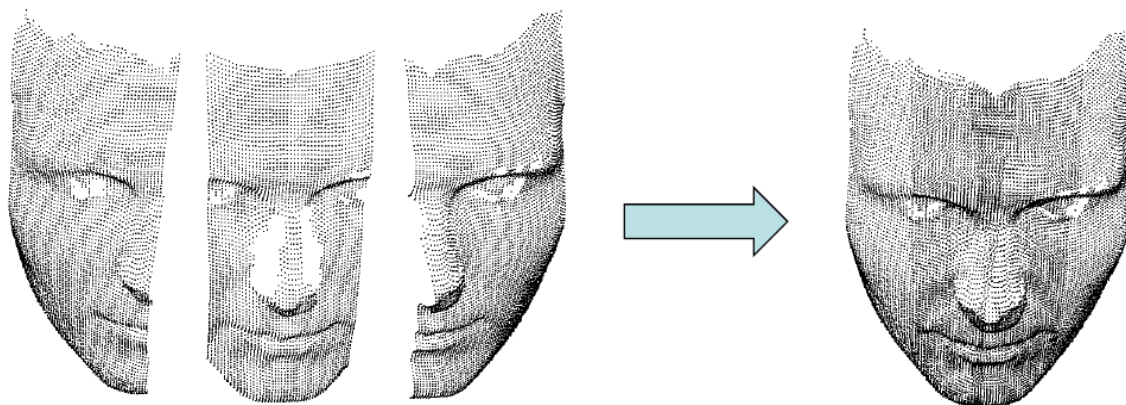
Мотивациони фактор многих метода реконструкција представља недостатак података. Недостак података се јавља због фактора као што су ограничен домет сензора, висока

апсорпција светлости и оклузија у процесу скенирања, где долази до неузорковања облика великих делова. Како технологија скенирања напредује већом прецизношћу, гушћим узорковањем и нижим нивоима шума, оклузија остаје сталан проблем због физичких ограничења уређаја. Напомињемо да нема разлика код узорковања неуниформних података, као кад је густина узорковања нула у таквим областима (слика 5.25-ђ).

Многе методе баве се недостатком података уз претпоставку да је скенирани облик водонепропустан [186, 191, 192, 193, 194]. У оквиру ове поставке, циљ методе је да се носи са поменутих изазовима када постоје подаци и закључак о геометрији површине делова која није узоркована. Друге методе су фокусиране на руковање недостајућим подацима покушавајући да дођу до тополошке структуре оригиналне површине на могућу штету задржавања геометријске верности, на пример, проналажење површине која је хомеоморфна првобитном облику [195].

5.4 Пре-процесирање резултата 3D дигитализације

С обзиром да се поступком 3D дигитализације, у зависности од сложености облика, као резултат најчешће добија већи број облака тачака, исте је потребно накнадно поравнати - стопити/спојити (*aligne*) додавањем скупа тачака (слика 5.26).



Слика 5.26. Стапање/спајање више облака тачака у један [183]

Након процеса 3D дигитализације, свеједно која техника да је примењена, јавља се велики број практичних проблема везаних за облак тачака. Проблеми који се јављају приликом пре-процесирање су присуство шума, односно грешака мерења и пикова, (пре)велики број (сувишних) тачака, неорганизованост и непотпуност података. Основна последица наведених проблема јесте да реконструкција на бази таквих, сирових облака тачака има за резултат неадекватни CAD модел, који не одговара оригиналном објекту.

Проблеми који се јављају са резултатима 3D дигитализације се могу значајно разликовати у зависности од примењене опреме за 3D дигитализацију, процедуре мерења, геометријске сложености објекта, циља процеса RE, примењене методологије RE итд. Тако се у различитим RE системима могу наћи различите подфазе у оквиру пре-процесирања, међу којима се, у готово свим системима, могу срести:

- филтрирање података-тачака и
- редуковање података-тачака.

У зависности од врсте, намене и специфичних захтева RE система, могу се срести и следеће подфазе: анализа правости, регресиона анализа и регенерација података-тачака,

затим уређивање података-тачака, односно подфазе екстракције података по попречним пресецима и генерисања попречних и контурних кривих, које се могу срести код система заснованих на методологији попречних пресека. Са друге стране, код полигоналног *RE* прилаза, могу се срести подфазе избора група троуглова за триангулацију, селекцију ивица-ентитета, односно *Delauney*-јева триангулација.

Приближно, може се узети да пре-процесирање почиње са завршетком *3D* дигитализације, а завршава са почетком генерисања/креирања површинског модела.

Приликом скенирања се јављају и грешке које се могу поделити на случајне и систематске. Случајне грешке су последица одређених поремећаја у систему скенирања и њихова појава се не може објаснити одређеним правилима. За разлику од њих, систематске грешке се дешавају по одређеним правилима, њихов узрок се готово увек може открити, а могу се посматрати као последица примењене технологије за *3D* дигитализацију (калибрисање, осетљивост сензора...), особина објекта (површинска храпавост, одсјај, мекост материјала...), услова околине (температура, влажност, бука, вибрације...) или способности особе која врши скенирање. Случајне грешке код *3D* дигитализације се огледају у такозваним тачкама изван опсега, односно импулсном шуму док су систематске везане за појаву пикова (*spikes*), који су узрок проблема неуглачаности генерисаних кривих и површина.

С обзиром на најчешће проблеме везане за резултат *3D* дигитализације, први корак у оквиру пре-процесирања података-тачака је филтрирање, чије су две основне функције: елиминисање импулсног шума и уравнивање (глачање) података-тачака.

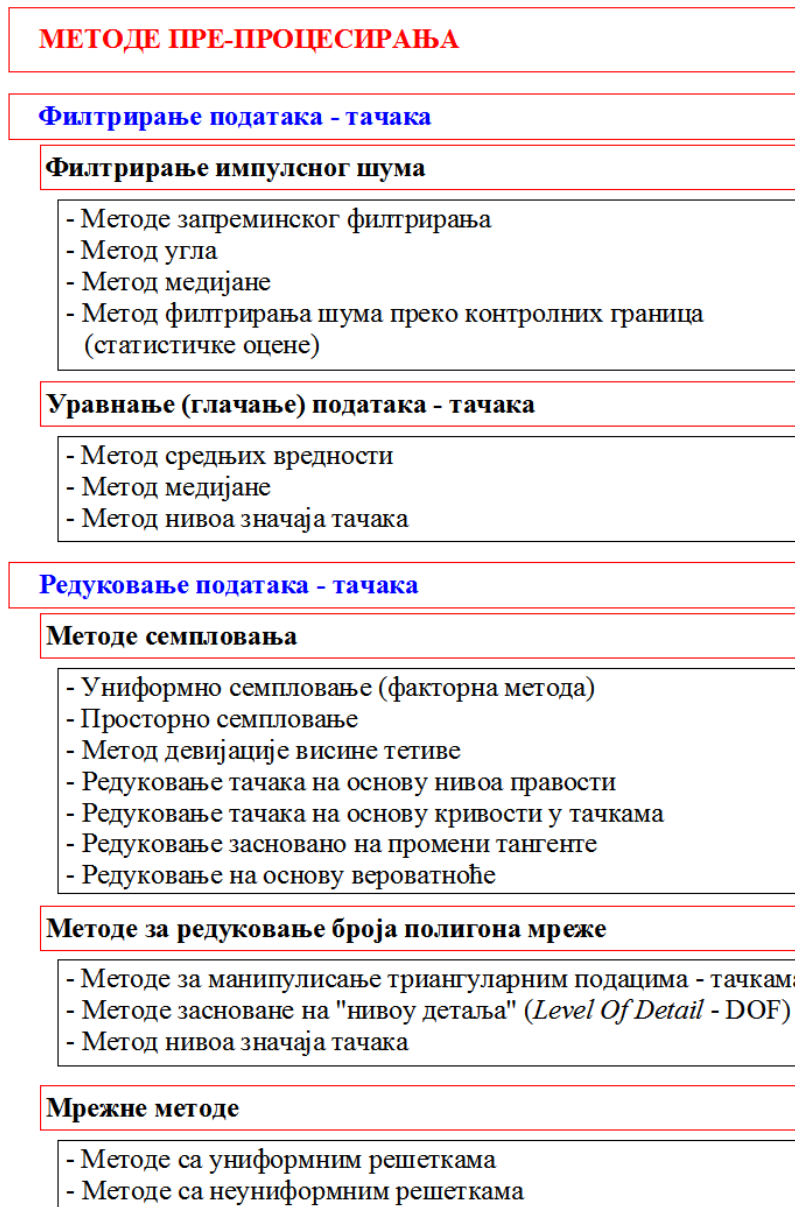
Након спровођења операција филтрирања грешака, односно уравнивања података, исти и даље садрже одређени број непотребних података-тачака (посебно када су добијене ласерским скенирањем), који пре свега оптерећује и успорава обраду података, а у одређеним ситуацијама могу и да допринесу грешкама. Овај проблем се решава операцијом редуковања непотребних података-тачака, којој се поклања све већа пажња и која значајно може да утиче како на квалитет реконструисаног модела, тако и на брзину његовог добијања.

У пракси се примењује већи број метода за редуковање података и у складу са порастом значаја све се више поклања пажња усавршавања постојећих и развоју нових. Тренутно примењиване методе за редуковање података-тачака у резултату *3D* дигитализације, могу се класификовати у три категорије:

- методе семпловања,
- методе за редуковање броја полигона у полигоналном моделу и
- мрежне методе.

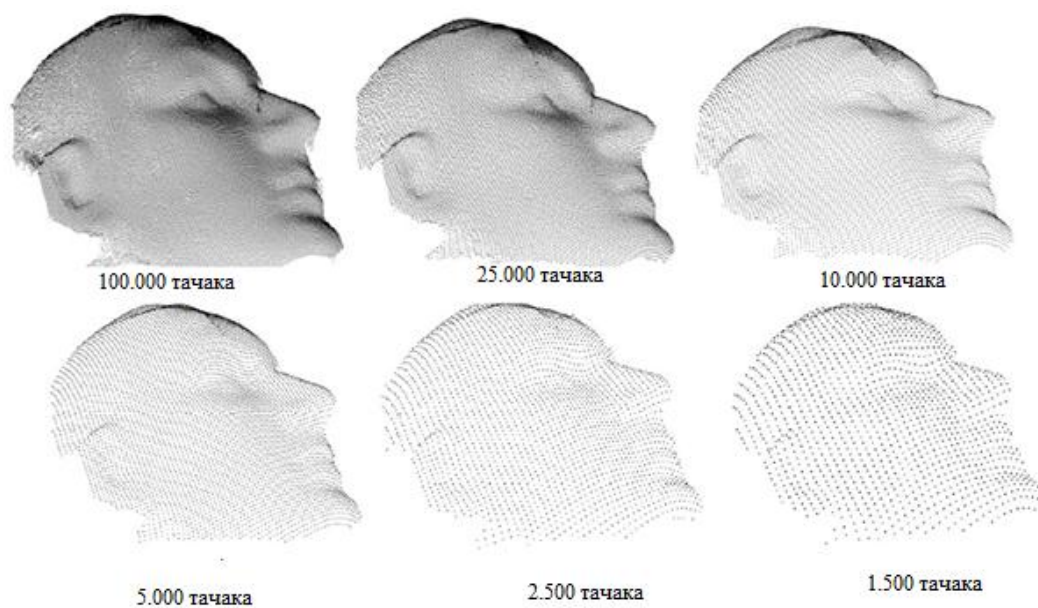
Методе у оквиру наведених категорија су приказане на слици 5.27. Детаљнији опис наведених метода препроцесирања може се наћи у [196].

Проблем превеликог броја тачака се огледа у чињеници да се током процеса *3D* дигитализације објекта, прикупи велика количина података-тачака, што је посебно карактеристично за ласерско скенирање. Чињеница је да сложенија површина објекта захтева и већи број тачака за реконструкцију. Међутим, велика количина података може и негативно да утиче на процесирање података које следи, тако што успорава процес, захтева врло моћан рачунар, а у екстремним случајевима га чини и немогућим. У складу са тим, неопходно је податке добијене дигитализацијом редуковати пре увоза у одређени софтвер за реконструкцију површина, и то на ниво који ће обезбедити очување квалитета реконструисане површине.

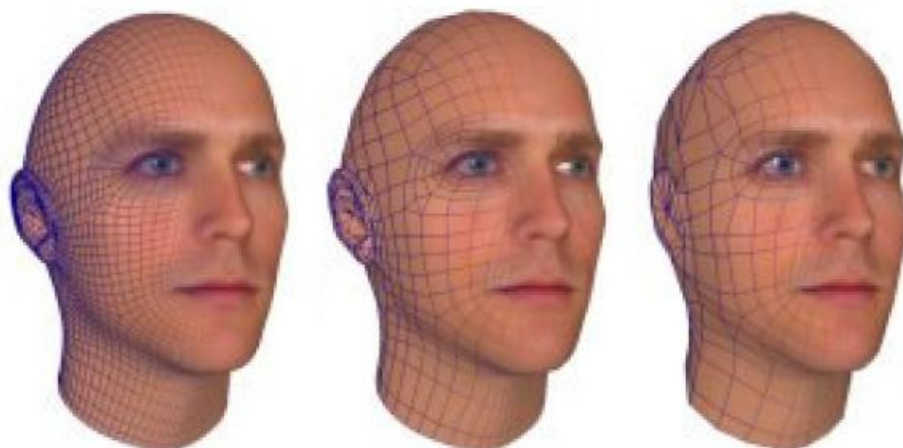


Слика 5.27. Методе пре-процесирања облака тачака [196]

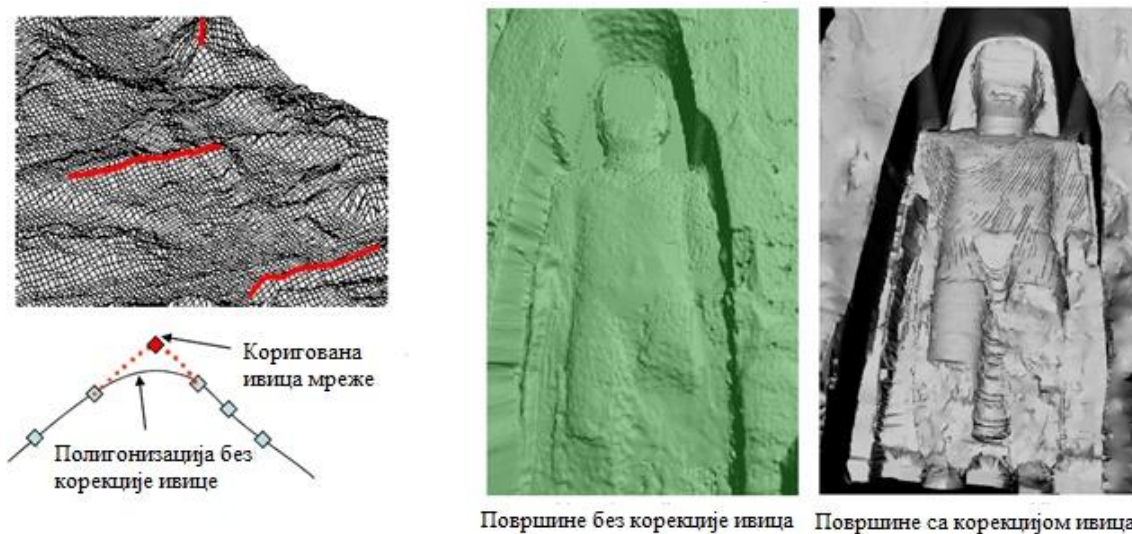
На следећим сликама приказани су примери пре-процесирања облака тачака. Пример редуције густине облака тачака јесте децимација (*decimating*), која процентуално смањује број тачака (слика 5.28). Редуција броја полигона (слика 5.29) је слична техника децимацији и смањује број полигона односно врши њихово укрупњавање. Корекција ивица (слика 5.30) је често потребна накнадна радња. Како су тачке облака тачака слободно распоређене у простору, полигонизацијом се углавном ивице аутоматски не могу извући, па их је често потребно накнадно извлачити. У зависности од сложености површина дела, софтверски пакети најчешће нису у могућности да генеришу „водонепропусну“ мрежу, па је неопходно накнадно попуњавати постојеће шупљине (слика 5.31).



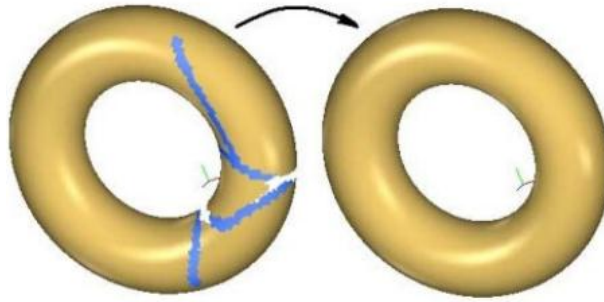
Слика 5.28. Смањење густине облака тачака - децимација [183]



Слика 5.29. Редукација броја полигона [183]

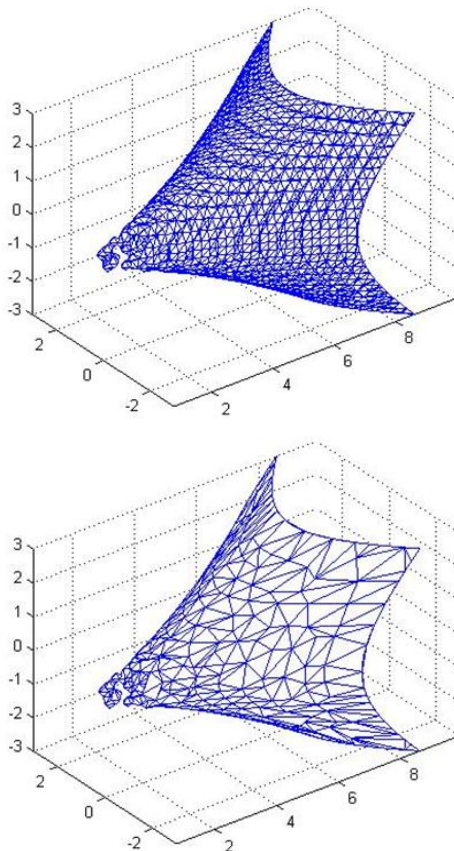


Слика 5.30. Примери корекције ивица [183]



Слика 5.31. Попуњавање постојећих шупљина на мрежи [183]

На слици 5.32 приказан је пример редуције тј. укрупњавања полигона изведене уз помоћ програмског пакета *MatLAB* преко наведеног програмског кода.

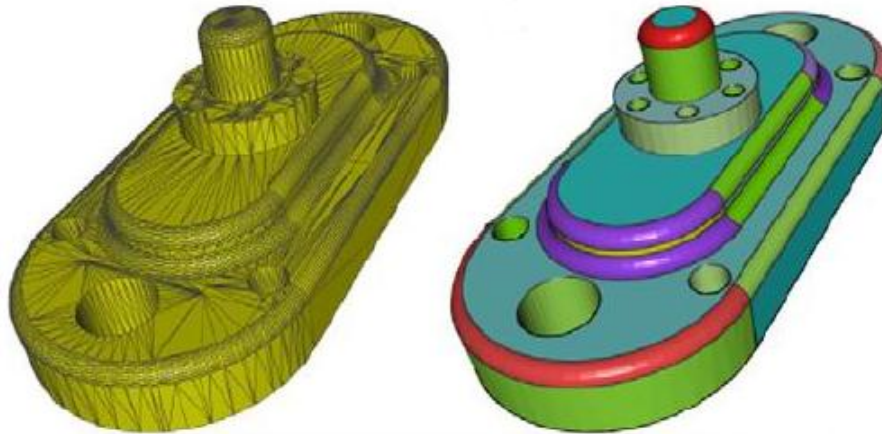


```
[x,y,z,v] = flow;
p = patch(isosurface(x,y,z,v,-3));
set(p,'facecolor','w','EdgeColor','b');
daspect([1,1,1])
view(3)
grid on
axis equal
figure;
h = axes;
p2 = copyobj(p,h);
reducepatch(p2,0.15)
daspect([1,1,1])
view(3)
grid
axis equal
```

Слика 5.32. Редуција полигона

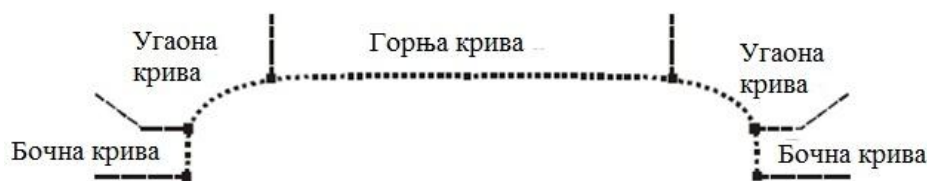
5.5 Сегментација облака тачака

Сегментација облака тачака је процес који се такође јавља у појединим системима, односно може бити потребан и то посебно у случајевима када је у питању моделирање сложенијих облика. Сегментација подразумева логичку поделу оригиналног скупа облака тачака на подскупове и то по један за сваку природну површину, тако да сваки подскуп садржи само тачке прикупљене са одређене природне површине. Другим речима, сегментација се може описати као процес дељења резултата 3D дигитализације на смислене регионе или процес екстракције важних елемената из облака тачака (слика 5.33).



Слика 5.33. Сегментација површина (триангулисани облак тачака дела и део са регионима) [197]

Под сегментацијом се обично подразумева подела $3D$ скупа тачака, односно скупа тачака које представљају површине у простору. Међутим, у системима заснованим на методологији попречних пресека, постоје прилази код којих се под сегментацијом подразумева подела тачака у оквиру скенираних попречних пресечних кривих (слика 5.34). Излаз процеса сегментације је скуп означених тачака које припадају одређеном региону.



Слика 5.34. Сегментација тачака у оквиру попречних скенираних кривих

Већина метода за сегментацију резултата $3D$ дигитализације се може сврстати у једну од следеће три категорије:

- методе засноване на детекцији ивица,
- методе засноване на расту (повећању) региона и
- хибридне методе.

Методе засноване на детекцији ивица покушавају да детектују дисконтинуитете на површинама које формирају затворене ентитете у облаку тачака. Једноставније, може се рећи да је ова техника базирана на покушају проналажења ивица у облаку тачака и изводи површине из података преко сегментације обезбеђене ивичним кривама. Уколико се трага за оштрим ивицама, морају се наћи места где нормале површине, одређене на облаку тачака, изненада мењају смер. Уколико се, пак ради о "меким" (тангентно-континуалним) ивицама, потребно је тражити места где кривости површина или други виши изводи имају дисконтинуитет.

Методе засноване на расту региона, врше сегментацију детектовањем континуалних хомогених површина које поседују сличне геометријске карактеристике. Ова техника има супротан смер у односу на претходну, јер покушава да одреди површине преко повезаних региона тачака са истим карактеристикама „као да припадају истој површини“ (нпр. група тачака са истим нормалама припада истој равни), а затим се ивице изводе као пресеци површина или посебним прорачунима.

Обе наведене групе метода имају своје предности и недостатке, у зависности од места примене. Методе засноване на детектовању ивица суочавају се са следећим проблемима. Већина метода заснованих на дисконтинуитету, приказује слабости када део ивице показује мало одступање или када се ради о хомогеним регионима. Резултат 3D дигитализације, посебно када се ради о оптичким скенерима, често није довољно поуздан у околини оштрих ивица услед рефлексије која је присутна у тим деловима. Такође, недостатак је и што се одлучивање о сегментацији врши на основу малог броја тачака из околине ивица, а већина тачака се не разматра. Проналажење меких ивица, тангентно-континуалних ивица или ивица са чак вишим нивоом континуитета, је врло непоуздано из разлога што је израчунавање извода за податке у којима је присутан шум, склоно грешкама. Уколико се, пак, прво примени поступак уравнивања облака тачака у циљу смањења грешака, оштре ивице се преводе у заобљене са малим радијусом чиме се компликује процес проналажења ивица, а такође је, кроз филтрирање шума, могућа промена позиције одређених карактеристичних елемената. Насупрот методама за детекцију ивица, методе за сегментацију засноване на регионима су добре код региона са високом хомогеношћу, али су често непоуздане и непрецизне код локализације спољашњих граница региона. Добра страна метода заснованих на површинама јесте управо одлучивање на основу много веће количине података, што умањује могућност грешака. Такође, одлучивање којој површини припада која тачка, у случају тачака у околини ивица које раздвајају две површине, је много лакше, јер то код прве групе метода често није најјасније.

У циљу превазилажења наведених проблема у обе групе метода, развијени су прилази тзв. хибридне сегментације, који комбинују методе засноване на детекцији ивица и методе засноване на расту региона. Процес сегментације није једноставан ни кад се ради о једноставним површинама, као што су равни и цилиндри, а компликације се повећавају код покушаја сегментације сложених површина. Највише примењиване параметарске површине попут *Bézier*-ових и *NURBS* површина, мапирају правоугаони параметарски домен у 3D, дајући тако за резултат делове површина са четири граничне криве. Међутим, комплексни облици не могу бити репрезентовани преко једне површине. Кључно питање код њих је, како пронаћи одговарајуће интерне границе региона који се могу представити јединственом површином.

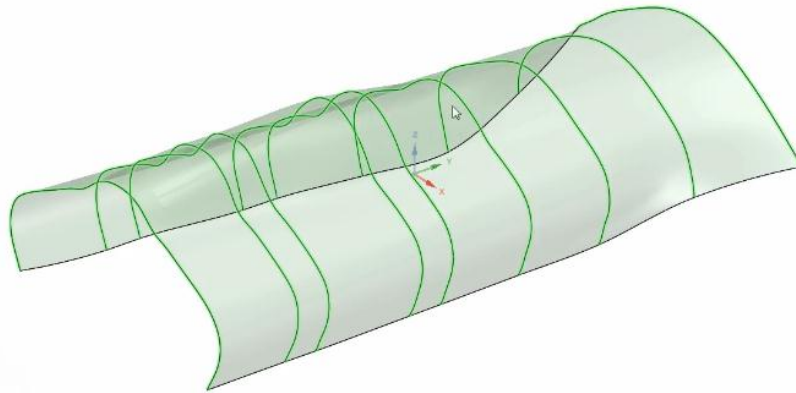
5.6 Реконструкција површине - генерисање CAD модела

Циљ фазе за реконструкцију површина јесте креирање површинског (*surface*), а затим и чврстог (*solid*) модела, у математичком облику, а на основу препроцесираног резултата 3D дигитализације.

У геометријском моделирању, површине се представљају или преко апроксимације на основу кривих или преко полигоналне апроксимације, тако да се овде приближно може говорити о два приступа. Први, данас широко примењиван у машинском пројектовању, је прилаз попречних пресека (*cross-sectional*), који подразумева генерисање површинског модела на основу пресечних кривих креираних на одређеној резолуцији према сложености површине. Код другог, полигоналног приступа, 3D површински модел се добија конвертовањем облака тачака у полигоналну мрежу која се затим преводи у површински модел.

Већина CAD система за моделирање површина описује облике преко параметарских једначина, као што су *Bézier*-ова или *B-Spline* форма. Једна од најчешће примењиваних у пракси је *B-Spline* форма, која практично представља стандард за опис сложених (*free-form*) кривих и површина у постојећим CAD системима. Процес креирања површинског

модела по принципу попречних пресека почиње са конвертовањем тачака пре-процесираних кривих у *B-Spline* криве, а затим се кроз те криве блендовањем долази до *B-Spline* површине. Блендовање површине се дефинише као процес „провлачења“ површине кроз низ кривих (слика 5.35).



Слика 5.35. Генерисање CAD модела на основу попречних пресека блендовањем [198]

5.6.1 Полигонизација

Полигоналне методе апроксимације површина имају за циљ конструисање полигонизоване површине која интерполира или апроксимира дате тачке на задовољавајућем нивоу. До данас је развијен велики број алгоритама за реконструкцију површина на бази полигоналних апроксимација, а методологија се у општем случају заснива на генерисању мреже полигона (најчешће троуглова) повезивањем тачака у препроцесираном резултату 3D дигитализације, као темена полигона, на одговарајући начин. Генерисана мрежа полигона се затим, применом различитих метода, (у које спадају: алфа-облици, *Delaunay*-јева триангулација, *Voronoi*-јев дијаграм, *ball-pivoting* алгоритам и *A*-умец), преводи у површински, најчешће *NURBS (Non Uniform Rational B-Spline)* модел (слика 5.36).

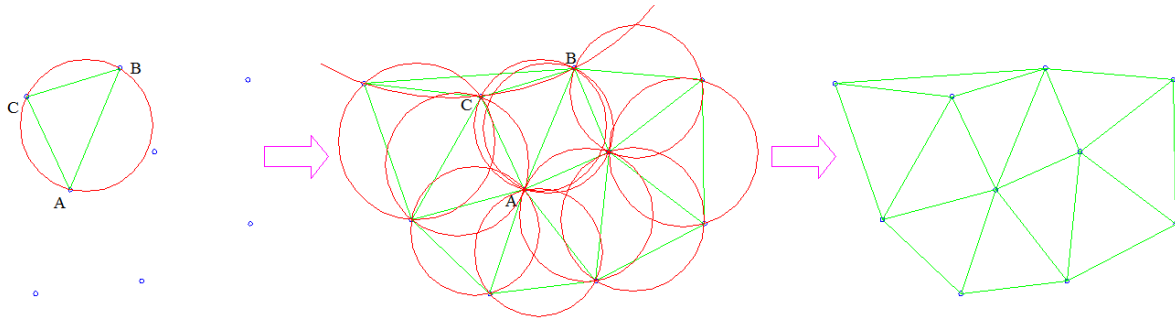


Слика 5.36. Генерисање CAD модела на основу полигона [199]

5.6.2 *Delaunay*-јева триангулација

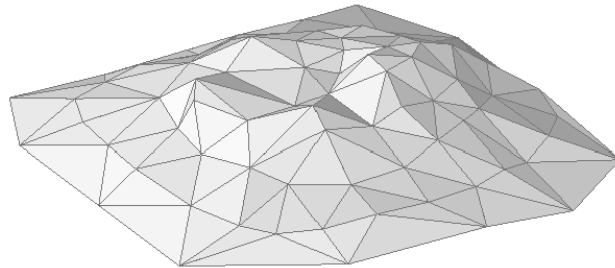
Триангулација је поступак претварања података-тачака у троугаону површину. Број троуглова је пропорционалан броју скенираних тачака, односно резолуцији скенера.

Delaunay-јева триангулација триангулише облак тачака на основу следећег услова: за сваки троугао ABC важи да се све задане тачке, осим A, B, и C, налазе изван описане кружнице троугла ABC. Овим условом триангулација добија јединствено решење (слика 5.37).



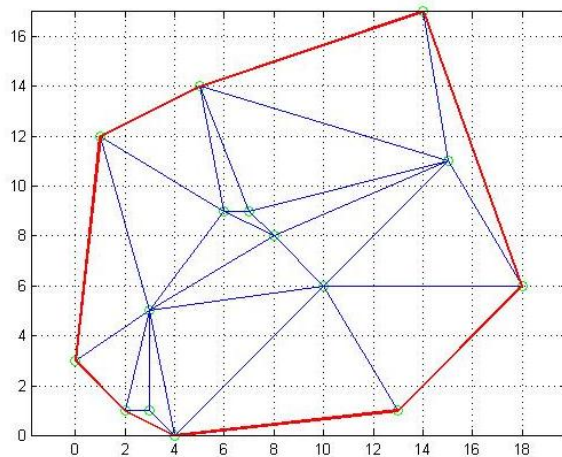
Слика 5.37. Услов *Delaunay*-еве тријангулације

У 2D простору *Delaunay*-ева тријангулација је одређена дељењем равни у троуглове, док у 3D простору она прераста у *Delaunay*-еву тетраедризацију (слика 5.38); сваки троугао постаје тетраедар који задовољава правило празне описане сфере. *Delaunay*-ева тетраедризација је јединствена за скуп тачака, осим када постоје дегенерисани случајеви у скупу (ако се пет или више тачака налазе на сфери). У овим случајевима, мора се послужити произвољним избором унутар свих понуђених решења.



Слика 5.38. Тетраедризација површине

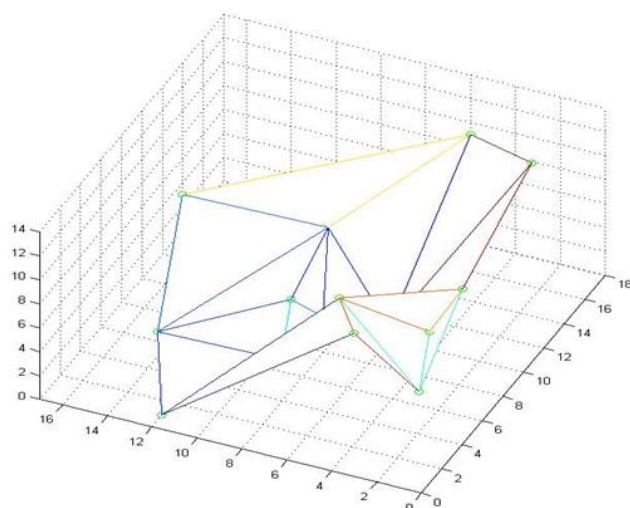
На слици 5.39 приказан је пример 2D *Delaunay*-еве тријангулације са ручним уносом координата тачака добијене уз помоћ програмског пакета *MatLAB*, преко наведеног програмског кода.



```
x=[1 3 4 5 3 6 8 0 10 14 2 18 15 7 13];
y=[12 1 0 14 5 9 8 3 6 17 1 6 11 9 1];
plot(x,y,'go');
hold on
dt = DelaunayTri(x,y);
fe = freeBoundary(dt);
triplot(dt);
axis equal
hold on;
plot(x(fe), y(fe), '-r', 'LineWidth',2);
```

Слика 5.39. 2D *Delaunay*-ева тријангулација

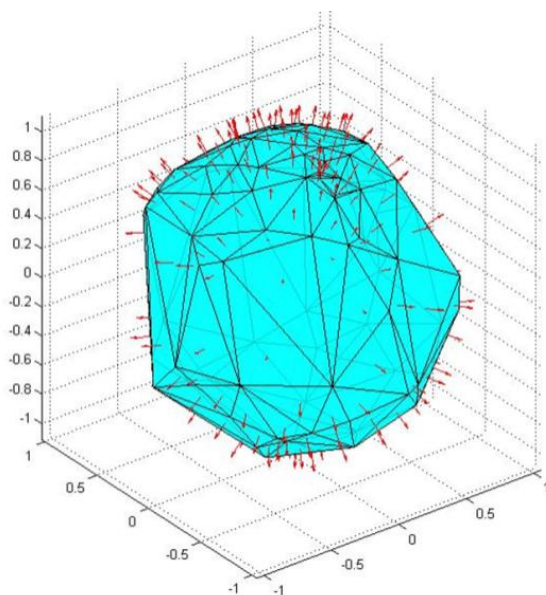
На слици 5.40 приказан је пример 3D *Delaunay*-еве тријангулације (тетраедризације), са ручним уносом координата тачака, добијене помоћу програмског пакета *MatLAB*, преко наведеног програмског кода.



```
x=[1 3 4 5 3 6 8 0 10 14 2 18 15
7 13]';
y=[12 1 0 14 5 9 8 3 6 17 1 6 11
9 1 ]';
z=[0 10 13 2 11 1 3 12 1 3 6 9 2
5 14]';
tri=delaunay(x,y);
trimesh(tri, x, y, z)
hold on
plot3(x,y,z,'go');
axis equal
```

Слика 5.40. 3D Delaunay-ева тријангулација (тетраедризација)

На слици 5.41 приказан је пример 3D Delaunay-еве триангулације (тетраедризације), са израчунатим векторима нормала површинских полигона, добијене помоћу програмског пакета *MatLAB*, преко наведеног програмског кода.



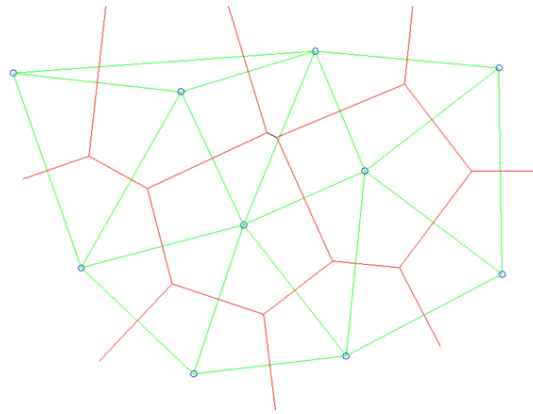
```
numpts = 100;
theta = rand(numpts,1)*2*pi;
phi = rand(numpts,1)*pi;
x = cos(theta).*sin(phi);
y = sin(theta).*sin(phi);
z = cos(phi);
dt = DelaunayTri(x,y,z);
[tri Xb] = freeBoundary(dt);
tr = TriRep(tri, Xb);
P = incenters(tr);
fn = faceNormals(tr);
trisurf(tri,Xb(:,1),Xb(:,2),Xb(:,3),'FaceColor',
'cyan', 'faceAlpha', 0.8);
axis equal;
hold on;
% Display the result using a quiver plot:
quiver3(P(:,1),P(:,2),P(:,3),fn(:,1),fn(:,2),fn(:,3)),
0.5, 'color','r');
hold off;
```

Слика 5.41. 3D Delaunay-ева тријангулација са нормалама полигона

5.6.3 Voronoi-ев дијаграм

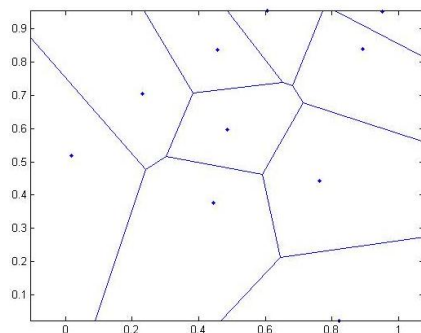
Решавањем *Delaunay*-еве триангулације уједно је решен још један проблем, а то је *Voronoi*-ев дијаграм. За низ тачака у равни, *Voronoi*-ев дијаграм приказује подручја којима је поједина тачка најближа. Добија се спајањем средишта описаних кружница троуглова, односно састоји се од симетрала страница троуглова *Delaunay*-еве триангулације (слика 5.42).

Voronoi-ев дијаграм се користи у компјутерској графици (приликом моделовање 3D објеката), урбанизму (приликом одређивања положаја важних објеката), у изградњи путева (код детекције препрека), у археологији (приликом одређивања подручја утицаја групе животиња), у биологији (за одређивање површине тла које настањује нека група биљака) итд.



Слика 5.42. Конструкција Voronoi-евог дијаграма

На слици 5.43 приказан је пример Voronoi-евог дијаграма, за 10 случајно изабраних координата тачака, добијен помоћу програмског пакета *MatLAB*, преко наведеног програмског кода.

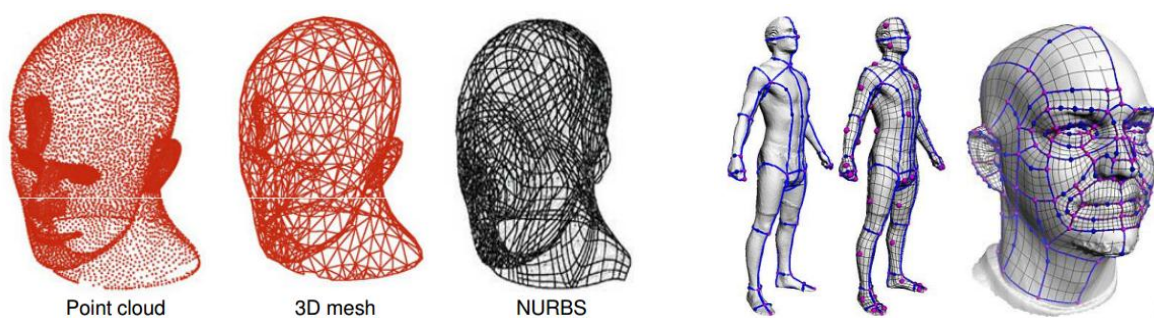


```
x = gallery('uniformdata',[1 10],0);
y = gallery('uniformdata',[1 10],1);
voronoi(x,y)
axis equal
```

Слика 5.43. Voronoi-ев дијаграм за 10 случајно изабраних тачака

5.6.4 Криве и површи за генерисање површина

Моделирање површина помоћу кривих и површи подразумева генерисање површинског модела на основу кривих, креираних са одређеном резолуцијом према сложености површине, кроз које се затим провлачи површина. Пример генерисања површинског модела из облака тачака, помоћу кривих линија и *NURBS* површина приказан је на слици 5.44.



Слика 5.44. Пример генерисања *NURBS* површина из облака тачака [183]

Криве се задају параметарски, тако да су координате тачака криве приказане као функције параметра, који се мења унутар заданог подручја вредности задатог параметра t у распону $0 \leq t \leq 1$, тако да положај тачке зависи само од вредности параметра. Векторски приказ положаја тачке P на кривој би био:

$$P(t) = [x(t), y(t), z(t)],$$

где су: $x(t)$, $y(t)$, $z(t)$ – координате тачака 3D криве.

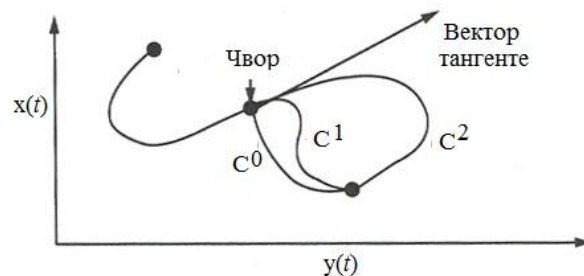
5.6.4.1 Кубне криве

Криве се могу апроксимирати скупом сегмената (слика 5.44). Међутим они не морају бити линеарни. Они могу бити квадратни (параметарски полиноми где је t другог степена), кубни (t је трећег степена) или вишег степена. У пракси, кубни полиноми су најлакши за коришћење и контролу, па су веома популарни у реконструкцији површина.

Ако је сваки сегмент криве $P(t)=(x(t), y(t), z(t))$, кубне полиномске једнакости које дефинишу (x,y,z) , тачке на кривој изгледају овако. Кубни полиноми имају 4 коефицијента (a , b , c и d) и зато сегмент криве има 4 границе (контролне тачке) које га дефинишу:

$$\begin{aligned}x(t) &= axt^3 + bxt^2 + cxt + d \\y(t) &= ayt^3 + byt^2 + cyt + d \\z(t) &= azt^3 + bzt^2 + czt + d \\(0 \leq t \leq 1)\end{aligned}$$

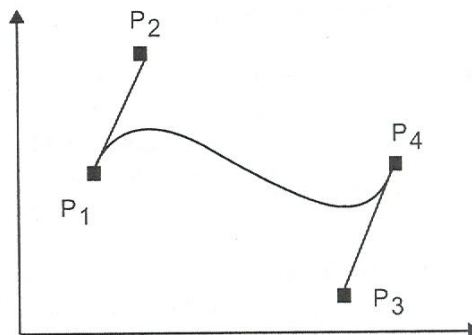
Различите врсте кривих (и површина) су класификоване према вредностима коефицијената у полиномским једначинама. Оне одређују како крива интерполира контролне тачке. Неке од често коришћених кривих су *Bezier*, *B-Spline*, *NURBS* итд. Спајање сегмената у чвор дефинише се преко коефицијента C^i , (C^0 , C^1 , C^2) (слика 5.45).



Слика 5.45. Сегменти криве

5.6.4.2 Bézier-ove krive

Кубни (*Bezier*-ов) сегмент криве има 4 контролне тачке: две од њих, P_1 и P_4 дефинишу крајеве криве, а друге две, P_2 и P_3 , утичу на облик криве контролишући векторе тангенти крајева (слика 5.46).



Слика 5.46. Bézier-ова крива дефинисана са 4 контролне тачке

Општи облик *Bézier* -ове криве реда $n+1$ је дат изразом:

$$P(t) = \sum_{i=0}^n B_i J_{n,i}(t)$$

Где су *Bernstein*-ови полиноми:

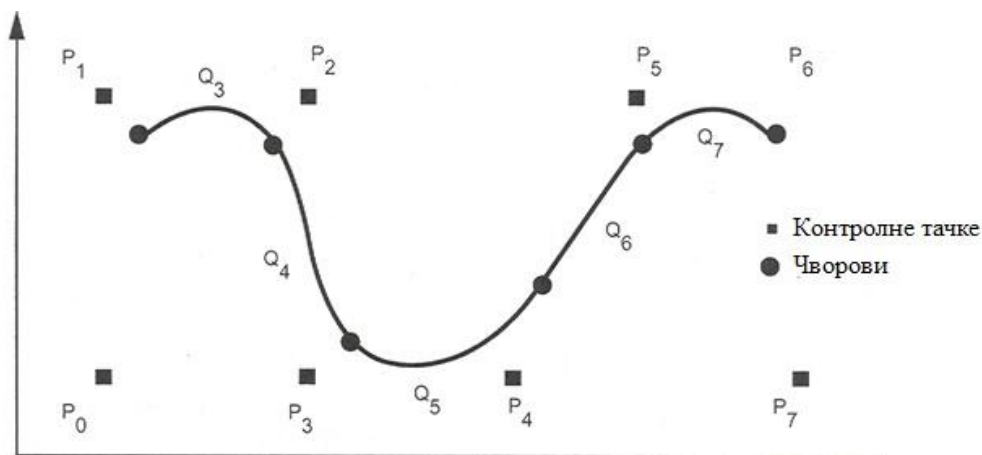
$$J_{n,i}(t) = \binom{n}{i} t^i (1-t)^{n-i}$$

$$\binom{n}{i} = \frac{n!}{i!(n-i)!}$$

5.6.4.3 B-Spline-ови

B-spline су један тип *spline*-а који је можда најпопуларнији за примену у реконструкцији површине слободног облика. Контролне тачке за целу *B-spline* криву су дефинисане у коњункцији, док индивидуални сегменти не морају пролазити кроз контролне тачке. Суседни сегменти деле контролне тачке, па су на овај начин наметнути услови континуитета. Из овог разлога, када се посматра *spline*, посматра се цела крива (која се састоји од својих сегмената), уместо њени индивидуални сегменти који се морају спојити. Кубне *B-spline* криве су дефинисане помоћу серије од $m=n+1$ контролних тачака P_0, P_1, \dots, P_n .

На примеру на слици 5.47 је приказан *spline* са $m=8$ контролних тачака. Индивидуални сегменти криве су Q_3, Q_4, Q_5, Q_6 и Q_7 . Док је Q_3 дефинисан са 4 контролне тачке, $P_0 \div P_3$, Q_4 тачкама $P_1 \div P_4$ итд.



Слика 5.47. Униформни нерационални *B-spline*

Налик *Bezier*-овим кривим, оне се формирају математички из апроксимација кубних полиномских функција.

Параметарска једначина *B-spline* криве дата је у облику:

$$P(t) = \sum_{i=1}^{n+1} B_i N_{i,k}(t), \quad t_{\min} \leq t < t_{\max}, \quad 2 \leq k \leq n+1$$

Где је нормализована *B-spline* базна функција реда k и нивоа $k-1$,

$$N_{i,k} = \begin{cases} 1, & \text{за } x_i \leq t < x_{i+1} \\ 0 & \text{у супротном} \end{cases}$$

$$N_{i,k} = \frac{(t-x_i)N_{i,k-1}(t)}{x_{i+k-1}-x_i} + \frac{(x_{i+k}-t)N_{i+1,k-1}(t)}{x_{i+k}-x_{i+1}}$$

Вредности x_i су чланови вектора чвора и испуњавају услов: $x_i \leq x_{i+1}$

Параметар t се мења од t_{\min} до t_{\max} дуж криве $P(t)$

5.6.4.4 NURBS криве

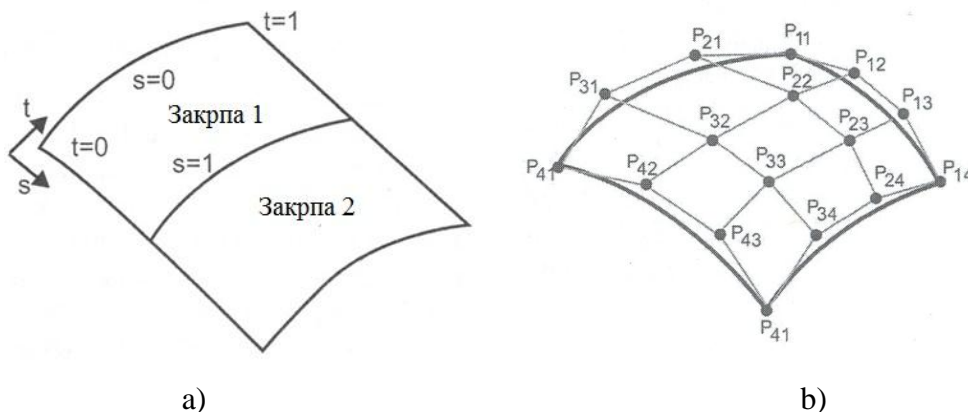
B-spline (или било које друге нерационалне криве) могу се дефинисати хомогеним координатама додавањем елемента h као четвртог у параметарској једнакости; $P(t)=(x(t), y(t), z(t), h(t))$. Као и обично, пребацивање у хомогене координате у 3D простору укључује дељење са $h(t)$. Овај процес се зове рационализација криве. Предност рационалних кривих је да су оне инваријантне под ротацијом, скалирањем, транслацијом и перспективним трансформацијама. Ово значи да треба применити трансформације само на контролне тачке и онда ревалуирати једнакост криве да би се генерисала трансформисана крива. Неуниформни рационални *B-spline* се још зове *NURBS* и често се користи у реконструкцији површине. Рационална *B-spline* крива, одређена је изразом:

$$P(t) = \frac{\sum_{i=1}^{n+1} B_i h_i N_{i,k}(t)}{\sum_{i=1}^{n+1} h_i N_{i,k}(t)}, \quad h_i \geq 0$$

Ако је, за свако i , $h_i=1$ - једначина се претвара у нерационалну *B-spline* криву, повећање x_i помера криву ближе тачки P_i и обрнуто, док је за $h_i=0$ утицај искључен.

5.6.4.5 Параметарске површине

Параметарске површине су генерализација кривих линија. Површина је издељена у сегменте параметарских површина или “закрпе” (*patch*), које су спојене једна за другу како би формирале целу површину. Параметарска једнакост за сваку закрпу је дефинисана преко два параметарска домена s и t , формирајући површину уместо криве (слика 5.48-а).



Слика 5.48. Површинска закрпа (*patch*) и њене контролне тачке

Свака закрпа је дефинисана *blending*-ом контролних тачака ($4 \times 4 = 16$ контролних тачака је потребно за дефинисање једне закрпе) (слика 5.48-б). Заправо, можемо замислити

контролне тачке као да дефинишу криве на специфичним интервалима домена, који су онда спојени у *mesh* и дефинишу површину.

Основна функција која се користи за *Bezier*-ове криве може се проширити дуж два параметарска домена да дефинише *Bezier*-ове комадиће површине. Ове површине нису много популарне јер имају потешкоћа у спајању континуалних површина.

NURBS површине могу се дефинисати као логичко проширење једнакости за *NURBS* криве, као што смо видели раније. Ове површине имају исте особине као и *NURBS* криве, могућност увођења дисконтинуитета кроз позицију чворова и инваријантност на трансформације. Оне су јако распрострањене у дефинисању спољних површина делова.

Математички опис кривих и површи које се користе у реверзном инжењерству може се наћи у следећој литератури [200, 201]

Поглавље 6

РАЧУНАРОМ ПОДРЖАНО МЕРЕЊЕ

Планирање процеса мерења је саставни део пројектовања и производних активности. Одређује које карактеристике дела треба да се мере, где и када. Савремену производњу све више карактерише мали обим, висока разноврсност производње, уске толеранције и висок квалитет дела (производа). Део и процес мерења еволуирају да постану важан елемент интегрисане производње. Произвођачи данас користе процес мерења за контролу производње како би постигли жељени квалитет, а не као средство за прихватање или одбијање делова на крају производње. Ово захтева брзо и тачно мерење, као и ефикасну интеграцију са *CAD* моделом дела и одговарајућом базом података. Потреба за све аутоматизованијим планирањем процеса мерења и бољим механизмима за подршку при одлучивању омогућава мерење сложенијих и разноврснијих делова и смањује развојни циклус израде дела [23].

Рачунаром подржано мерење (често се користи и термин: рачунаром подржана инспекција, *Computer Aided Inspection - CAI*) је нова технологија која омогућава мерење поређењем одступања физичког дела од његовог номиналног (идеалног) *3D CAD* модела. Процес *CAI* почиње од *CAD* модела и физичког дела који је потребно мерити. Део се прво неким од уређаја за *3D* (контактну или бесконтактну) дигитализацију снима. Добијена датотека облака тачака (*STL*, *TXT* и сл. или датотека површинског модела добијеног поступцима реверзног инжењерства из облака тачака) увози се у софтвер за мерење. Софтвер врши поређење номиналног модела са мерним тачкама (или површинским моделом) и пружа графичко поређење одступања мера дела у односу на *CAD* модел. Фазе *CAI* приказане су на слици 6.1.

Одлуке које се доносе у току процеса планирања мерења имају значајан утицај на квалитет добијеног дела, поред времена производње и трошкова. Неке производне методе и секвенце, изабране током процеса планирања мерења, могу бити склоније грешкама и недоследности, због великог броја подешавања (*setups*) или неправилног избора референтних елемената (*datums*). Веза планирања производног процеса са

процесом планирања мерења доводе до затварања петље обезбеђивања жељеног квалитета и осигурања да део буде "добро пројектован" од почетка и смањења одбачених делова (шкартова) и/или дорађених делова [24].



Слика 6.1. Фазе рачунаром подржаног мерења [202]

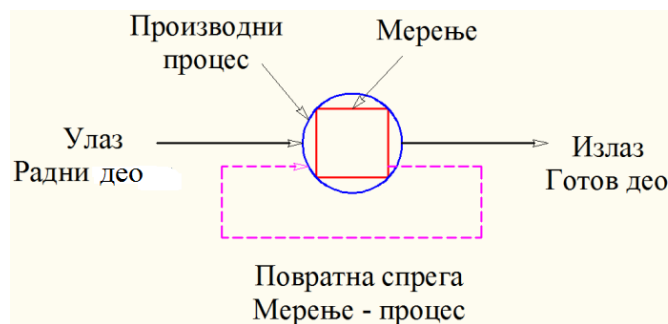
Планирање рачунаром подржаног мерења (*Computer Aided Inspection Planing - CAIP*) је тема истраживања дуже од 30 година. Већина *CAIP* система је развијено за координатне мерне машине (*CMM*), док је истраживање мерења бесконтактним уређајима у порасту последњих година. Велики број аутора је разматрало *CAIP* системе и категорисало их у две групе: толеранцијом вођене (*tolerance driven*) и системе засноване на геометрији (*geometry based*).

У поређењу са *CMM*, системи директног мерења на машини (*On-Machine Inspection - OMI*) обезбеђују непосредан увид у производњу и контролу квалитета, што је од виталног значаја за аутоматизовану производњу. Од раних 1990-их, нови *CAIP* системи развијени су за *OMI* системе па су развијене и нове технологије за побољшање *CAIP*. Развијени су и нови производни стандарди за пренос података као што су *STEP* и *STEP-NC* како би се обезбедили стандардизовани и свеобухватни модели података за обраду и мерење [23].

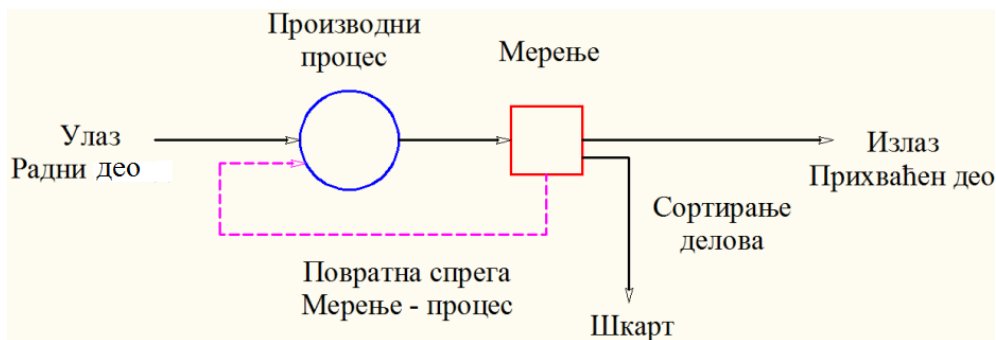
6.1 Поступци мерења

У производним процесима поступке мерења је могуће сврстати у три начина [203]:

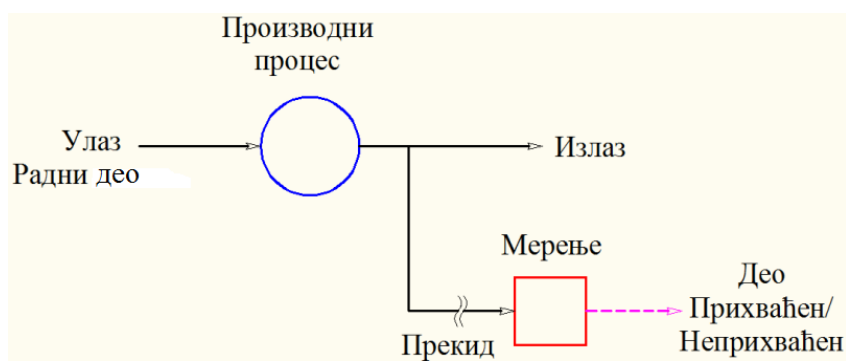
- 1) Мерење на машини (*On-Machine Inspection - OMI*) (слика 6.2), које се може поделити на:
 - истовремено мерење (*in-process inspection*), које се врши док се део израђује и
 - квазиистовремено мерење (*portable inspection*), где се део мери кад је обрађен, али још није скинут са машине. Површински инструмент, који је ручни, се на неки начин поставља на део када машина престане да ради, а затим се врши мерење.
- 2) Мерење ван машине (*remote inspection*), које се може изводити:
 - на посебном мерном уређају, где се део уклања са машине и мери мерним уређајем који се налази у близини машине алатке (слика 6.3) и
 - у лабораторији за мерење - контроли квалитета, где се део односи у прописно опремљену лабораторију и мери (слика 6.4).



Слика 6.2. Мерење на машини



Слика 6.3. Мерење на посебном мерном уређају



Слика 6.4. Мерење у мерној лабораторији

Наведени поступци мерења, сврстани на основу врсте мерења, типа контроле, информација које дају и које су им потребне, брзине и добијених информација, као и њихове особине дати су у табели 6.1.

Табела 6.1. Начини мерења и њихове особине [203]

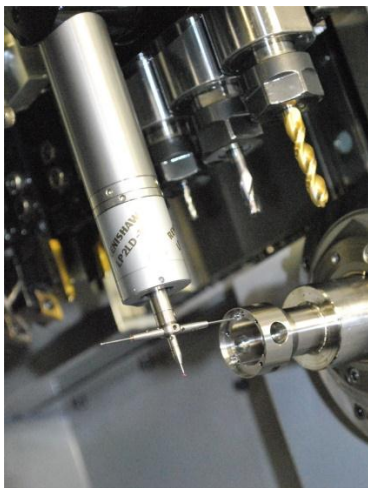
	Мерење на машини	Мерење на посебном уређају	Мерење у лабораторији
Врста мерења	Динамичко	Статичко	Интегрисано
Тип контроле	Адаптивна	Статистичка	Дугорочна следљивост
Добијене информације	Врло специфичне	Средње	Свеобухватна површинска геометрија
Потребне информације	Контрола процеса	Посматрање процеса	Посматрање машине алатке
Брзина	Врло брзо	Време потребно за снимање и оцену	Функционална процена
Резултат	Померање ради контроле	Уверење о квалитету	Квалитет гарантује пројектовање

6.1.1 Мерење на машини

У конвенционалном систему контроле квалитета, произведени део, са обрадног центра захтева преношење на координатну мерну машину (*СММ*) како би се проверила тачност његових димензија. Мануелни посао подешавања и мерење обрађених делова обично захтева доста времена, подложен је људским грешкама, а често доводи до дужих рокова испоруке и потребе за прерадом. Проблем уског грла даље се компликује са тешкоћама у капиталним инвестицијама и временском кашњењу протока материјала између *СММ* и машине алатке у фабрици. Додирно-прекидне сонде омогућавају произвођачима да изврше мерење дела, помогну у пословима подешавања, дају прецизне компоненте, минимизирају отпад и повећају продуктивност [23].

Од недавно, све више се користи мерење на машини (*On Machine Inspection - OMI*) као пожељна мерна опрема за потребе директних мерења у производњи и контроли квалитета, што је витална карактеристика аутоматизованог система производње. *OMI* је процес који интегрише пројектовање, обраду и аспекте мерења у производњи како би се омогућило да део буде измерен и прихваћен директно са машине алатке. Овај процес се постиже помоћу машине алатке као мерног уређаја док је део сигуран на обрадном центру са његовим нетакнутим координатним системом. Помоћу машине алатке као мерног уређаја елиминишу се потребе за скупом мерном опремом, омогућавајући произвођачу преусмеравање ресурса у друге сврхе. Нема потребе за накнадним стезањем ради мерења, јер стезни прибор машине алатке стеже део и служи као мерни стезни прибор. Како део постаје сложенији, улога *OMI* постаје све значајнија као ефикасна димензионална мерна опрема [204]. Сензори присутни у *CNC* систему имају способност пружања тачне повратне информације за различите погонске елементе. Они су често ограничени само на обављање тих функционалности и нису усмерени ка подршци било каквих мерних радњи, ефикасних као што је *OMI*.

На следећим сликама приказана су два различита уређаја за *OMI*, са додирно прекидном сондом (слика 6.5-а) [205] и оптички (ласерски) *OMI* уређај (слика 6.5-б) [206] произвођача *RENISHAW*.



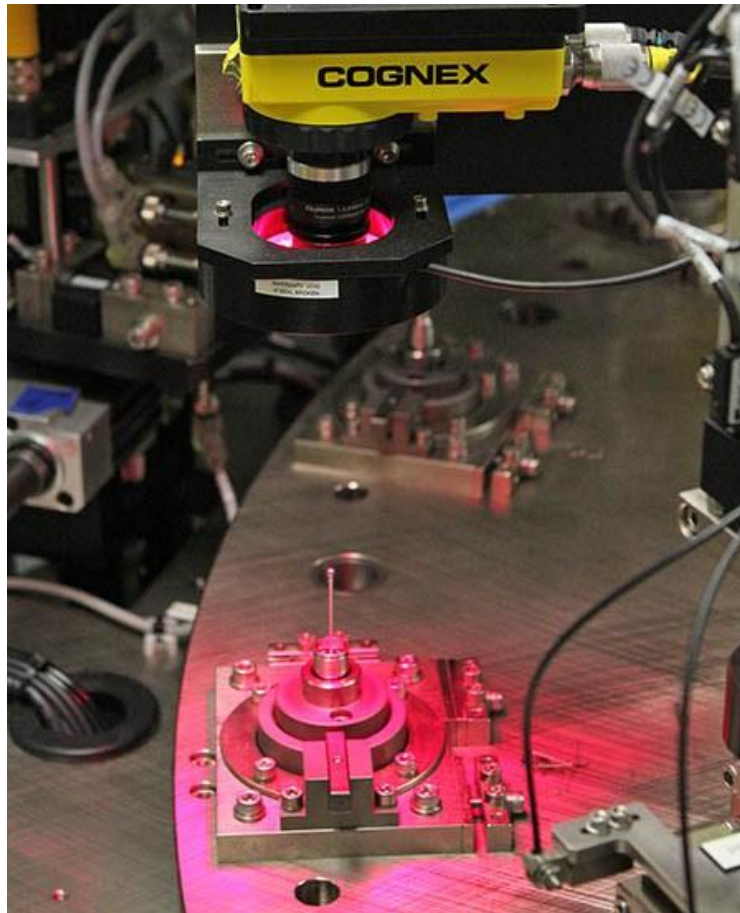
а)



б)

Слика 6.5. Мерни уређаји за мерење на машини

Од савременијих поступака треба поменути и поступак *on-line* мерења, где се делови мере у току процеса обраде (*on-line*) и преко одговарајућих софтвера истовремено, аутоматизованим поступком, проверава квалитет. На слици 6.6 приказан је поступак *on-line* мерења на уређају произвођача *COGNEX*.



Слика 6.6. On-line мерење уређајем произвођача COGNEX [207]

Предности коришћења *ОМІ* се могу сажети у следећем [26, 27, 28, 208, 209]:

- 1) Уштеда у цени и времену кроз:
 - смањење главног времена потребног за мерне уређаје и стезање,
 - минимизирање потребе за пројектовањем, израдом, одржавањем мерних уређаја, стезањем и опремом,
 - смањење чекања на редослед мерења и времена за мерење и
 - елиминацију поновне израде неусаглашених делова;
- 2) Промена из „реактивног“ мерења у „проактивну“ контролу кроз следеће активности:
 - интегрисаном контролом квалитета дела током реализације процеса,
 - употребом окарактерисаних и квалификованих процеса како би се повећала поузданост дела,
 - фокусирањем ресурса на превенцији дефеката уместо на детекцији на крају процеса и
 - коришћењем *real-time* процеса знања и контроле и прихватањем дела;
- 3) Елиминација додавања *non-value* операција, као што су *lot inspection*, планови узорковања, пријем мерења, пројектовање, израда и одржавање мерних уређаја, и прерада неусаглашених делова;
- 4) Агилна обрада. *ОМІ* омогућава брзе одговоре на промене у пројектовању дела. Како се мерни послови обављају на истом обрадном центру, нема потребе за

промену мерних уређаја и стезање. Нове и постојеће технологије, као што су стратегије вођења сонде, компензације грешке, софтвер за анализу података и технологије пројектовања стезања могу да се интегришу у систем *ОМІ*. Како се грешке које се јављају током процеса обраде детектују и евидентирају када се појављују, неправилност дела може бити „исправљена“ одмах кроз подешавање наредне операције обраде.

Успешна имплементација *ОМІ* ипак захтева робустан и поуздан хардвер и софтвер. Често је неопходна машина алатка са мулти-алатним капацитетом. Такође је од суштинског значаја контролер отворене архитектуре за укључивање додатног софтвера за вођење сонде који може бити неопходан. За имплементацију процеса *ОМІ* на машини алатки потребан је систем сонди који може да се састоји од различитих сонди, сензора и електронских елемената. Механизам повратне спреге треба да буде на свом месту и у реалном времену.

6.1.2 Системи за планирање рачунаром подржаног мерења за *ОМІ* и *СММ*

Систем планирања рачунаром подржаног мерења (*CAIP*) треба да садржи аутоматизоване или полу-аутоматизоване модуле који су у стању да идентификују и препознају димензионални елемент за мерење заједно са повезаним мерним ограничењима. Што би значило да буде у стању да предложи мерни метод за сваки димензионални део који треба мерити. Резултујућа мерна операција такође треба да буде интегрисана у један општи мерни план [209] у оквиру рачунаром подржаног планирања процеса (*Computer Aided Process Planning – CAPP*).

Аутоматско планирање димензионалног и геометријског мерења може бити на макро или микро нивоу. Макро (*macro*) ниво планирања се односи на израду група подешавања. Свако подешавање се односи на доступност елемената (*features*) које треба мерити, сонде за мерење елемента сваког типа и релативан положај дела. Покушава се да се групишу проверавани елементи, врсте толеранција и врсте и величине сонди које ће се користити. Микро (*micro*) ниво планирања се првенствено бави питањем избора тачака, генерисањем путање и генерисањем извршног кода.

Ови системи се могу сврстати у две групе и то:

- *CAIP* системе засноване на толеранцији (*tolerance-driven*) и
- *CAIP* системе засноване на геометрији (*geometry-based*).

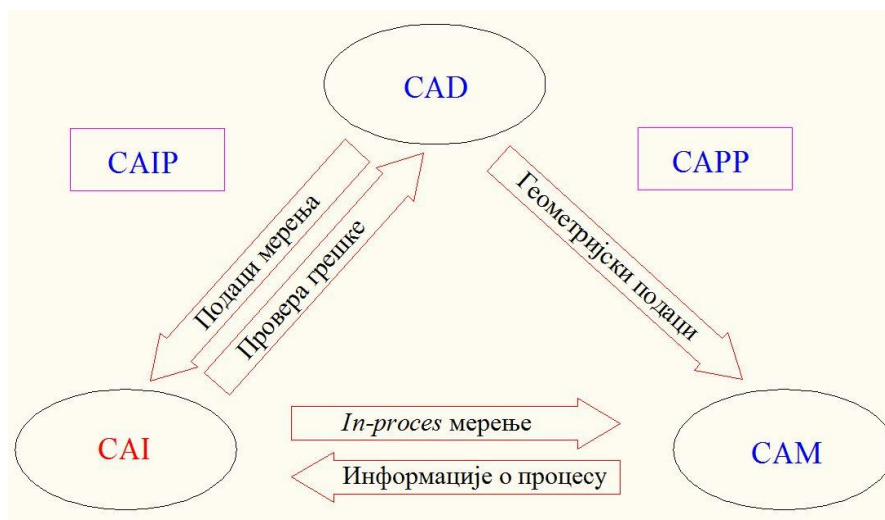
CAIP системи засновани на толеранцији су тема бројних истраживачких радова [210, 211, 212, 213, 214, 215, 216, 217]. *Hopp i Lau* [218, 219] су развили приступ користећи хијерархијску мерну контролу за генерисање контролних кодова за *СММ* (слика 6.7). Након што корисник изабере потребну толеранцију из *CAD* базе података, задатак мерења је решен и карактеристике толеранције су идентификоване. Затим се бирају елементи површина за мерење. Следи избор тачака, планирање путање сонде, дефинисање потребних кретања машине и мерење тачака се извршава задатим редоследом. На овај начин генерисан је *СММ* мерни програм. Неки од комерцијалних, као што су *Valisys* [220] и *Audimess* [221] користе сличан приступ.

Сви претходно наведени радови су били фокусирани на развијање концептуалног нивоа *CAIP* система за *СММ*. Већини ових *CAIP* система је потребан улаз (*input*) које извршава оператер, како за одабир мерног толерисаног елемента, тако и за толеранцију за коју је потребно извршити мерење. Овај тип истраживања поставља добру основу за касније фазе *CAIP* истраживања.



Слика 6.7. Хијерархија поступка мерења [222]

За разлику од *tolerance-driven CAIP* система, *CAIP* системи засновани на геометрији често игноришу информације о толеранцији, али се фокусирају на геометрији спаривања (*geometry-matching*) између израђеног дела и пројектованог облика. Овим системима се баве радови [223, 224, 225]. *Cho* и *Kim* су развили флексибилан тродимензионални мерни систем за скулптурне површине помоћу *CMM*, *CAD* базе података и система технологије визије. Предложени систем (слика 6.8) обавља оптимално планирање мерења, препознавање дела и компензацију са поравнањем грешака. База података препознавања/локализације се генерише из *CAD* базе података на основу новог концепта под називом *Z- слој (Z-layer)*. Затим се *3D* облик објекта на столу *CMM* конструише коришћењем визијом вођене *CMM*.



Слика 6.8. Систем заснован на геометрији са међусобном зависношћу између *CAD/CAI/CAM* [226]

Geometry-based CAIP системи нису добили толико пажње колико *tolerance-driven CAIP* системи. У поређењу са *tolerance-driven CAIP* системом, *geometry-based* систем покушава да измери читав део што води у дуготрајан процес.

Новији *CAIP* системи садрже модуле за следеће задатке [23]:

- 1) Избор и редослед мерних елемента;
- 2) Избор и оптимизацију мерних тачака/узорковање;
- 3) Планирање и генерисање путање без колизије при вођењу сонде (укључујући сонде за испитивање приступачности и оријентације) и
- 4) Извршење мерења.

Од средине 1990-их, истраживања у *CAIP* почела су да се базирају на једним или неким од горе наведених задатака за одређени *CAIP* систем. Истовремено, не-*CMM* мерење и бесконтактни уређаји као што су *3D* оптички скенери постепено су сазрели. Стога је *CAIP* систем истраживања са методама мерења не-*CMM* постао други велики тренд истраживања.

У поређењу са традиционалним додирним сондама, бесконтактне сонде су у стању да сниме велику количину података у релативно кратком времену са већом тачношћу. *Bogue* [227] дискутује о ограничењима контактне *CMM* сонде и описује нови, ласерски заснован *3D* геометријски систем за скенирање који је заједнички развијен од стране *Metris* и *Volvo* за сврхе монтаже. *Vezzetti* [228] представља селективан приступ прикупљању (аквизиције) података узорковањем за граничне дефиниције у *RE* апликацијама. Предложени приступ је развијен за оптичке уређаје. *Minoni* и *Cavalli* [229] предлажу оптички мерни систем вођења сонде, који се може користити за обављање *on-line* мерења. Међутим, ова оптичка опрема има строжије захтеве у мерне околине, па замагљеност, нечисте површине дела, рефлектујуће површине и температура могу довести до грешака у мерењу. *Auilar* и аут. [230] анализирају тачност и грешке механизма сонди ласерског скенирања помоћу симулација и експеримената. Неколико тестова спроведених на сонди ласерског скенирања фиксирани у *CMM* утврдили су основни извор грешке сензора. Најновија истраживања се баве између осталог оптимизацијом избора мерних тачака [28, 231, 232, 233] и планирањем и генерисањем мерних тачака код *OMI* [28, 234] и *CMM* [235, 236, 237].

6.2 Уређаји за рачунаром подржано мерење

Недавни напредак оптичких уређаја за скенирање омогућава прикупљање милиона узоркованих тачака разумне индивидуалне тачности на делу на коме се врши мерење. Постоје очигледне предности бесконтактних мерних метода: брзина, покривеност, лакоћа рада, цена, итд. Поставља се питање зашто бесконтактне методе нису још распрострањеније у мерењу димензија. Уствари, аутоматско извлачење стварне димензије и *GD&T* вредности из податка мерења код бесконтактних уређаја није лако поновљив и репродукован поступак.

Свакако постоје велике разлике између *CMM* и бесконтактних података мерења који понекад захтевају фундаментално различите приступе. Прва разлика је у томе да је обично тачност појединачних тачака код бесконтактног мерења лошија у односу на уређаје са додирном сондом. Овај проблем традиционално изазива знатну забринутост; међутим, ове сумње могу бити умањене тако што се побољша укупна тачност уређаја. Друга разлика је да неке површине, због сјаја или транспарентности, нису погодне за оптичко мерење и изазвају посебне грешке. Ово је валидан аргумент, али у исто време постоји много материјала који су неадекватни за мерење са додирном сондом (као нпр. меке или флексибилни супстанце). Постоји и трећа разлика: сама количина

прикупљених података. То може бити од значаја у највећој мери, али истовремено и добро и лоше за бесконтактно мерење. Огромна количина тачака пружа много више покривености, али се оператер мора одрећи своје индивидуалне контроле над појединачним тачкама. Дакле, овде је разлика више у поступку процене него у геометријским алгоритмима. На неки начин ова разлика приморава на размишљање о димензионалном мерењу и *GD&T* на нешто другачији начин. Главни концепти у развоју су аутоматска класификација измерених тачака с обзиром на елементе које се мере и аутоматска елиминација тачака ван опсега.

Оптичке бесконтактне технике мерења су револуција у мерним апликацијама у последњој деценији. Трошкови и покривеност овим уређајима су довели до тога да ове технике постану атрактивне у многим ситуацијама. Ласерски и структурирани *white light* скенер уређаји се све више користе у многим ситуацијама производног мерења. У многим областима серијских и великосеријских обима производних процеса, уређаји за скенирање у комбинацији са мерним софтвером постају главно средство за мерење.

CMM машина за мерење са додирном сондом су се успешно користиле још од шездесетих година прошлог века. Седамдесете су донеле револуцију високо прецизним *CMM* уређајима углавном захваљујући напредним јапанским индустријским машинама алаткама и метролошким компанијама. Ови уређаји су поуздани и високо тачни инструменти, њихова прецизност лежи у субмикрометарском распону [29].

Скенери са белим светлом и скенери компјутерске томографије имају нешто краћу историју. Први поуздани уређаји су из средине деведесетих. Најпрецизнији уређаји могу поуздано да дају координате у микрометарском опсегу, али узимајући у обзир унутрашње процедуре регистрације, тачност појединачних тачака је најчешће преко десет или двадесет микрометара.

Скенери компјутерске томографије (*CT*) су недавно уведени у процес мерења. Ови инструменти су се прво користили у медицини. Од средине осамдесетих је било покушаја да се *2D* и спирални *CT* уређаји уведу у метрологију, али се прави помак очекивао од коришћења *cone-beam CT* скенера. Ови уређаји постоје још од раних 2000-их. Чине се посебно погодним за пластичне делове ливене убризгавањем, који имају много унутрашњих елемената. Макро-*3D* скенери пружају тачност приближно величине воксела, тренутно од око 2 до 400 μm .

CMM софтвер корацима следи програмирање *CNC* машине алатке. Он постаје све усавршенији у приступу, додиру и праћењу површина из различитих праваца.

Развој софтвера за бесконтактно мерење морао је да изабере другачији развојни пут. Уместо појединачних тачака основна информација је сет опсега слика, више непосредно несређених облака тачака или полигоналних мрежа. Према томе софтвер скенера је изграђен на бази *Computer Vision* софтвера, *Discrete Computational Geometry*, и *CAD* модела.

Разлике се не односе само на алгоритме, већ су у питање по много чему различити системи. *CMM* приступ је обично сасвим адекватан ако имамо довољно а priori знања о елементу који се мери и ако стварни елемент не одступа много од номиналног. То је много неприкладније уколико се ради о геометрији слободног облика (*free-form*) или је одступање велико. Поред тога, алгоритми аутоматске евалуације резултата бесконтактног мерења захтевају посебну пажњу у идентификацији одговарајућих тачака елемената.

6.3 Софтвер за мерење

Софтвер за мерење премошћује јаз између прикупљених података тачака и захтева пројектовања. Правилан избор мерног хардвера и софтвера код *CAI* може да смањи време мерења и до 90%, док побољшава поновљивост и репродуктивност до 50% [238]. Међутим, пре избора софтвера потребно је направити правилан избор између контактнoг или бескотактнoг мерења.

Пре избора уређаја најважније је дефинисати циљеве. Одредити стварне потребе које ће директно утицати на избор између тачности, брзине и цене. У наставку је дат осврт на уређаје за мерење који би могао помоћи при њиховом избору.

Контактна решења су традиционалнија и широко прихваћенија технологија. Стационарне *SMM* имају недостатак зато што су фиксиране на једном месту, веома споре и прилично скупе. Али с друге стране, предност у тачности увек треба узети у обзир.

Преносиве *SMM*, које су обично стациониране на руци или посматране од стране уређаја за праћење су, како само име каже, лако преносиве и могу се пренети до дела а не обрнуто као код стационарних *SMM*. Оне су ручно управљане и ниже тачности него стационарне *SMM*, али имају много нижу цену. Коришћење преносивих *SMM* захтева много мању обуку, могу се користити на веома великим деловима без потребе сложенoг подешавања.

Бескотактна решења су релативно нови приступ. Овде се убрајају ласерски скенери, структурирани светлосни скенери и индустријски *CT* скенери. Сви они снимају „облик“ дела тако да мерења не могу бити анализирана без коришћења мерног софтвера. Предности бескотактних скенера наспрам контактних уређаја укључују брзо прикупљање података, а посебно свеобухватну колекцију тачака што значи јаснији поглед на део.

Ласерски скенери су веома флексибилни - могу се монтирати на *SMM* а могу бити ручни (*hand-held*) или монтирани на стативима (*tripods*). Ласерска светлост доводи до својственог мерног шума, док дифузија ласерске светлости ограничава могућу резолуцију и имају потешкоће мерња високо рефлектујућих површина. Избор коришћења ових скенера треба да буде на основу поређења расположиве резолуције скенера у односу на толеранцијске захтеве.

Скенер са структурираним светлом користи пројектоване светлосне шаблоне и систем камера за снимање одступања светлости за снимање *3D* облика дела. Доступани у више нијанси светлости, ови скенери су обично прецизнији од ласерских скенера, због изразито мањег мерног шума. Поред тога, они могу да мере делове са светлосно рефлектујућим површинама. Комбинована технологија светла и камера пружа много већу прецизност што подразумева рад са много тежим скуповима података. Такође су мање флексибилни, уз потребу да се монтирају и калибришу на стативима или роботима.

Предност индустријских *CT* скенера је у том што могу да сниме и интерну и екстерну геометрију, чак до тачке у стању да виде и идентификују пукотине и напрслине у материјалу скоро до атомског нивоа ако се користи квалитетан систем. Овакав вид тачности захтева много веће цене, док су далеко мање преносиви. *CT* скенери такође имају ограничења о томе које материјале могу скенирати тако да их треба пажљиво проверити у односу на захтеве.

Након избора уређаја потребно је изабрати софтвер за мерење. Како није сваки софтвер исти, потребно је обратити пажњу на неопходност за додатном обуком. Треба изабрати софтвер на основу уређаја и захтевати пробни рад софтвера преко једног од типичних производних делова или ићи на пун пилот тест комплетног система. Такође треба размотрири и формате резултата мерења које софтвер поседује.

Постоји велики број мерних софтверских производа на тржишту, од којих сви имају своје предности и мане. Софтвери за мерење се природно могу сврстати у контактне и бесконтактне.

Софтвер за контактено мерење обично не може да обради велике скупове података које даје бесконтактно скенирање као и производе развијене за бесконтактна решења. Неки од комерцијалних софтвера за контактено мерење су: *FARO CAM2*, *Hexagon PC DMIS*, *Verisurf*, *BuildIt!*, *Delcam PowerInspect*, између осталих.

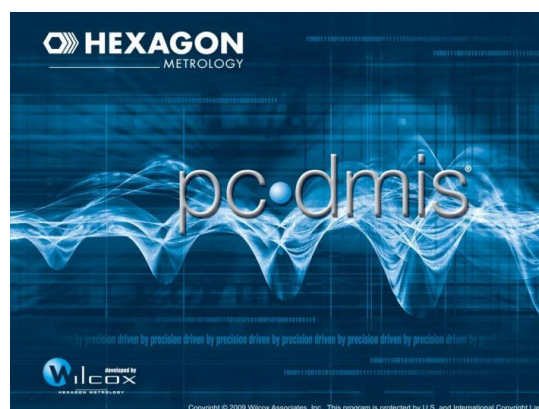
Примена софтвера за бесконтактно мерење је потпуно другачији приступ од традиционалних метода, а има за циљ поступке мерења помоћу оптичких уређаја. Комерцијално доступни софтверски производи укључују: *Geomagic Qualify*, *Rapidform XOV*, *Innovmetric Polyworks* и *GOM Inspect*.

У наставку су описани софтвер *PC DMIS* који користе контактни уређаји, као и *GOM Inspect*, који подржава бесконтактне уређаје.

6.3.1 PC DMIS софтвер

PC DMIS је водећи светски софтвер за мерење на *CMM*, присутан на преко 30.000 локација широм света. Његове широке могућности омогућавају корисницима да измере различите делове, од једноставних призматичних до најсложенијих авио и аутомобилских компоненти [239] и коришћење код највећег броја типова мерних машина.

PC DMIS је софтверски производ *Hexagon Metrology* (слика 6.9), а развијен пре више од двадесет година са циљем интегрисања операција конструисања, производње и мерења и контроле у један систем. Он уводи *3D* модел у метрологију, па је филозофија која је слеђена приликом развоја овог софтвера базирана на једноставном принципу који гласи: ако се производ развија коришћењем *CAD* технологије, онда се он мора мерити коришћењем *CAD* модела. Данас је та филозофија проширена како би се добила решења за све процесе димензионалног мерења. *Hexagon Metrology* је водећи глобални понуђач технологије *3D* пројектовања, мерења и визуелизације које омогућавају корисницима пројектовање, мерење и одређивање положаја објеката, као и процесирање и приказивање података.



Слика 6.9. Лого регистрован на *PC DMIS User Group* [240]

PC DMIS нуди богат скуп могућности за анализу измерених података. Резултате приказује у широком распону погодном за различите публикације. Сви *PC DMIS* модули имају заједнички изглед и могућност размене података и *par* програма међусобно.

6.3.1.1 Верзија *PC DMIS* софтвера

Верзије *PC DMIS CMM* софтвера садрже основне конфигурације са додатним модулима и то [241]:

- 1) *PC DMIS Pro*. Верзија која ради без *CAD* модела. Основне предности овог пакета су:
 - ради без *CAD* модела, док је истовремено снабдевен потребним алатима за најнапредније мерење, без потребе за куповином комплетног пакета,
 - поједностављено је подешавање (*setup*), садржи низ стартних (*quick start*) путања сонде (*routines*), олакшана је квалификација сонде, а делови се лако поравнавају,
 - лак избор мерних елемената са интуитивним и подесивим графичким корисничким интерфејсом, комплетним сетом мерних путања и извештаја,
 - коришћење моћних чаробњака (*wizard*) који упрошћавају тешке индивидуалне послове унапред припремљеним рутинама, па метролошке проблеме решавају са само неколико кликова мишем и
 - могућност сталне софтверске надоградње (нпр. у случају потребе за увођењем *CAD* модела) и компатибилност са осталим верзијама софтвера.
- 2) *PC DMIS CAD*. Верзија која користи *CAD* модел, а између осталог омогућава:
 - развој програма за мерење помоћу *CAD* модела (изведеног из једноставних *2D* цртежа до најсложенијих чврстих *3D* модела),
 - увоз и извоз *CAD* података у скоро свим форматима и рад директно са изворним *CAD* моделом,
 - извођење података делова директно из модела, мерне путање сонде су поједностављене и грешке се могу одредити кликом на тачку на моделима делова, што елиминира грешке које се односе на лош унос података,
 - прилагођавање *CAD* процесу мерења и евалуацији делова,
 - графичко тестирање и отклањање грешака путанња сонде мерења пре него што су покренути на машини, анимира путеве кретања сонде и омогућава мењање у ходу, што укључује тачно кинематско моделирање већине *CMM* и, када се ради са чврстим моделом, сонда аутоматски детектује колизију са деловима и прибором и
 - подржавање више протокола за повезивање са *CAD*, то може бити неутрална датотека *IGES* или *STEP* или *CAD* систем пореклом из *UG* или *CATIA*.
- 3) *PC DMIS CAD ++*. Верзија која подржава најновије технологије и најзахтевније апликације. Како се мерна технологија и мерни уређаји константно мењају и унапређују, тако се апликације и технике морају прилагођавати мерењу и евалуацији произведених делова. Осим тога, неке индустрије имају своје јединствене захтеве. *PC DMIS CAD ++*, осим што поседује карактеристике претходне две верзије софтвера, између осталог подржава:
 - тешке задатке скенирања и подржава софистициране уређаје за скенирање,
 - нове технологије за вођење сонди и серво зглобове који мењају начин на који се могу мерити делови,
 - генерисање великог броја тачака (десетине хиљада тачака, чиме се добија бољи приказ изгледа елемента дела) уместо неколико тачака,

- интегрисање подршке за широк распон уређаја и техника скенирања чиме прати корак са технологијама док захтеви за мерењем еволуирају,
- увођење бесконтактних сензора (ласера, камера и слични уређаја) у *CMM* токове и
- мерење тешко меривих делова од лима с којима се произвођачи аутомобила суочаваја и садржи свеобухватну библиотеку посебних путања сонде за њихово мерење.

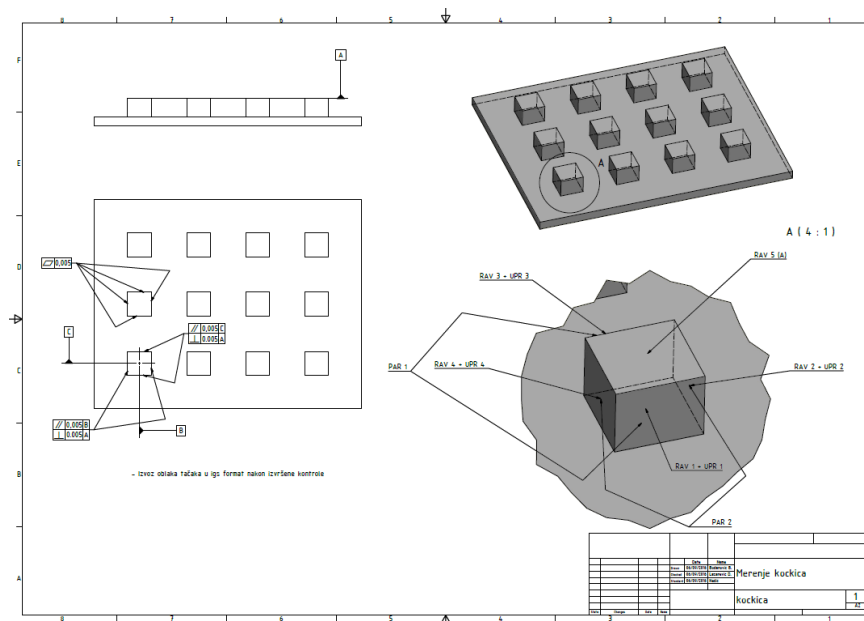
6.3.1.2 Генерисање програма за мерење

Уобичајене фазе током генерисања програма за мерење дела обухватају:

- креирање нове *part program* датотеке,
- избор/дефинисање сензора,
- калибрацију сензора,
- дефинисање погледа на део и мерење,
- постављање одговарајућих координатних система,
- мерење елемената (*features*),
- подешавање специфичних потреба (*preferences*),
- додавање коментара (оператеру),
- конструисање елемената,
- димензионисање елемената,
- извршавање *part* програма и на крају
- штампање извештаја и његову анализу.

6.3.1.3 PC DMIS извештај мерења

Након извршења парт програма *PC DMIS* извози извештај мерења на унапред изабрану локацију. Локација и тип датотеке извештаја се претходно бира. Датотека извештаја се најчешће извози у *PDF*, *RTF* или *XYZ* формату. Извештај се може прегледати у *Report* прозору програма, где се могу изабрати различите варијације изгледа резултата мерења применом различитих стандардних (програмских) или накнадно (кориснички) креираних извештаја по постојећем шаблону.



Слика 6.10. Пример *PC DMIS* цртежа и 3D модела са задатим толеранцијама

PC DMIS омогућава мерење геометријских толеранција (*GD&T*) изабраних елемената површина дефинисаних цртежом (слика 6.10). Координате тачака мерене површине елемента дела се апроксимирају (методом најмањих квадрата, о којој је било речи у поглављу 4), а апроксимирана раван се упоређује са референтном равни. Ове толеранције се даље приказују у извештају мерења. Део једног извештаја у *PDF* формату са измереним толеранцијама равности и одступањима од задатих вредности дат је на слици 6.11.

pcdmis		PART NAME : Merenje obradjenih kocki				June 15, 2016		08:16	
		REV NUMBER :		SER NUMBER : Uzorak 1		STATS COUNT : 1			
Kocka 1 L									
FCFFLAT1	MM	0.02							
Feature	NOMINAL	+TOL	-TOL	MEAS	DEV	OUTTOL	BONUS		
PLN3	0.000	0.020		0.014	0.014	0.000			
PLN4	0.000	0.020		0.015	0.015	0.000			
PLN5	0.000	0.020		0.019	0.019	0.000			
PLN6	0.000	0.020		0.014	0.014	0.000			
PLN7	0.000	0.020		0.014	0.014	0.000			
FCFPERP1	MM	0.02 A B							
Feature	NOMINAL	+TOL	-TOL	MEAS	DEV	OUTTOL	BONUS		
PLN5	0.000	0.020	0.000	0.021	0.021	0.001	0.000		
PLN3	0.000	0.020	0.000	0.060	0.060	0.040	0.000		
FCFPERP2	MM	0.02 A C							
Feature	NOMINAL	+TOL	-TOL	MEAS	DEV	OUTTOL	BONUS		
PLN6	0.000	0.020	0.000	0.034	0.034	0.014	0.000		
PLN4	0.000	0.020	0.000	0.024	0.024	0.004	0.000		
//	MM	PARL3 - PLN5 TO PLN3							
AX	NOMINAL	+TOL	-TOL	MEAS	DEV	OUTTOL			
M	0.000	0.020	0.000	0.061	0.061	0.041			

Слика 6.11. Део PC DMIS извештаја са приказаним толеранцијама облика

6.3.2 GOM Inspect софтвер

GOM Inspect представља програм за анализу података добијених 3D мерењем коришћењем оптичких 3D скенера, ређе *CMM* и осталих мерних уређаја. *GOM*-ов софтвер се користи у развоју производа, контроли квалитета и производњи.

GOM производи софтвер који кореисте машине и уређаји за индустријску и аутоматизовану 3D координатну мерну технологију. *Gom Inspect* побољшава квалитет и убрзава развој својих производа и производних процеса компанијама у индустрији аутомобила, авиоиндустрији и роби широке потрошње, као и у многим истраживачким институтима и универзитетима [242].

6.3.2.1 Могућности GOM Inspect софтвера

Могућности и карактеристике *GOM Inspect* софтвера се могу сагледати кроз алате за:

- увоз различитих датотека облака тачака (*ATOS, STL, PLY, ASCII, ...*),
- генерисање 3D полигоналне мреже (препроцесирање и процесирање мреже),
- увоз различитих датотека *CAD* модела (*CATIA, PRO/E, Unigraphics, IGES, STEP, JT-Open, Parasolid, PLY, ...*),

- увоз мерног плана (*ASCII, CSV, FTA, ...*),
- једноставно поравнање облака тачака и *CAD* модела,
- поређење са *CAD* моделом (површина, пресека, тачака, ...),
- мерење засновано на кривој линији (које попуњава празнину између мерења тачке и мерења површине),
- мерење засновано на дискретној тачки (нема потребе за генерисањем површина облака тачака),
- мерење засновано на *2D* пресецима,
- параметарско мерење (промена и прилагођавање на деловима се може накнадно вршити и ажурирати),
- *Teaching by Doing* - помоћу кога се готова (постојећа) евалуација може применити на два или више узорака дела,
- *Gd&T* анализу толеранција облика и положаја засновану на *ISO 1101* и *ASME Y14.5* стандарду,
- *I-Inspect* - функцију која предлаже принципе и критеријуме мерења који најбоље одговарају мереном елементу,
- контролу квалитета и анализу аеродинамике покретних делова и лопатица турбина,
- статистичку контролу процеса,
- виртуалну мерну собу - симулацију целокупног процеса мерења, контролу колизије, израчунавање потребног времена за мерење итд. и
- извештај мерења, који може бити графички приказан у облику слике, табеле, дијаграма, текста или извезен у *PDF* формату.

6.3.2.2 Верзије *GOM Inspect* софтвера

Gom Inspect софтвери су тестирани и сертификовани од стране *National Metrology Institute of Germany (PTB)* и *National Institute of Standards and Technology (NIST)*. У зависности од мерних потреба, избор се своди на једну од три постојеће верзије *Gom* софтвера и то:

- 1) *GOM Inspect* (бесплатна верзија),
- 2) *GOM Inspect Profesional* и
- 3) *GOM Inspect Enterprise*.

Избор *GOM* софтвера зависи првенствено од односа мерних потреба и цене. Бесплатна верзија *GOM* софтвера садржи већи број претходно наведених алата, али и одређене недостатке. Тако се помоћу *GOM Inspect*-а, између осталог не може увести већи број познатих формата *CAD* датотека, не може вршити параметарско мерење нити *Teaching by Doing* мерење и не садржи виртуелну мерну собу. *GOM Inspect* се може надоградити у напреднију верзију софтвера.

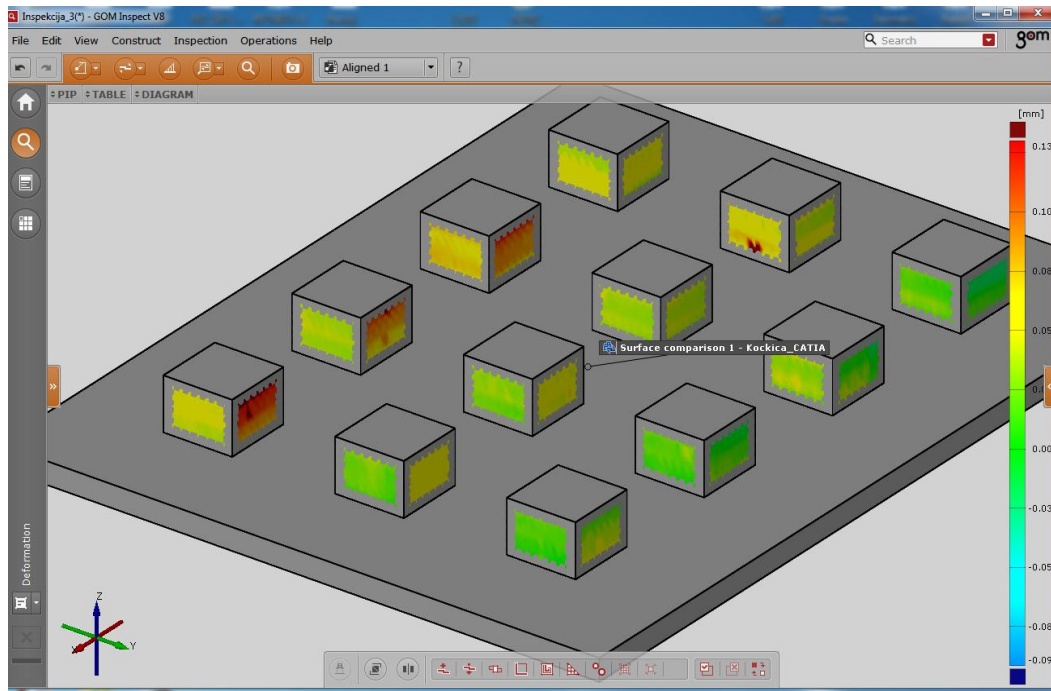
Основна разлика *Gom Inspect Profesional* и *Gom Inspect Enterprise* се огледа у флексибилном решењу за мрежне лиценце (*Flexible Solution for Network Licenses*), коју *Gom Inspect Enterprise* поседује.

6.3.2.3 *GOM Inspect* извештај мерења

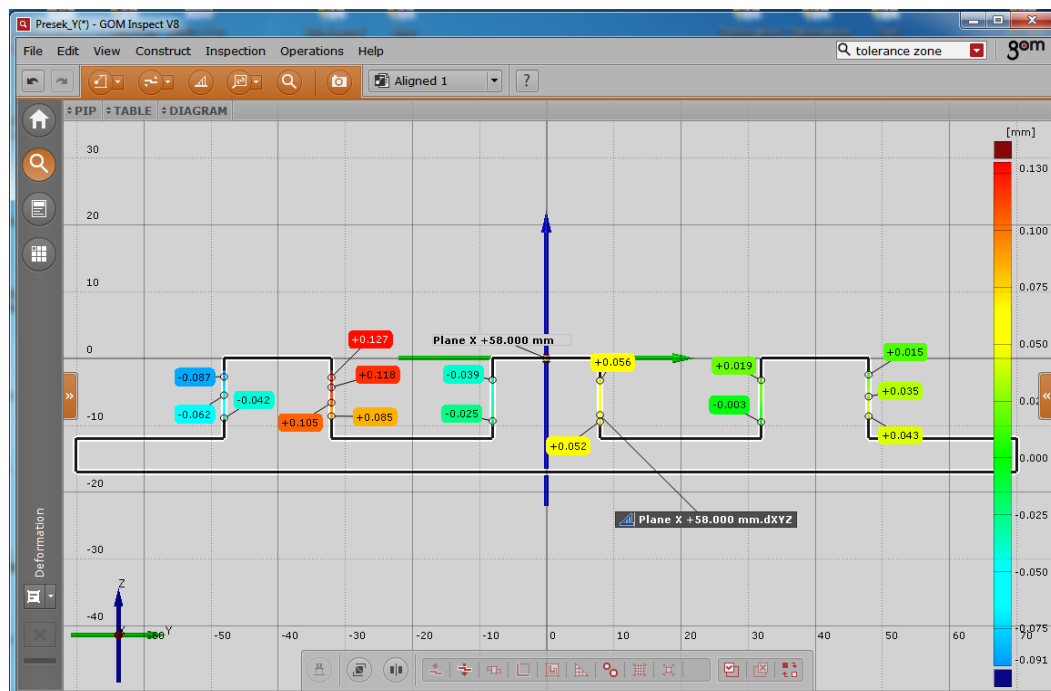
Модул извештавања омогућава корисницима да креирају извештаје који садрже снимке, слике, табеле, дијаграме, текст и графику. Ови резултати могу бити представљени и измењено у корисничком интерфејсу, као и извезени у *PDF* формату.

Прилагођени шаблони су за виšekратну употребу, а сваки снимак чува се у извештају и може накнадно да се врати у 3D прозор.

На слици 6.12 приказан је графички изглед поређења облака тачака мереног дела са 3D CAD моделом. Након поређења могуће је измерити одступања дискретних тачака у простору или по попречном пресеку као што је приказано на слици 6.13. табеларни извештај површинских одступања од правости приказан је на слици 6.14.



Слика 6.12. Графички приказ поређења измерених тачака дела са CAD моделом



Слика 6.13. Графички приказ поређења измерених тачака дела са попречним пресеком CAD модела

Element	Datum	Property	Nominal	Actual	Tol -	Tol +	Dev	Check
A 1		∠	+0.000 mm	+0.014 mm	+0.000 mm	+0.100 mm	+0.014 mm	
A 2		∠	+0.000 mm	+0.014 mm	+0.000 mm	+0.100 mm	+0.014 mm	
A 3		∠	+0.000 mm	+0.019 mm	+0.000 mm	+0.100 mm	+0.019 mm	
A 4		∠	+0.000 mm	+0.014 mm	+0.000 mm	+0.100 mm	+0.014 mm	
A 5		∠	+0.000 mm	+0.026 mm	+0.000 mm	+0.100 mm	+0.026 mm	
A 6		∠	+0.000 mm	+0.018 mm	+0.000 mm	+0.100 mm	+0.018 mm	
A 7		∠	+0.000 mm	+0.019 mm	+0.000 mm	+0.100 mm	+0.019 mm	
A 8		∠	+0.000 mm	+0.019 mm	+0.000 mm	+0.100 mm	+0.019 mm	
A 9		∠	+0.000 mm	+0.022 mm	+0.000 mm	+0.100 mm	+0.022 mm	
A 10		∠	+0.000 mm	+0.032 mm	+0.000 mm	+0.100 mm	+0.032 mm	
A 11		∠	+0.000 mm	+0.023 mm	+0.000 mm	+0.100 mm	+0.023 mm	
A 12		∠	+0.000 mm	+0.033 mm	+0.000 mm	+0.100 mm	+0.033 mm	
A 13		∠	+0.000 mm	+0.015 mm	+0.000 mm	+0.100 mm	+0.015 mm	
A 14		∠	+0.000 mm	+0.008 mm	+0.000 mm	+0.100 mm	+0.008 mm	
A 15		∠	+0.000 mm	+0.010 mm	+0.000 mm	+0.100 mm	+0.010 mm	
A 16		∠	+0.000 mm	+0.015 mm	+0.000 mm	+0.100 mm	+0.015 mm	
A 17		∠	+0.000 mm	+0.019 mm	+0.000 mm	+0.100 mm	+0.019 mm	
A 18		∠	+0.000 mm	+0.018 mm	+0.000 mm	+0.100 mm	+0.018 mm	
A 19		∠	+0.000 mm	+0.015 mm	+0.000 mm	+0.100 mm	+0.015 mm	
A 20		∠	+0.000 mm	+0.018 mm	+0.000 mm	+0.100 mm	+0.018 mm	
A 21		∠	+0.000 mm	+0.021 mm	+0.000 mm	+0.100 mm	+0.021 mm	

Слика 6.14. Табеларни извештај резултата мерења

6.3 STEP и STEP-NC стандарди

STEP (*Standard for the Exchange of Product Model Data*) стандард за размену података дела представља скуп ISO стандарда и обухвата све стандарде који претходе стандарду ISO 10303. Општи циљ STEP-а је да се обезбеди механизам који даје комплетну и недвосмислену дефиницију дела током целокупног животног циклуса [243].

Са међународним напорима у развоју стандарда за размену производних модела података - STEP и STEP-NC, као и сродних апликационих протокола - сада је могуће да се изгради стандардизован модел података за цео процес производње који обухвата обраду и мерење. STEP и STEP-NC пружају информације на високом нивоу, укључујући информације о најбитнијој толеранцији за процесе мерења. Консолидовани модел података може да се гради и за обраду и планирање процеса мерења. У том случају је могуће добити интегрисани систем процеса планирања за обраду и процес мерења. Критични елементи и толеранције једног дела могу бити пажљиво испитани током процеса обраде. Овај систем узима у обзир променљиве које утичу на обраду и мерење, као што су параметри обрадног центра, толеранције, хабање алата, итд. Излаз из система ће бити оптималан извештај обраде уграђен са операцијама мерења. Процес обраде се може одржавати уз помно праћено и контролисано окружење. Како STEP и STEP-NC подржавају двосмерни протока информација у процесу, изводљив је *on-line* повратан проток информација о процесу обраде, а промене које се могу јавити при процесу обраде могу се модификовати на време.

Поглавље 7

КВАЛИТЕТ ОБРАДЕ

У савременим условима производње, развој методологија које смањују трошкове и постижу максимални квалитет обрађених делова постаје све важнији, посебно имајући у виду тачност обраде (димензија, облика и положаја) и квалитет обрађене површине. Геометријске и димензионалне грешке јављају се услед фактора као што су деформација радног дела и алата током обраде, термичке деформације, хабање алата и нетачност машине алатке.

Смањење трошкова производње је од суштинског значаја за унапређење конкурентности производних предузећа. Квалитет обрађеног дела је уско везан за тачност димензија зато је важно развити методологије за идентификовање и отклањање нетачности обраде у циљу побољшања нивоа квалитета. Произвођачи машина алатки предлажу софистициране стратегије за смањење одређених узрока непрецизности, међутим, постоје многи аспекти којима се морају бавити директно корисници машина алатки. На пример, грешке позиционирања (*set-up*) алата и дела, деформација структуре дела и алата, хабање алата и топлотна деформација алата и дела, обично се не могу контролисати управљачком јединицом машине алатке [3].

Постоје два основна приступа која се користе за побољшање тачности обрађених делова: мапирање померања алат-део и корекција завршне путање алата или интерполација позиције алата компензацијом димензионалних грешака.

Машина алатке и мерне машине са 3-5 оса могу се наћи у огромном броју и свим областима савремене производње: од аутомобилске до ваздухопловне, од производње робе широке потрошње до производње медицинских средстава. Тренд у правцу индивидуалних производа и мањих димензија умного повећава значај флексибилности машина у производњи. Уместо да се ослања на намену појединачних машина, производња се све више организује у производним ћелијама, које се могу прилагодити вишеструким и променљивим производима. Један од главних критеријума перформанси савремене производне ћелије је њена способност производње прецизних

делова. Ово се може постићи само контролисаним и детерминистичким производним процесима. Док је поновљивост машине неопходан услов за добро контролисан процес, геометријска тачност дела може се постићи повратном спрегом (*feedback loop*) кроз метрологију дела. Због краћег животног циклуса дела и мањих серија производње, максимална тачност машина алатки добија све већи значај [244].

7.1 Врсте грешака обраде

Глодање спада у један од најраспрострањенијих процеса обраде метала у индустрији. Пример представља операција обимног глодања које се користи у аутомобилској, авио, машинској индустрији, алатничарству и прецизној обради скидањем струготине. Један од најважнијих показатеља успешности обраде глодањем је естетски квалитет површине који се постиже завршним операцијама. Па како захтеви за квалитетом временом расту, акценат се све више ставља и на естетски квалитет површине [30].

У процесу обраде глодањем може се идентификовати много различитих извора грешака [245]. Тачност машине алатке је првенствено под утицајем геометријских грешака, неуниформне термичке експанзије структуре машине и статичко/динамичког оптерећења које индукује грешке. Као последица тога, ствара се резултантна грешка (*volumetric error*) која се јавља као резултат кретања резног алата и дела који се обрађује [31]. Ова грешка непосредно изазива неправилности на глоданој површини дела и директно утиче на њен квалитет. Тачност обраде површине зависи од многих контролисаних и неконтролисаних параметара процеса. Њихов утицај и међусобне зависности представљени су на слици 7.1.

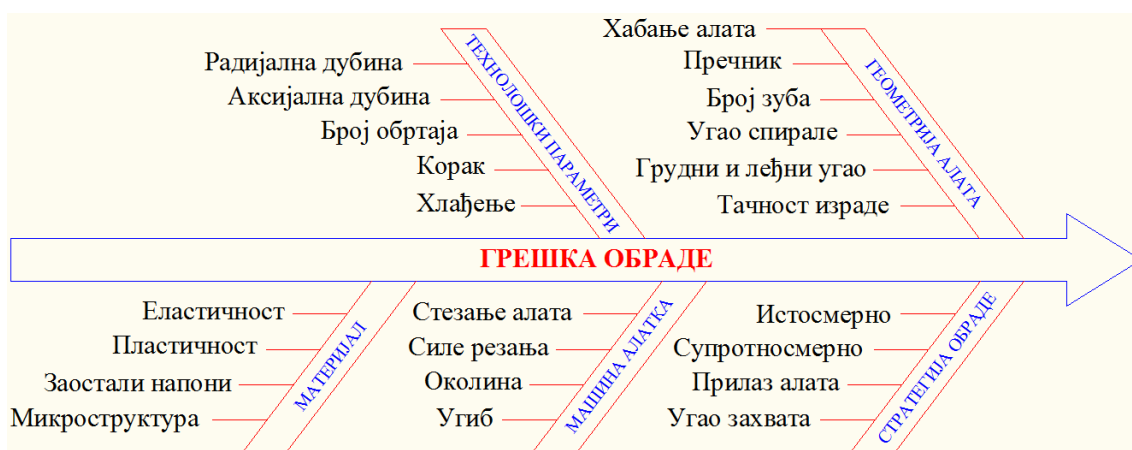


Слика 7.1. Извори резултантне грешке обраде и њихова међузависност [31]

Како је тешко моделирати процес обраде глодањем узимајући у обзир све параметре који утичу на повећање грешке обраде, овде су наведени само они утицаји који су у међузависности са регенерисањем NC кода и то: технолошки параметри, геометрија алата, материјал дела, карактеристике машине и стратегија обраде (слика 7.2).

Грешке обраде, које карактеришу квалитет генерисане површине се могу сврстати у:

- грешке димензија (дужинске грешке),
- грешке облика и положаја површина (раванске и просторне) и
- грешке површинске храпавости (грешке топологије).



Слика 7.2. Утицајни параметри на грешку обраде глодањем

7.2 Грешке димензија

Грешке димензија су грешке које не задовољавају спецификоване толеранције дужинских мера задате техничком документацијом, а могу бити линеарне у равни или у простору. Оне се могу измерити ручним мерилима или нпр. помоћу координатне мерне машине (*СММ*). Како *СММ* не мери вредности дужинских растојања већ координате изабраних тачака, резултати се накнадно морају процесирати софтвером *СММ*, како би се добило одступање од спецификоване дужинске толеранције. Грешке димензија се ређе мере бесконтактним уређајима.

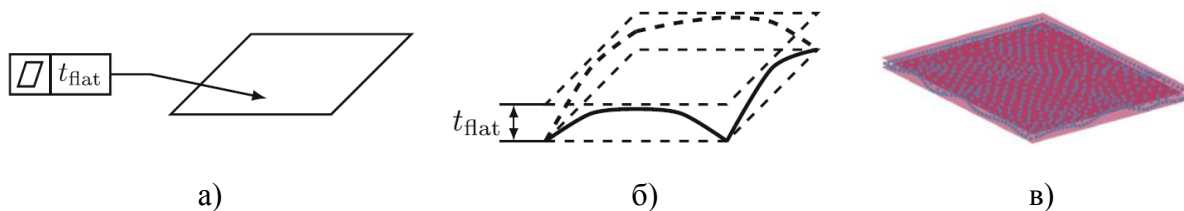
7.3 Грешке облика и положаја површина

Грешке облика и положаја површина представљају раванско или просторно одступање површина. У ове грешке спадају грешке одступања од облика и положаја (правца, места и тачности обртања). Наведена одступања су спецификована и стандардизована правилима о геометријском димензионисању и толерисању (*GD&T*) (ISO 1101:2012) о којима је било речи у поглављу 2. Као и код грешака дужинских мера и грешке облика и положаја површина не могу се директно измерити помоћу *СММ* или бесконтактним мерним уређајима. Како се као резултат мерења добијају координате изабраних тачака (или облак тачака), исте се накнадно софтверски обрађују и изводе информације о одступањима. И овде се површине апроксимирају (најчешће методом најмањих квадрата) једном равни, а затим упоређују са површинама модела.

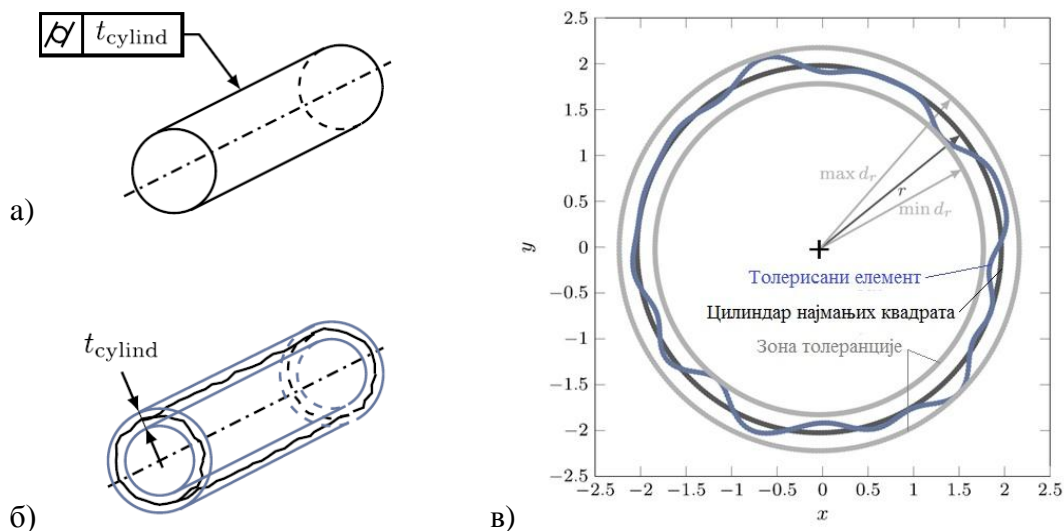
На слици 7.3-а приказана је толеранција облика (равности) спецификована цртежом. Вредност дозвољене толеранције је дата вредношћу t_{flat} у толеранцијском оквиру. Слика 7.3-б приказује зону толеранције дефинисану простором између две паралелне равни са задатим међусобним растојањем t_{flat} . Измерене тачке (облак тачака) површине просторно су распоређене (слика 7.3-в) и уколико се нађу у зони толеранције може се констатовати да измерена површина задовољава спецификовану толеранцију, у супротном да не задовољава. Задавањем вредности за дозвољено одступање софтвер израчунава и даје извештај да ли је грешка обраде измерене површине унутар или ван жељених граница.

На слици 7.4-а приказан је цртеж дела са спецификованом толеранцијом облика - цилиндричности. Зона толеранције представља растојење између два замишљена цилиндра са међусобним растојањем t_{cylind} (слика 7.4-б). На слици 7.4-в приказана је контура толерисаног елемента коју формирају измерене тачке (или облак тачака). Приказане су најмања уписана и највећа описана кружница које дефинишу зону

толеранције, као и пречник цилиндра добијен методом најмањих квадрата. Уколико је вредност спецификоване толеранције мања од вредности измерене зоне, грешка обраде неће задовољити постављене захтеве.

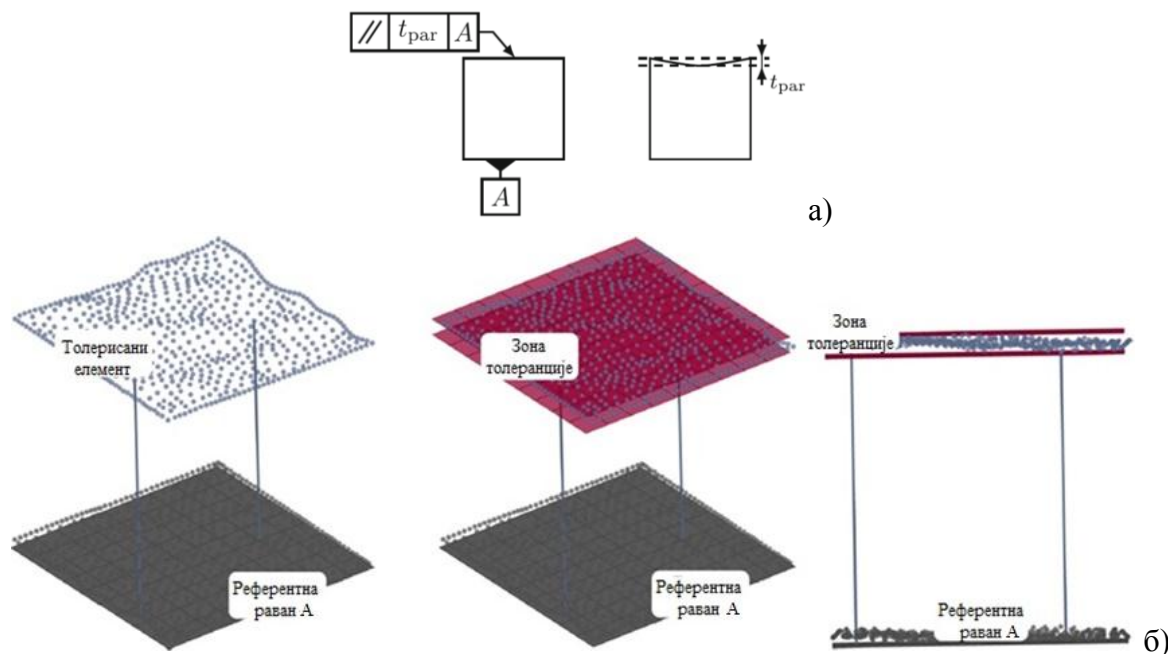


Слика 7.3. Грешка равности и зона толеранције [32]



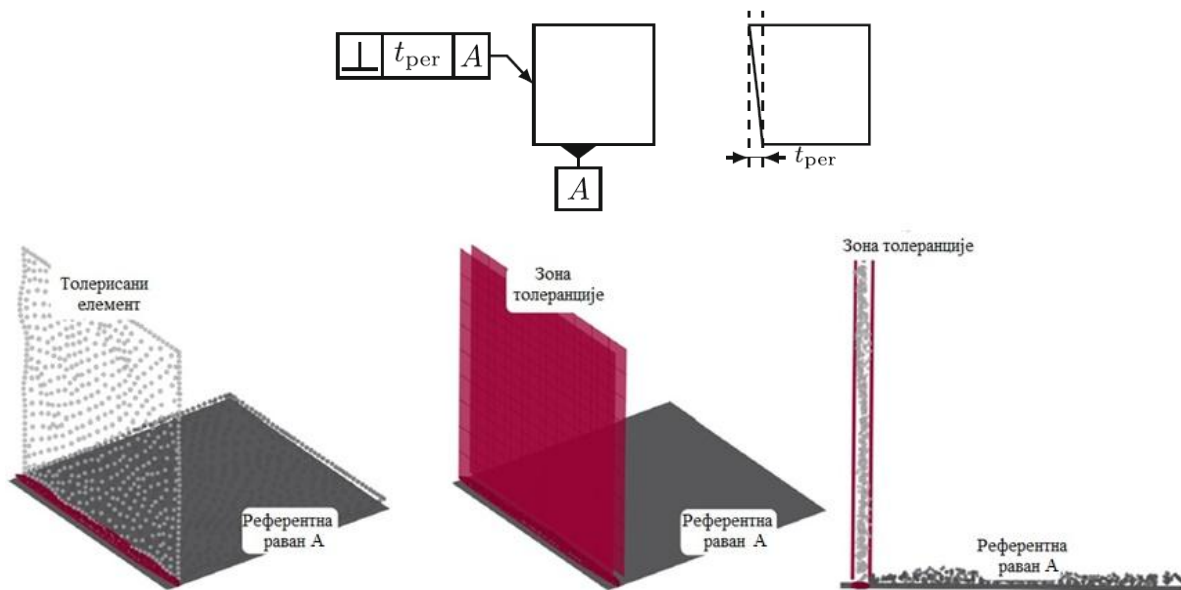
Слика 7.4. Грешка цилиндричности и зона толеранције [32]

Толеранције положаја захтевају дефинисање референтног елемента који може бити површина, раван или линија. На слици 7.5-а дата је (цртежом) захтевана толеранција паралелности (t_{par}) у односу на референтну раван A . На слици 7.5-б приказан је пример положаја измерених тачака у односу на зону толеранције и референтну раван A .



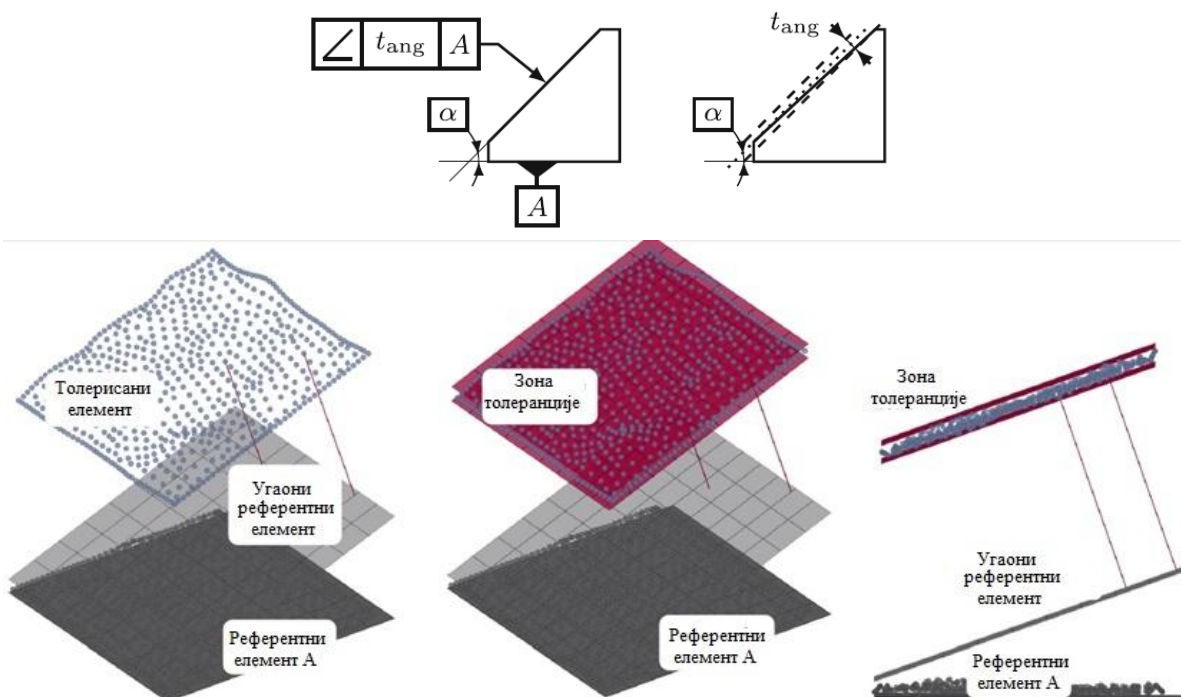
Слика 7.5. Грешка паралелности и зона толеранције [32]

На следећим сликама приказана су преостала одступања измерених тачака површина од правца, и то грешка управности (слика 7.6) и грешка угловности (слика 7.7).

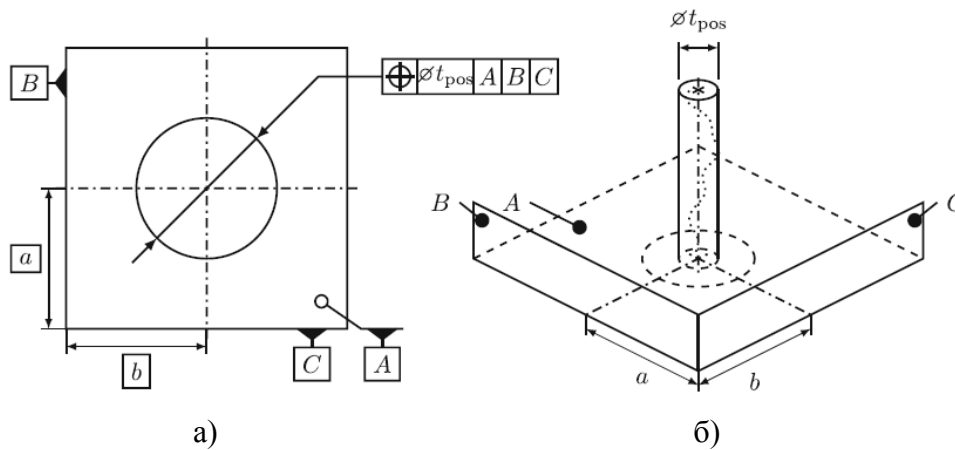


Слика 7.6. Грешка управности и зона толеранције [32]

Аналогно се одређује да ли обрађена површина задовољава толеранцију места, која такође захтева дефинисање референтног елемента. На слици 7.8 приказан је пример одступања од места - локације. На слици 7.8-а, дат је цртеж са спецификованом толеранцијом. Грешку обраде дефинише положај осе цилиндричног дела која након мерења треба да се нађе унутар замишљеног цилиндра пречника ϕ_{pos} у односу на референтне елементе A , B и C .

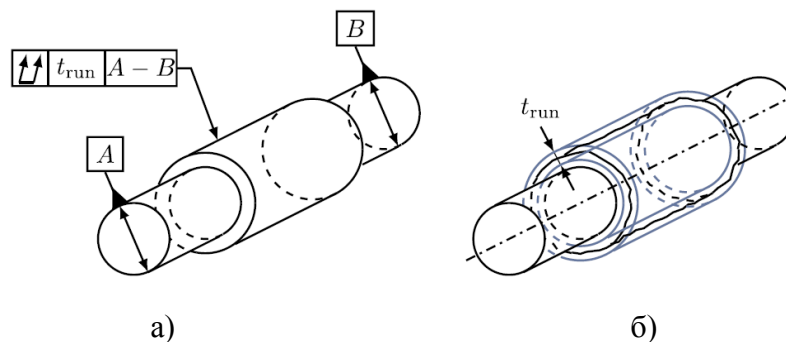


Слика 7.7. Грешка угловности и зона толеранције [32]



Слика 7.8. Грешка места - локације осе [32]

У грешке положаја спада и грешка обртања. Тачке измерене површине у овом случају морају се наћи између два коаксијална цилиндра са разликом у пречницима од t_{run} , а оса да се подудара са заједничком правом линијом референтних елемената $A - B$, како би мерена површина остала у границама захтеване толеранције. На слици 7.9-а приказан је 3D цртеж са спецификованом толеранцијом модела, док је на слици 7.9-б приказан део са измереним тачкама и зоном толеранције.



Слика 7.9. Грешка положаја - тачности обртања [32]

7.4 Грешке површинске храпавости

Површинска храпавост игра важну улогу у одређивању квалитета производа, јер знатно утиче на перформансе делова, као и на трошкове производње. Многи процеси обраде намећу карактеристичне неправилности на површини обрадка. Тако је и једна од карактеристика код процеса обраде глодањем неједнак попречни пресек струготине који је описан у многим радовима, нпр. [246]. Храпавост је један од фактора који утичу на механичке особине као што су отпорност на корозију, отпорност на хабање, флексибилност, замор материјала итд. Дакле, то је један од ефикасних параметара који се не може занемарити у пројектовању [33]. На слици 7.10. дат је приказ параметара који утичу на површинску храпавост.

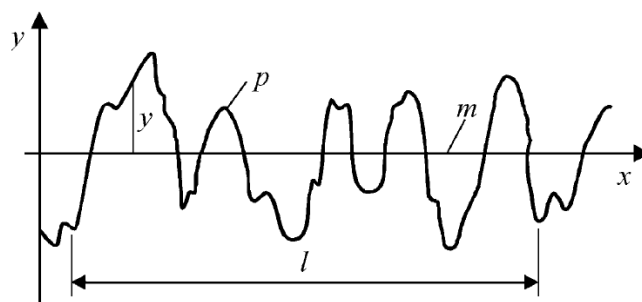
Површинска храпавост зависи од многих контролисаних параметара процеса (укључујући брзину резања, аксијалну и радијалну дубину резања, геометрију резног алата и корак) и неконтролисаних параметара процеса (у које спадају особине материјала обрађиваног дела и алата, вибрације машине алатке, хабање алата итд.) које је тешко предвидети и континуирано пратити.

Површинска храпавост према дефиницији ISO 4287:1997 [35] представља свеукупне микрогеометријске неравнине на површини предмета проузроковане поступком обраде

или неким другим утицајима. На слици 7.11 приказана је стандардна терминологија која описују површинску храпавост. Профил (p) представља контуру пресека у равни управној на обрађену површину. l је референтна дужина или дужина узорковања. Средња линија m профила p се налази тако да збир површина изнад линије (унутар узорковане дужине l) буде једнак збиру површина испод линије [247].



Слика 7.10. Дијаграм утицајних параметара на површинску храпавост [34]



Слика 7.11. Елементи који дефинишу површинску храпавост [247]

Упркос различитим параметрима, средње аритметичко одступање профила R_a је најчешће коришћен параметар површинских неравнина. Дефинише се као:

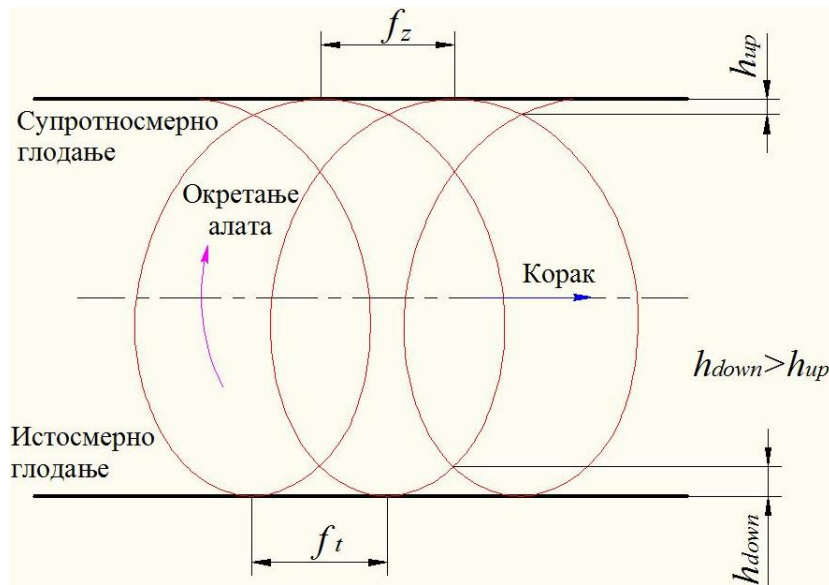
$$R_a = \frac{1}{l} \int_0^l |y(x)| dx$$

Методe мерења површинске храпавости се могу поделити на упоредне и директне. Упоредне методe врше поређење измерене вредности површинске храпавости са постојећим еталоном, док директне непосредно израчунавају величину храпавости.

Упоредне методe најчешће користе компаративни микроскопи. У директне методe се сврставају у бесконтактне (које користе одбијање светлости) и контактне методe (које користе дијамантске или челичне игле). Контактне методe користе уређаји као што су профилометри и профилографи.

Површинска храпавост код обраде глодањем је у директној зависности од путање зуба глодала. Ако се глодало и машина алатка сматрају апсолутно крутим, тада стварна (идеална) трајекторија резног зуба глодала представља криву линију - циклоиду (*trochoid*). Истосмерно и супротносмерно глодање не користе исти део циклоидне

путање зуба током резања због различитих ротационих праваца алата, као што је приказано на слици 7.12.



Слика 7.12. Циклодна путања зуба код ИС и СС глодања [248]

Код истосмерног глодања, висина храпавости (неравнина) означена са h_{down} је већа од оне код супротносмерног глодања означена са h_{up} добијене истим кораком (*feed*). Стога се очекује да површинска храпавост код истосмерног буде већа него код супротносмерног глодања [248]. Висина храпавости код глодања (h) математички је повезана са кораком по зубу (f_z), полупречником резног алата (R), и бројем зуба (z) и може се одредити из израза [36]:

$$h = \frac{f_z^2}{8 \left(R \pm \frac{f_z \cdot z}{\pi} \right)}$$

Позитиван знак у имениоцу односи се на супротносмерно, а негативан знак за истосмерно глодање. Ова једначина подразумева једнакост корака зуба по обиму резног алата и обраду без радијалног бацања.

Поглавље 8

ГЕНЕРИСАЊЕ ПОВРШИНЕ ГЛОДАЊЕМ

Упркос развоју *CAM* софтвера, технологије резног алата и технологије машине алатке, резултати код глодања вретенастим глодалом (*end mill*) још увек зависе у великој мери од производног особља. Обрада глодањем вретенастим глодалом је сложен процес у смислу планирања процеса из разлога сложене геометрије, еволуције нових материјала, и високих захтева финалног производа. Сходно томе, пуни потенцијал система машине алатке је од користи у многим случајевима. *CAD/CAM* системи могу да генеришу *CNC* програме на основу геометрије дела, али они не помажу програмерима у избору одговарајућих режима резања и других параметара процеса [248].

8.1 Фактори који утичу на формирање површинске топографије

Утицајни фактори на квалитет генерисања површинске топографије током процеса обраде глодањем, претпостављајући да су елементи машине алатке апсолутно крути, представљају: лоше постављање и стезање глодала, радијално одступање (грешка обртања) глодала, угиб, динамика система [48], као и нетачност израде резних ивица глодала, односно хабања зуба глодала.

Утицај лошег постављања глодала у држач алата може се дефинисати преко паралелне померености и нагнутости осе глодала. Утицај нетачности израде зуба, односно њиховог хабања, геометријски представља индивидуално радијално одступање зуба глодала. Ова два утицаја на генерисање површине глодањем биће детаљно описане у даљем раду и изведени модели за предвиђање њиховог утицаја.

Грешка обртања алата дефинисана је ексцентричношћу која се јавља између геометријске осе резног алата и осе ротације вретена машине. Присуство грешке обртања резног алата резултује променљивим оптерећењем струготине преко ротације резног алата који окретањем изазива неравномерну расподелу силе резања приликом једног пуног окрета алата.

Вретенасто глодало се понаша као конзолна греда изложена оптерећењу на свом резном делу. Ово оптерећење изазива угиб алата са различитим вредностима померања у односу на осу глодала и изражено је у оба бочна смера.

Утицај динамике система алата, вретена и машине алатке може се апроксимирати једним степеном слободе као што је приказано у следећим једначинама у X и Y правцу, респективно [48]:

$$\begin{aligned} m_x \ddot{x}^i + c_x \dot{x}^i + k_x x^i &= F_x^i \\ m_x \ddot{y}^i + c_x \dot{y}^i + k_x y^i &= F_y^i \end{aligned}$$

Параметри који карактеришу систем су маса, пригушење и крутост (m , c , k) и могу се одредити експериментално. Укупне силе (F_x и F_y) се израчунавају за сваки (i) корак симулације, а затим уводе у десну страну једначине и решавају, чиме се одређује положај центра алата.

8.2 Генерисање површинске топографије

Обимно глодање (*peripheral milling*) вретенастим глодалом је честа операција резања метала која се користи у аутомобилској, авио и машинској индустрији. Један од најважнијих показатеља успешности у завршним операцијама представља квалитет површине. Како захтеви за квалитетом расту, акценат се све више ставља на квалитет површине. Један од фактора који могу да деградирају квалитет површине представља такозвана „грешка постављања алата“ која настаје када се оса алата не поклапа са осом ротације радног вретена. Грешка постављања алата може се разматрати као збир две врсте грешака: грешке услед паралелне померености (*cutter parallel axis offset*) и грешке услед нагиба (*cutter axis tilt*) између оса алата и вретена [36]. Други фактор је грешка услед одступања мера (полупречника) зуба глодала.

Пионирски рад на аналитичком одређивању путање резне ивице алата при операцији глодањем дао је *Martellotti* [36]. Он је извео параметарске једначине са циклоидним путањама сечива алата и извршио процену елемената као што су радијус кривине путање зуба, грудног и леђног угла, дужине путање зуба, радијалне дебљине струготине и њихов ефекат на квалитет генерисане површине, потрошену енергију и постојаност алата. *Kline* и аут. [37, 38] су проучавали утицај грешке услед паралелне померености осе алата на трагове зуба (*teeth marks*) алата који услед обраде остају на површини радног дела. Они наводе генерисање хетерогености *band*-а и концепт ефективног радијуса и развијају модел за израчунавање резане геометрије и предвиђање сила резања са ефектом паралелног померања осе глодала на радном делу од алуминијума 7075. *Babin* и аут. [39, 40] су развили модел резања са паралелним померањем осе глодала чему су додали и угиб алата услед отпора резања, као и утицај паралелног померања осе глодала на промену величине храпавости по различитим висинама глодане површине при различитим брзинама резања. *Ismail* и аут. [41] су извели модел узимајући у обзир паралелно померање осе глодала и укључили ефекте вибрације глодала и хабања бока и анализирали неправилности у маркирању корака (*feed marks*). *Schmitz* и аут. [42] истражују ефекат паралелне померености осе на површинску топографију код глодања, грешку локације површине, и стабилности код глодања са вретенастим глодалом. *Li* и *Li* [43] закључују да је промена радијуса зуба глодала најважнији фактор у процени ефеката грешке обртања глодала. *Gao* и аут. [44] су развили директну, независну од мреже (*meshindependent*) методу која одређује симулацију топографије обрађене површине код процеса глодања са вретенастим глодалом са равним и лоптастим врхом.

Stori и аут. [45] поред паралелне померености осе глодала узимају у обзир нагнутост осе глодала (*cutter axis tilt*) и врше оптимизацију параметара резања код операција завршног (финог) обимног глодања. *Ranganath* и *Sutherland* [46] представљају тро-корачну методологију за процену грешке обртања, укључујући оштрење алата, паралелну помереност и нагнутост осе код обимног глодања. *Ryu* и аут. [47] анализирају силе резања и угиб алата узимајући у обзир геометрију алата, грешку постављања алата (паралелну помереност и нагнутост осе), као и крутост машине алатке при обимном глодању зида одливака. Такође разматрају карактеристике и разлике облика обрађене површине код истосмерног и супротносмерног глодања. *Omar* и аут. [48] развијају модел који обухвата ефекте грешке обртања (паралелну помереност осе и нагнутост осе), угиб алата, динамику система, бочно хабање алата и површинску храпавост. *Ehmann* и *Hong* [49] развијају модел (назван *surface-shaping system*) за предвиђање топографије генерисане површине под утицајем грешке обртања алата, деформације и вибрације машине алатке, преко трансформационих матрица (*transformation matrices*).

Arizmendi и аут. [249] постављају генерални модел за одређивање путање зуба вретенастог глодала преко трансформационих матрица, узимајући у обзир паралелну помереност и нагнутост осе глодала. Такође свеобухватно анализирају појаву хетерогених *band-ova* храпавости (*roughness heterogeneity bands*) на глоданим површинама. *Arizmendi* и аут. [250] у једначине модела путање кретања зуба глодала додају вибрације током процеса резања и упростили постојећи модел. Модел омогућава предвиђање топографије, величине површинске храпавости и облик грешака глодане површине. *Arizmendi* и аут. [251, 252] настављају да анализирају топографију површине и хетерогеност *band-ova* у новонасталим условима.

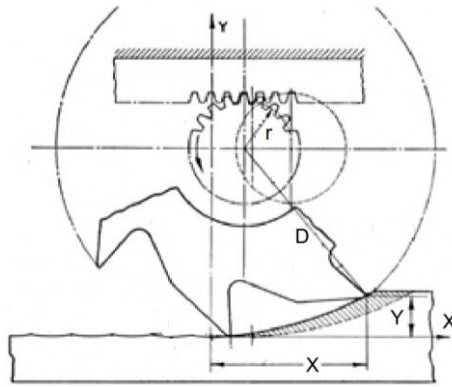
8.2.1 *Martellotti*-јев модел за генерисање површинске топографије добијене обимним глодањем

Глодање је процес уклањања вишка материјала са радног дела у облику ситних индивидуалних струготина. Ове струготине се формирају повременим ангажовањем више сечива или зуба као саставним делом алата, односно уметнутим плочицама у цилиндрично тело које се назива глодало, са радним делом. Ово повремено ангажовање је производ помоћног кретања (корака) дела у области у којој је ротирање резног алата главно.

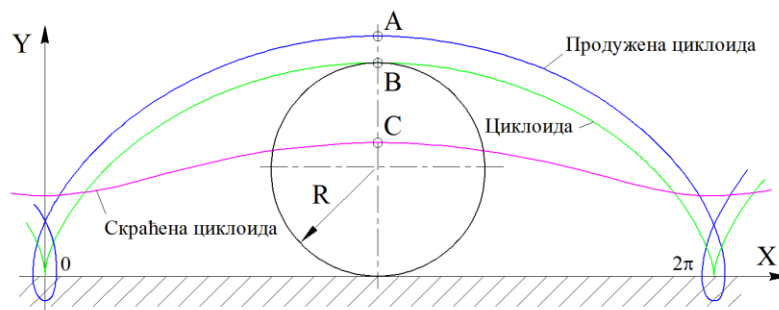
Као што је речено, први рад на аналитичком одређивању путање алата код операције глодањем извео је *Martellotti*. Он је дошао до параметарских једначина са циклоидним путањама сечива алата. За потребе анализе, систем који се састоји од ротирајућег глодала и обратка који се транслаторно креће, заменио је еквивалентним системом при коме је радни комад непокретан, а резни алат истовремено ротира и транслаторно се креће. У овом случају, међутим, правац транслаторног кретања резног алата (корак) ће бити супротан од кретања радног комада, који се добија у општем случају. Идеализована верзија овог модела (слика 8.1), састоји се од зупчаника правилних димензија, повезаног са радним вретеном на које је постављено глодало. Зупчаник је спрегнут са зупчастом летвом круто повезаном за непокретно постоље машине. Након ротације вретена, резни алат ће се померати ка радном комаду за вредност корака.

Правац кретања тачке алата се стално мења у односу на правац кретања радног комада, па путања тачке резне ивице зуба, која из овог проистиче, није кружница већ крива која је правилно описана као продужена циклоида (*curtate trochoid*). Продужену циклоиду описује тачка *A* која лежи изван круга (слика 8.2), који се без клизања котрља по неком правцу *X*. У случају да се тачка *B* налази на обиму круга, резултујућа крива је циклоида

(*cykloid*). Трећи тип криве је скраћена циклоида (*prolate trochoid*) и она настаје у случају да тачка С лежи унутар круга.

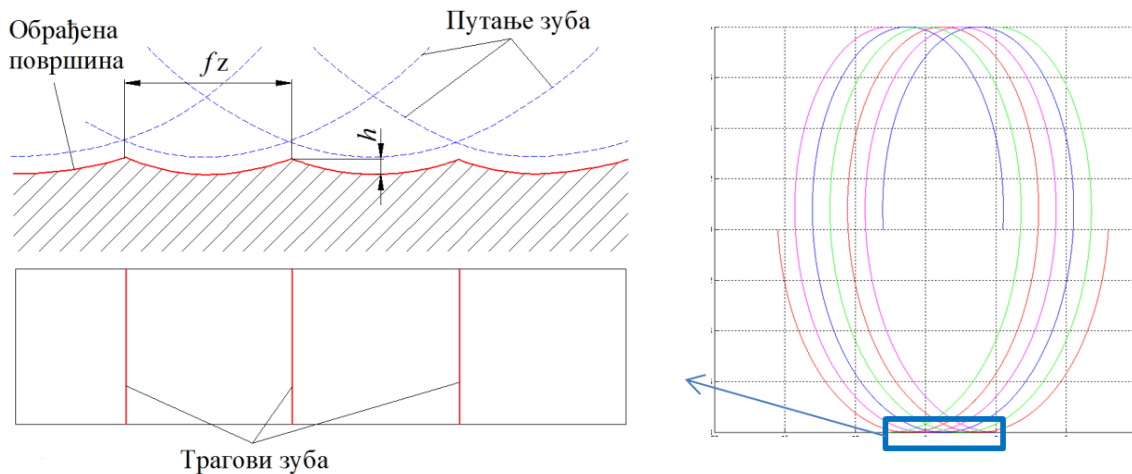


Слика 8.1. Модел са зупчаником и зупчастом летвом [36]



Слика 8.2. Криве линије - циклоиде

Због ограниченог периода ангажовања сваког зуба, глодана струготина је кратка и променљиве дебљине, док се обрађена површина састоји од низа елементарних површина насталих појединачним резањем сечива резног алата, док се површинска топографија формира са жлебовима (траговима зуба), произведеним на глоданој површини од стране различитих резних ивица вретенастог глодала са својим циклоидним путањама [36]. У идеалном случају, где су све тачке резних ивица алата смештене на цилиндричној површини коаксијалној са осом вретена, формирани жлебови ће добити облик циклоидних лукова истих дужина, одвојени дуж праваца корака величином кораку по зубу fz и разликом у дубини h (слика 8.3).

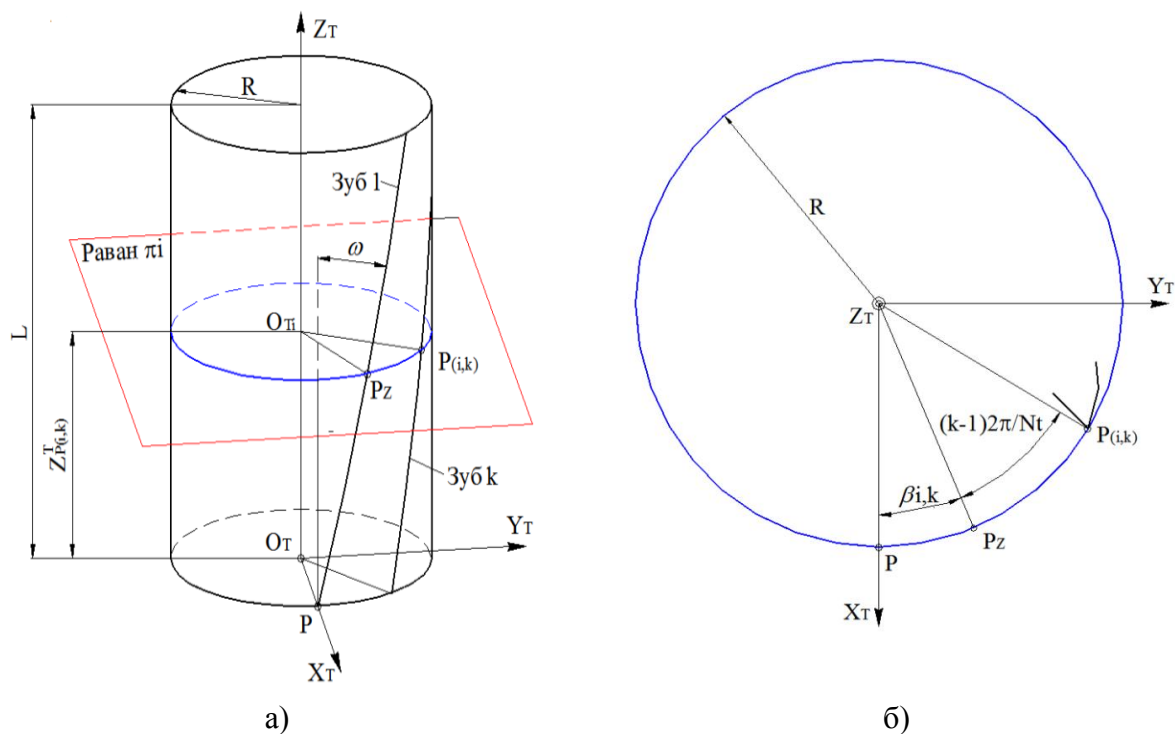


Слика 8.3. Идеалан случај топографије глодане површине

Искуство показује да, када се вретенасто глодало стеже у држач алата, све тачке на резним ивицама нису смештене у истом цилиндру због чињенице да се оса глодала не поклапа са осом вратила, као и да висине свих зуба нису исте. Као последица тога, свака тачка резне ивице ротира око осе вретена са тзв. ефективним (стварним) полупречником различитим од номиналног. Како свака резна ивица има различит ефективни полупречник, профил жлебова ће садржати циклоидне лукове различитих дужина који ће се понављати са периодом који је једнак кораку по обртају f , где је $f=N_t \cdot f_z$, а N_t број зуба глодала. Стога, да би се предвидела топографија глодане површине и утицај радијалног одступања полупречника резних ивица, мора бити познат положај тачака резних ивица у односу на осу вретена, па прво треба узети у обзир геометрију грешке постављања алата.

8.2.2 Модел идеалне путање зуба

Слика 8.4 приказује геометрију вретенастог глодала и одговарајући координатни систем $X_T Y_T Z_T$. Вретенасто глодало се моделира са N_t спиралних резних ивица зуба који се налазе на периферији цилиндричне површине радијуса R представљеног на слици 8.4-а.



Слика 8.4. Геометрија вретенастог глодала [249]

До једначине идеалне путање тачке на резној ивици може се доћи постављањем равни нормалне на осу Z_T глодала, на висини $z_{P(i,k)}^T$ од тачке врха O_T (слика 8.4-а). Ова равна сече зуб 1 и k у тачкама P_Z и $P(i,k)$, респективно. Гледано одозго на равна (слика 8.4-б), угаони положај $\beta_{i,k}$ у односу на најнижу тачку зуба 1, може се извести следећи израз:

$$\beta_{(i,k)} = \frac{z_{P(i,k)}^T \cdot \tan(\omega)}{R} \tag{1}$$

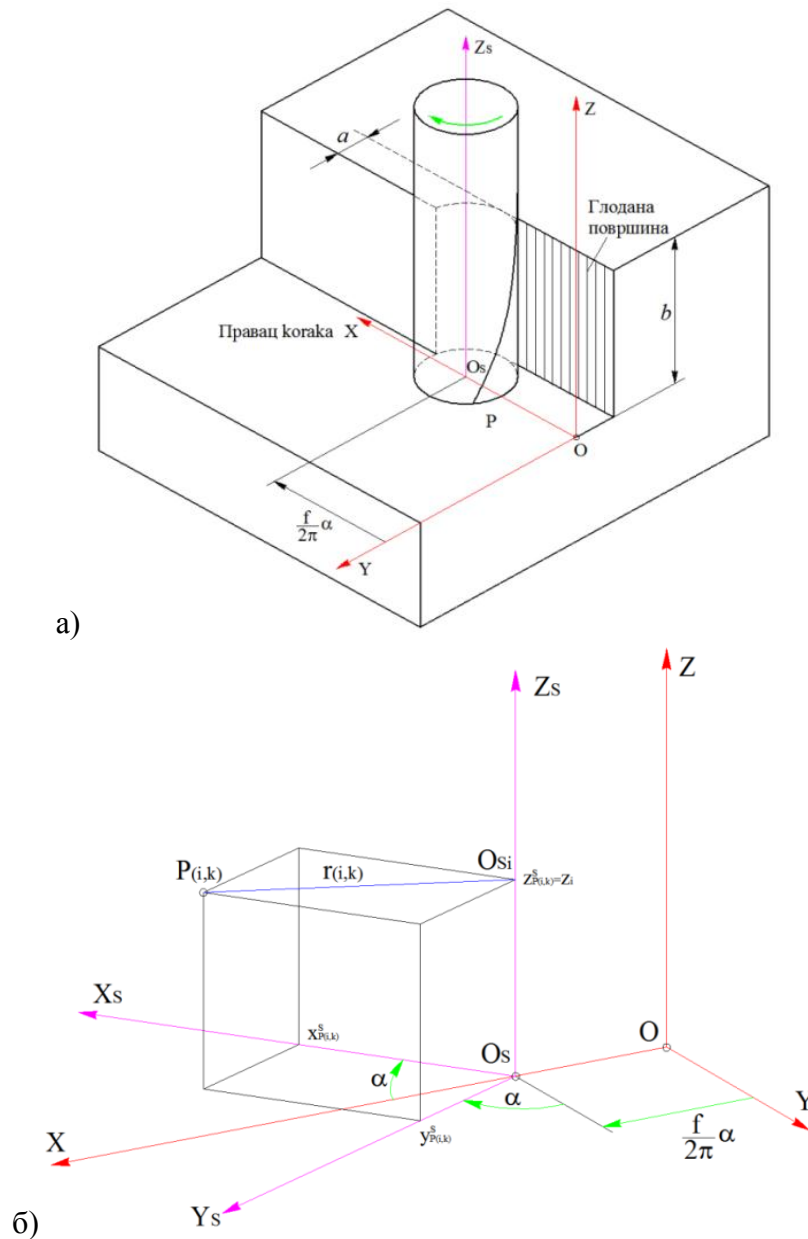
где је ω - угао спирале зуба.

Сада се координате $(x_{P(i,k)}^T, y_{P(i,k)}^T$ и $z_{P(i,k)}^T)$ тачке $P(i,k)$ могу изразити једначинама:

$$\begin{aligned}
 x_{P(i,k)}^T &= R \cdot \cos \left[\beta_{(i,k)} + (k-1) \frac{2\pi}{N_t} \right] \\
 y_{P(i,k)}^T &= R \cdot \sin \left[\beta_{(i,k)} + (k-1) \frac{2\pi}{N_t} \right] \\
 z_{P(i,k)}^T &= \frac{\beta_{(i,k)} R}{\tan(\omega)}
 \end{aligned} \tag{2}$$

где је k - редни број зуба, и то $k=1,2,\dots,N_t$, а N_t - број зуба глодала.

У циљу добијања једначина које описују пут тачке $P(i,k)$ у односу на део, морају се узети у обзир два референтна система: референтна система XYZ (слика 8.5-а) фиксиран за део и систем $X_s Y_s Z_s$, који ротира око осе вретена Z_s константном угаоном брзином и помера се за растојање f по обртају у правцу корака (X).



Слика 8.5. Референтни системи модела [249]

Претпоставља се да је процес крут тако да се грешке настале услед вибрације алата и обратка могу занемарити. Координате (x, y) тачке $P(i, k)$ у систему XYZ могу се написати у матричном облику у функцији угла ротације α (слика 8.5-б):

$$\begin{bmatrix} x_{P(i,k)}^{(\alpha)} \\ y_{P(i,k)}^{(\alpha)} \\ z_{P(i,k)}^{(\alpha)} \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos(\alpha) & \sin(\alpha) & 0 & \frac{f}{2\pi} \alpha \\ -\sin(\alpha) & \cos(\alpha) & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_{P(i,k)}^T \\ y_{P(i,k)}^T \\ z_{P(i,k)}^T \\ 1 \end{bmatrix} \quad (3)$$

где су $x_{P(i,k)}^{(\alpha)}$ и $y_{P(i,k)}^{(\alpha)}$ координате $P(i, k)$ при углу ротације у правцу корака α и правцу нормалном на глодану површину, респективно и $z_{P(i,k)}^{(\alpha)}$ је висина дуж глодане површине.

Једначине кретања тачке резне ивице зуба са идалном геометријом добија се уносом израза за координате из једначине (2) у једначину (3):

$$\begin{bmatrix} x_{P(i,k)}^{(\alpha)} \\ y_{P(i,k)}^{(\alpha)} \\ z_{P(i,k)}^{(\alpha)} \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos(\alpha) & \sin(\alpha) & 0 & \frac{f}{2\pi} \alpha \\ -\sin(\alpha) & \cos(\alpha) & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} R \cdot \cos \left[\beta_{(i,k)} + (k-1) \frac{2\pi}{N_t} \right] \\ R \cdot \sin \left[\beta_{(i,k)} + (k-1) \frac{2\pi}{N_t} \right] \\ \frac{\beta_{(i,k)} R}{\tan(\varpi)} \\ 1 \end{bmatrix} \quad (4)$$

Са слике 8.4-б може се извести однос између угаоног положаја $\beta_{i,k}$ и висине пресечне равни $z_i = z_{P(i,k)}^T$:

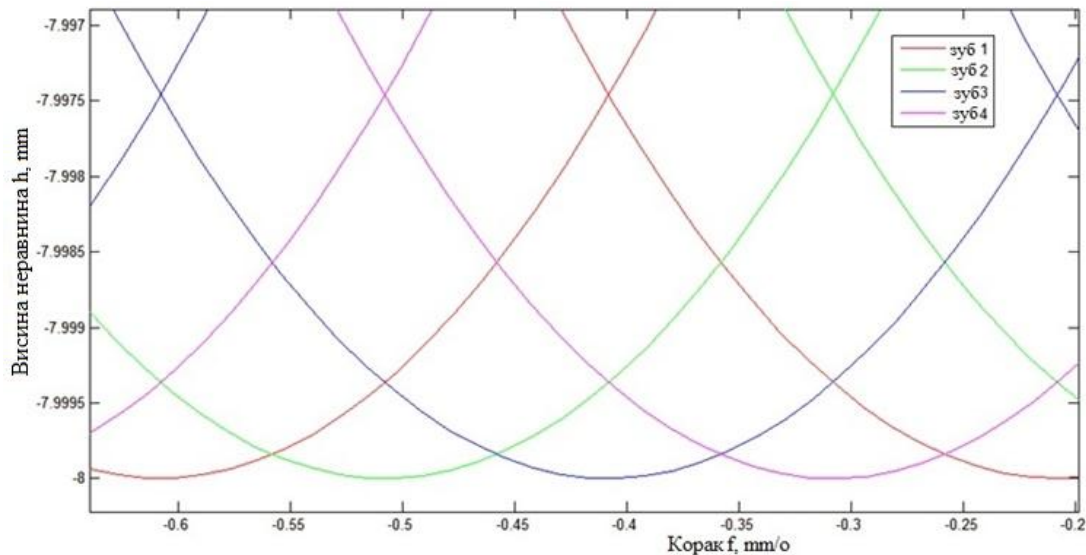
$\beta_{(i,k)} \cdot R = z_i \cdot \tan(\varpi)$, одакле је:

$$\beta_{(i,k)} = \frac{z_i}{R} \tan(\varpi) \quad (5)$$

Сада су дефинитивне једначине кретања тачке у функцији угла ротације α :

$$\begin{bmatrix} x_{P(i,k)}^{(\alpha)} \\ y_{P(i,k)}^{(\alpha)} \\ z_{P(i,k)}^{(\alpha)} \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos(\alpha) & \sin(\alpha) & 0 & \frac{f}{2\pi} \alpha \\ -\sin(\alpha) & \cos(\alpha) & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} R \cdot \cos \left[\frac{z_i}{R} \tan(\varpi) + (k-1) \frac{2\pi}{N_t} \right] \\ R \cdot \sin \left[\frac{z_i}{R} \tan(\varpi) + (k-1) \frac{2\pi}{N_t} \right] \\ z_i \\ 1 \end{bmatrix} \quad (6)$$

На слици 8.6 приказани су теоретски (идеални) трагови зуба глодала са 4 зуба, полупречника 8 mm добијени из модела и једначине (6) у програму *MatLAB*.



Слика 8.6. Трагови зуба идеалне путање

8.2.3 Модел који узима у обзир грешке постављања глодала

У циљу дефинисања положаја осе глодала у односу на осу радног вретена, узима се у обзир грешка постављања алата (паралелна помереност осе и нагиб осе), преко одређених параметара: тачака, координатних система и равни (слика 8.7). Грешка подешавања алата је дефинисана помоћу параметара коришћених у [38, 253, 46, 249]. Паралелна помереност осе ρ је дефинисана као удаљеност централне осе глодала од осе вретена на стегнутом крају глодала. Нагиб осе τ се дефинише као угао који гради оса глодала у односу на осу вретена.

Да би се повезале грешке (ρ и τ), једне с другом и са ивицама глодала, морају се разматрати два угла положаја (ϕ и λ) (слика 8.7-а) преко равни P_T , која садржи осу глодала и паралелна је са осом вретена. Поред тога, користе се најниже тачке осе глодала и зуба 1, O_T и P , респективно. Стога, угао ϕ је угао добијен помоћу равни P_T и правца ρ задатог тачкама A и B . Угао λ је дефинисан као угао добијен линијом која спаја тачке P и O_T са равни P_T у смеру супротном од смера казаљке на сату.

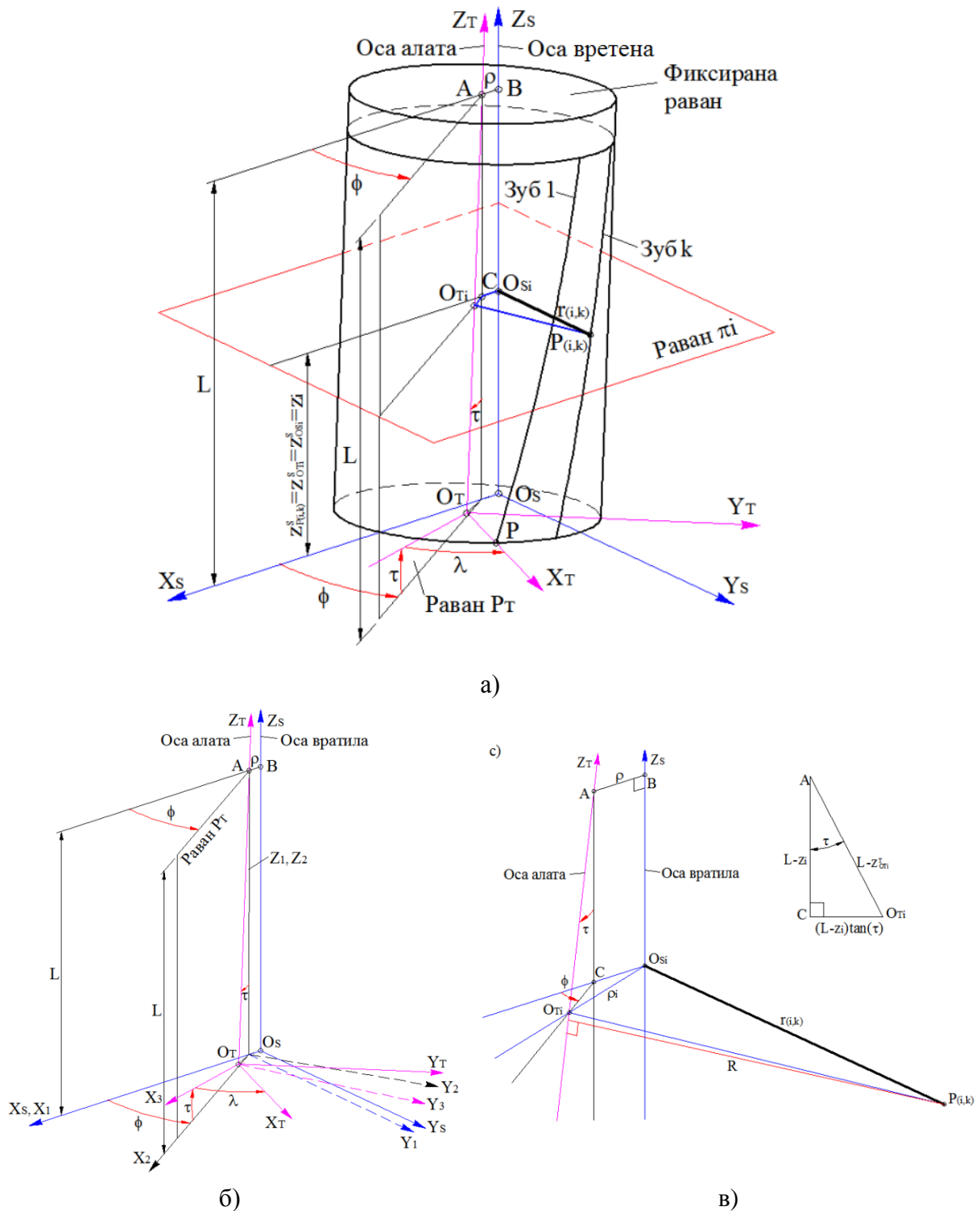
Даље, кроз ова четири параметра ρ , τ , ϕ и λ , положај сваке тачке резне ивице се може изразити у односу на осу вретена. Да би се то постигло, морају се успоставити два главна координатна система: систем глодала $X_T Y_T Z_T$, и референтни систем вретена $X_S Y_S Z_S$ (слика 8.7-а).

Систем $X_T Y_T Z_T$ је координатни систем везан за глодало где се: оса Z_T поклапа са осом глодала, координатни почетак O_T одговара тачки пресека осе Z_T и слободног краја глодала и налази се на удаљености L од фиксиране равни, (L представља слободну дужину глодала) и оса X_T има правац линије која спаја тачке O_T и P , која је пресечна тачка зуба 1 са слободним крајем алата (слика 8.7-а).

Систем $X_S Y_S Z_S$ је координатни систем причвршћен за ротационо вретено. У овом координатном систему: оса Z_S поклапа се са осом вретена, координатни почетак се налази на удаљености L од фиксиране равни и оса X_S има правац паралелног померања глодала ρ задат тачкама A и B (слика 8.7-а).

Као и у литератури [5, 6, 21, 13, 17], у овом раду је алат дискретизован преко равни π_i (слика 8.7-а) управно на осу ротације вретена Z_S , која се налази на висини z_i у систему $X_S Y_S Z_S$ и дели је на међусобно једнака растојања. Свака раван π_i сече осе Z_S и Z_T у

тачкама O_{S_i} и O_{T_i} респективно и зуб k на тачке резне ивице $P(i,k)$, где се тачка зуба k налази на висини z_i или $z_{P(i,k)}^S$ у $X_S Y_S Z_S$ систему вретена или на висини $z_{P(i,k)}^T$ у систему глодала $X_T Y_T Z_T$. Да би се изразиле координате тачке, индекс ће се односити на посматрану тачку, а експонент на референтни систем на који се односи.



Слика 8.7. Геометрија глодала са грешком постављања алата [249]

Да би се добио однос координата тачке резне ивице $P(i,k)$ у систему вретена $X_S Y_S Z_S$ са својим координатама у систему глодала $X_T Y_T Z_T$, узима се у обзир низ помоћних координатних система.

Помоћни координатни системи (слика 8.7-б) који се овде користе су дефинисани према моделима представљеним на следећи начин [39, 249]:

- систем $X_1Y_1Z_1$: чије су осе паралелне са осама система вретена $X_SY_SZ_S$ али померене за растојање ρ у смеру X_S ,
- систем $X_2Y_2Z_2$: добијен ротацијом око осе Z_1 координатног система $X_1Y_1Z_1$ под углом ϕ у смеру супротном од смера казаљке на сату и
- систем $X_3Y_3Z_3$: који је добијен ротацијом за угао τ око осе паралелне осе Y_2 и пролази кроз тачку A у фиксираној равни (слике 8.7-а,б).

Коначно, координате $P(i,k)$ у систему $X_SY_SZ_S$ се могу изразити као производ трансформационих матрица координата између референтних система претходно дефинисаних и координата тачке $P(i,k)$ у систему $X_TY_TZ_T$:

$$\begin{bmatrix} x_{P(i,k)}^S \\ y_{P(i,k)}^S \\ z_{P(i,k)}^S \\ 1 \end{bmatrix} = T_{S1(\rho)} \cdot T_{12(\phi)} \cdot T_{23(L,\tau)} \cdot T_{3T(\lambda)} \begin{bmatrix} x_{P(i,k)}^T \\ y_{P(i,k)}^T \\ z_{P(i,k)}^T \\ 1 \end{bmatrix} \quad (7)$$

Где су матрице транслације и ротације помоћних координатних система:

$$T_{S1(\rho)} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & \rho \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

$$T_{12(\phi)} = \begin{bmatrix} \cos(\phi) & -\sin(\phi) & 0 & 0 \\ \sin(\phi) & \cos(\phi) & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

$$T_{23(L,\tau)} = \begin{bmatrix} \cos(\tau) & 0 & -\sin(\tau) & L \cdot \sin(\tau) \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ \sin(\tau) & 0 & \cos(\tau) & L \cdot [1 - \cos(\tau)] \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

$$T_{3T(\lambda)} = \begin{bmatrix} \cos(\lambda) & -\sin(\lambda) & 0 & 0 \\ \sin(\lambda) & \cos(\lambda) & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

Први индекс трансформационих матрица (T_{S1} , T_{12} , T_{23} и T_{3T}) се односи на крајњи координатни систем, а други на почетни и где су $x_{P(i,k)}^T$, $y_{P(i,k)}^T$ и $z_{P(i,k)}^T$ координате тачке $P(i,k)$ у систему $X_TY_TZ_T$, које су добијене раније узимањем у обзир геометрије глодала.

Из једначине (2), да би израчунали положај тачке $x_{P(i,k)}^T$, $y_{P(i,k)}^T$ и $z_{P(i,k)}^T$, узимајући у обзир грешке постављања глодала, мора бити познат угаони положај $\beta_{i,k}$. Заменом

једначине (2) у једначину (7), решава се за $z_{P(i,k)}^S$ и узимајући у обзир да је $z_{P(i,k)}^S = z_i$, добија се следећа једначина у релацији са углом $\beta_{i,k}$ и z_i :

$$R \cdot \cos\left(\lambda + \beta_{(i,k)} + (k-1)\frac{2\pi}{N_t}\right) \sin(\tau) + \frac{R \cdot \cos(\tau)}{\tan(\omega)} \beta_{(i,k)} + L(1 - \cos(\tau)) = z_i \quad (8)$$

Решавање једначине (8) је компликовано али се $z_{P(i,k)}^T$ може апроксимирати са занемарљивом грешком са $z_{OT_i}^T$, где се са слике 8.7-ц, може видети да је:

$$L - z_i = (L - z_{OT_i}^T) \cos(\tau) \quad (9)$$

Затим, решавањем једначине (9) за $z_{OT_i}^T$, апроксимирани израз $z_{P(i,k)}^T$ добија облик:

$$z_{P(i,k)}^T \approx z_{OT_i}^T = L - \frac{(L - z_i)}{\cos(\tau)} \quad (10)$$

Из j-не (5) добијамо:

$$\beta_{(i,k)} \approx \frac{z_{OT_i}^T \cdot \tan(\omega)}{R} = \left[L - \frac{(L - z_i)}{\cos(\tau)} \right] \frac{\tan(\omega)}{R} \quad (11)$$

Када се угаони положај $\beta_{i,k}$ одређује, могу се добити координате сваке тачке резне ивице $P(i,k)$ у систему вретена $X_S Y_S Z_S$ помоћу једначина (7) и (2). Кроз ове координате, сада може бити изведена путања дефинисана тачком резне ивице:

$$\begin{aligned} x_{P(i,k)}^T &= R \cdot \cos\left[\left(L - \frac{(L - z_i)}{\cos(\tau)}\right) \frac{\tan(\omega)}{R} + (k-1)\frac{2\pi}{N_t}\right] \\ y_{P(i,k)}^T &= R \cdot \sin\left[\left(L - \frac{(L - z_i)}{\cos(\tau)}\right) \frac{\tan(\omega)}{R} + (k-1)\frac{2\pi}{N_t}\right] \\ z_{P(i,k)}^T &= \frac{\left(L - \frac{(L - z_i)}{\cos(\tau)}\right) \frac{\tan(\omega)}{R} R}{\tan(\omega)} = \left(L - \frac{(L - z_i)}{\cos(\tau)}\right) \end{aligned} \quad (12)$$

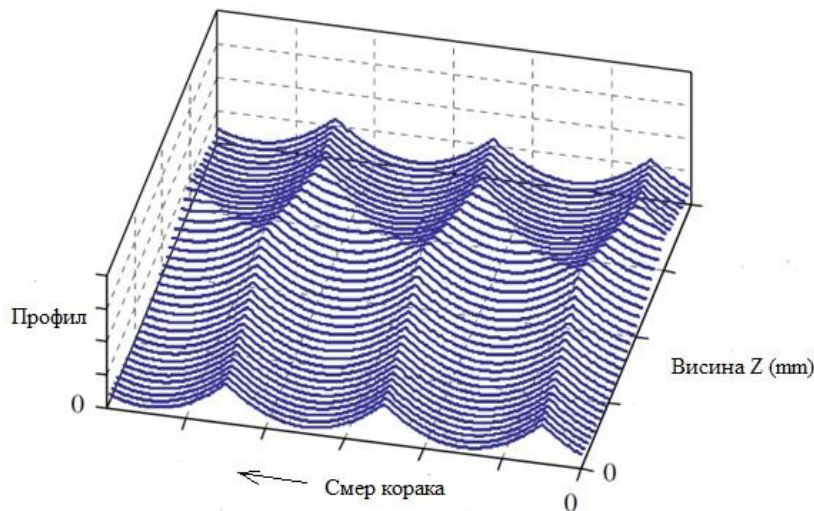
Поступак за добијање површинске топографије захтева симулацију путања зуба на основу коначних једначина (12) за добијање профила храпавости у свакој равни π_i . Ова симулација укључује рачунање позиције (x, y) сваке тачке резне ивице на дискретним корацима угла ротације α . Да би се генерисао профил храпавости на висини z_i , морају бити одређене пресечне тачке између путања резних ивица и како би знали који зуб оставља свој траг на радном делу, мора се обавити поређење између стаза. Када се једном утврди профил храпавости на свакој равни π_i дуж аксијалне дубине, сви профили се здружују да формирају површинску топографију. На слици 8.8 приказан је пример генерисане топографија где се види да, до одређене висине посматраног профила, резање врши један зуб, док променом висине, резање преузима суседни зуб и формира тзв. хетерогеност *band*-а храпавости генерисане површине.

Дефинитивне једначине кретања тачке резне ивице зуба глодала, које узимају у обзир грешку постављања алата преко паралелне померености и нагнутости осе у функцији угла ротације α приказане у матричном облику, добијају се заменом вредности из једначине (12) у једначину (7):

$$\begin{bmatrix} x_{P(i,k)}^{(\alpha)} \\ y_{P(i,k)}^{(\alpha)} \\ z_{P(i,k)}^{(\alpha)} \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos(\alpha) & \sin(\alpha) & 0 & \frac{f}{2\pi}\alpha \\ -\sin(\alpha) & \cos(\alpha) & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & \rho \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \cos(\phi) & -\sin(\phi) & 0 & 0 \\ \sin(\phi) & \cos(\phi) & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

$$\begin{bmatrix} \cos(\tau) & 0 & -\sin(\tau) & L \cdot \sin(\tau) \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ \sin(\tau) & 0 & \cos(\tau) & L \cdot [1 - \cos(\tau)] \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \cos(\lambda) & -\sin(\lambda) & 0 & 0 \\ \sin(\lambda) & \cos(\lambda) & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

$$\begin{bmatrix} R \cdot \cos \left[\left(L - \frac{(L - z_i)}{\cos(\tau)} \right) \frac{\tan(\omega)}{R} + (k - 1) \frac{2\pi}{N_t} \right] \\ R \cdot \sin \left[\left(L - \frac{(L - z_i)}{\cos(\tau)} \right) \frac{\tan(\omega)}{R} + (k - 1) \frac{2\pi}{N_t} \right] \\ L - \frac{(L - z_i)}{\cos(\tau)} \\ 1 \end{bmatrix} \tag{13}$$



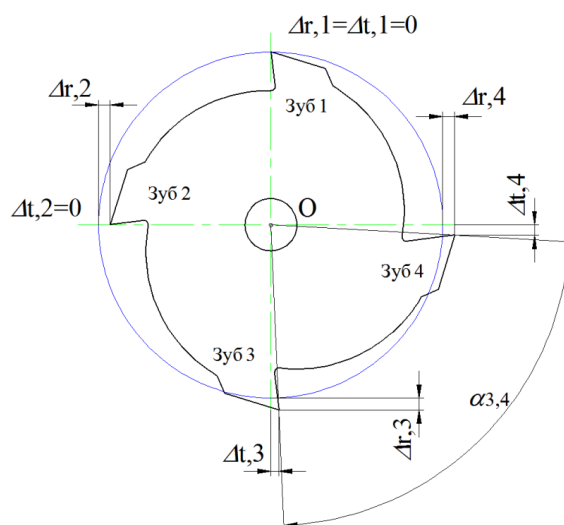
Слика 8.8. Површинска топографија глодане површине [249]

8.2.4 Модел који узима у обзир радијално одступање зуба глодала

Основни узрок одступања мера зуба глодала је његова израда. Као и код сваког другог машинског елемента и мере зуба глодала се при конструисању задају у одређеним толеранцијама и без обзира на чињеницу да те толеранције могу бити веома уске, може се десити да при глодању са малим корацима поједини зуби глодала уопште не врше резање. Исто важи и за преоштравана глодала. Без обзира да ли је до грешке дошло услед лошег постављања глодала или услед израде (односно оштрења), ако нпр. два зуба уопште не режу, зуб који долази после њих обрадиће троструко већу количину материјала него што је требало, па ће тиме и отпори на том зубу бити далеко већи од очекиваних, процес хабања интензивнији, а квалитет обрађене површине лошији и са већом хрпавошћу [254].

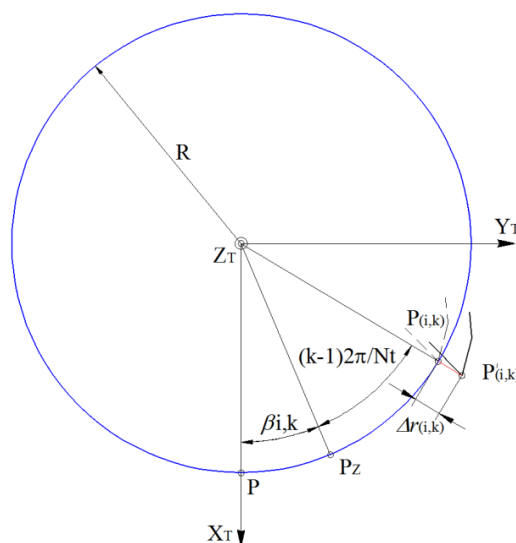
Одступања мера сечива глодала се могу свести на три основна (слика 8.9): радијанло ($\Delta_{r,i}$), тангенцијално ($\Delta_{t,i}$) и аксијално ($\Delta_{a,i}$) одступање, ($i \in 1, \dots, N_k$), која формирају одговарајућа угаона одступања ($\Delta\alpha_{k,k-1} = (k-1)2\pi / N_t - \alpha_{k-1,k}$).

На слици 8.9 приказан је поглед одоздо на глодало са 4 зуба. Хипотетички су одабрана одступања мера глодала. Тако да зуб 1 нема одступања, зуб 2 садржи само радијално одступање, док зуб 3 и зуб 4 садрже и радијално и тангенцијално одступање. Наведена одступања изазивају смањење или повећање угла α који, код идеалног глодала, код глодала са 4 зуба, износи 90° . Аксијално одступање мера зуба (одступање дуж осе глодала) није приказано на слици али се може претпоставити. Ако зуби немају подједнаку елевацију, тј. издигнутост у односу на неку референтну хоризонталну раван, или тачније, одређени зуби не леже у хоризонталној равни и неједнако су удаљени од њих, код њих је присутно аксијално одступање мера.



Слика 8.9. Пример одступања мера глодала са 4 зуба [254]

Иако је јасно да њихов утицај постоји, овде се занемарује утицај тангенцијалног и аксијалног одступања јер се претпоставља да, за разлику од радијалног, немају знатан утицај на топографију глодане површине код обимног глодања.



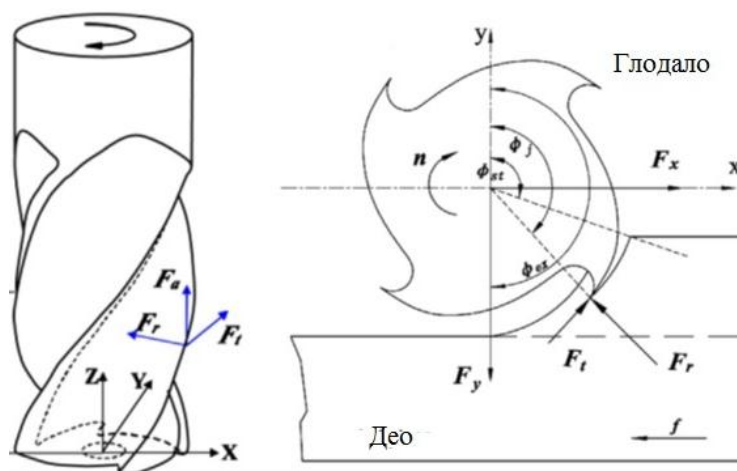
Слика 8.10. Радијално одступање тачке $P_{(i,k)}$

Утицај радијалног одступања зуба на генерисање глодане површине добија се једноставним додавањем њихових вредности у једначину (13). Додавањем радијалног одступања $\pm \Delta r(i,k)$, тачка $P(i,k)$ прелази у положај $P'(i,k)$ (слика 8.10). Важно је напоменути да су при наведеном поступку усвојене неке претпоставке због јасно занемарљивих разлика и лакшег рачуна, па је: $\pm \Delta r(i,k) = \pm \Delta' r(i,k)$. Такође је занемарена промена полупречника глодала услед радијалног одступања по висини z_i . Тако добијамо матрицу координата одступања тачке на резној ивици зуба глодала $P^{\alpha}_{\Delta(i,k)}$ која узима у обзир одступање услед стежања глодала у стезну главу и радијалног одступања зуба:

$$\begin{bmatrix} x_{P\Delta(i,k)}^{(\alpha)} \\ y_{P\Delta(i,k)}^{(\alpha)} \\ z_{P\Delta(i,k)}^{(\alpha)} \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos(\alpha) & \sin(\alpha) & 0 & \frac{f}{2\pi}\alpha \\ -\sin(\alpha) & \cos(\alpha) & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & \rho \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \cos(\phi) & -\sin(\phi) & 0 & 0 \\ \sin(\phi) & \cos(\phi) & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \\ \cdot \begin{bmatrix} \cos(\tau) & 0 & -\sin(\tau) & L \cdot \sin(\tau) \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ \sin(\tau) & 0 & \cos(\tau) & L \cdot [1 - \cos(\tau)] \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \cos(\lambda) & -\sin(\lambda) & 0 & 0 \\ \sin(\lambda) & \cos(\lambda) & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \\ \cdot \begin{bmatrix} (R \pm \Delta r_{(i,k)}) \cdot \cos \left[\left(L - \frac{(L - z_i)}{\cos(\tau)} \right) \frac{\tan(\omega)}{R} + (k-1) \frac{2\pi}{N_t} \right] \\ (R \pm \Delta r_{(i,k)}) \cdot \sin \left[\left(L - \frac{(L - z_i)}{\cos(\tau)} \right) \frac{\tan(\omega)}{R} + (k-1) \frac{2\pi}{N_t} \right] \\ L - \frac{(L - z_i)}{\cos(\tau)} \\ 1 \end{bmatrix} \quad (14)$$

8.3 Моделирање отпора резања

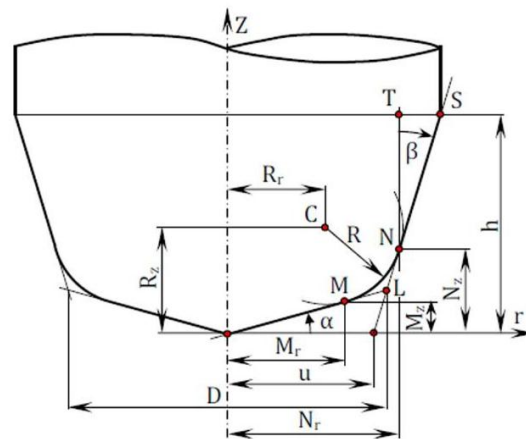
Отпор резања, који се јавља као последица продирања сечива зуба глодала у материјал обрађиваног дела, разлаже се на три компоненте: аксијалну (F_a), радијалну (F_r) и тангенцијалну (F_t) (слика 8.11).



Слика 8.11. Положај компоненти отпора резања

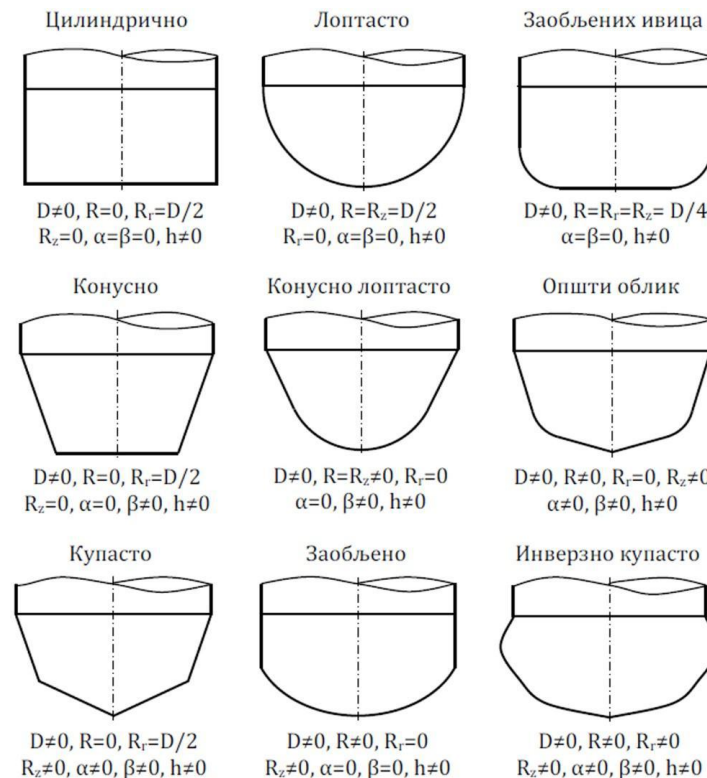
Општи модел сила резања се заснива на општем облику глодала дефинисаном према [255] на начин приказан на слици 8.12.

Према овом моделу, обвојница сваког глодала дефинисана је са 7 параметара: $CUTTER/D, R, R_r, R_z, a, b, h$ (слика 8.12). За различите вредности ових параметара добијају се скоро сви облици глодала који се користе у металопрерађивачкој пракси. На слици 8.13 приказани су карактеристични облици врха вретенастог глодала: цилиндрично, лоптасто, глодало заобљених ивица, конусно, конусно лоптасто, купасто, заобљено, инверзно купасто и општи облик, као и вредности параметара облика.



Слика 8.12. Општи модел глодала [255]

Силе резања се моделирају на различите начине, у функцији од дебљине резног слоја $h_j(t)$, ширине резања (аксијалне дубине резања) b и положаја сечива алата (зуба глодала) у захвату (табела 8.1): $F=F(b, h_j(t), \Phi_j(t))$.



Слика 8.13. Облици вретенастог глодала [255]

Табела 8.1. Модели отпора резања

Линеарна зависност	Експоненцијална зависност	Комбинација линеарне и експоненцијалне зависности
$F_{\eta_j} = a_p (K_{rc} h_j(t) + K_{re}) g_j(\phi_j(t))$	$F_{\eta_j} = g_j(\phi_j(t)) K_{rc} a_p h_j(t)^{x_f}$	$F_{\eta_j} = a_p (K_{rc} h_j(t)^{x_f} + K_{re}) g_j(\phi_j(t))$
$F_{\eta_j} = a_p (K_{rc} h_j(t) + K_{re}) g_j(\phi_j(t))$	$F_{\eta_j} = g_j(\phi_j(t)) K_{re} a_p h_j(t)^{x_f}$	$F_{\eta_j} = a_p (K_{rc} h_j(t)^{x_f} + K_{re}) g_j(\phi_j(t))$

У моделима сила резања $g_j(\phi_j(t))$ је функција која описује да ли је j -о сечиво глодала у захвату или није, $\phi_j(t)$ је угао који j -о сечиво заклапа са правцем нормалним на правац кретања алата, а K_{tc} , K_{te} , K_{rc} и K_{re} су параметри који зависе од комбинације алата и врсте материјала обратка и експериментално се одређују.

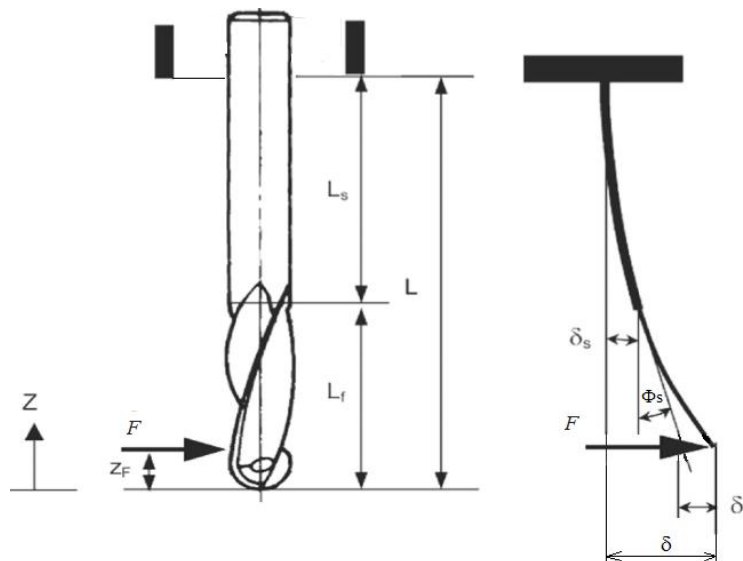
8.4 Угиб глодала

Захваљујући облику, односно свом слободном крају на коме се налазе резне ивице зуба, вретенасто глодало се може посматрати као конзола оптерећена на свом слободном крају, док је други крај круто стегнут у држач алата. Као такво, глодало је непрекидно изложено дејству сила резања, од којих, радијална сила резања изазива савијање односно угиб глодала. Угиб глодала зависи од параметара обраде и директно утиче на тачност, облик и квалитет генерисане површине. Угиб се не може узети у обзир класичном оптимизацијом путање алата нити уобичајеним методама регенерисања CNC кода. С друге стране, постојеће софтверске апликације не садрже интегрисане, довољно тачне алгоритме за одређивање утицаја угиба.

Угиб вретенастог глодала дефинисан је преко израза [5]:

$$\delta = \frac{F}{E \cdot I} \left[(z - z_F)^3 - (L - z)^3 + 3(L - z)^2(L - z_F) \right]$$

Где је $F = \sqrt{F_t^2 + F_r^2}$ - активни отпор резања; I - момент инерције глодала; E - Young-ов модул; L - препуст глодала; z_F - центар дејства силе мерен по висини осе глодала; и z - положај места (по осе глодала) за који се мери угиб.



Слика 8.14. Модел угиба вретенастог глодала [256]

Наведени модел угиба је унапређен (слика 8.14). Као такав представља типичан статички модел греде који узима у обзир различите пресеке алата дуж осе. Активни отпор резања се простире у (X, Y) равни нормално на осу глодала. Иако и вертикална компонента силе резања (F_a) такође делује на глодало, аксијални угиб се обично игнорише јер је крутост релативно висока у аксијалном правцу. Модел угиба алата је сада дат изразом [24]:

$$\delta = \frac{F}{E \cdot I} \left[-(L - L_f)^3 + 3(L - L_f)^2(L - z_F) \right] + \frac{F}{E \cdot I_f} \left[(z_F - z)^3 - (L_f - z)^3 + 3(L_f - z)^2(L_f - z_F) \right] \\ + \frac{F}{E \cdot I} \left[-(L - L_f)^2 + 3(L - L_f)(L - z_F) \right] (L - z_F)$$

где је: I_f – момент инерције резног дела глодала; L_F – препуст резног дела глодала.

Поглавље 9

CNC ПРОГРАМИРАЊЕ И РЕГЕНЕРИСАЊЕ NC КОДА

Упркос убрзаном развоју *CNC* машина, *NC* програмирања, *CAM* софтвера, технологије резног алата и технологије машине алатке код глодања вретенастим глодалом још увек зависе у великој мери од обима знања производног особља. Обрада глодањем вретенастим глодалом представља сложен процес у смислу планирања процеса, првенствено из разлога компликоване геометрије, развоја нових материјала и високих захтева обрађеног дела. Тако је пуни потенцијал система машине алатке од користи у многим случајевима. Иако *CAD/CAM* системи могу да генеришу *CNC* програме на основу геометрије дела, они не помажу програмерима у избору одговарајућих режима резања и других параметара процеса.

CNC програм садржи информације које управљачка јединица машине алатке „може да разуме“ и да их у одговарајућим фазама обраде саопштава машини, тј. њеним извршним и другим органима. Информације садржане у програму се односе на потребна кретања (главно и помоћна), укључивање и искључивање извршних органа машине, почетак и заустављање програма, аутоматску измену резног алата итд.

9.1 Принципи *NC* програмирања

NC програм обухвата две основне групе података:

- геометријске информације - податке о координатама оних правих и кривих линија које пресликавају трајекторију релативног кретања алата и обратка дела у процесу његове обраде и
- технолошке информације - податке о бројевима обртаја алата или обратка, кораку и дубини резања, врсти и ознаци алата којим се изводе пројектоване операције и захвати итд.

За извођење сваког захвата на машини, програм садржи ограничен део информација који се назива реченица. Реченица се састоји од речи, а свака реч садржи неку основну

информацију, на пример, о координатама (диманзијама обратка), о броју обртаја радног вретена машине, о кораку и тако даље. Свака реченица мора унапред садржавати назначену информацију о редоследу, чиме је програмом дефинисан редослед извршавања појединих захвата обраде.

Управљачке јединице *CNC* машина алатки су конципиране и развијене тако да програмске информације и инструкције прихватају само у кодираном облику, тј. само ако су написане у одговарајућем коду. Група или скуп правила и принципа за писање и приказивање података, те њихова трансформација из једног у други облик назива се кодирање. Информације се при кодирању задају у алфа - нумеричком облику (слова, бројеви и симболи) и по утврђеним правилима и редоследу. Развијено је више система кодирања, али се углавном користе ISO и EIA систем кодирања.

Управљачки системи развијени су тако да аутоматски препознају систем кодирања информација, систем мерних јединица и слично. ISO систем кодирања садржи 50 симбола преко којих је могуће кодирати све информације потребне за програмирање обраде свих могућих типова обрадака, како по облику и димензијама, тако и по захтевима у погледу тачности.

Структура програма за NC машину алатку састоји се из три главна дела:

- ознаке за почетак програма,
- низа реченица којима се описује ток извођења програма и
- ознаке за крај програма.

Знак за почетак програма је % и мора бити написан испред прве реченице програма. Иза ознаке за почетак програма следи низ програмских реченица. Свака програмска реченица обухвата све неопходне информације на основу којих управљачка јединица управља једним дефинисаним покретом или радним ходом машине. Програмска реченица састоји се од програмских речи, при чему свака реч обухвата једну, програмом изводљиву геометријску или технолошку информацију. Речи се у оквиру сваке програмске реченице исписују по утврђеном редоследу. Најшири, општи облик програмске реченице, са редоследом програмских речи приказан је на слици 9.1.



Слика 9.1. Структура програмске реченице

Основне ознаке и специјални знаци за програмске речи према DIN 66025:

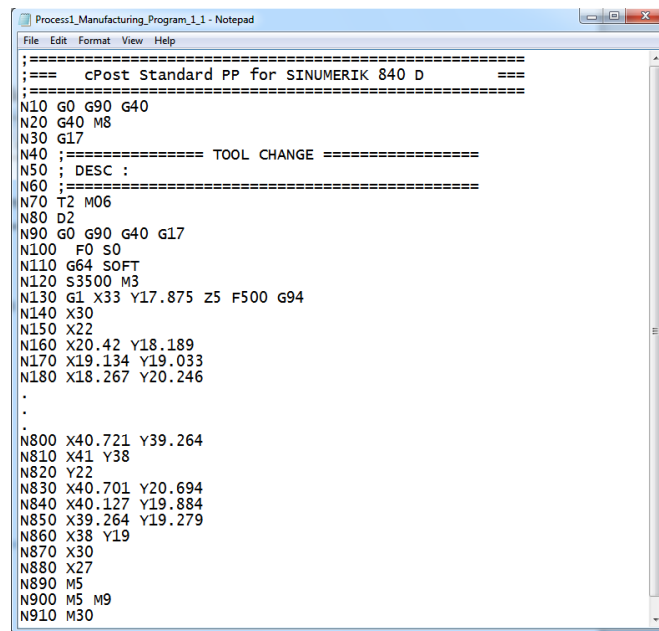
- A, B, C – обртање око X, Y и Z осе,
- D – меморија за коректуру алата,
- E – други корак - корак (помоћно кретање),
- F – корак (помоћно кретање),
- G – услови пута (функција кретања, начин извођења помоћног кретања),
- H – слободна адреса (помоћна функција),
- I, J, K – параметар интерполације или корак навоја паралелно X, Y и Z осе,
- L – слободна адреса,
- M – машинске функције,
- N – ознака програмске реченице,
- O – слободна адреса,
- P, Q, R – треће кретање паралелно X, Y и Z осе,
- S – број обртаја радног вретена,
- T – број (адреса) резног алата,

U, V, W – друго кретање паралелно X, Y и Z осе,
 X, Y, Z – кретање у правцу X, Y и Z осе,
 % – почетак програма (такође, безуслован стоп враћања програма) и
 () – почетак и крај напомене.

Наредбе за услове пута, састављене од слова G и бројчане ознаке, су:

G01 – заустављање у полазној тачки, брзо кретање у празном ходу,
 G01, G02, G03, G06 – интерполација (линеарна, кружна, параболична),
 G 04 – заустављање програма, време паузе у дефинисаном времену,
 G 08, G 09 – повећање и смањење брзине,
 G17, G18, G19 – избор равни XY, XZ и YZ,
 G 20 до G 24 – слободне речи,
 G 33, G 34, G 35, G 63 – израда навоја,
 G 40 до G 44 – корекције алата,
 G 53 до G 59 – помоћно кретање,
 G 71 – дужинске мере у милиметрима,
 G 90, G 91 – димензије у апсолутном/инкременталном систему,
 G 94, G 95 – корак у мм/мин, mm/o,
 G 96 G 97 – укљ/искљ константне брзине резања,
 G 97 – број обртаја вретена, о/мин,
 G 80 до G 89 – радни (типски) циклус и друге.

На слици 9.2 приказан је пример кода добијеног у CAD/CAM софтверу CATIA приликом експерименталних истраживања.



```

Process1_Manufacturing_Program_1_1 - Notepad
File Edit Format View Help
=====
;=== cPost Standard PP for SINUMERIK 840 D ===
=====
N10 G0 G90 G40
N20 G40 M8
N30 G17
N40 ;===== TOOL CHANGE =====
N50 ; DESC :
N60 ;=====
N70 T2 M06
N80 D2
N90 G0 G90 G40 G17
N100 F0 S0
N110 G64 SOFT
N120 S3500 M3
N130 G1 X33 Y17.875 Z5 F500 G94
N140 X30
N150 X22
N160 X20.42 Y18.189
N170 X19.134 Y19.033
N180 X18.267 Y20.246
.
.
.
N800 X40.721 Y39.264
N810 X41 Y38
N820 Y22
N830 X40.701 Y20.694
N840 X40.127 Y19.884
N850 X39.264 Y19.279
N860 X38 Y19
N870 X30
N880 X27
N890 M5
N900 M5 M9
N910 M30

```

Слика 9.2. NC код добијен у софтверу CATIA

Радне, машинске функције, задају се преко M кода. Машинске функције не зависе само од машине алатке већ и од управљачке јединице и могу бити програмиране као помоћне и додатне функције. Управљачка јединица је погоднија за аутоматизацију процеса обраде уколико је већи број машинских функција које се могу вршити помоћу управљачке јединице. Неке од машинских функција су: укључивање и позиционирање радног вретена и регулација броја обртаја, стезање алата, одржавање помоћног кретања константним, укључивање средства за хлађење, управљање мерним уређајима и

уређајима за измену обратка, за додавање комада, сортирање, транспорт струготине и сл.

Приликом програмирања *CNC* машина неопходно је унапред познавати референтне тачке које дефинишу положај резног алата, радног стола машине и дела у радном простору машине.

Програмирање се може обављати ручно и помоћу рачунара.

Ручно програмирање подразумева исписивање програма од стране оператера ручно, ред по ред програма, према дефинисаним правилима.

Код програмирања помоћу рачунара, програмирање се врши аутоматским путем, на основу дефинисаних параметара процеса и на основу геометрије *CAD* модела. Технолошки параметри задају се преко софтверских дијалога, док се избор алата врши из постојећих база података алата или се кориснички дефинишу. Неки од доступних *CAM* софтвера су: *AutoDESK INVENTOR*, *ProENGINEER*, *SolidWORKS*, *MasterCAM*, *CATIA*, *VisualMILL*, *EdgeCAM*, *FeatureCAM*, *SurfCAM* и сл.

Процес програмирања *CNC* машина подразумева израду документације која садржи следеће:

- листу операција са редоследом операција, параметрима резања и временом израде,
- план коришћених алата према редоследу коришћења и потребним корекцијама,
- план стезања који дефинише габарите радног простора, положај дела на машини, тачке ослањања дела на радном столу машине и место стезања, нулте тачке и сл,
- план обраде са јасно видљивим путањама врха алата за сваку операцију и
- програм са наредбама за управљање машином.

9.2 *CAM* системи

Након пројектовања модела делова и склопова конструкције, приступа се њиховој изради на машини алатки. Машина алатка захтева унос адекватних података (програм) у електронској форми. Процес трансформације дела из апстрактне (електронске) форме у физичку, добијену обрадом на машини алатки, захтева програмски система за рачунаром подржану производњу - *CAM* систем.

CAM системи врше планирање производно - технолошких процеса. У основне функције *CAM* система спадају: генерисање припремка, креирање нове и/или коришћење постојеће базе података параметара обраде и алата, генерисање *NC* програма и генерисање производне документације.

У оквиру генерисања *NC* (кода) програма врши се генерисање и оптимизација путања алата, мерење времена обраде, као и симулација обраде.

Корисник *CAM* система креира *3D* модел припремка и уноси га у *CAM* систем и аутоматски генерише припремак или, ако је део једноставније геометрије, корисник може системски дефинисати припремак уз директну интервенцију на његовој геометрији.

Након креирања припремка, могуће је увести и *3D* модел израдка (готовог дела), и уравнати са припремком дела. *CAM* системи поседују могућност накнадне провере путање алата и њихове евентуалне корекције и регенерације. Провере путање алата се углавном спроводе код делова сложене геометрије и са ограниченим путањама

алата услед конфигурације не само дела, већ и услед конфигурације делова машине, стезног прибора и околине, у циљу избегавања колизије.

CAM системи садрже базе података и дигиталне каталоге алата, прибора, параметара обраде и других елемената производног процеса. Постојање базе података и њено ажурирање новим подацима о обради од виталног је значаја за брзо и ефикасно моделирање и симулацију производње.

На основу производно-технолошких параметара обраде, геометрије производа и геометрије алата, *CAM* систем израчунава време израде. Поред главног времена обраде, систем поседује могућност израчунавања и припремног, помоћног и завршног времена.

CAM системи генеришу производну документацију у електронском облику погодном за размену између различитих система који учествују у развоју дела.

9.2.1 Генерисање *NC* кода применом софтвера *FeatureCAM*

FeatureCAM представља напредни софтверски алат заснован на елементу (*feature-based*) и знању (*knowledge-based*) који омогућава програмирање машина алатки у кратком временском периоду.

Технологија заснована на знању даје *CAM* систем који комбинује аутоматизацију и контролу. Предност *FeatureCAM*-а, у односу на друге *CAM* системе је у томе да генерише путање алата на основу елемената дела, а затим аутоматски бира одговарајуће алате и аутоматски нуди параметре за грубу и фину (завршну) обраду, израчунавајући корак (помоћно кретање) и брзину резања помоћу уграђеног софтвера заснованог на знању. Такође омогућава једноставну промену параметара у складу са корисничким потребама.

Програм садржи модуле за *2.5D* и *3D* глодање на 3-осним и 5-осним машинама алаткама, модуле за аутоматско препознавање облика (*feature*) на *3D* моделима дела, модуле за обраду на ерозиматима и др.

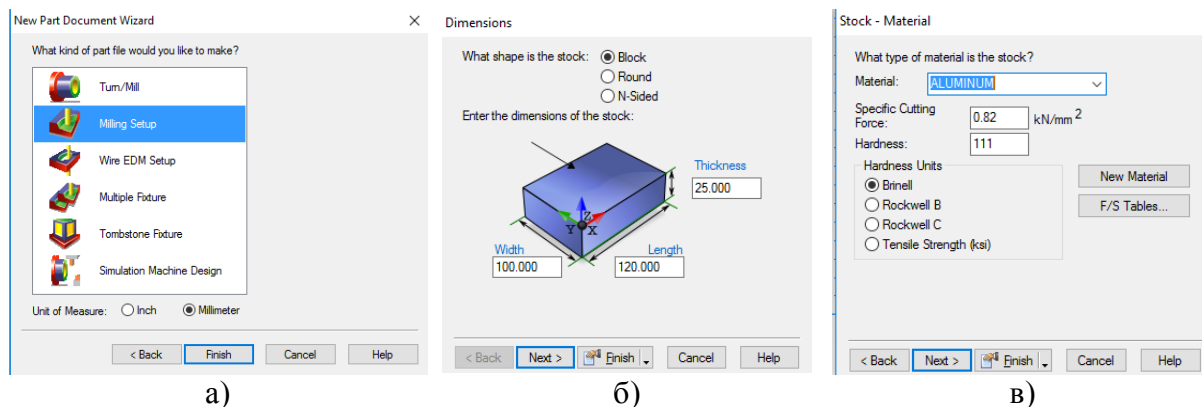
Програм подржава увоз великог броја стандардних *CAD* формата дела (*iges*, *step*, *stl*), као и формате датотека комерцијалних *CAD* софтвера као што су *CATIA* (*catpart*), *ProENGINEER* (*part*), *SolidWORKS* (*sldprt*, *sldasm*), *AutoCAD* (*dwg*, *dxf*), *AutoDESK Inventor* (*ipt*, *iam*) и сл.

NC код, чије је генерисање приказано у наставку, коришћен је током већег дела експерименталног истраживања (потпоглавље 10.2).

9.2.1.1 Креирање припремка дела за обраду

Генерисање *NC* кода започиње избором између опција креирања нове датотеке или увозом постојеће датотеке. При креирању нове датотеке, помоћу „чаробњака“ бирају се модул обраде и мерне јединице (*inch* или *mm*) (слика 9.3-а). Креирање новог припремка дела (*stock*) врши се у следећем кораку (слика 9.3-б).

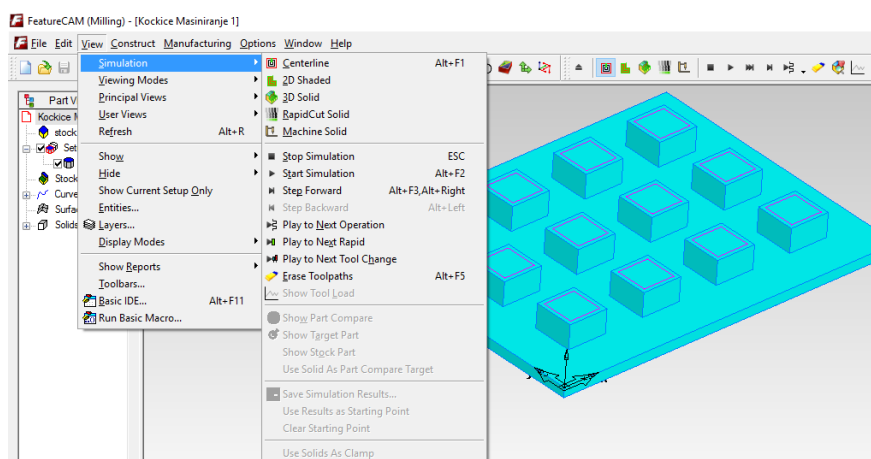
Чаробњак, који у неколико корака врши креирање припремка дела, нуди избор припремка призматичног, цилиндричног или облика вишестране призме (*Block*, *Round* или *N-Sided*), преко поља за унос димензија. У следећем кораку (слика 9.3-в) бира се материјал из базе података програма или се кориснички дефинише. База садржи и податке о механичким карактеристикама материјала. Даље се бира тип позиционирања, даје назив операцији (*Setup*) и дефинише координатни систем припремка дела. На крају се креира фасцикла за смештај снимљених датотека.



Слика 9.3. Избор модула обраде, димензија и материјала припремка

Након креирања *CAD* модела припремка или бирања постојећег, припремак се увози у програм. Дефинисање параметара обраде, алата, креирање додатних елемената, дефинисање приказа дела, симулације убрале и сл., врши се из главног менија програма.

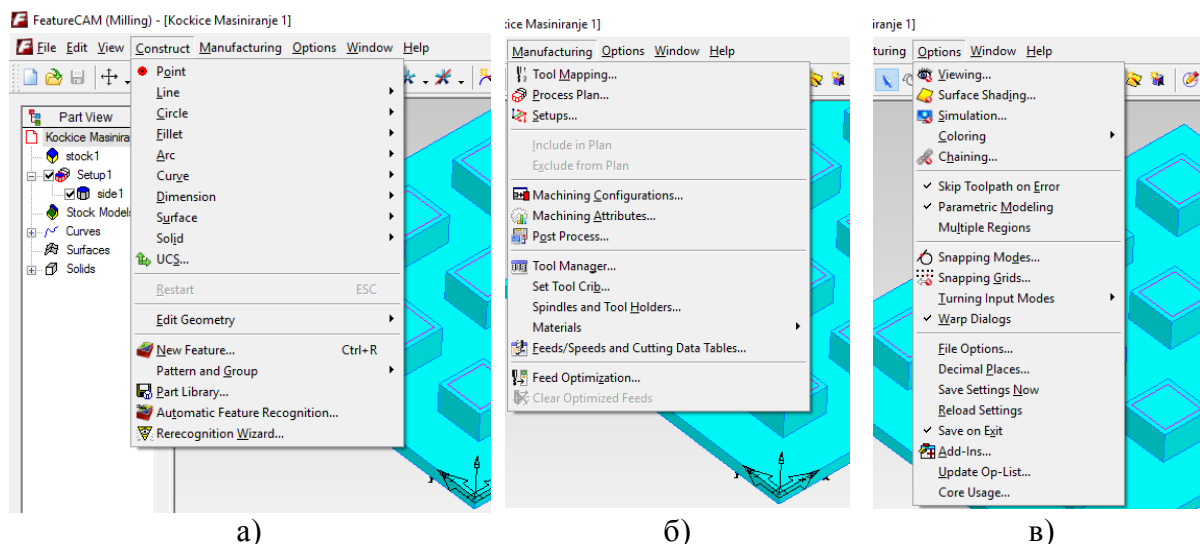
Програм *FeatureCAM* садржи (као и већина програма који раде на *Windows* платформама) мени са алатима за рад са датотекама (*File*) и едитовање и селекцију (*Edit*). Падајући мени *View* (слика 9.4) садржи алате за приказ симулације (*simulation*), различите приказе модела (*Show, Hide, Display Modes*), као и приказе извештаја (*Show Reports*).



Слика 9.4. Приказ главног менија и подменија (*View*) са алатима за преглед и симулацију програма *FeatureCAM*

Падајући мени *Construct* (слика 9.5-а) садржи опције за креирање основних *2D* геометријских елемената (тачке, линије, круга, лукова, кривих линија, као и креирање *3D* површина (*Surface*) и чврстих тела (*Solid*), извлачењем, обртањем, извлачењем по линији итд. Овде се налазе и алати за котирање (*Dimension*), измену геометрије (*Edit*), копирање облика по одређеним шаблонима (*Patern and Group*), аутоматско препознавање облика (*Automatic Feature Recognition*) и сл.

Подешавања везана за листу процеса и њене измене (*Process Plan*), палету алата (*Tool Manager*), палету држача алата (*Spindlers and Toolholders*), подешавање машине (*Machining Configuration*) и избор пост-процесора (*Post Process*), измене везане за материјал, брзину резања и корак (*Feeds/Speeds*) налазе се у падајућем менију *Manufacturing* (слика 9.5-б).



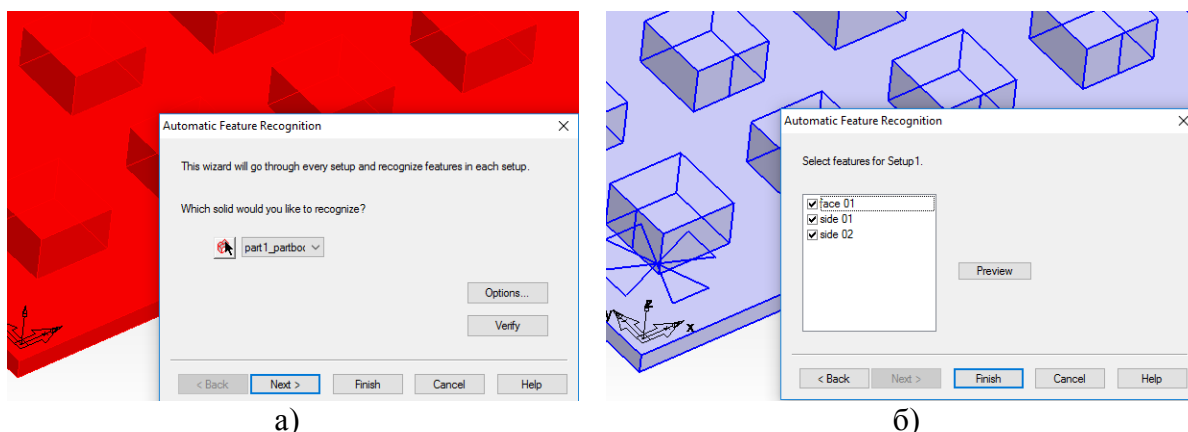
Слика 9.5. Команде подменија *Construct*, *Manufacturing* и *Options*

Падајући мени *Options* (слика 9.5-в) садржи подешавања око изгледа модела (видљивости линија, углова и сл.), подешавање тастера на мишу (*Viewing*), подешавања сенке и светлости на моделу у зависности од дубине и начина сечења (*Surface Shading*), подешавања у вези симулације процеса (*Simulation*), подешавање боје модела (*Coloring*), избор приказа спојева на моделима и на мрежи (*Snapping Models and Grids*), могућности чувања датотека (*Save Settings Now*), учитавања подешавања (*Reload*), приказ искоришћености процесора рачунара (*Core Usage*), опције и особине тренутног фајла (*File Options*) и сл.

Команде у менију *Window* чине алати за манипулацију прозорима, док мени *Help* садржи команде за помоћ, корисне туторијеле и везу са интернет сервисом произвођача софтвера *FeatureCAM*.

9.2.1.2 Програмирање обраде аутоматским избором параметара обраде

Као што је раније речено, *FeatureCAM* нуди алат за аутоматски избор (оптималних) параметара обраде и алата на основу изабраних елемената (*features*) дела који се обрађују и материјала дела.

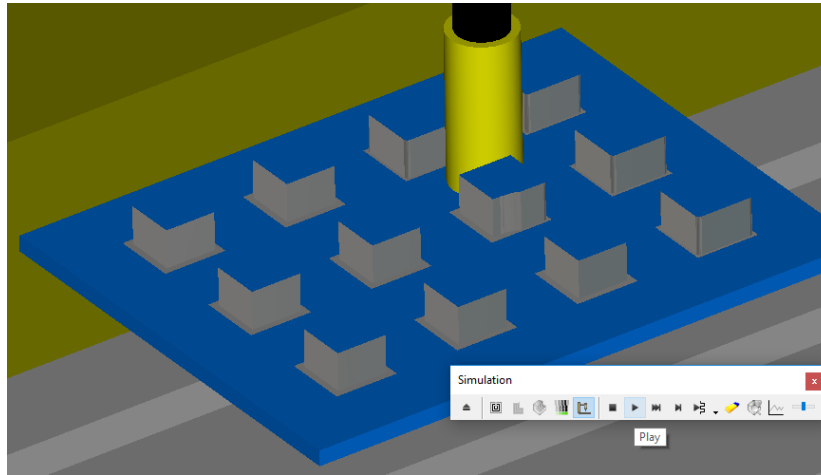


Слика 9.6. Избор карактеристичних елемената дела аутоматским избором параметара обраде

Automatic Feature Recognition (AFR) прво снима и препознаје карактеристичне елементе на делу (слика 9.6-а) и нуди могућност избора жељеног елемента (слика

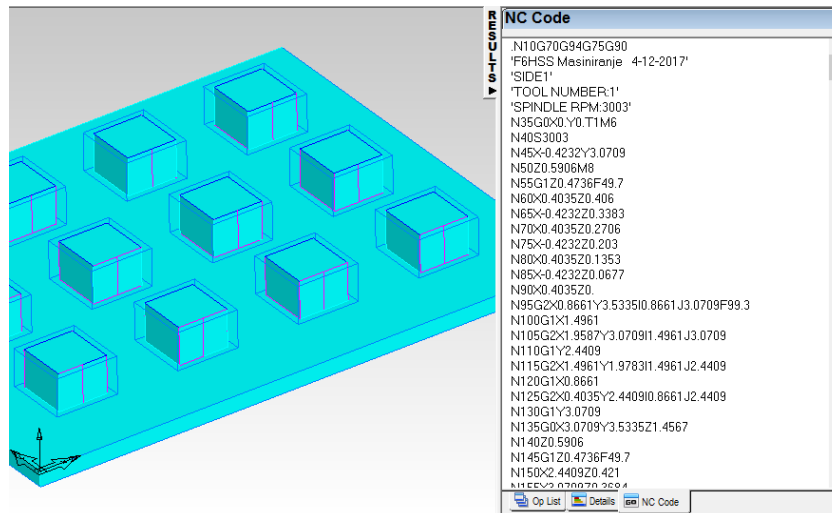
9.6-б), а потом извршава доделу параметара обраде и геометрију резног алата. *AFR* задаје груби и фини пролаз уз параметре обраде и одговарајући алат.

Након избора елемената потребно је извршити симулацију обраде (слика 9.7), како би програм у следећем кораку могао да генерише *NC* код.



Слика 9.7. Симулација обраде у програму *FeatureCAM*

Са десне стране графичког прозора може се приметити искачући прозор *RESULTS* у коме се током рада бележе информације о обради. Оквир садржи три картице (у доњем делу прозора), картицу листе операција (*Op List*), детаља операција (*Details*) и добијеног програмског кода (*NC Code*) (слика 9.8).

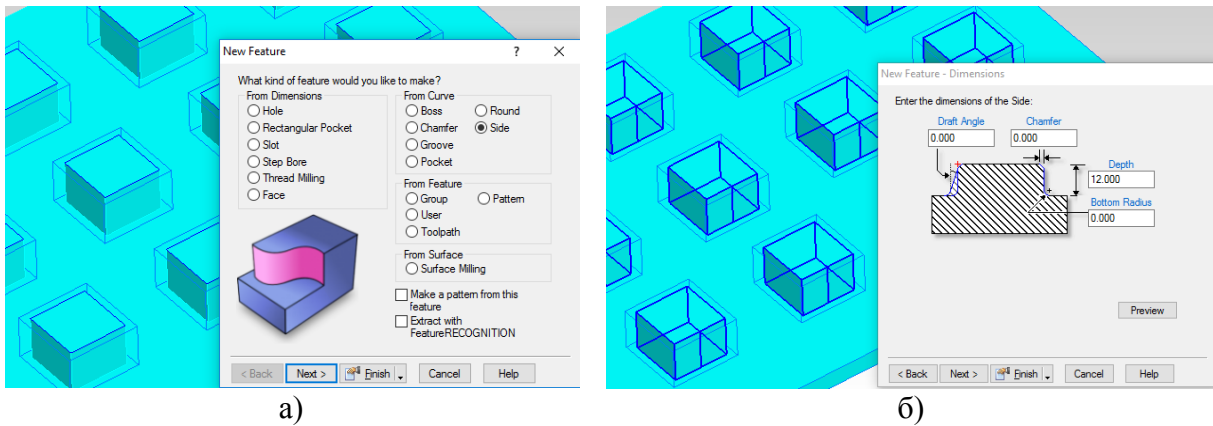


Слика 9.8. Прозор *RESULTS* са приказаним *NC* кодом обраде

9.2.1.3 Програмирање обраде корисничким уносом параметара обраде

Други начин програмирања обраде у програму *FeatureCAM* представља кориснички избор елемената, као и унос параметара обраде, геометрије алата, стратегије и материјала дела, избором команде *New Feature* из менија *Construct*.

На основу геометрије површина које се обрађује, прво је потребно изабрати тип елемента (*feature*) који се обрађује (слика 9.9-а). Затим се бира страна материјала који је потребно уклонити и уносе параметри дела елемента који је потребно отклонити (слика 9.9-б).

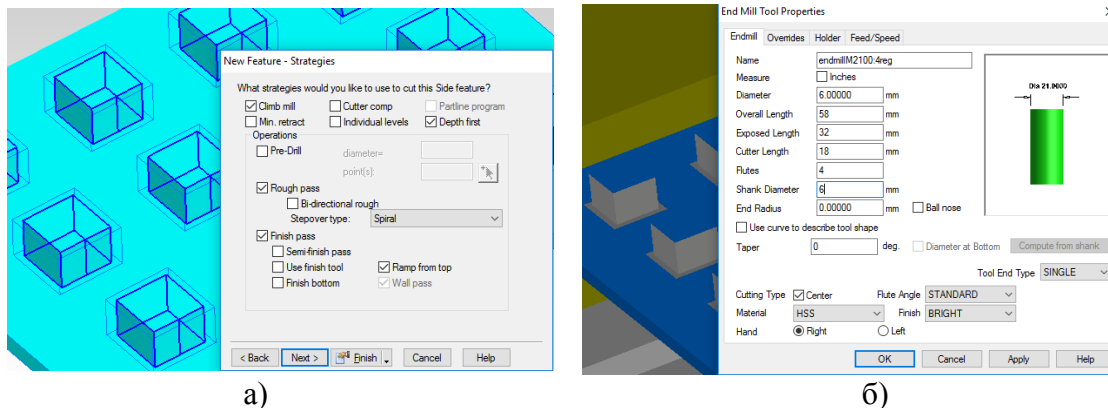


а)

б)

Слика 9.9. Избор елемента и геометрије уклоњеног материјала

У следећем кораку потребно је одредити стратегију (*strategies*) кретања алата у односу на део, истосмерно (*climb mill*) или супротносмерно глодање, као и потребан број захвата. Програм нуди грубу (*Rough*) и фину (*Finish*) обраду (слика 9.10-а). Систем нуди готове алате, али је исте могуће и кориснички дефинисати, задавањем геометрије и материјала алата (слика 9.10-б).

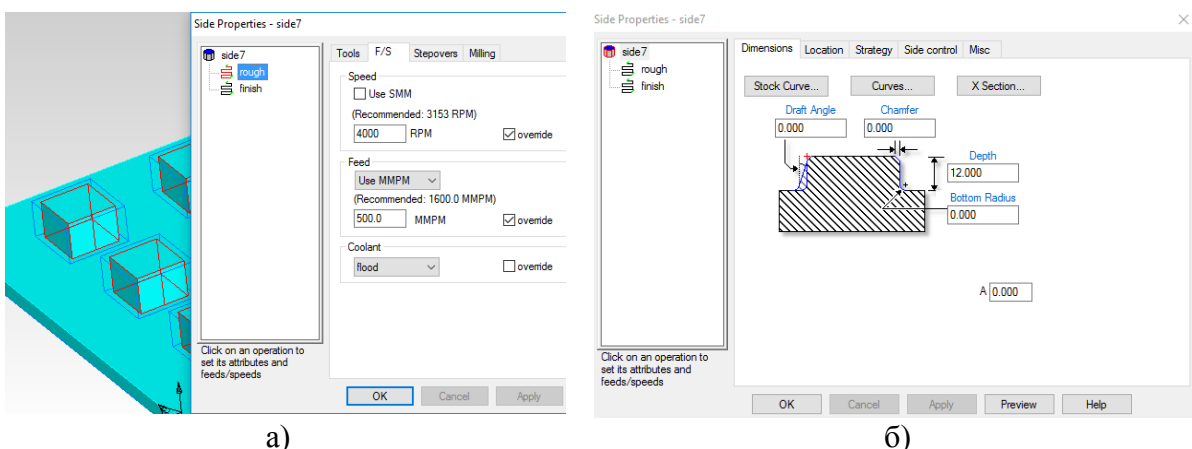


а)

б)

Слика 9.10. Избор стратегије обраде и дефинисање геометрије алата

Последњи корак представља унос вредности за брзину резања (*Speed*) и помоћно кретање (*Feed*), као и избор флуида за хлађење и подмазивање (*Coolant*) (слика 9.11-а). Након последњег корака, систем новим оквиром приказује сумиране параметре обраде, који се још увек могу променити (слика 9.11-б).



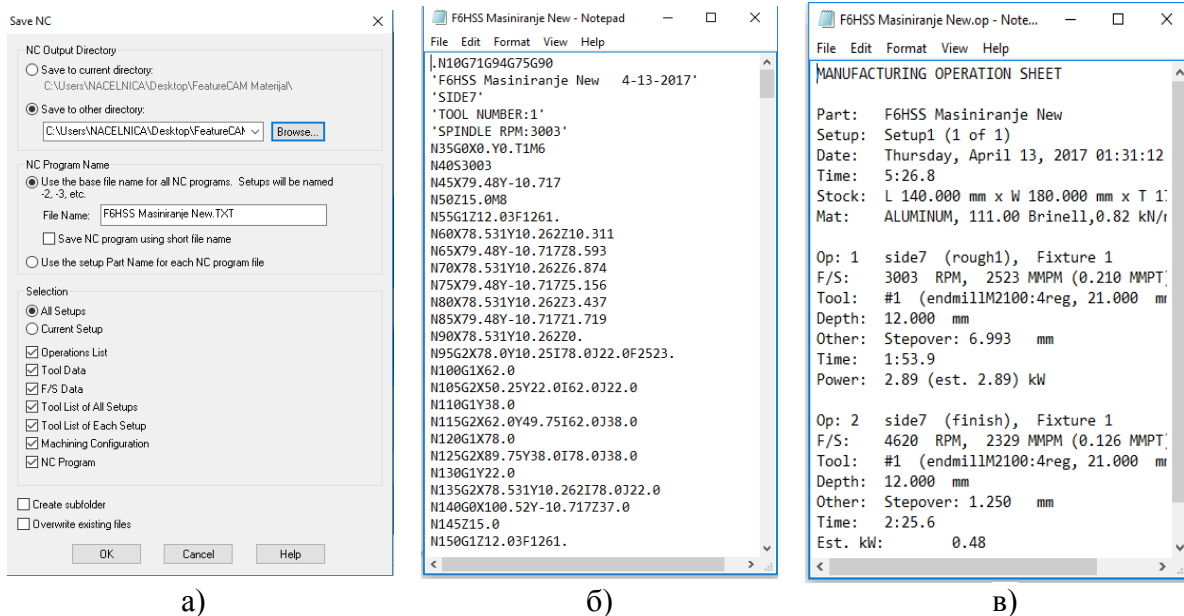
а)

б)

Слика 9.11. Избор брзине резања и корака и преглед изабраних параметара

Након дефинисања параметара и стратегије обраде, као и дефинисане геометрије алата, приступа се симулацији обраде.

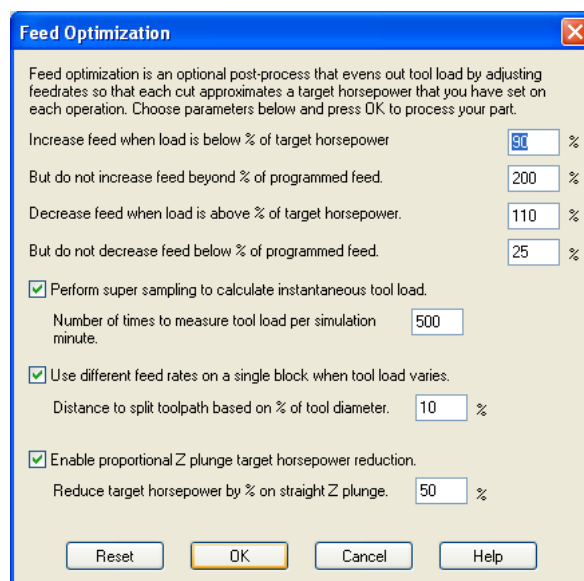
Током симулирања обраде, систем је генерисао *NC* код. Из оквира *Save NC* бирају се опције у вези снимања *NC* кода. Могуће је изабрати дестинацију датотеке, дати име датотеци и изабрати које све типове извештаја (формата датотеке) у вези обраде дела, креирати (слика 9.12-а). На овај начин извршено је генерисање *NC* код у *TXT* формату (слика 9.12-б), као и операционог листа обраде дела (слика 9.12-в).



Слика 9.12. Избор брзине резања и корака и преглед изабраних извештаја

Још једна од предности *FeatureCAM*-а, осим могућности аутоматског избора (оптимизованог) корака, броја обртаја, геометрије алата, јесте напредна (пост-процесорска) оптимизација корака. Оптимизација се обавља у циљу смањења оптерећења алата, мање површинске храпавности или искоришћења снаге машине алатке. На слици 9.13 приказан је оквир у коме се врши унос параметара оптимизације.

Путем пост-процесирања могуће је кориговати (офсетовати) путање алата и регенерисати *NC* код у циљу побољшања тачности обраде.



Слика 9.13. Прозор за избор параметра оптимизације корака

9.3 Компензација грешке корекцијом *NC* кода

У циљу побољшања тачности обраде и генерисања путање алата од кључног значаја је да грешка обраде буде минимална. Грешке/нетачности обраде услед нетачности машине могу да се смање структурним побољшање машине алатке путем пројектовања, производње делова и монтаже. Међутим, поступак ће резултирати веома високим производним трошком, нарочито када су захтеви тачности изван уобичајених оквира. У циљу економичног побољшања тачности машине алатке може се применити компензација грешке. Побољшање тачности машине алатке кроз компензацију грешке укључује предвиђање и компензацију резултујуће грешке обраде. Како обрадни систем не може да избегне грешке, уз континуиран мониторинг стања елемената процеса обраде, било каква генерисана грешка се може отклонити компензацијом [245].

Модели компензације грешке могу се наћи у истраживачким радовима [50-57]. Компензација се врши на основу величине грешака обраде које могу бити унапред дефинисане при пројектовању машине алатке [58] или се до њих може доћи мерењем након обраде [257]. Компензација се може односити на одабране грешке или укупну грешку. Типичан приступ за компензацију грешке укључује изградњу математичких модела узимајући у обзир податке од сензора постављених на машини алатки код система мерења на машини [258-262].

9.3.1 Компензација корекцијом путање алата

Квалитет обрађеног дела је уско везан за грешке обраде. Грешке обраде (о којима је било речи у поглављу 7) изазивају фактори као што су: стање алата, нулто подешавање и прецизно позиционирање алата и дела, термичка деформација машине алатке, геометријска нетачност машине алатке, хабање делава машине и резног алата, статичко деформисање компонената машине и многи други. Зато је важно развити методологије за идентификовање и компензацију таквих сметњи у циљу побољшања нивоа квалитета.

За мерење грешака обраде обично се примењују оптичке или контактне методе и циљу добијања листе тродимензионалних координата тачака (облака тачака) са површине дела.

Компензација путање алата се састоји из модификовања тачака путања алата и обично се изводи само за завршне обраде, у циљу смањења грешака обраде. На овај начин се могу компензовати сви типови нетачности под претпоставком да су поновљиви.

Модел за компензацију грешке обраде обично се базирају на *off-line* мерењу дела, а затим, на основу измереног одступања, врши се корекција путање.

9.3.2 Модел за компензацију путање алата применом мапе померања

У случају *off-line* корекције *NC* кода, процес обраде се прво извршава номиналном некомпензованом путањом алата. Затим се мере грешке обраде (помоћу *SMM* или неконтактним уређајем), генерише се компензована путања алата и примењује при обради каснијих делова.

Модификација путање алата се добија транслацијом контролних тачака за вредност у висини износа измерене грешке. Овде је коришћен модел за компензацију путање алата применом мапе померања, односно померања за вредност корекције путање [3]. Потребна корекција путање алата представља вредност трансляторног померања који координате путање алата помера из стварног положаја у жељени положај за сваки

захват засебно. Компензовани пролаз мора да компензује нетачност обрадка и угиб (савијање) алата/обрађиваног дела која се десила током претходног пролаза.

Скуп овако добијених вредности корекције путања за све пролазе представља мапу померања положаја алата у функцији координата. Дакле, мапа померања у функцији координата, може се добити мерењем израђеног дела или проценом нетачности положаја алата, применом високо прецизних оптичких метода попут ласерског интерферометра. Мапа померања се касније накнадно примењује за регенерисање завршног *NC* програма.

Компензација грешке обраде померањем путање алата применом мапе померања и регенерисањем *NC* кода приказана је на примеру обраде цилиндричних изданака (слика 9.14-а). Обрада је вршена са два пролаза, грубим и финим пролазом. Компензација је извршена у оба пролаза. Карактеристичне мере обрадка су почетне димензије X_1 и Y_1 , мере након првог пролаза X_2 и Y_2 , мере након другог (завршног) пролаза X_3 и Y_3 , као и дубина резања за први a_1 и други пролаз a_2 .

На слици 9.14-б приказана је скица обраде са очекиваним и стварним (измереним) путањама алата, као и компензоване путање које доводе до тачне мере за димензију у X правцу. Где су:

- a_{10} , a_{20} - задате (очекиване) дубине резања првог и другог пролаза,
- a_{1S} , a_{2S} - стварне (измерене) дубине резања првог и другог пролаза,
- Δa_{1S} , Δa_{2S} - одступања стварне путање од очекиване за први и други пролаз и
- v_1 , v_2 - корекције путање алата за први и други пролаз.

Првим пролазом (слика 9.14-б), уместо очекиване путање (пуна плава линија десно), добија се стварна путања (испрекидана црвена линија десно). Другим пролазом, уместо очекиване путање (пуне плаве линије лево), добиће се стварна путања (испрекидана црвена линија лево). Првом компензацијом (задавањем померања v_1) извршиће се корекција првог пролаза, чиме ће се стварна путања померити за вредност корекције путање v_1 (црвена испрекидана линија лево помериће се до прве испрекидане зелене линије лево). Другом компензацијом (задавањем померања v_2) извршиће се корекција другог пролаза, чиме ће се стварна путања померити за вредност корекције v_2 и довести у очекивану путању (средња испрекидана зелена линија помериће се лево до испрекидане зелене линије - жељене путање).

Параметри обраде (померања) се могу одредити на основу слике 9.14-б, па је:

$$X_2 = X_1 - 2 \cdot a_1$$

$$X_3 = X_2 - 2 \cdot a_2$$

$$\Delta a_1 = a_{10} - a_{1S}$$

$$\Delta a_2 = (a_{10} + a_{20}) - (a_{1S} + a_{2S})$$

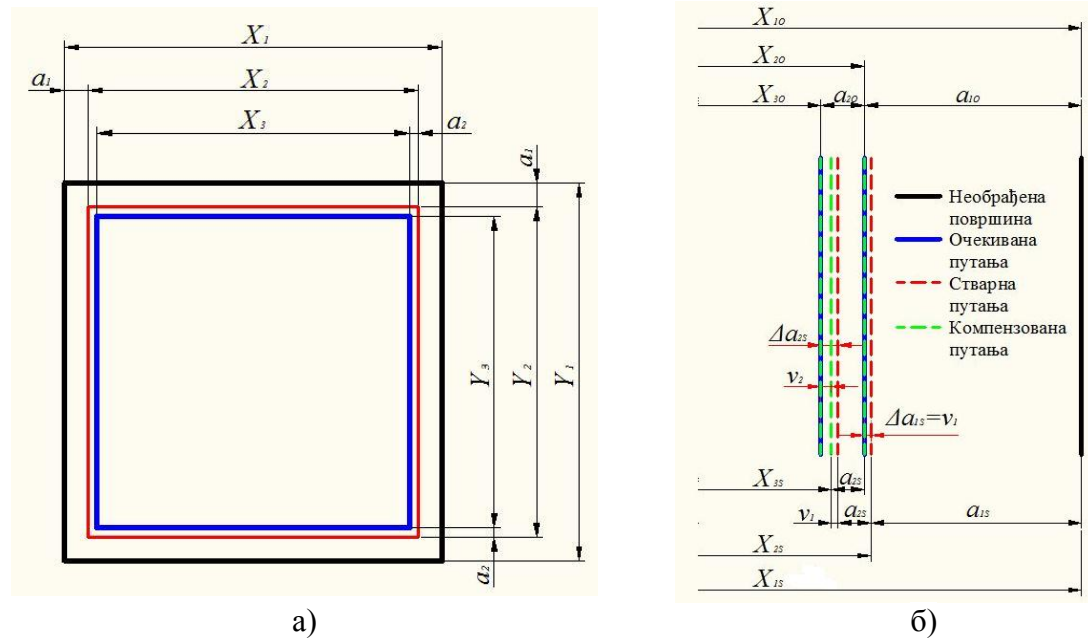
Вредности корекције путања се одрђују из једначина:

$$v_1 = a_{10} - a_{1S}$$

$$v_2 = a_{20} - a_{2S}$$

На основу очекиваних и добијених (стварних) дубина резања једноставно се долази до вредности корекције путање за сваки пролаз. Скуп овако добијених вредности корекција путање и параметара обраде даје мапу померања положаја алата за обраду свих изданака дела.

Вредности вектора померања се уносе у *NC* код и регенеришу путању алата. Унос корекција путање у *NC* коду може се извршити ручним кориговањем или уносом преко одговарајућег софтвера.



Слика 9.14. Скица обраде са очекиваним и стварним (измереним) путањама алата

Регенерисање *NC* кода применом мапе померања положаја алата примењено је у експерименталном делу.

9.4 Оптимизација технолошких параметара обраде

Процес оптимизације технолошких параметара обраде представља избор најповољнијих параметара обраде у циљу генерисања што квалитетније површине дела при испуњењу услова критеријума оптимизације (трошкови обраде, време обраде и др.). Технолошки параметри обраде, оптимизују се различитим математичким методама које врше селекцију оптималних технолошких параметара обраде, с обзиром на измерене параметре квалитета површине, не узимајући у обзир путању алата. Истраживачи су се фокусирали на улазне параметре процеса као што су брзина резања, корак и дубина резања и излазне параметре процеса као што количина уклоњеног материјала, квалитет обрађене површине и сл.

У примени су различите методе оптимизације као што су: *Analysis of Variance* коришћена у раду [263], *Genetic Algorithm* [264], *Response surface methodology* [265], *Taguchi method* [266], *Neural Network* и *Harmony Search Algorithm* [267], *Finite Element Method* [268] и сличне.

Поглавље 10

ЕКСПЕРИМЕНТИ, РЕЗУЛТАТИ И АНАЛИЗА

У оквиру овог поглавља извршени су експерименти у циљу испитивања утицајних фактора на грешке обраде. На основу добијених резултата анализиран је утицај ширине резања на димензионалну тачност, као и утицај брзине резања и помоћног кретања на површинску храпавост и димензионална и геометријска одступања. Такође је анализиран утицај грешке стезања глодала и одступања полупречника зуба глодала. Сва испитивања су изведена у циљу добијања модела грешке обраде у функцији утицајних фактора и начина да се оне смање путем регенерисања NC кода. Последњим експериментом извршено је мерење димензионалних и геометријских одступања дела добијених обрадом са променљивим дубинама резања, односно корекцијом путање алата (регенерисањем NC кода).

10.1 Испитивање утицаја ширине резања на димензионалну тачност обраде вретенастим глодалом

Програмирање на CNC машини алатки може се извршити тако да се обрада врши са једном ширином резања (аксијалном дубином) или са више и са једном дубином резања (радијалном дубином) или са више, односно са једним или са више аксијалних и радијалних пролаза. Дубином резања постиже се тачна мера, док се ширином остварује обрада целокупне површине дела. Повећањем ширине резања повећава се и утицај угиба алата (вретенастог глодала) на тачност обраде. Ово истраживање има за циљ анализу утицаја ширине резања на тачност обраде, како би се извршио што квалитетнији избор стратегије обраде. Анализа обухвата обраду супротносмерним (CC) и истосмерним (IC) глодањем делова са равним и цилиндричним изданцима.

10.1.1 Материјали и опрема

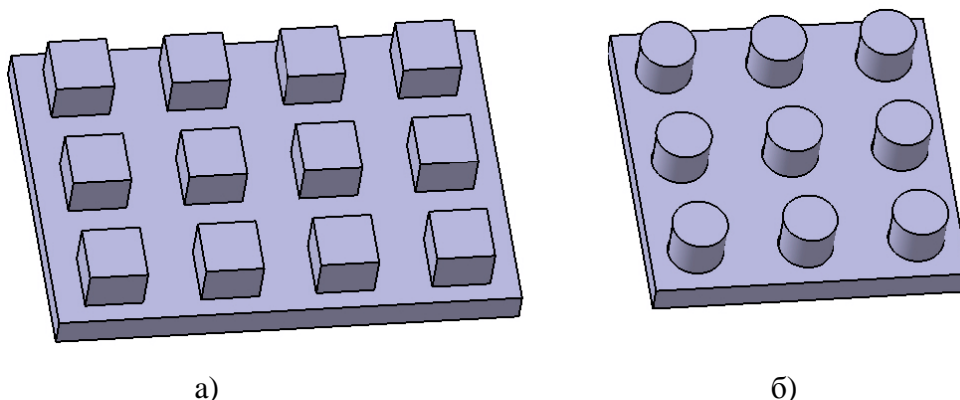
Експериментална испитивања су вршена на троосној вертикалној глодалици *MIKRON VCP1350* (обрадном центру) са три CNC контролисане осе (слика 10.1). Основне

карактеристике машине су: опсег оса X - Y - Z : 1350-820-600 mm, максимални број обртаја 12000 o/min, брзина помоћног кретања оса 30 m/min, укупна снага 40 kW, капацитет алата у магацину 60. Коришћени алат је вртенасто глодало од тврдог метала (VHM), без превлаке, марке *Atorn W45* (DIN6535): пречника 8 mm, дужине резног дела 21 mm, дужине препуста 25 mm, укупне дужина 63 mm, угла завојнице 45° и броја зуба 4.



Слика 10.1. Глодалица MIKRON VCP1350

Припремци су призматичне плоче. Прве две плоче су димензија 135x100x25 mm на којима су са једне стране израђени призматични изданци (слика 10.2-а) димензија 20x20x12 mm. Друге две плоче су димензија 95x95x25 mm, са израђеним цилиндричним изданцима димензија $\phi 20 \times 8$ mm (слика 10.2-б). Висине изданака у оба случаја су 12 mm. Израда изданака (припремака) вршена је вртеним глодалом пречника 20 mm (велике крутости) са већим бројем пролаза. На тај начин су добијени изданци тачних димензија без одступања услед могућег угиба алата.



а)

б)

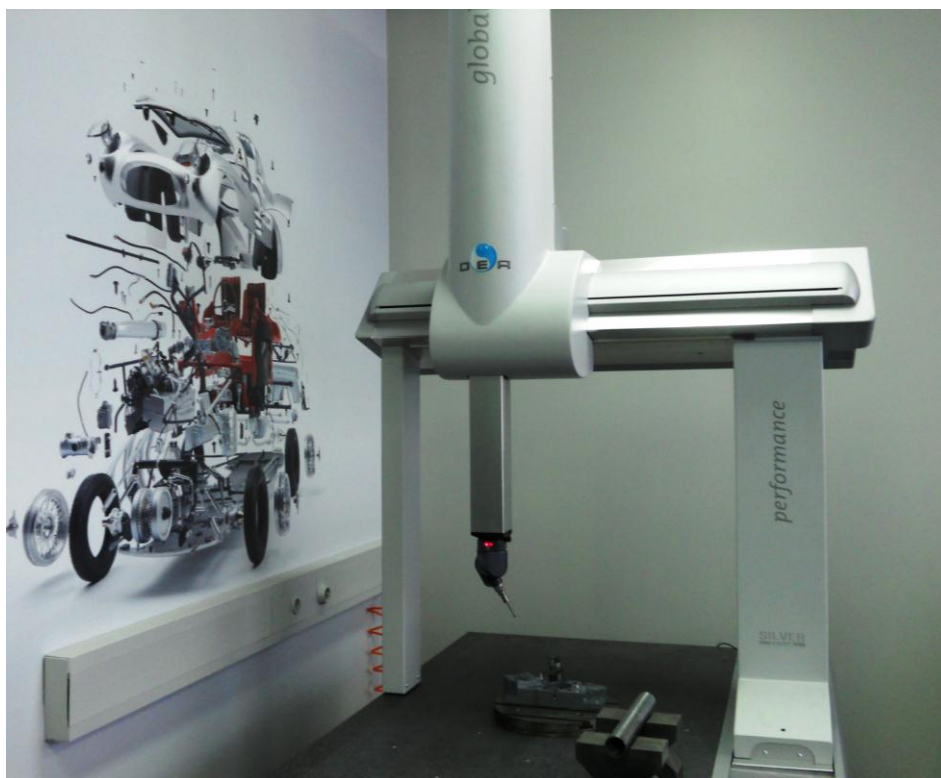
Слика 10.2. Изглед геометрије припремака делова

Материјал обрађиваних делова је легура алуминијума *6005A-T6 Al (AlSiMg(A) 3.3210)* са следећим хемијским саставом: 0,6-0,9 % - *Si*; 0,35 % - *Fe*; 0,10 % - *Cu*; 0,10 % - *Mn*; 0,40-0,6 % - *Mg*; 0,10 % - *Cr*; 0,10 % - *Zn*; 0,10 % - *Ti*; 0,15 % - остали елементи.

Механичке особине: затезна чврстоћа: 262 МПа; граница течења: 241 МПа; издужење: 8-10 %; затезна чврстоћа: 205 МПа; тврдоћа: 95 НВ; модул еластичности: 69 ГПа; густина: 2,7 g/cm³. Обрадивост ове легуре највише зависи од процента *Si* у материјалу из разлога јер повећава његову тврдоћу. Поред тога добро се обрађује, јер је тврда и даје добар квалитет обрађиване површине. Овај тип алуминијумове легуре је знатно заступљен у изради железничке и аутобуске профил-конструкције, стубова, платформи, цевовода итд.

Као средство за хлађење и подмазивање коришћена је емулзија минералног емулгирајућег уља концентрације 4%.

Обрађени делови су мерени на координатној *CNC* мерној машини (*CMM*) *DEA GLOBAL Silver Performance* (слика 10.3) у преставништву *HEXAGON METROLOGY* чије се заступништво налази на Факултету инжењерских наука Универзитета у Крагујевцу у оквиру лабораторије за обраду материјала резањем.



Слика 10.3. Мерна машина *DEA GLOBAL Silver Performance*

DEA GLOBAL Silver, као универзална трокоординатна мерна машина, нуди мерење скенирањем или мерењем тачка-по-тачка, са оптичким сензорима или сензорима са додиром, фиксираним или покретним носачима сонди. Скенирање се врши коришћењем софтвера *PC DMIS* и функције *Adaptive Scanning* која подешава оптималне параметре скенирања. Ласерски скенер *Safety-Kit* сет који поседује ова *CMM* обезбеђује сигурност и када машина ради самостално без оператора. Овај систем успорава машину када неко приђе дефинисаној заштићеној зони, док се у редовни режим рада враћа аутоматски чим је заштићена зона поново слободна, без интервенције оператора, а зауставља се одмах ако неко уђе у заштићену зону. *DEA GLOBAL Silver* је флексибилна при различитим мерним условима. Омогућава мерење у температурном опсегу од 15 до 30°C. Машина поседује даљински управљач *Universal Jog Box (UJB)*. Екран *UJB* је у боји и осетљив је на додир. *UJB* комуницира директно са *PC DMIS* софтвером преко *Bluetooth*-а. Носач сонди подржава све стандардне сонде, од *Single Point Probing*, *Self-*

Centering, па све до сонди за високо-брзинска скенирања као и ласерске сонде.

10.1.2 План експеримента

Експерименти су извођени тако што је вршена обрада призматичних изданака (припремака) димензија 20x20 mm и висина 12 mm, на димензију 15x15 mm са различитим ширинама резања (од 0,2 до 12 mm).

Исти експеримент је урађен и са цилиндричним изданицима димензија $\phi 20 \times 12$ mm. Ови изданици су обрађени са дубином резања 2,5 mm на пречник 15 mm и са различитим ширинама резања у опсегу од 0,2 до 12 mm.

Експерименти су вршени тако што је вршена обрада истосмерним и супротносмерним глодањем на деловима са призматичним, а затим и на деловима са цилиндричним изданицима.

Параметри извођења експеримената су приказани у табели 10.1.

Табела 10.1. Параметри експерименталних испитивања

Параметар	Призматични део	Цилиндрични део	
Број обртаја, n , o/min	3000		
Брзина помоћног кретања f , mm/min	1000		
Корак по зубу, f_z , mm/zubu	0,083		
Број зуба глодала, z	4		
Дубина резања, a , mm	2,5		
Ширине резања, b , mm	0,2; 0,4; 0,5; 0,6; 0,8; 1; 1,5; 2; 3; 4; 6; 12	0,2; 0,5; 0,8; 2; 2,5; 3; 4; 6; 12	
Угао контакта, ψ , °	8, 10		

Мерним пипком координатне мерне машине је мерена димензија изданка тачно на половини висине обрађене површине. Мерење је вршено на већем броју места по дужини изданака.

10.1.3 Резултати и анализа резултата

Резултати експерименталних испитивања одступања димензија (Δ) изданака од очекиваних и задатих CNC програмом су приказани у табели 10.2 за призматичне и табели 10.3 за цилиндричне изданке. Добијени резултати се односе на истосмерно (ИС) и супротносмерно (СС) глодање.

Табела 10.2. Измерена одступања димензија призматичних изданака

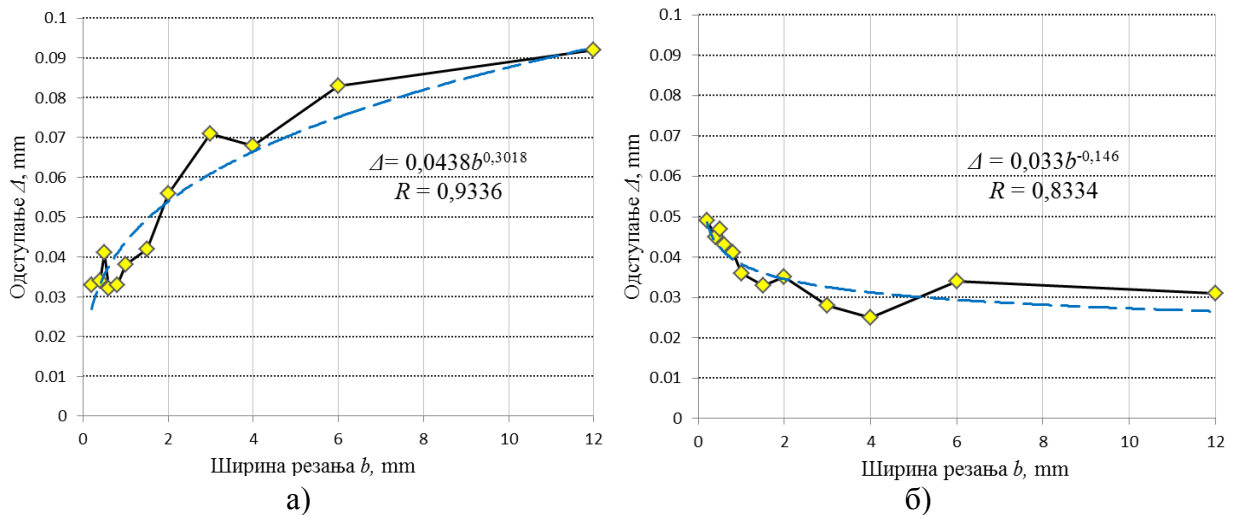
Смер глодања	Ширина резања - b , mm												
	0,2	0,4	0,5	0,6	0,8	1	1,5	2	3	4	6	12	
ИС	Δ	0,033	0,034	0,041	0,032	0,033	0,038	0,042	0,056	0,071	0,068	0,083	0,092
СС	Δ	0,049	0,045	0,047	0,043	0,041	0,036	0,033	0,035	0,028	0,025	0,034	0,031

Табела 10.3. Измерена одступања димензија цилиндричних изданака

Смер глодања	Ширина резања - b , mm									
	0,2	0,5	0,8	2	2,5	3	4	6	12	
ИС	Δ	0,041	0,043	0,042	0,047	0,053	0,055	0,052	0,063	0,079
СС	Δ	0,049	0,047	0,045	0,041	0,033	0,046	0,043	0,041	0,035

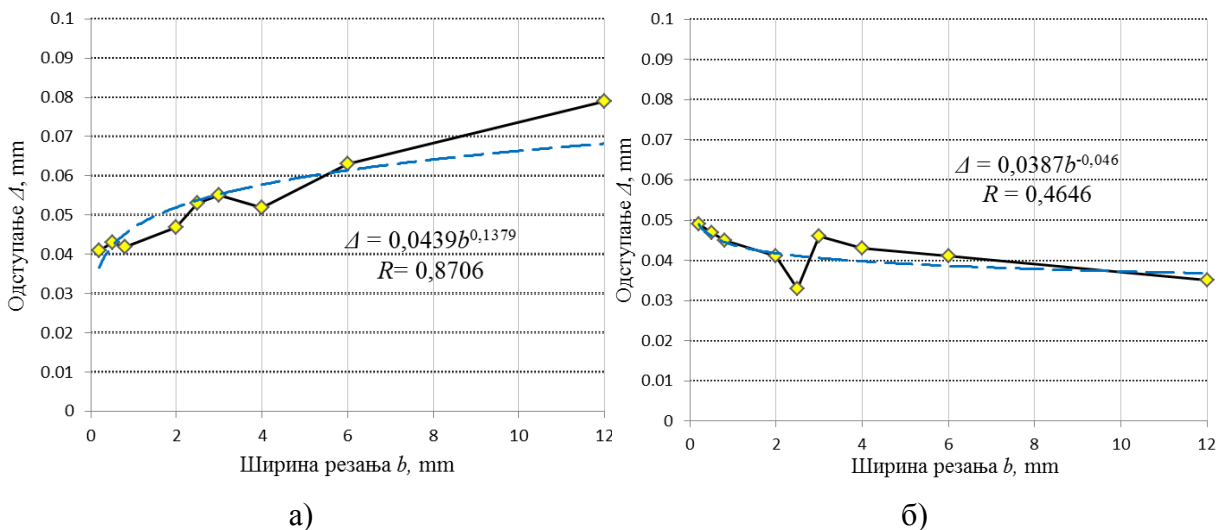
Применом регресионе анализе на експериментално добијеним подацима за одступања Δ , добијене су регресионе криве и коефицијенти корелације R .

На слици 10.4 приказане су криве одступања (једначина, коефицијент корелације и дијаграм) призматичних изданака за истосмерно глодање (слика 10.4-а) и супротносмерно глодање (слика 10.4-б).



Слика 10.4. Дијаграми одступања за део са призматичним изданицима за истосмерно и супротносмерно глодање

На слици 10.5, приказане су криве одступања (једначина, коефицијент корелације и дијаграм) цилиндричних изданака за истосмерно глодање (слика 10.5-а) и супротносмерно глодање (слика 10.5-б).



Слика 10.5. Дијаграми одступања за део са цилиндричним изданицима за истосмерно и супротносмерно глодање

Са слике 10.4 се може јасно уочити да се код истосмерног глодања призматичних изданака, повећањем ширине резања повећава и одступање од номиналне мере, док за супротносмерно глодање важи обрнуто. Ово се може објаснити тиме што код истосмерног глодања вретенасто глодало са повећањем ширине резања све више тежи да „побегне“ (одбије се) од обрађиваног дела, док код супротносмерног глодања алат, са повећањем ширине резања, тежи да привуче део ка себи. На тај начин захвата се више материјала него што је поступком потребно.

На слици 10.5 се види да исто важи и за обраду цилиндричних изданака, па се може закључити да путања кретања глодала (криволинијска или кружна) нема велики утицај на тачност мере, већ искључиво смер глодања (истосмерно или супротносмерно), дубина и ширина резања. Па је један од разлога што се истосмерно глодање више примењује него супротносмерно што се алат одбија од контуре, па оператер/програмер увек има сигурност да алат неће „повредити“ жељену меру и да увек може компензовати грешке (нпр. регенерисањем *NC* кода) настале у процесу глодања.

Такође може се закључити да су одступања код истосмерног глодања већа у односу на одступања настала при супротносмерном глодању са истим параметрима резања.

Оваква испитивања је потребно вршити и на делу од челика, одступања би тада била знатно већа, као и хабање алата. Осим тога и друга слична испитивања се требају вршити ради успостављања корелације параметара резања и тачности обраде дела, а све у циљу повећања квалитета израде програма за *CNC* машину.

10.2 Испитивање утицаја брзине резања и брзине помоћног кретања на површинску храпавост и тачност обраде

У оквиру овог експеримента приказани су резултати испитивања утицаја променљивих параметара обраде, брзине резања и помоћног кретања (корака) на површинску храпавост и на димензионална и геометријска одступања легуре алуминијума 6005А-Т6, при *CNC* истосмерној и супротносмерној обради глодањем са вретенастим глодалом различитих димензија и од различитих материјала ($\phi 6$ *HSS*, $\phi 6$ *VHM* и $\phi 10$ *VHM*).

10.2.1 Материјали и опрема

Машина на којој се вршила обрада је вертикална глодалица *Haas VF-3SS* са три *CNC* контролисане осе (слика 10.6). Ова вертикална глодалица има осу обртања у правцу *Z* осе, док *X* оса представља дужину радног стола, док *Y* оса прати кретање стола напред и назад. Сва кретања по осама обезбеђују завојна вретена са навртком, а као мерни систем се користи линеарни енкодер. Управљачка јединица *HAAS VF-3SS* је *HAAS 2*. Карактеристике вертикалне глодалице *Haas VF-3SS* су: опсег оса *X-Y-Z*: 1016-508-635 mm, максимални број обртаја 12000 o/min, максимална брзина помоћног кретања 21,1 m/min, укупна снага 22,4 kW, капацитет алата у магацину 24+1.

Као резни алати коришћена су три вретенаста глодала од различитог материјала, глодало *15112 Orion* од брзорезног челика (*HSS*) и два глодала *20 2243 Garant* од тврдог метала (*VHM*) и геометријом датај у табели 10.4.

3D Модели делова коришћени у експерименту (слика 10.7) као и све стазе (путање кретања) алата и симулација обраде (слика 10.8), добијене су коришћењем софтвера *CATIA P3 V5-R62014*. Генерисане путање алата симулиране су у софтверу *CIMCO Edit v7.0.7*.

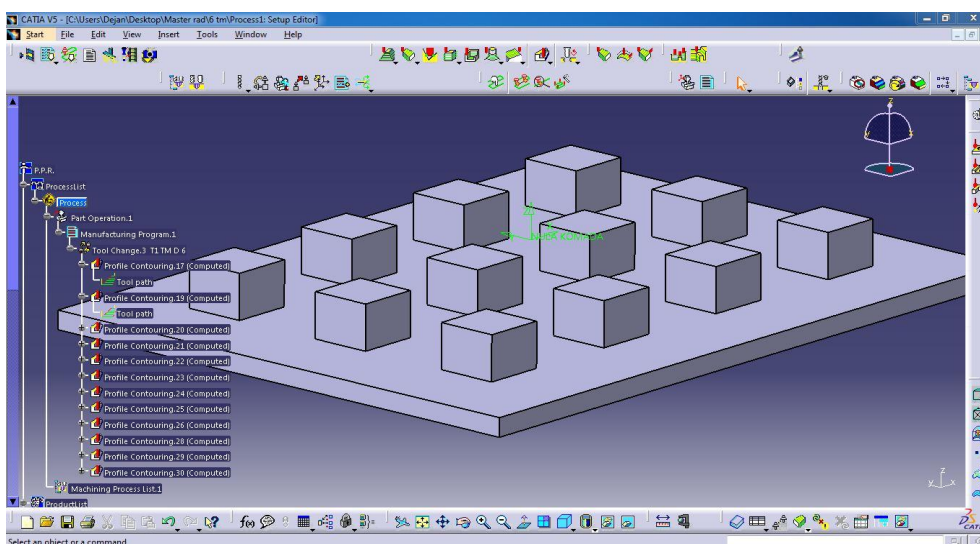
Као средство за хлађење и подмазивање (*CХП*) користила се емулзија са 6% уља, измерена рефрактометаром *PCE-010*. Што се тиче овог експеримента, емулзија је више коришћена као средство за подмазивање него за хлађење, јер брзине резања нису биле велике. За меке легуре, као што је алуминијум обавезно је примењивати *CХП*, јер би у супротном дошло до лепљења струготине за алат, прегревања алата и на самом крају и до лома глодала.



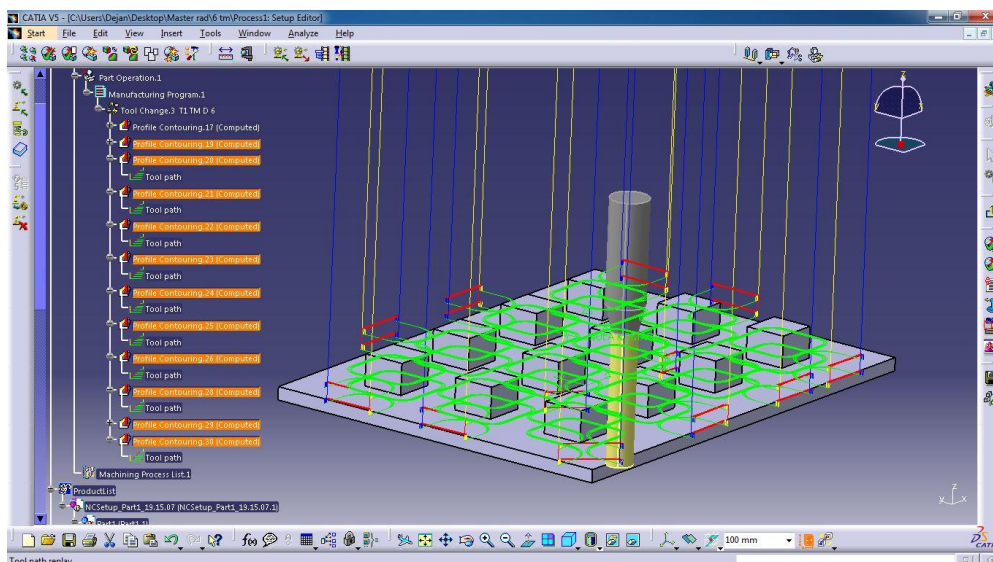
Слика 10.6. Глодалица HAAS VF-3SS

Табела 10.4. Геометријске карактеристике глодала коришћених у експерименту

Геометрија/ тип глодала	D mm	d_2 mm	l_1 m m	l_2 mm	l_3 mm	ω °	z број зуба	
$\phi 6$ HSS 15112 Orion	6	6	57	13	25	45	3	
$\phi 6$ VHM 20 2243 Garant	6	6	57	13	19			
$\phi 10$ VHM 20 2243 Garant	10	10	72	22	30			



Слика 10.7. Приказ операција у програму CATIA V5



Слика 10.8. Приказ симулације путање алата у програму CATIA V5

Материјал делова је легура алуминијума *6005A-T6* чије су особине наведене у потпоглављу 10.1.

Површинска храпавост је мерена мерним системом *TALYSURF-6* повезаним са рачунаром (слика 10.9). Овај уређај омогућава: мерење свих релевантних параметара храпавости и валовитости, статистичку обраду резултата мерења параметара храпавости, приказ резултата на екрану, њихово меморисање, штампање и цртање и просторно скенирање површина. Мерење параметара храпавости вршено је на три мерна места по свакој површини изданка, а затим је изведена средња вредност, која је коришћена за даљу анализу.



Слика 10.9. Уређај за мерење храпавости *TALYSURF 6*

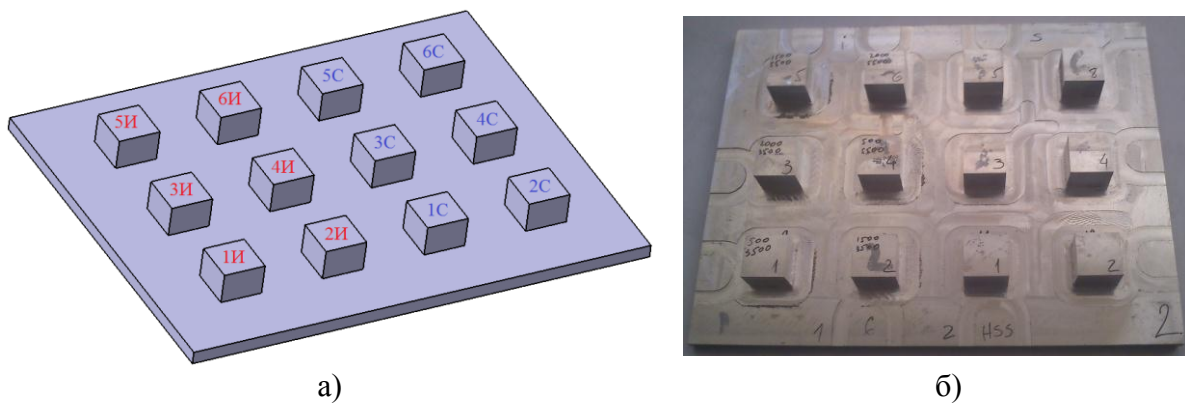
Мерење обрађених делова вршено је на *CNC* мерној машини *DEA GLOBAL Silver Performance* (слика 10.11).

Корелативне једначине и дијаграми зависности параметара обраде од површинске храпавости и димензионалних и геометријских одступања добијени су помоћу софтвера *MatLAB R2015a*.

10.2.2 План експеримента

Радни комади, односно површине делова који су обрађивани били су равни изданци призматичног облика, истих димензија, претходно обрађени на димензију 20x20x12 mm. На слици 10.10-а, приказан је CAD модел дела, док је на слици 10.10-б приказан део након обраде.

Радни комад (припремак) је добијен из плоче димензија 180x140x20 mm, из које су претходном обрадом добијени призматични изданци. Прво грубом, а затим фином обрадом вретенастим глодалом $\phi 16$ mm, добијени су финални делови са изданима димензија 20x20x12 mm (слика 10.10-а). Овакви делови су обрађивани вретенастим глодалима различитих пречника и материјала ($\phi 6$ HSS, $\phi 6$ VHM и $\phi 10$ VHM) уз примену истих параметара резања. Параметри резања и план експеримента са редоследом обраде приказани су у табели 10.5, где су са-И обележени изданци обрађивани истосмерним глодањем, док су-С, изданци обрђивани супротносмерним глодањем. Обрада је вршена са два пролаза са дубином резања од 0,875 mm и завршним пролазом од 0,25 mm.

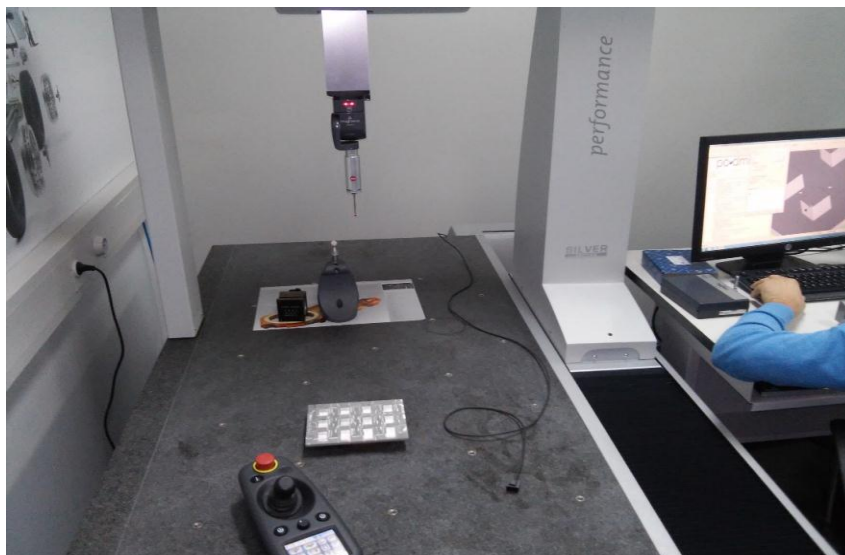


Слика 10.10. CAD модел и део након обраде

Табела 10.5. Параметри експерименталних испитивања и план експеримента

Параметар обраде	Изданак					
	1	2	3	4	5	6
f , mm/min	500	1500	2000	500	1500	2000
n , o/min	3500			5500		
a , mm	0,875/0,875/0,25					
b , mm	12					

Добијени делови су измерени у преставништву *HEXAGON METROLOGY* чије се заступништво налази на Факултету инжењерских наука у Крагујевцу. Мерење добијених делова вршено је на CNC мерној машини *DEA GLOBAL Silver Performance* (слика 10.11), чије су перформансе наведене у потпоглављу 10.1. Резултати мерења обрађени су помоћу софтвера *PC DMIS*.



Слика 10.11. Мерење делова на мерној машини DEА GLOBAL Silver Performance

10.2.3 Резултати и анализа резултата мерења храпавости

Резултати измерених средњих аритметичких одступања профила (R_a , μm) у зависности од улазних параметара: корака (f , mm/min), броја обртаја (n , o/min), односно корака по зубу (f_z , mm/z) и брзине резања (V , m/min) с обзиром на смер глодања (истосмерно и супротносмерно) и геометрију глодала, дати су у табели 10.6.

Табела 10.6. Резултати мерења храпавости (R_a , μm) при ИС и СС глодању

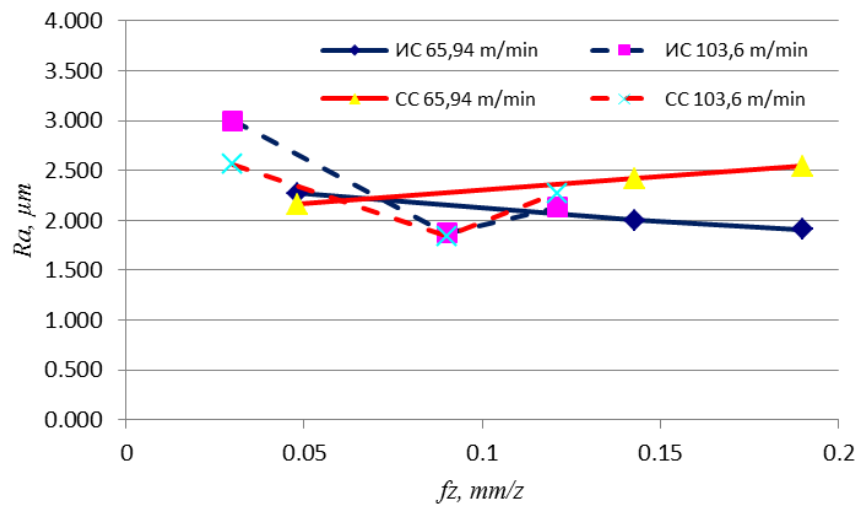
Изданак	f , mm/min	n , o/min	Глодало $\phi 6$ HSS				Глодало $\phi 6$ VHM				Глодало $\phi 10$ VHM			
			f_z , mm/z	V , m/min	R_a , μm		f_z , mm/z	V , m/min	R_a , μm		f_z , mm/z	V , m/min	R_a , μm	
					ИС	СС			ИС	СС			ИС	СС
1	500	3500	0,048	65,94	2,270	2,160	0,048	65,94	0,392	0,520	0,048	109,9	0,169	0,140
2	1500		0,143		2,000	2,420	0,143		1,770	1,250	0,143		1,150	1,131
3	2000		0,190		1,910	2,540	0,190		2,260	1,660	0,190		2,130	1,670
4	500	5500	0,030	103,6	3,000	2,560	0,030	103,6	0,480	1,250	0,030	172,7	0,146	0,138
5	1500		0,090		1,870	1,840	0,090		1,370	2,090	0,090		0,522	0,460
6	2000		0,121		2,130	2,270	0,121		1,690	0,121	0,121		0,880	0,731

На следећем дијаграму (слика 10.12) приказани су резултати мерења вредности параметра R_a храпавости површине за глодало пречника 6 mm HSS при супротносмерном и истосмерном глодању.

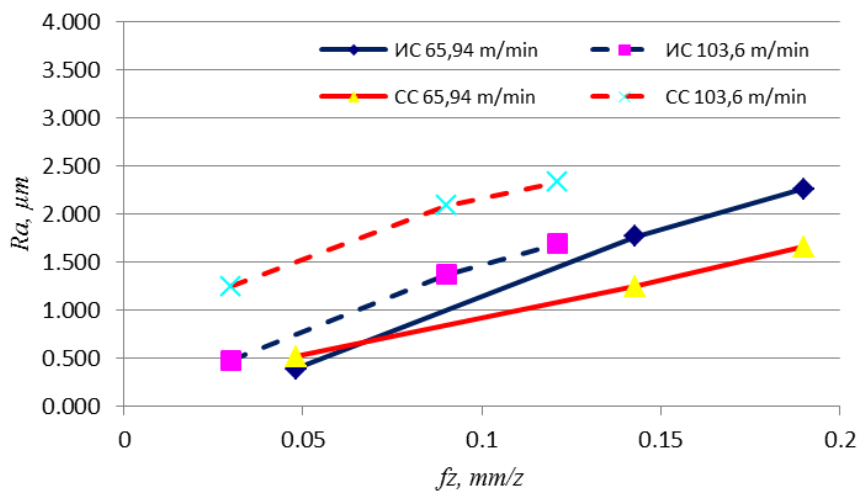
Са дијаграма се може приметити да се не може успоставити добра корелација између храпавости (R_a) и брзине помоћног кретања при супротносмерном глодању. Код истосмерног глодања постоји област брзина помоћног кретања при којима је храпавост обрађене површине најмања. Овакви резултати нису у складу са досадашњим сличним истраживањима. Може се претпоставити да је узрок наведених резултата лепљење струготине за резни алат, што се често дешава при обради алуминијума глодалима од брзорезног челика.

Слика 10.13 приказује резултате мерења параметра површинске храпавости (R_a) након обраде истосмерним и супротносмерним глодањем глодалом $\phi 6$ од тврдог метала (VHM). Може се закључити да са повећањем брзине помоћног кретања расте R_a ,

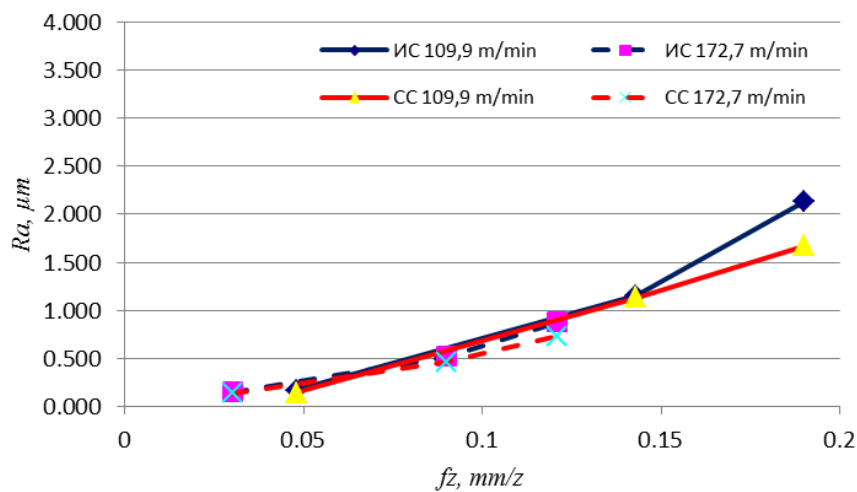
односно храпавост обрађене површине. Овај пораст је запажен и код истосмерног и супротносмерног глодања. Код истосмерног глодања, до веће храпавости долази при мањој брзини резања, док је код супротносмерног већа храпавост постигнута при већој брзини резања.



Слика 10.12. Истосмерно наспрам супротносмерног глодања за глодало $\phi 6$ HSS



Слика 10.13. Истосмерно наспрам супротносмерног глодања за глодало $\phi 6$ VHM



Слика 10.14. Истосмерно наспрам супротносмерног глодања за глодало $\phi 10$ VHM

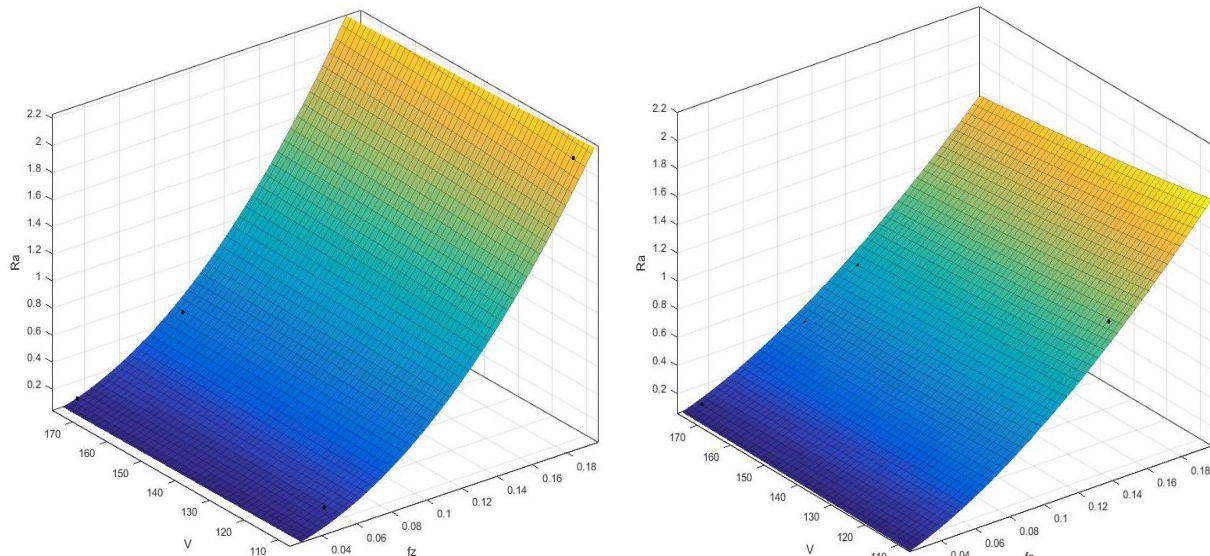
Дијаграм резултата мерење параметра R_a храпавости обрађене површине при истосмерном и супротносмерном глодању у зависности од брзине помоћног кретања добијених глодалом пречника $\phi 10$ mm *VHM* дат је на слици 10.14. Дијаграм показује да при повећању корака расте храпавост обрађене површине. Такође се може уочити да је храпавост већа при мањој брзини резања и већа код обраде поступком истосмерног него код супротносмерног глодања.

На основу резултата експеримента, помоћу софтверског пакета *MatLAB R2015a*, добијене су корелативне једначине и одговарајући дијаграми (слика 10.15) зависности параметара обраде: брзине резања (V , m/min) и корака по зубу (f_z , mm/zub) од параметра површинске храпавости (R_a , μm) у случају истосмерног (ИС) и супротносмерног (СС) глодања глодалом пречника $\phi 10$ mm *VHM*.

Корелативне једначине су дате у облику:

$$R_a = C \cdot f_z^y \cdot V^x$$

Како израз садржи параметар f_z , извршено је израчунавање ове вредности за свако глодало и одговарајућу брзину помоћног кретања V и броја обртаја (табела 10.6).



ИС: $R_a = 31,77 \cdot f_z^{2,014} \cdot V^{0,134}$, $R_k = 99,73$

СС: $R_a = 86,04 \cdot f_z^{1,552} \cdot V^{-0,2885}$, $R_k = 99,78$

Слика 10.15. Дијаграми и корелативне једначине за ИС и СС глодање глодалом $\phi 10$ *VHM* са коефицијентима корелације R_k

Дијаграм показује добро предвиђање обраде. Корелативне једначине дају добру корелацију R_k (99,73% за истосмерно и 99,78% за супротносмерно). Са дијаграма се може закључити да се при истим параметрима обраде мања храпавост добија код супротносмерног него код истосмерног глодања.

10.2.4 Резултати и анализа резултата мерења тачности обраде

Мерењем додирном сондом *CMM* добијени су резултати мерења у виду координата тачака. Софтвером *PC DMIS* резултати су обрађени и добијена димензионална и геометријска одступања од номиналних мера дела. Од геометријских одступања анализирана су одступања од равности, управности и паралелности.

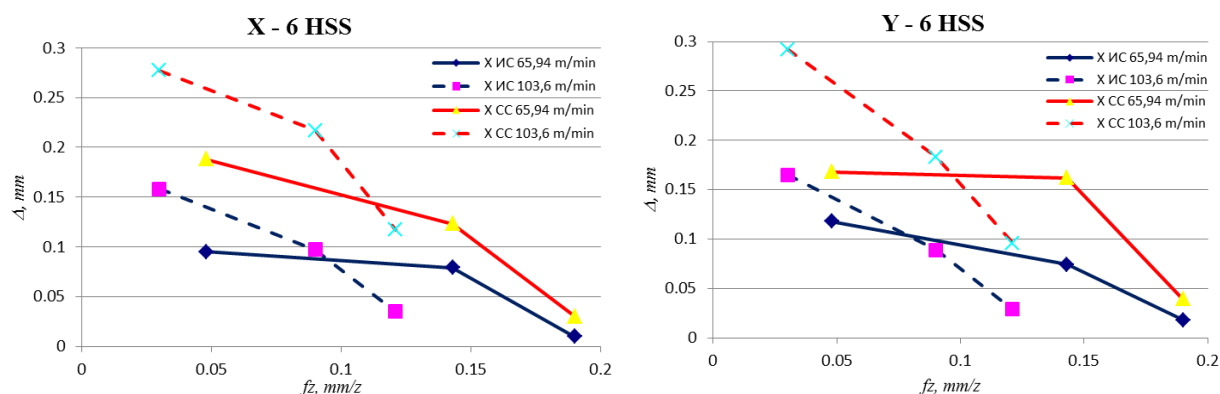
10.2.4.1 Димензионална одступања

Резултати измерених вредности одступања у X и Y правцу (ΔX , ΔY , mm) у зависности од улазних параметара: брзине помоћног кретања (f , mm/min), броја обртаја (n , o/min), односно, корака по зубу (f_z , mm/z) и брзине резања (V , m/min), с обзиром на смер глодања, истосмерно (ИС) и супротносмерно (СС) и геометрију глодала, дати су у табели 10.7.

Табела 10.7. Резултати мерења одступања по X и Y (Δ , mm) при ИС и СС глодању

Изданак	f , mm/min	n , o/min	Глодало $\phi 6$ HSS				Глодало $\phi 6$ VHM				Глодало $\phi 10$ VHM			
			ΔX , mm		ΔY , mm		ΔX , mm		ΔY , mm		ΔX , mm		ΔY , mm	
			ИС	СС	ИС	СС	ИС	СС	ИС	СС	ИС	СС	ИС	СС
1	500	3500	0,095	0,188	0,012	0,168	0,031	0,039	0,035	0,041	-0,021	-0,023	-0,016	-0,020
2	1500		0,079	0,123	0,074	0,162	0,094	0,043	0,086	0,044	-0,010	-0,017	-0,010	-0,018
3	2000		0,010	0,030	0,018	0,039	0,105	0,047	0,110	0,047	-0,007	-0,016	-0,001	-0,015
4	500	5500	0,158	0,277	0,165	0,292	0,043	0,021	0,063	0,021	-0,022	-0,027	-0,016	-0,024
5	1500		0,097	0,217	0,089	0,183	0,074	0,041	0,082	0,041	-0,018	-0,023	-0,010	-0,023
6	2000		0,035	0,117	0,029	0,096	0,087	0,048	0,083	0,048	-0,013	-0,021	-0,013	-0,018

Измерене вредности одступања приказане су на наредним дијаграмима.



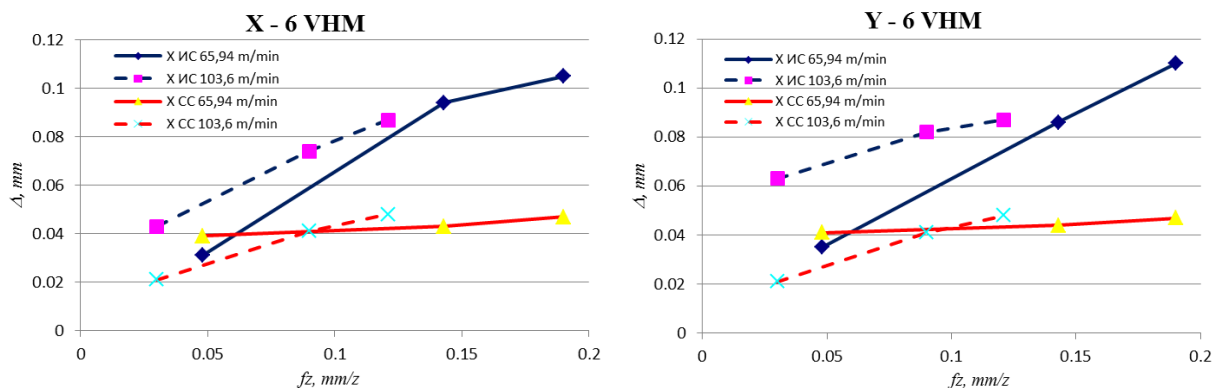
Слика 10.16. Димензионално одступање по X и Y оси - глодало $\phi 6$ HSS

Са слике 10.16 може се закључити да истосмерно глодање глодалом од брзорезног челика пречника $\phi 6$ mm, при датим параметрима резања, даје бољу тачност, тј. мање одступање од дужинске мере. Одступање се смањује повећањем корака по зубу у оба случаја (истосмерног и супротносмерног) глодања. Такође, у оба случаја, одступање расте повећањем брзине резања. Највећа тачност (са одступањем од 0,010 mm,) постигнута је истосмерним глодањем при минималној брзини резања (65,94 m/min) и максималном кораку по зубу (0,190 mm/z).

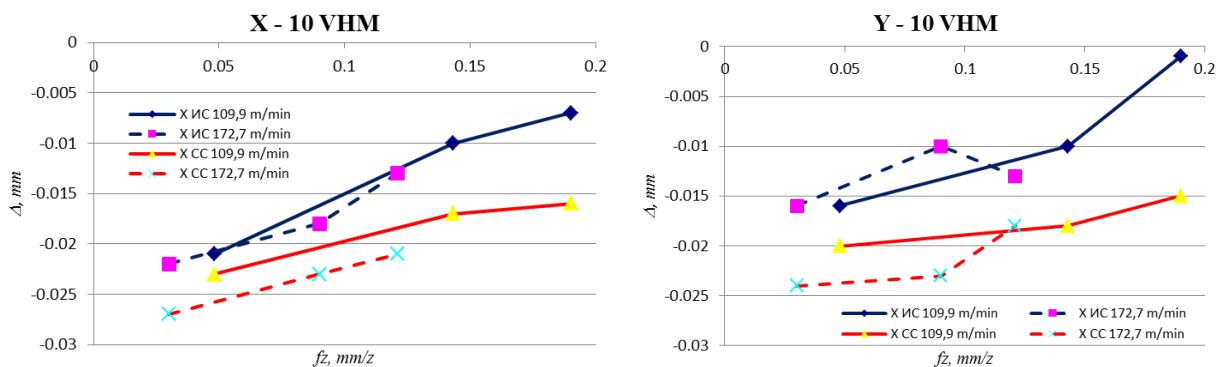
На слици 10.17 приказана су одступања од номиналне дужинске мере за глодало $\phi 6$ mm од тврдог метала, с обзиром на промену корака по зубу и брзине резања. Може се закључити да супротносмерно глодање даје бољу тачност, тј. мање одступање. За разлику од глодања алатом од брзорезног челика, тачност дужинске мере обрадом VHM глодалом опада повећањем корака по зубу у оба случаја (истосмерног и супротносмерног) глодања. Утицај брзине резања се мења повећањем корака по зубу, тако је тачност изједначена при обради са кораком од 0,09 mm/z код супротносмерног глодања, док се код истосмерног тренд променио, па је већа тачност постигнута при мањој брзини резања. Највећа тачност постигнута је супротносмерним глодањем (за

обе осе) при највећој брзини резања (103,6 m/min) и најмањем кораку по зубу (0,03 mm/z) и то 0,021 mm.

За разлику од обраде глодалима $\phi 6$ (HSS и VHM), одступања од дужинске мере при обради глодалом $\phi 10$ VHM (слика 10.18) су негативна. Повећањем корака по зубу одступања се смањују и приближавају се нули. Тачност опада повећавањем брзине резања. Истосмерно глодање при мањој брзини резања (109,9 m/min) и највећем кораку по зубу (0,190 mm/z) овде даје најмање одступање од номиналне мере и то -0,001 mm по Y оси.



Слика 10.17. Димензионално одступање по X и Y оси - глодало $\phi 6$ VHM

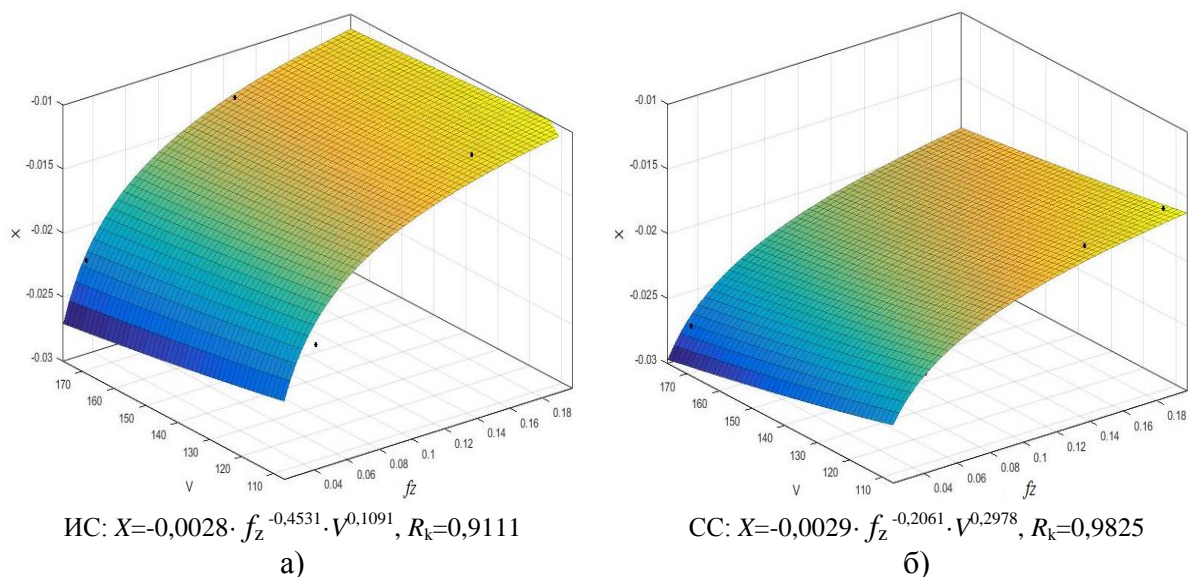


Слика 10.18. Димензионално одступање по X и Y оси - глодало $\phi 10$ VHM

На основу резултата експеримента, помоћу софтверског пакета *MatLAB R2015a*, добијене су корелативне једначине и одговарајући дијаграми зависности параметара обраде: брзине резања (V , m/min) и корака по зубу (f_z , mm/zub) од одступања по X оси у случају истосмерног (слика 10.19-а) и супротносмерног (слика 10.19-б) глодања глодалом пречника $\phi 10$ mm VHM у облику:

$$X = C \cdot f_z^y \cdot V^x$$

Променом режимима обраде, највеће одступање од тачности димензије (16 mm) током обраде експерименталног дела овог рада је упркос замени и постављању нових глодала, јављало се код супротносмерног глодања глодалом $\phi 6$ HSS. Најмања одступања се примећују код глодала $\phi 10$ VHM. На основу наведеног може се закључити да са повећањем крутости алата долази и до повећања прецизности и добијања веће димензионе тачности. При повећаним режима обраде и задовољавајућом крутошћу алата, глодало $\phi 6$ VHM је показало боље резултате супротносмерним глодањем у односу на истосмерно.



Слика 10.19. Дијаграми и корелативне једначине за ИС и СС глодање глодалом $\phi 10$ VHM са коефицијентима корелације R_k , за одступање димензије по X оси

10.2.4.2 Одступања од равности

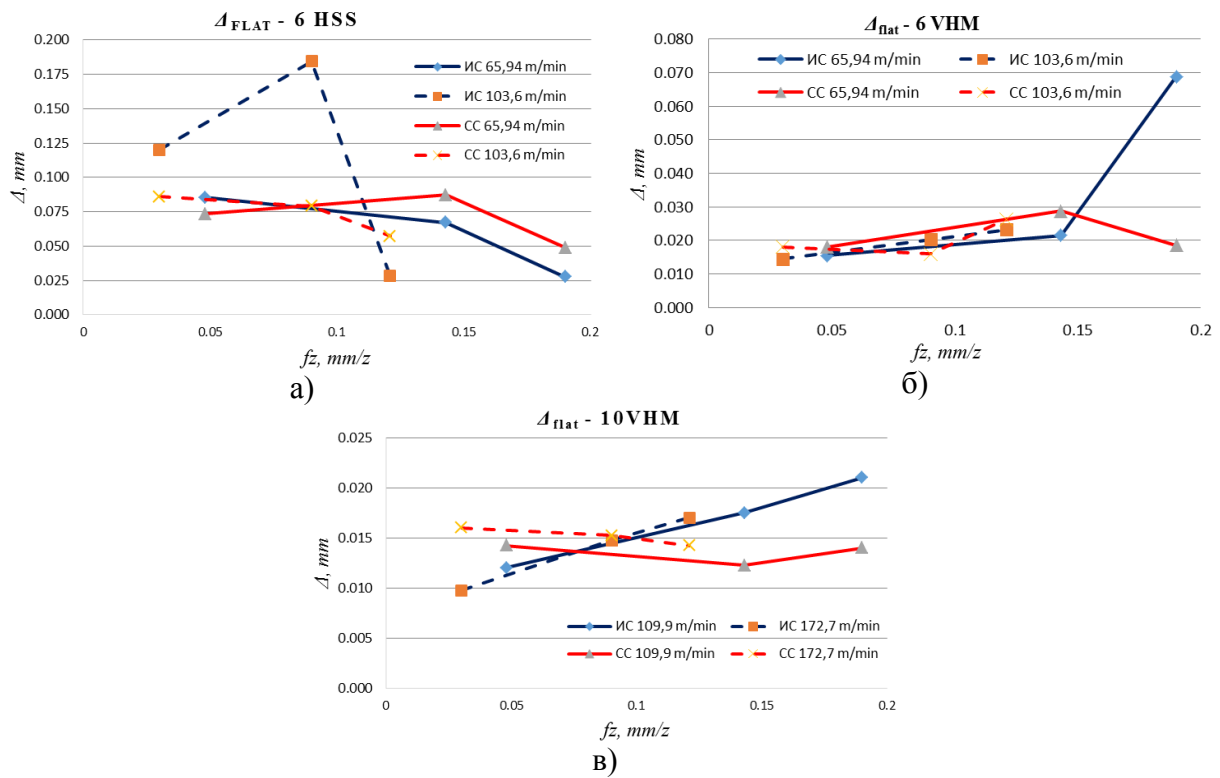
Резултати мерења одступања од равности добијена на СММ обрађени су у програму PC DMIS. Добијена су геометријска одступања за сваку површину изданка, а затим су израчунате средње (просечне) вредности по изданку (табела 10.8) и таква коришћена у даљој анализи.

Табела 10.8. Резултати мерења одступања од равности при ИС и СС глодању

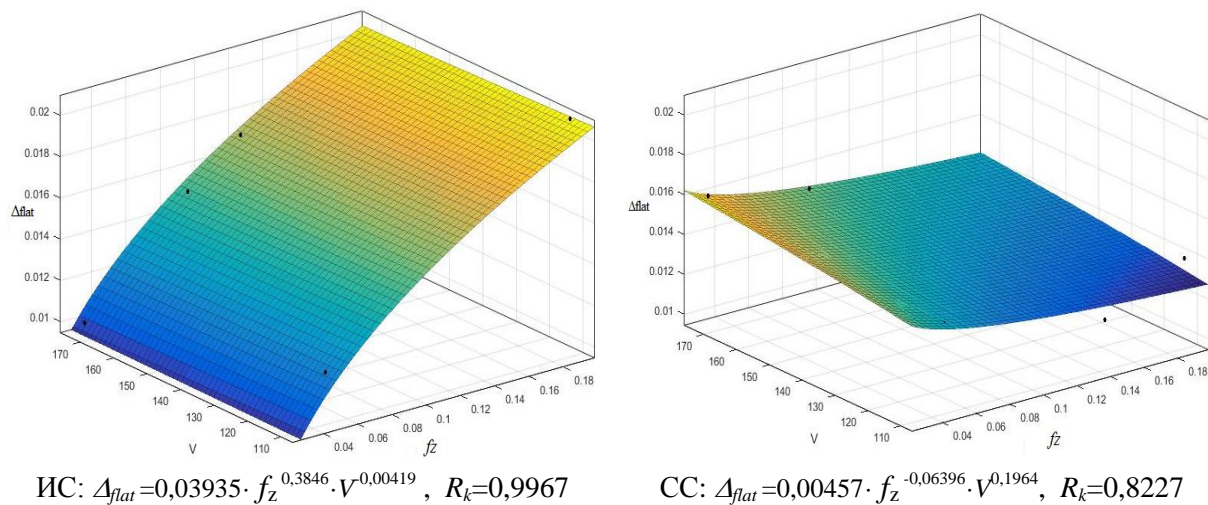
Глодало	Изданак	1	2	3	4	5	6
	f , mm/min		500	1500	2000	500	1500
n , o/min		3500	3500	3500	5500	5500	5500
$\phi 6$ HSS	Δ_{flat} - ИС	0,085	0,067	0,028	0,120	0,185	0,028
	Δ_{flat} - СС	0,074	0,087	0,049	0,086	0,079	0,057
$\phi 6$ VHM	Δ_{flat} - ИС	0,016	0,022	0,069	0,015	0,020	0,023
	Δ_{flat} - СС	0,018	0,029	0,019	0,018	0,016	0,026
$\phi 10$ VHM	Δ_{flat} - ИС	0,012	0,018	0,021	0,010	0,015	0,017
	Δ_{flat} - СС	0,014	0,012	0,014	0,016	0,015	0,014

На основу дијаграма (слика 10.20-а) може се закључити да одступање од равности код обраде глодалом $\phi 6$ HSS опада повећавањем корака по зубу. Супротно је код обраде глодалом $\phi 6$ VHM (слика 10.20-б) и обраде глодалом $\phi 10$ VHM (слика 10.20-в) где одступање од равности расте повећањем корака по зубу. Повећање брзине резања различито се одражава на свако глодало и смер глодања, па се не може извући карактеристика промене.

На основу резултата експеримента, добијене су корелативне једначине и одговарајући дијаграми зависности параметара обраде: брзине резања (V , m/min) и корака по зубу (f_z , mm/zub) одступања од равности (слика 10.21) у случају истосмерног и супротносмерног глодања глодалом пречника $\phi 10$ mm VHM.



Слика 10.20. Одступање од равности за сва глодала



Слика 10.21. Дијаграми и корелативне једначине за ИС и СС глодање глодалом $\phi 10$ VHM, са коефицијентима корелације R_k , за одступање од равности

10.2.4.3 Одступања од управности

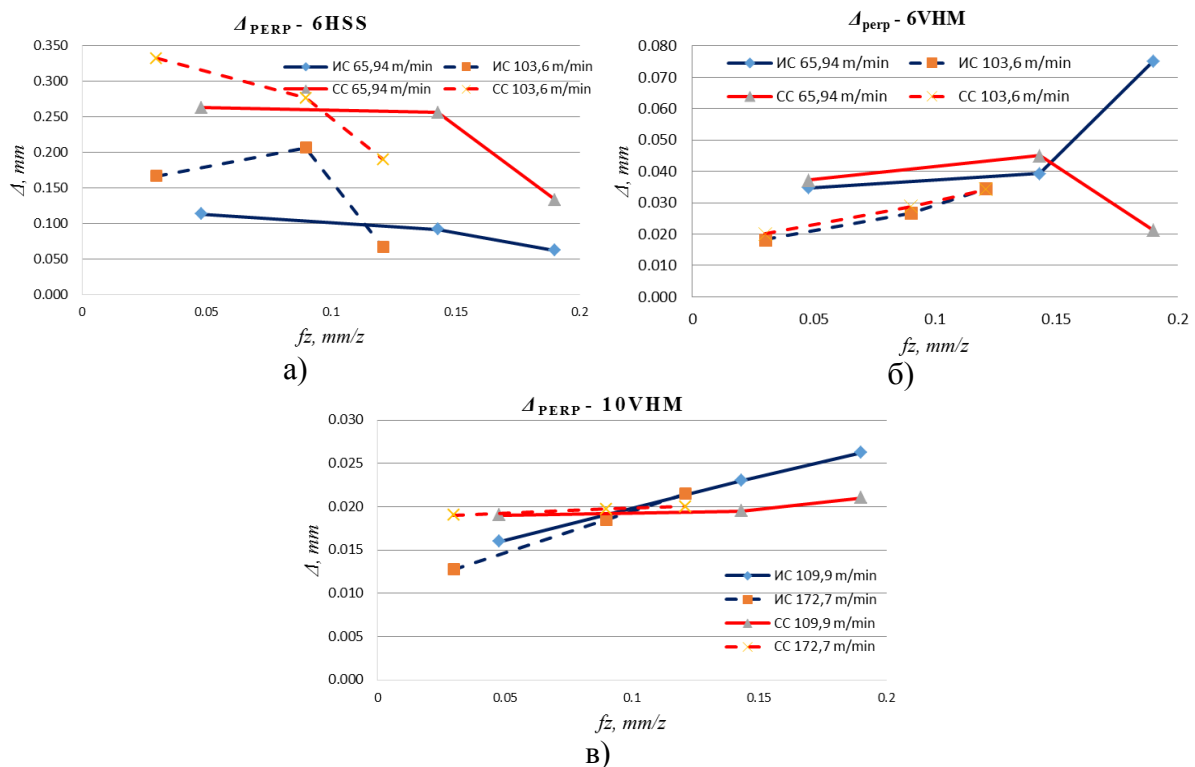
Резултати мерења одступања од управности добијена на СММ обрађени су у програму PC DMIS. Добијена су геометријска одступања за сваку површину изданка, а затим су израчунате средње (просечне) вредности по изданку (табела 10.9) и таква коришћена у даљој анализи.

Табела 10.9. Резултати мерења одступања од управности при ИС и СС глодању

Глодало	Изданак	1	2	3	4	5	6
	f , mm/min	500	1500	2000	500	1500	2000
n , o/min	3500	3500	3500	5500	5500	5500	
$\phi 6$ HSS	$\Delta_{\text{перп}}$ - ИС	0,113	0,091	0,062	0,166	0,207	0,067
	$\Delta_{\text{перп}}$ - СС	0,263	0,256	0,133	0,332	0,276	0,190
$\phi 6$ VHM	$\Delta_{\text{перп}}$ - ИС	0,035	0,039	0,075	0,018	0,027	0,035
	$\Delta_{\text{перп}}$ - СС	0,037	0,045	0,021	0,020	0,029	0,034
$\phi 10$ VHM	$\Delta_{\text{перп}}$ - ИС	0,016	0,023	0,026	0,013	0,019	0,022
	$\Delta_{\text{перп}}$ - СС	0,019	0,020	0,021	0,019	0,020	0,020

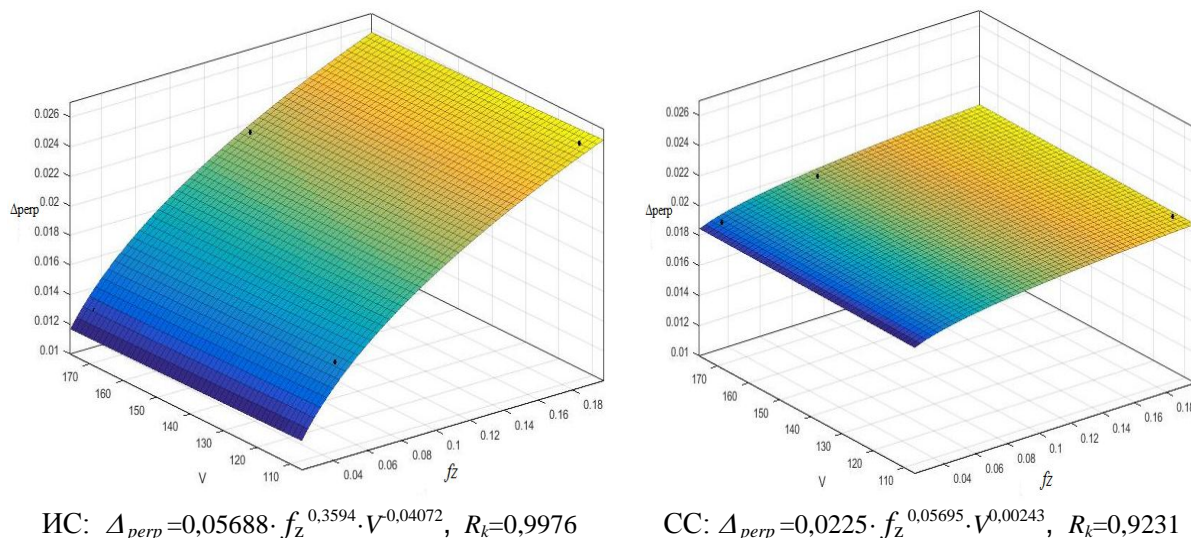
На основу дијаграма за обраду глодалом $\phi 6$ HSS (слика 10.22-а) може се закључити да одступање од управности опада повећавањем корака по зубу. Овде се јасно види и утицај промене брзине резања, односно њеним повећањем расте одступање при обе стратегије глодања (истосмерне и супротносмерне).

Супротно је код обраде глодалом $\phi 6$ VHM (слика 10.22-б) и обраде глодалом $\phi 10$ VHM (слика 10.22-в) где одступање од управности расте повећањем корака по зубу. Утицај промене брзине резања и овде је уочљивији, тако да се може констатовати да се повећањем брзине резања смањује одступање од равности.



Слика 10.22. Одступање од управности за сва глодала

На основу резултата експеримента, добијене су корелативне једначине и одговарајући дијаграми зависности параметара обраде: брзине резања (V , m/min) и корака по зубу (f_z , mm/z) одступања од управности (слика 10.23) у случају истосмерног и супротносмерног глодања глодалом пречника $\phi 10$ mm VHM.



Слика 10.23. Дијаграми и корелативне једначине за ИС и СС глодање глодалом $\phi 10$ VHM са коефицијентима корелације R_k за одступање од управности

10.2.4.4 Одступања од паралелности

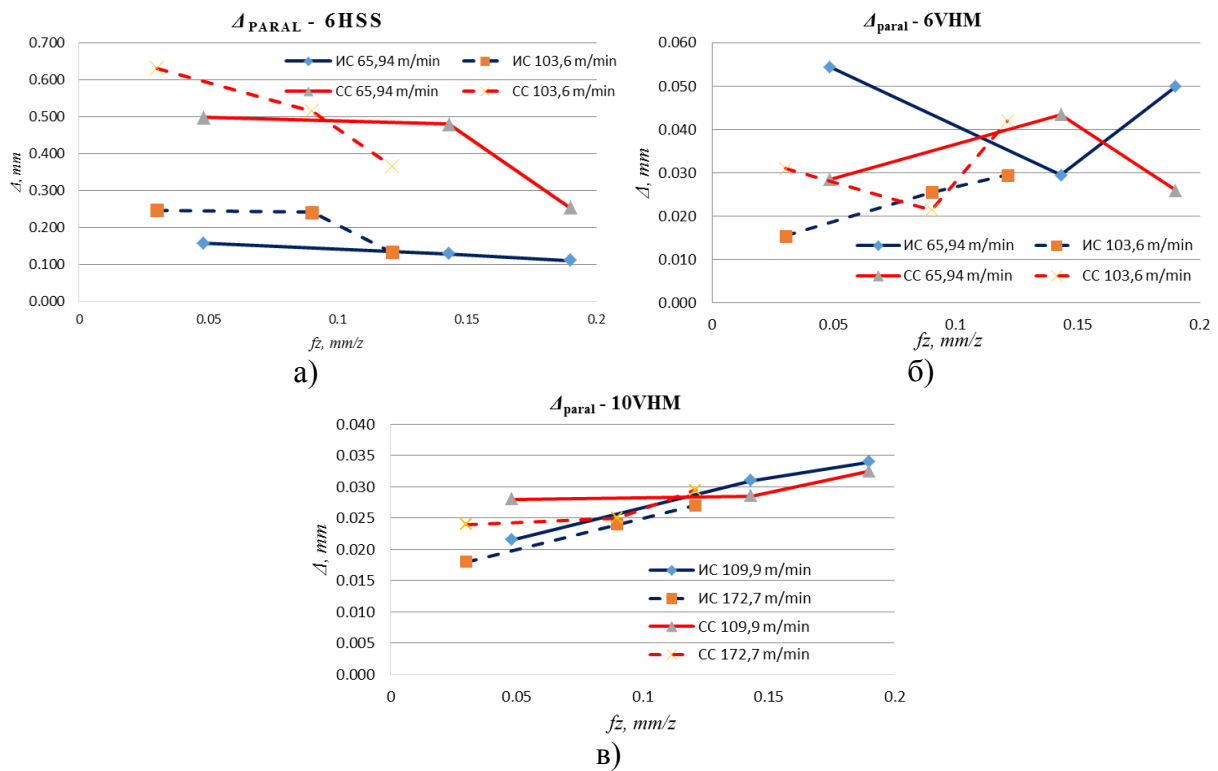
Резултати мерења одступања од паралелности добијена на СММ обрађена су у програму PC DMIS. Добијена су геометријска одступања за сваку површину изданка, а затим су израчунате средње (просечне) вредности по изданку (табела 10.10) и таква коришћена у даљој анализи.

Табела 10.10. Резултати мерења одступања од паралелности при ИС и СС глодању

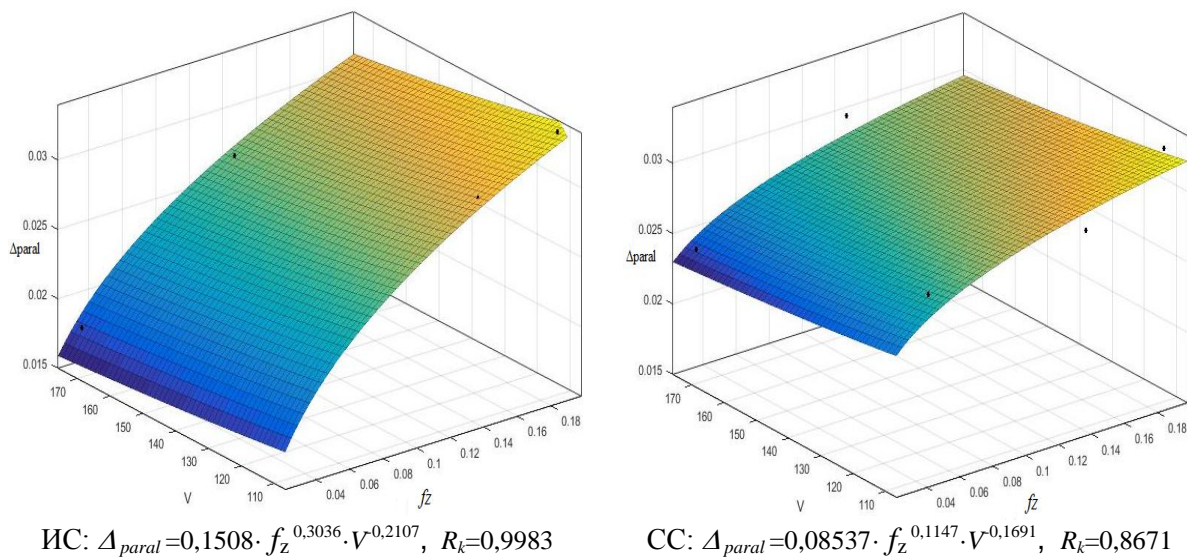
Глодало	Изданак	1	2	3	4	5	6
	f , mm/min	500	1500	2000	500	1500	2000
n , o/min	3500	3500	3500	5500	5500	5500	
$\phi 6$ HSS	$\Delta_{\text{парал}}$ - ИС	0,157	0,129	0,111	0,247	0,241	0,133
	$\Delta_{\text{парал}}$ - СС	0,498	0,480	0,253	0,631	0,515	0,367
$\phi 6$ VHM	$\Delta_{\text{парал}}$ - ИС	0,055	0,030	0,050	0,016	0,026	0,030
	$\Delta_{\text{парал}}$ - СС	0,029	0,044	0,026	0,031	0,022	0,042
$\phi 10$ VHM	$\Delta_{\text{парал}}$ - ИС	0,022	0,031	0,034	0,018	0,024	0,027
	$\Delta_{\text{парал}}$ - СС	0,028	0,029	0,033	0,024	0,025	0,030

На основу дијаграма за обраду глодалом $\phi 6$ HSS (слика 10.24-а) може се закључити да одступање од паралелности се смањује повећавањем корака по зубу. Овде се види и утицај промене брзине резања, тако да њеним повећањем расте одступање од паралелности код обе стратегије глодања (истосмерне и супротносмерне). Супротно је код обраде глодалом $\phi 6$ VHM (слика 10.24-б) и обраде глодалом $\phi 10$ VHM (слика 10.24-в) где одступање од паралелности расте повећањем корака по зубу. Може се такође констатовати да се тачност повећава, односно одступање од паралелности смањује, повећањем брзине резања.

На основу резултата експеримента, добијене су корелативне једначине и одговарајући дијаграми зависности параметара обраде: брзине резања (V , m/min) и корака по зубу (fz , mm/z) одступања од паралелности (слика 10.25) у случају истосмерног и супротносмерног глодања глодалом пречника $\phi 10$ mm VHM.



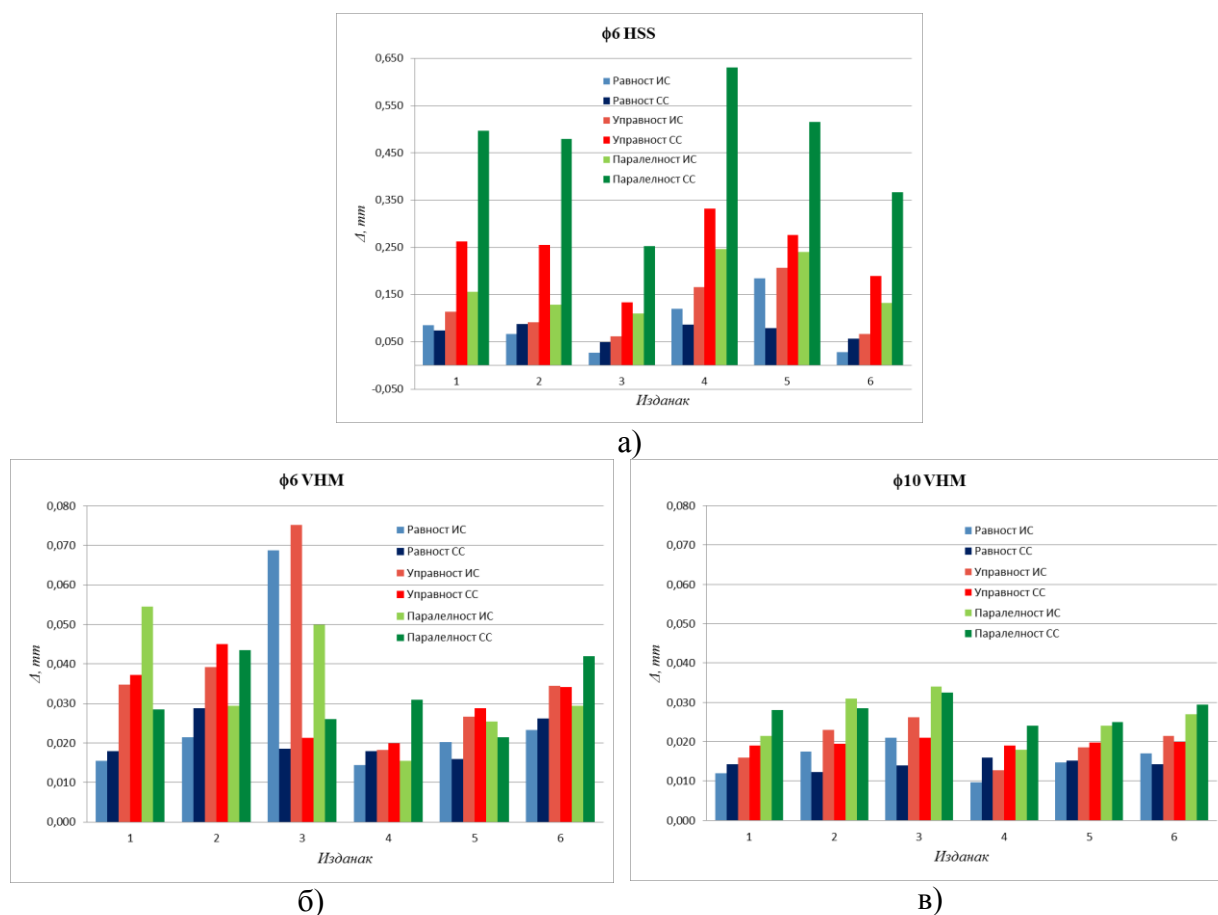
Слика 10.24. Одступање од паралелности за сва глодала



Слика 10.25. Дијаграми и корелативне једначине за ИС и СС глодање глодалом $\phi 10$ VHM са коефицијентима корелације R_k , за одступање од паралелности

10.2.4.5 Поређење геометријских одступања

На слици 10.26 приказано је поређење добијених резултата мерења свих геометријских одступања. Код обраде глодалом $\phi 6$ HSS (слика 10.26-а) примећује се значајна разлика између одступања добијених истосмерним и супротносмерним глодањем. Одступања од управности и паралелности су најмање два пута већа код супротносмерног, док код равности то није случај. Код обраде глодалом $\phi 6$ VHM (слика 10.26-б) и глодалом $\phi 10$ VHM (слика 10.25-в) тренд одступања се мења и мање су разлике с обзиром на смер глодања.



Слика 10.26. Поређење геометријских одступања за сва глодала

Поређењем наведених дијаграма примећује се значајно смањење геометријских одступања применом различитих глодала. Тако се заменом глодала $\phi 6$ HSS глодалом $\phi 6$ VHM вредности одступања смањују и до 10 пута, док се заменом глодала $\phi 6$ VHM глодалом $\phi 10$ VHM вредности геометријских одступања смањују приближно два пута.

10.3 Испитивање утицаја грешке стезања и радијалног одступања зуба глодала на површинску топографију

Овим експериментом испитан је и анализиран утицај грешке стезања глодала, као и грешке услед радијалног одступања зуба глодала (до које долази услед израде, односно хабања) на генерисану површину дела. Грешка стезања узима у обзир паралелну помереност осе глодала као и закошеност осе глодала у односу на осу радног вретена машине. Грешка израде, односно хабања зуба глодала, подразумева промену полупречника сваког зуба глодала појединачно. Топографија површине је добијена применом модела наведеног у поглављу 8 (једначина 14) помоћу софтвера *MatLAB* и упоређена са измереним и снимљеним (камером) профилом површинске храпавости.

10.3.1 Материјали и опрема

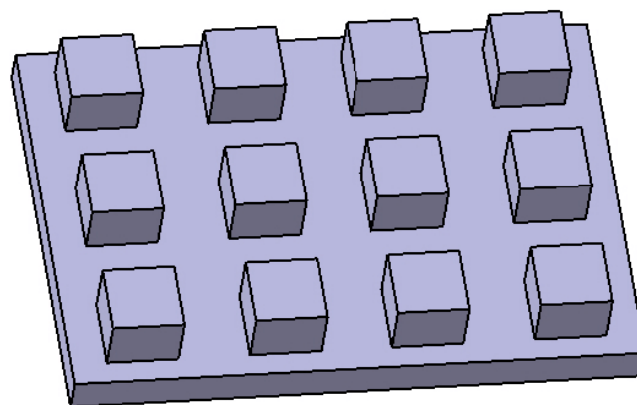
Експериментална испитивања су вршена на 3-осној вертикалној глодалици *HAAS TM-1* са три CNC контролисане осе (слика 10.27), која се налази на Факултету инжењерских наука Универзитета у Крагујевцу у оквиру лабораторије за производно машинство. Карактеристике вертикалне глодалице *Haas TM-1* су: опсег оса X-Y-Z: 762-305-406 mm, максимални број обртаја 4000 o/min, брзина помоћног кретања оса 5,1 m/min, укупна снага 5,6 kW.



Слика 10.27. Глодалица HAAS TM-1

Коришћени алат је вретенасто глодало од тврдог метала (VHM): пречника 15 mm, дужине резног дела 28 mm, дужине препуста 50 mm, укупне дужина 84 mm, угла завојнице 30° и броја зуба 4. Изабрано глодало је већег пречника из разлога како би се утицај угиба алата свео на минимум, као и да би трагови зуба били видљивији.

Припремак је призматична плоча од легуре алуминијума 6005A-T6 (особине ове легуре наведене су у потпоглављу 10.1), димензија 135x100x25 mm на којој су са једне стране израђени призматични изданци (слика 10.28) димензија основе 20x20 mm и висине 16 mm. Израда изданака (припремака) вршена је вретенстим глодалом пречника 20 mm (велике крутости) са већим бројем пролаза. На тај начин су добијени изданци тачних димензија без одступања услед могућег угиба алата. Подразумева се да су грешке услед осталих фактора обраде једнаке нули, односно да је систем машина-алат-стегање апсолутно крут.



Слика 10.28. Геометрија припремка

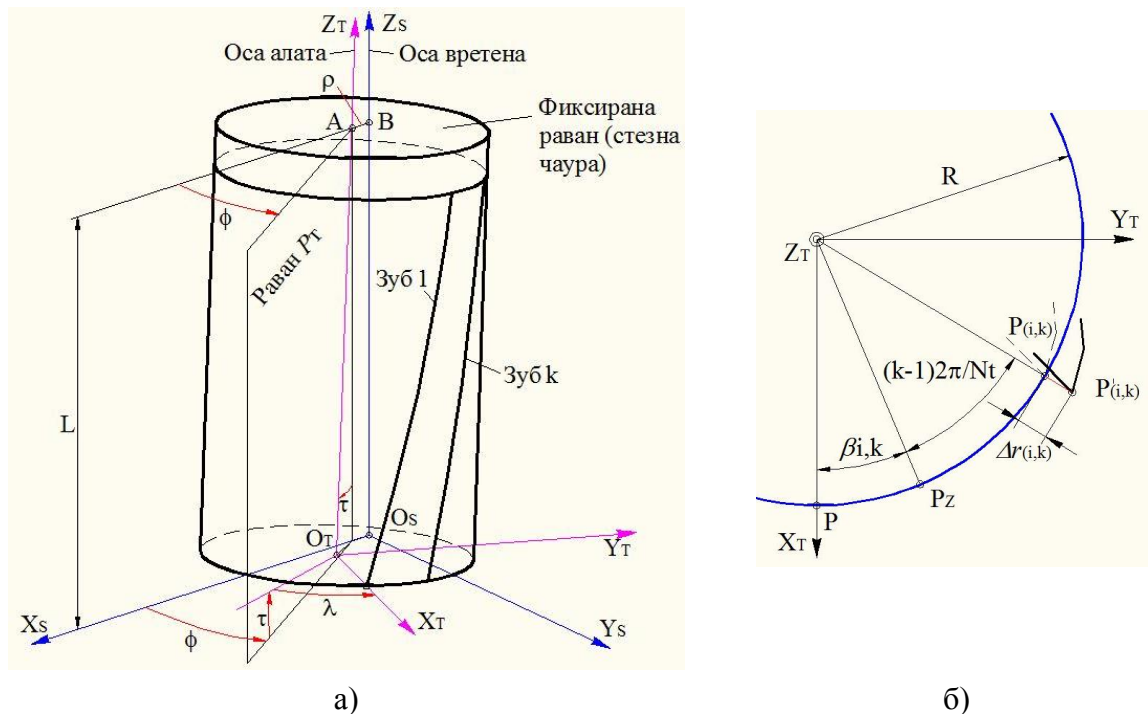
Топографија површине (слике и једначине путања зуба глодала) добијена је применом модела наведеног у поглављу 8 (једначина 14) помоћу софтвера *MatLAB R2015a*. Коначне једначине кретања резних ивица су дате у облику:

$$\begin{bmatrix} x_{PA(i,k)}^{(\alpha)} \\ y_{PA(i,k)}^{(\alpha)} \\ z_{PA(i,k)}^{(\alpha)} \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos(\alpha) & \sin(\alpha) & 0 & \frac{f}{2\pi}\alpha \\ -\sin(\alpha) & \cos(\alpha) & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & \rho \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \cos(\phi) & -\sin(\phi) & 0 & 0 \\ \sin(\phi) & \cos(\phi) & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

$$\begin{bmatrix} \cos(\tau) & 0 & -\sin(\tau) & L \cdot \sin(\tau) \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ \sin(\tau) & 0 & \cos(\tau) & L \cdot [1 - \cos(\tau)] \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \cos(\lambda) & -\sin(\lambda) & 0 & 0 \\ \sin(\lambda) & \cos(\lambda) & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

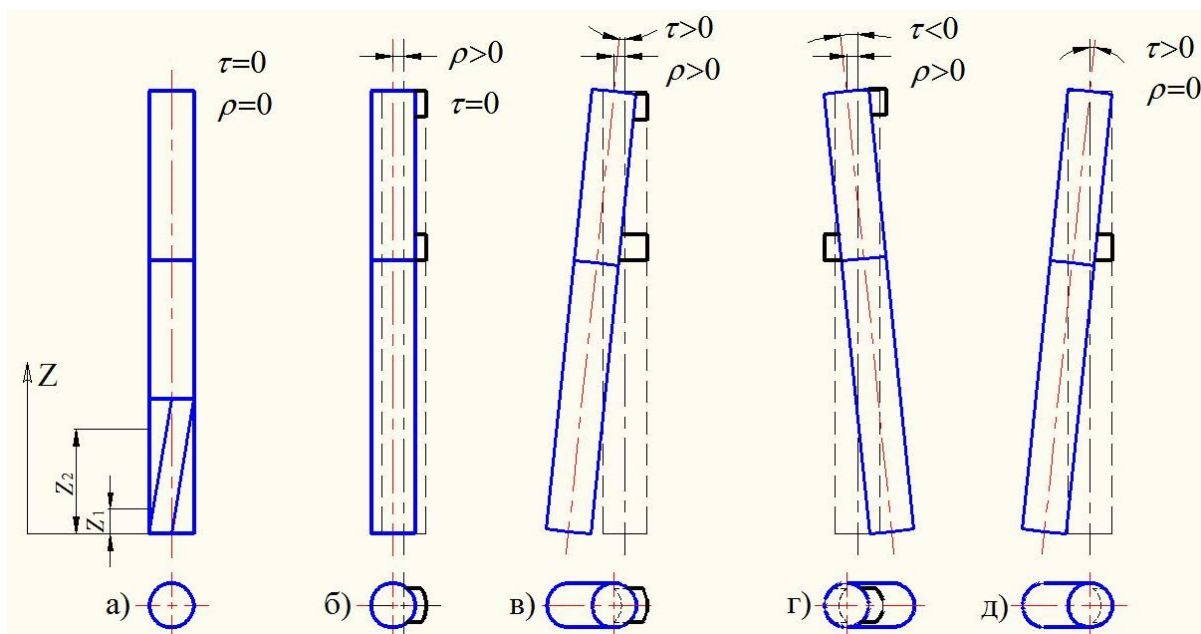
$$\begin{bmatrix} (R \pm \Delta r_{(i,k)}) \cdot \cos \left[\left(L - \frac{(L - z_i)}{\cos(\tau)} \right) \frac{\tan(\omega)}{R} + (k-1) \frac{2\pi}{N_t} \right] \\ (R \pm \Delta r_{(i,k)}) \cdot \sin \left[\left(L - \frac{(L - z_i)}{\cos(\tau)} \right) \frac{\tan(\omega)}{R} + (k-1) \frac{2\pi}{N_t} \right] \\ L - \frac{(L - z_i)}{\cos(\tau)} \\ 1 \end{bmatrix}$$

На слици 10.29-а приказани су параметри који дефинишу грешку постављања глодала у стезну чауру и то: паралелна помереност осе глодала од осе радног вретена (ρ , mm), угао закошења осе глодала од осе радног вретена (τ , °), угао постављања зуба 1 с обзиром на осу x (ϕ , °) и угао постављања (λ , °) зуба 1 с обзиром на раван P_T . На слици је са $X_S Y_S Z_S$ обележен координатни систем радног вретена, док је $X_T Y_T Z_T$ - координатни систем глодала који узима у обзир наведена одступања.



Слика 10.29. Параметри грешке постављања алата и радијалног одступања зуба

Избацивање глодала из осе и његово искошење извршено је уметањем ослонаца одговарајућих дебљина. Начин постављања ослонаца приказан је на слици 10.30.

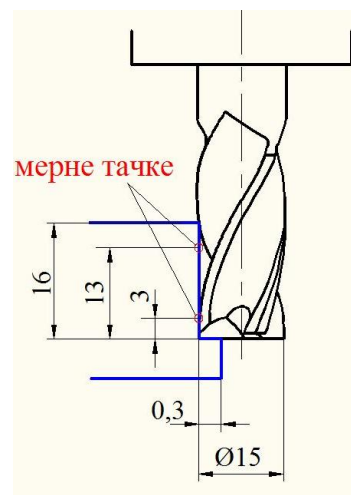


Слика 10.30. Варијанте експеримента са грешком стегања

Радијално одступање зуба $\Delta r_{(i,k)}$ (слика 10.29-б) глодала представљају радијалну помереност тачке врха резне ивице (из $P_{(i,k)}$ у $P'_{(i,k)}$) у радијалном правцу. Ова одступања мерена су компаратором на висини $Z=3$ mm и $Z=13$ mm (слика 10.31-а и слика 10.31-б).



а)



б)

Слика 10.31. План мерења радијалног одступања зуба и површинске храповости

Површинска храповост је мерена мерним системом *TALYSURF-6* повезаним са рачунаром (слика 10.9), а резултати су приказани на дијаграмима помоћу софтвера *Microsoft Excel*. Храповост је мерена на висини $Z=3$ mm и $Z=13$ mm изданка (слика 10.31-б).

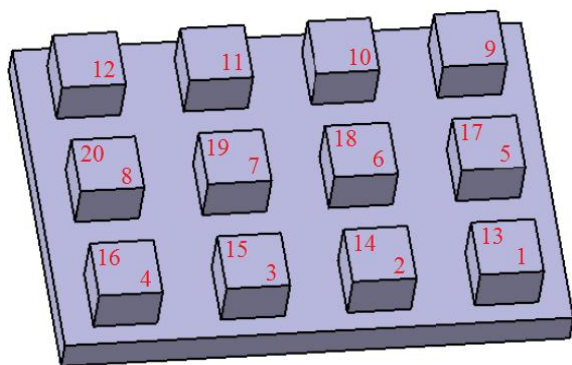
Храповост карактеристичних површина је фотографисана увеличавајућом дигиталном камером *EHEV1-200USB DIGITAL PEN* (слика 10.32). Карактеристике ове камере су: *high-quality CMOS* сензор са 2 MP, резолуција 1600x1200, прикључак USB2.0, број фрејмова у секунди 30, увећање од 1-400x и фокус 10mm - ∞ .



Слика 10.32. EHEVI-200USB DIGITAL PEN камера

10.3.2 План експеримента

Обрађивани делови, односно површине делова које су обрађиване су равни изданци призматичног облика, истих димензија, претходно обрађени на димензију 20x20x16 mm. На слици 10.33-а, приказан је CAD модел дела са планом обраде. Обрађиване су бочне (предње према слици) површине изданака (1, 2,..., 12) и бочне (задње према слици) површине изданака (13, 14,..., 20). На слици 10.33-б приказан је део након обраде.



а)

б)

Слика 10.33. План обраде изданака и обрађен део

Сви изданци су обрађивани супротносмерним глодањем. Обрада је вршена са бројем обртаја од 200 o/min, док је корак по зубу променљив и дат у табели 10.12. Ширина резања (аксијална дубина) износи 16 mm за све обрађене површине изданака. Дубина резања (радијална дубина) за све обрађене површине износи 0,3 mm.

Експеримент је изведен у 5 варијанти стезања. Прва варијанта (слика 10.30-а) узима у обзир само грешку радијалног одступања зуба. У другом случају (слика 10.30-б), оса глодала је померена за вредност $\rho > 0$, постављање зуба је $\lambda > 0$, док су остали параметри грешке стезања једнаки нули. Трећа варијанта (слика 10.30-в), осим позитивног параметра ρ , уводи и закошење осе $\tau > 0$. У четвртном случају (слика 10.30-г), оса глодала је померена за вредност $\rho > 0$, док је закошење изведено са супротне стране $\tau < 0$, а угао

постављања ϕ је позитиван. У петом стезању (слика 10.30-д) глодало није померено из осе ($\rho=0$), док је закошење присутно ($\tau>0$).

Измерене вредности радијалног одступања зуба на висини од 3 mm и висини од 13 mm, мерено од врха глодала, дате су у табели 10.11.

Табела 10.11. Вредности радијалног одступања зуба глодала

Висина	Z=3 mm				Z=13 mm			
Зуб	1	2	3	4	1	2	3	4
Одступање, Δr , mm	0,002	-0,009	-0,014	-0,014	0,002	-0,009	-0,012	-0,017

Вредности променљивих параметара обраде (корака) и параметара грешке стезања дате су у табели 10.12.

Табела 10.12. Параметри обраде и параметри грешке стезања

Варијанта	а				б				в				г				д			
Површина изданка	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
f_0 , mm/o	0,4	0,6	0,8	1,0	0,4	0,6	0,8	1,0	0,4	0,6	0,8	1,0	0,4	0,6	0,8	1,0	0,4	0,6	0,8	1,0
ρ , mm	0				0,005				0,005				0,005				0			
τ , °	0				0				0,005				-0,005				0,005			
ϕ , °	0				0				0				90				0			
λ , °	0				45				0				0				0			

10.3.3 Резултати и анализа резултата

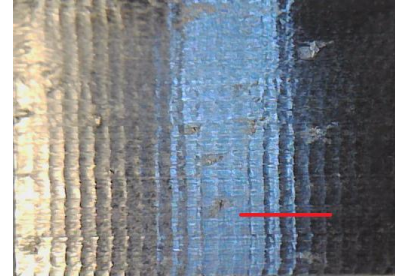
Помоћу наведеног модела добијене су линије кретања зуба. Уређајем за мерење хрпавости је измерена површинска хрпавост. Камером су фотографисане обрађене површине.

На следећим сликама (слике 10.34-а,б,...,и) приказани су резултати испитивања за све варијанте истраживања. Лево горе приказан је измерени профил површинске хрпавости приликом експеримента. Лево доле су линије кретања зуба добијене помоћу математичког модела. Десно горе је приказана фотографија обрађене површине, а испод ње увеличан сегмент мерене дужине профила (обележен црвеном линијом). Сlike се односе на вредности корака од 0,8 mm/o и 1,0 mm/o. Ове вредности корака су приказане из разлога боље прегледности и поклапања измерених вредности хрпавости са кривим добијеним из модела. Висина изданка на којој је мерена хрпавост износи 13 mm. Криве добијене помоћу модела такође се односе на висину 13 mm. Дужина мерења профила износи 4 mm.

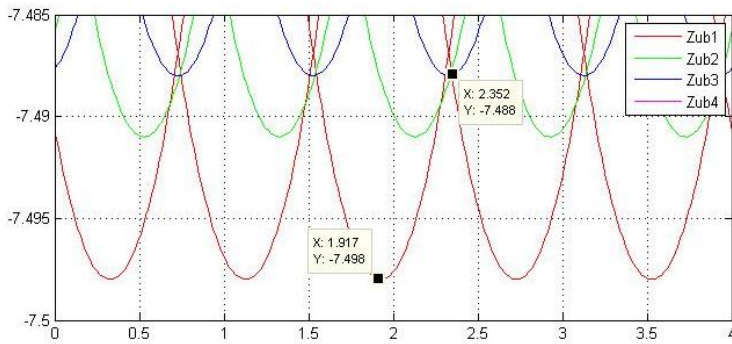
Варијанта **а** (слика 34-а,б) приказује како радијално одступање зуба утиче на генерисање површинске топографије. Посматрањем кривих добијених помоћу модела, које симулирају путање зуба са кораком од 0,8 mm/o (слика 34-а) може се закључити да у резању учествују два зуба (и трећи, чији је утицај незнатан). Зуб 1, који носи најмање одступање је најутицајнији зуб. Зуб 2 захвата део површине дела, док зуб 3 незнатно утиче на топографију. Утицај зуба 2 и зуба 3 постаје већи повећањем корака са 0,8 на 1,0 mm/o (слика 34-б). Такође се може приметити (очитати) смањење површинске хрпавости захваљујући ангажовању више зуба.

На осталим сликама (слике 34-в,г,...,и) приказани су додатни утицаји грешке стезања глодала и њиховог комбиновања на генерисање површинске топографије. Такође је видљив и утицај промене брзине помоћног кретања. Односно, са повећањем корака по зубу расте површинска хрпавост.

Експеримент



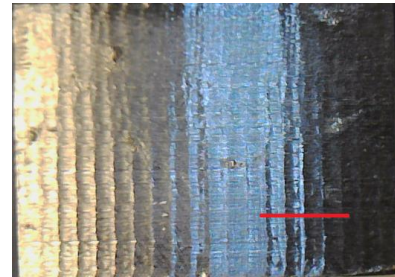
Математички модел



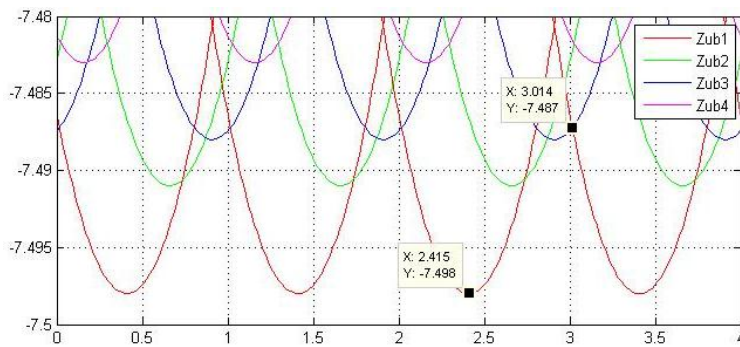
Варијанта-а
 $f_0=0,8 \text{ mm/o}$

Слика 10.34-а. Топографија бочне површине изданка 3

Експеримент



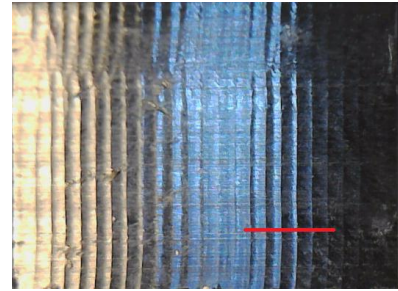
Математички модел



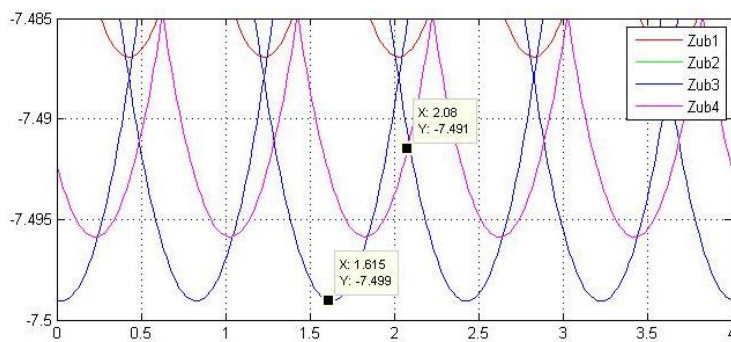
Варијанта-а
 $f_0=1,0 \text{ mm/o}$

Слика 10.34-б. Топографија бочне површине изданка 4

Експеримент



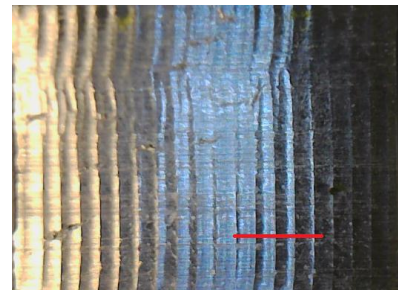
Математички модел



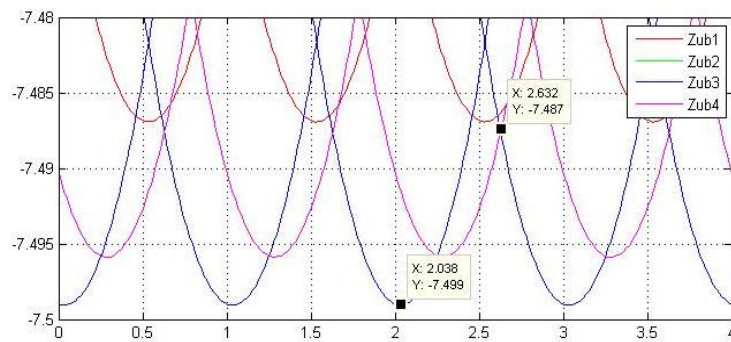
Варијанта-б
 $f_0=0,8 \text{ mm/o}$

Слика 10.34-в. Топографија бочне површине изданка 7

Експеримент



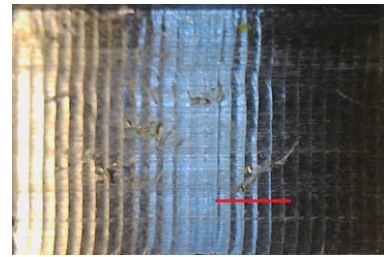
Математички модел



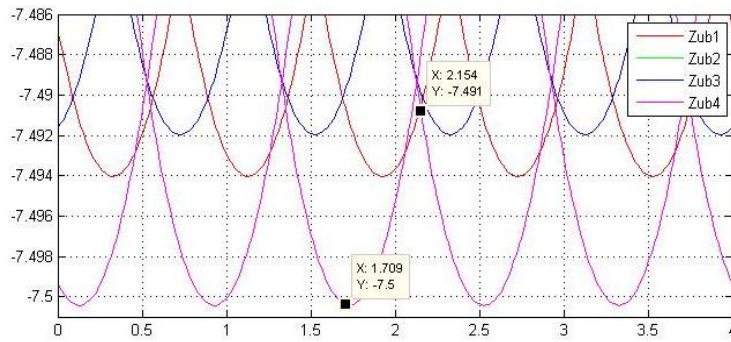
Варијанта-б
 $f_0=1,0 \text{ mm/o}$

Слика 10.34-г. Топографија бочне површине изданка 8

Експеримент



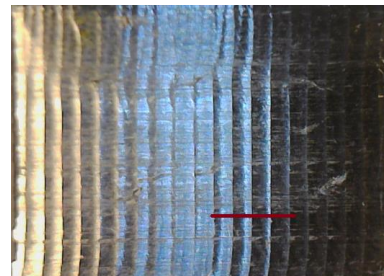
Математички модел



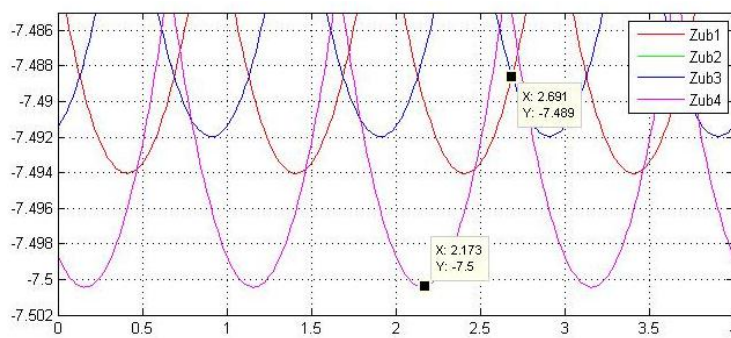
Варијанта-в
 $f_o=0,8 \text{ mm/o}$

Слика 10.34-д. Топографија бочне површине изданка 11

Експеримент



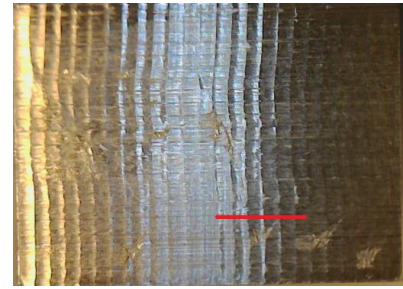
Математички модел



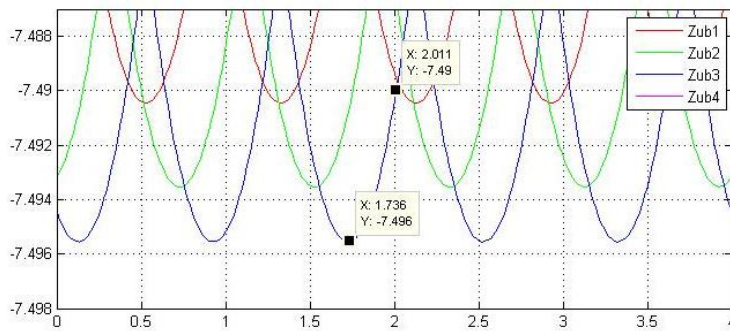
Варијанта-в
 $f_o=1,0 \text{ mm/o}$

Слика 10.34-ђ. Топографија бочне површине изданка 12

Експеримент



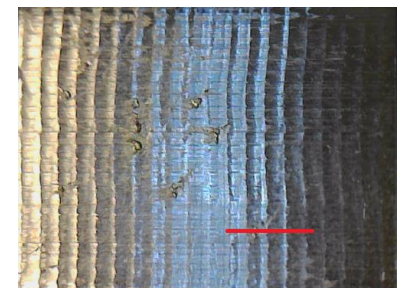
Математички модел



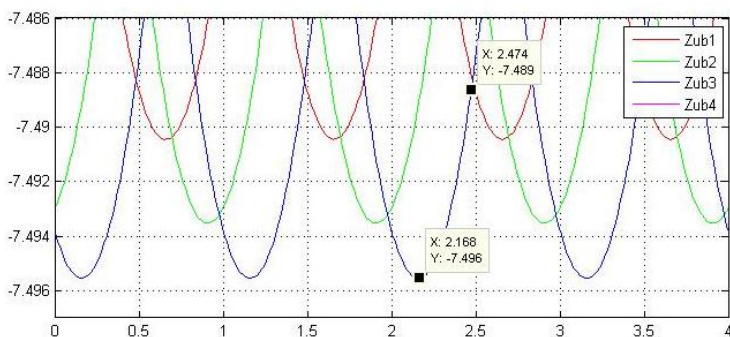
Варијанта-г
 $f_0=0,8 \text{ mm/o}$

Слика 10.34-е. Топографија бочне површине изданка 15

Експеримент



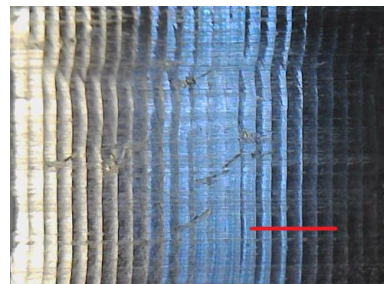
Математички модел



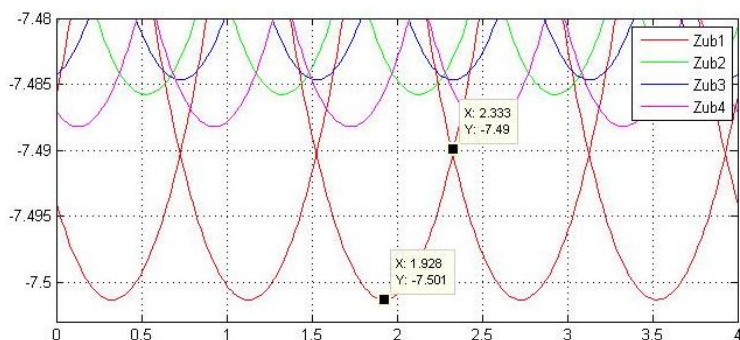
Варијанта-г
 $f_0=1,0 \text{ mm/o}$

Слика 10.34-ж. Топографија бочне површине изданка 16

Експеримент



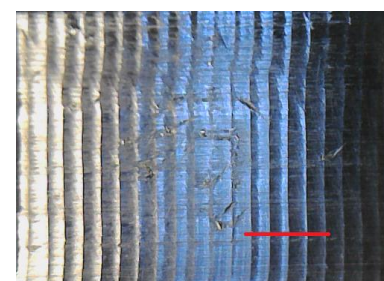
Математички модел



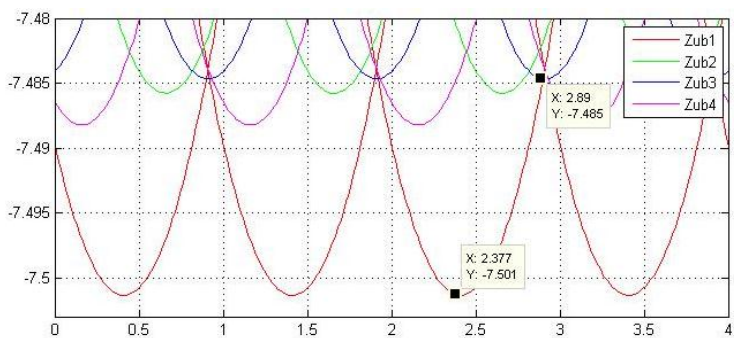
Варијанта- δ
 $f_0=0,8 \text{ mm/o}$

Слика 10.34-з. Топографија бочне површине изданка 19

Експеримент



Математички модел



Варијанта- δ
 $f_0=1,0 \text{ mm/o}$

Слика 10.34-и. Топографија бочне површине изданка 20

На основу резултата експерименталних испитивања потврђена је исправност математичког модела за одређивање површинске топографије.

С обзиром да модел прати положај кретања зуба у простору, могуће је измерити рачунске висине неравнина (храпавости) које остављају зуби. Осим тога, мерењем бочног померања зуба, односно одступања од жељене дубине резања, могуће је измерити и димензионално одступање. Могуће је пратити померање путања зуба и по висини, самим тим и измерити и рачунска геометријска одступања.

Како се на основу наведеног модела може предвидети површинска топографија и одредити димензионална и геометријска одступања, тако се непосредно пре обраде, мерењем параметара грешке стезања и радијалног одступања зуба, може извршити корекција *NC* кода и побољшати квалитет обраде.

10.4. Утицај промене дубине резања (корекције путање алата) на димензионална и геометријска одступања

У овом експерименту извршена је обрада изданака са различитим дубинама глодања, а зстим је извршено мерење дужинских и геометријских мера површина изданака. Овакав поступак мењања дубине глодања примењује се приликом корекције путање при завршној (финој) обради ради постизања жељене димензионалне и геометријске тачности.

Прво је изведена обрада свих површина изданака са истом (референтном) дубином (путањом). Путања алата је померана за различите вредности дубине, док је обрада вршена и празним другим пролазом. Све варијанте су изведене супротносмерним и истосмерним глодањем. Циљ експеримента је одређивање утицаја корекције путање алата регенерисањем *NC* кода на димензионална и геометријска одступања. Приказан је и поступак регенерисања *NC* кода применом модела (развијеног у поглављу 9) са мапом померања положаја алата.

10.4.1 Материјали и опрема

Експериментална испитивања су вршена на 3-осној вертикалној глодалици *HAAS TM-1* (чије су карактеристике наведене у потпоглављу 10.3) са три *CNC* контролисане осе (слика 10.35), која се налази на Факултету инжењерских наука Универзитета у Крагујевцу у оквиру лабораторије за производно машинство.

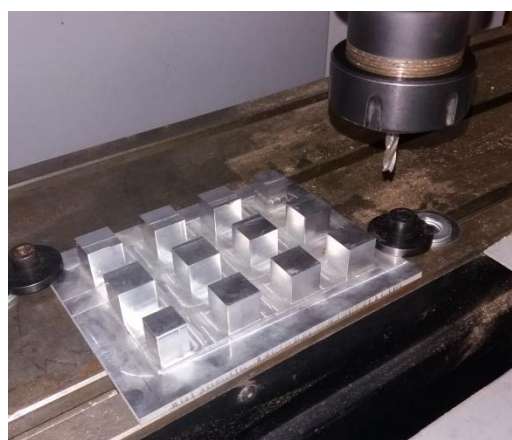
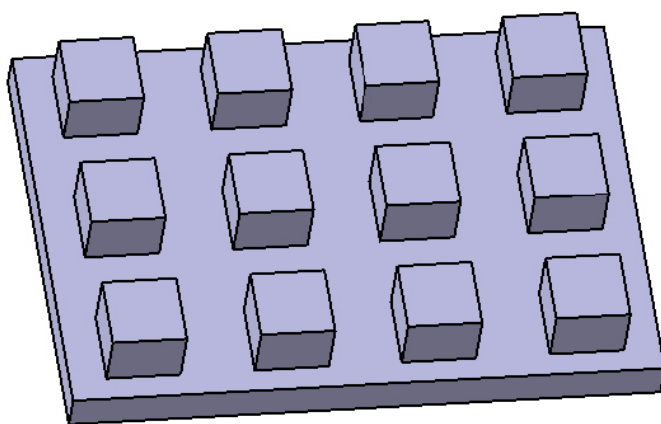


Слика 10.35. Глодалица *HAAS TM-1*

Коришћени алат је вретенасто глодало од брзорезног челика следеће геометрије: пречник 6 mm, дужина резног дела 18 mm, дужина препуста 32 mm, укупна дужина 58 mm, угао завојнице 30° и број зуба 4.

Припремак (полазни комад) је плоча од легуре алуминијума 6005A-T6 (особине ове легуре наведене су у потпоглављу 10.1), димензија 135x100x25 mm на којој су са једне стране израђени призматични изданци (слика 10.36) димензија основе 20x20 mm и висине 16 mm. Израда изданака (припремака) вршена је вретеним глодалом пречника 20 mm (велике крутости) са већим бројем пролаза. На тај начин су добијени изданци релативно тачних димензија, односно без одступања услед могућег угиба алата.

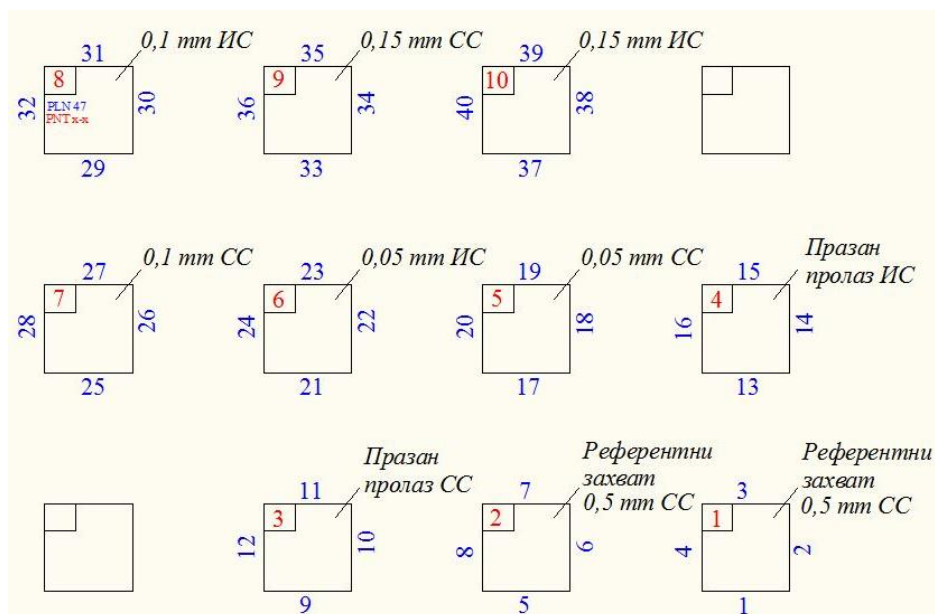
Обрађене површине изданака мерене су на CNC координатној мерној машини *DEA GLOBAL Silver Performance* (слика 10.11), чије су перформансе наведене у потпоглављу 10.1. Резултати мерења обрађени су помоћу софтвера *PC DMIS* и добијене су вредности димензионалних и геометријских одступања.



Слика 10.36. CAD модел дела и део на радном столу машине

10.4.2 План експеримента

Површине изданака обрађиване су према плану приказаном на слици 10.37.



Слика 10.37. План обраде изданака

Експеримент је изведен са непромењеном ширином резања од 12 mm. Сви изданци су обрађивани првим пролазом са дужином резања од 0,5 mm. Изданци 1 и 2 нису обрађивани накнадним (другим) пролазом и они су послужили као референтни, тако да је у односу на њих анализирано добијено одступање осталих изданака. Следећи изданци су обрађивани другим пролазом (дорадом), комбиновањем различитих дубина резања и смером глодања. Тако су изданци 3 и 4 обрађени празним пролазом (са дужином од 0 mm) супротносмерно и истосмерно. Изданци 5 и 6 су обрађени пролазом са дужином од 0,05 mm, супротносмерним и истосмерним глодањем. Повећаном дужином резања (од 0,1 mm) обрађени су изданци 7 и 8, такође супротносмерним и истосмерним глодањем. Дубина је поново повећана (на 0,15 mm) па су супротносмерним и истосмерним глодањем обрађени изданци 9 и 10.

Сви изданци су обрађивани истим параметрима резања: бројем обртаја 4000 о/min (брзина резања 75,4 m/min) и брзином помоћног кретања од 500 mm/min (корак по зубу 0,031 mm/z).

Мерење на координатној мерној машини изведено је тако да је свака површина обрађеног изданка (површине од 1 до 40 на слици 10.37) мерена по матрици од 7x4 (28) тачака. Добијени резултати мерења су обрађени у софтверу *PC DMIS* и израчуната су димензионална и геометријска одступања.

10.4.3 Резултати и анализа резултата

Резултати измерених величина (дужинских и геометријских мера) обрађених изданака, односно њихове просечне вредности измерене по површини изданка, за супротносмерно (СС) и истосмерно (ИС) глодање, према описаном плану експеримента, дате су у табели 10.13.

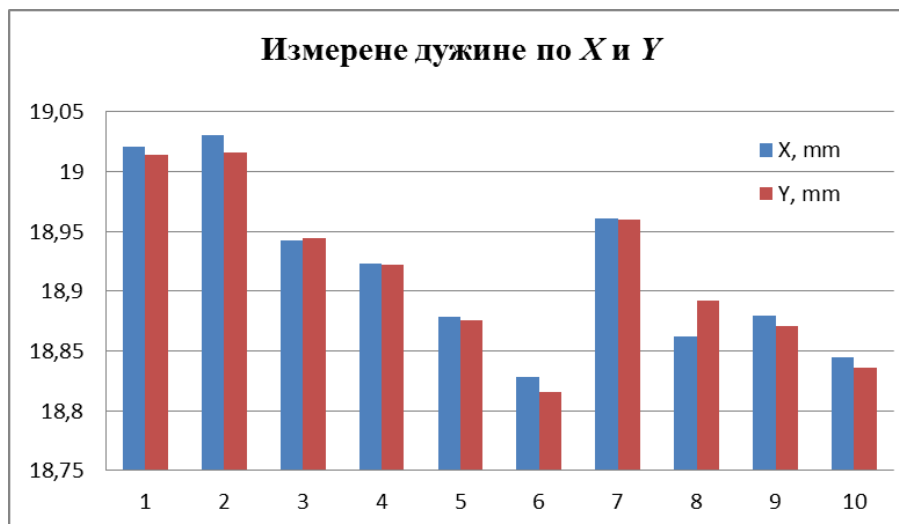
Табела 10.13. Вредности измерених величина изданака

Изданак	1	2	3	5	7	9	4	6	8	10	
Број на дијаграму	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	
1 пролаз	0,5 mm / СС										
2 пролаз	дубина, mm	-	-	0	0,05	0,10	0,15	0	0,05	0,10	0,15
	смер	-	-	СС				ИС			
X, mm	19,021	19,030	18,942	18,923	18,878	18,828	18,961	18,862	18,879	18,845	
Y, mm	19,014	19,016	18,944	18,922	18,876	18,816	18,96	18,892	18,871	18,836	
ΔX, mm	0,021	0,030	-0,058	-0,077	-0,122	-0,172	-0,039	-0,138	-0,121	-0,155	
ΔY, mm	0,014	0,016	-0,056	-0,078	-0,124	-0,184	-0,040	-0,108	-0,129	-0,164	
Равност	0,117	0,104	0,010	0,038	0,046	0,247	0,047	0,142	0,221	0,249	
Паралелност	0,221	0,206	0,023	0,031	0,063	0,610	0,096	0,333	0,457	0,666	
Управност	0,142	0,140	0,033	0,052	0,063	0,342	0,075	0,194	0,276	0,360	

На основу наведених вредности одступања, у програмском пакету *Microsoft Office Excel*, добијени су одговарајући дијаграми одступања.

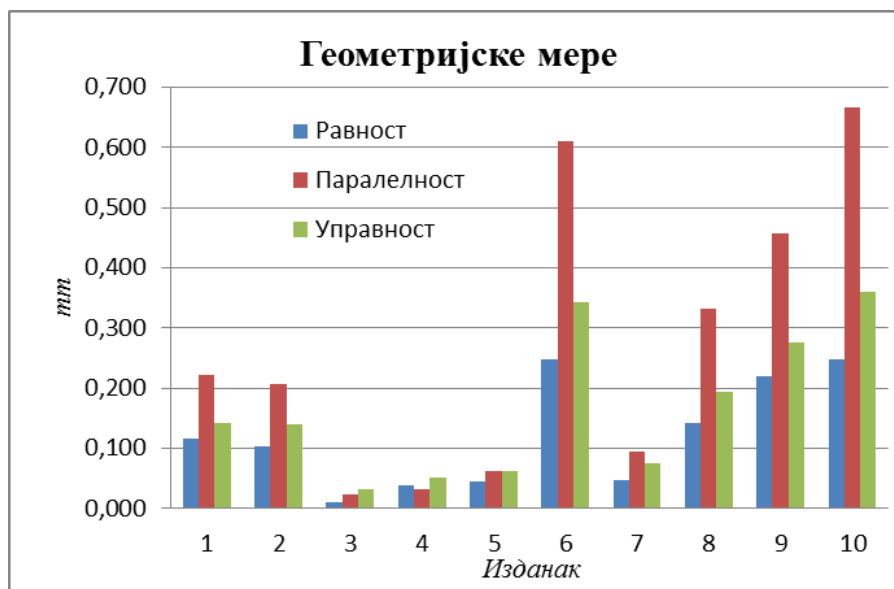
На слици 10.38 приказан је дијаграм добијених дужинских мера по изданку у *X* и *Y* правцу. Са слике су може уочити да су неке мере у складу са очекиваним. Прва два изданка на дијаграму, добијена су једним пролазом са 0,5 mm корекцијом путање (дужином). Измерене величине у *X* и *Y* правцу су незнатно веће, са позитивним прираштајем Δ (од 0,021 mm у *X* правцу и 0,014 mm у *Y* правцу) у односу на очекивану меру (19 mm).

Карактеристични су и резултати мера изданака 3 и 7, добијени празним пролазом (са дубином једнаком 0, односно без корекције путање) супротносмерним и истосмерним пролазима. Иако неочекивано, глодањем је уклоњен одређени слој материјала и задату меру (од 19 mm) остварила мањом. Примећује се и да је при истосмерном глодању уклоњено незнатно више материјала у односу на супротносмерно глодање.



Слика 10.38. Измерене вредности дужина изданака по X и Y осци

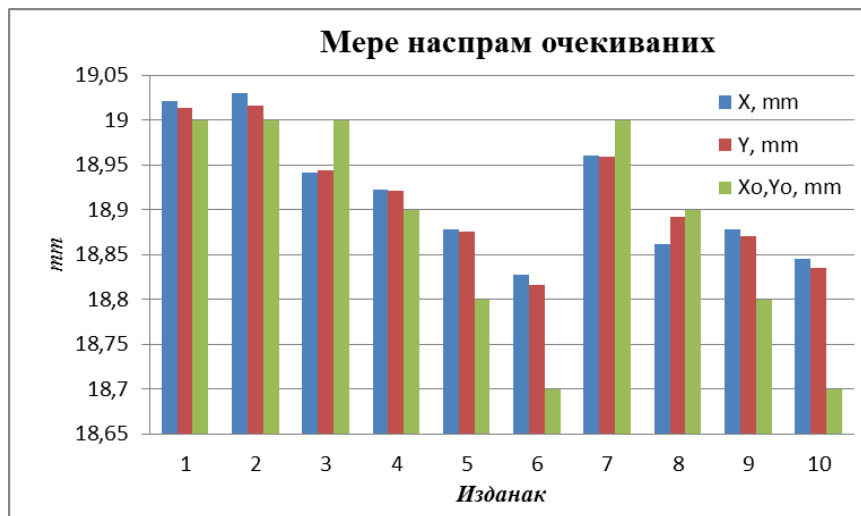
На слици 10.39 приказане су измерене вредности геометријских мера (равности, паралелности и управности) површина изданака. Видно је да се боље геометријске мере добијају мањом дубином резања, односно мањом корекцијом путање. Јасно је да је најбољи геометријски квалитет површине добијен поновним (празним) пролазом (изданци 3 и 4). Ово се може приписати угибу (савијању) вретенастог глодала, која расте са повећањем дубине резања тј. повећањем отпора резања.



Слика 10.39. Геометријске мере површина изданака

Тако је поновљени (празан) пролаз довео до најтачније дужинске и геометријске мере, док су неке дубине резања довеле до неочекиваних резултата које треба посебно размотрити. Треба нагласити и разлике добијених мера од очекиваних за супротносмерно и истосмерно глодање.

На слици 10.40 приказано је одступање мера изданака у X и Y правцу од очекиваних мера X_0 и Y_0 . Са ове слике се може анализирати утицај изданка, односно вредности корекције путање (дубине) на очекивану меру. Такође је могуће анализирати утицај смера резања (истосмерног и супротносмерног) на тачност мере.



Слика 10.40. Измерене вредности дужинских мера изданака наспрам очекиваних

На основу изведеног експеримента могуће је одредити вредности корекције (померања) путање алата (модела развијеног у поглављу 9). На слици 10.41-а приказана је скица обраде са очекиваним и стварним (измереним) путањама алата, као и компензоване путање које доводе до тачне мере, за меру у X правцу. На слици 10.41-б приказане су вредности параметара за обраду изданка 5. Обрада је вршена са два пролаза, grubим и финим пролазом. Компензација је извршена у оба пролаза. Првим пролазом, уместо очекиване путање (пуна плава линија десно) добија се стварна путања (испрекидана црвена линија десно). Другим пролазом, уместо очекиване путање (пуне плаве линије лево), добиће се стварна путања (испрекидана црвена линија лево). Првом компензацијом (задавањем померања v_1) извршиће се корекција првог пролаза, чиме ће се стварна путања померити за вредност корекције путање v_1 (црвена испрекидана линија лево помериће се до прве испрекидане зелене линије лево). Другом компензацијом (задавањем корекције v_2) извршиће се корекција другог пролаза, чиме ће се стварна путања померити за вредност корекције v_2 и добити очекивана мера (средња испрекидана зелена линија помериће се лево до испрекидане зелене линије).

На слици 10.41-а приказане су:

- a_{10} , a_{20} - задате (очекиване) дубине резања првог и другог пролаза,
- a_{1S} , a_{2S} - стварне (измерене) дубине резања првог и другог пролаза,
- Δa_{1S} , Δa_{2S} - одступања стварне путање од очекиване за први и други пролаз и
- v_1 , v_2 - вредности корекције путање алата за први и други пролаз.

Параметри обраде (померања) се могу одредити на основу слике 10.41, па је:

$$X_2 = X_1 - 2 \cdot a_1$$

$$X_3 = X_2 - 2 \cdot a_2$$

$$a_1 = (X_1 - X_2)/2$$

$$a_2 = (X_2 - X_3)/2$$

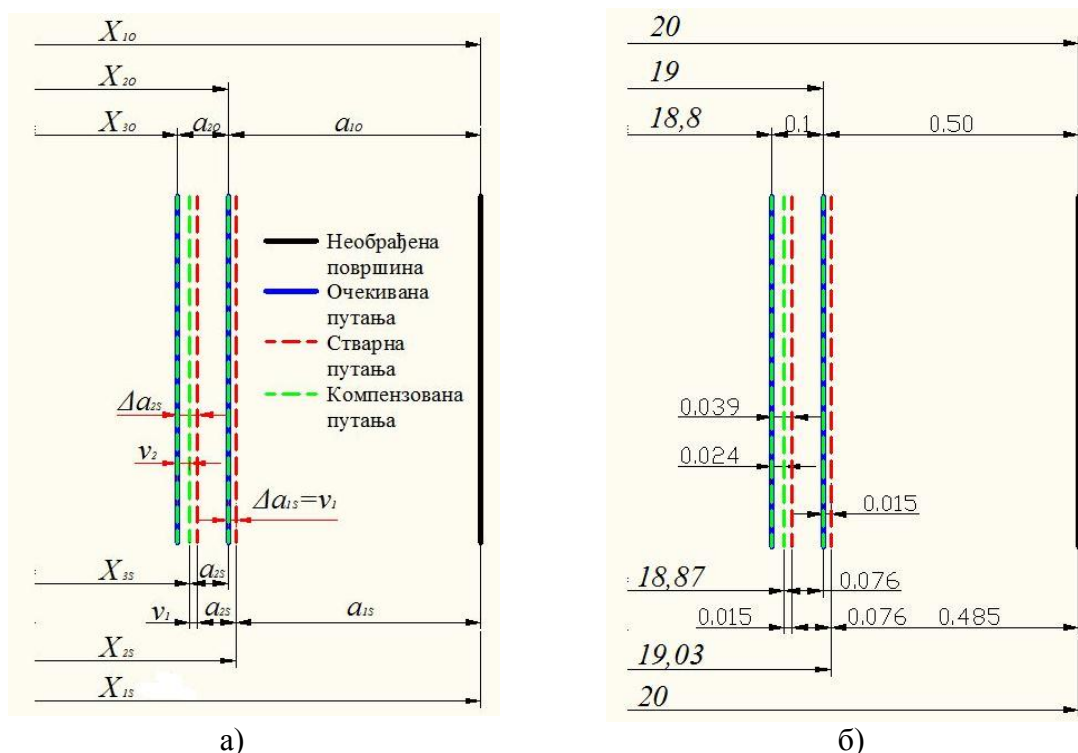
$$\Delta a_1 = a_{10} - a_{1S}$$

$$\Delta a_2 = (a_{10} + a_{20}) - (a_{1S} + a_{2S})$$

Вредности корекције путање се могу одредити из једначина:

$$v_1 = a_{10} - a_{1S}$$

$$v_2 = a_{20} - a_{2S}$$



Слика 10.41. Приказ одступања стварне путање од очекиване путање

На основу наведених резултата експерименталних испитивања (табела 10.13), могуће је одредити наведене параметре померања путања алата за први и други пролаз, за све дубине резања (изданке - варијанете експеримента). На основу очекиваних и добијених (стварних) дубина резања једноставно се долази до вредности корекције путања за сваки пролаз. Скуп овако добијених вредности корекције путања чини мапу померања положаја алата за обраду свих изданака дела (табела 10.14). Табела садржи вредности параметара померања и вредности корекције положаја путање алата за очекиване (О) и измерене - стварне вредности (С). Како су изданци 1 и 2 референтни, они нису унети у табелу. На основу референтног изданка 2, изабрана је димензија након првог пролаза ($X_2=19,03$ mm) и додатак након првог пролаза ($a_1=0,485$ mm).

Табела 10.14. Мапа померања положаја алата

Параметар	Изданак															
	3		4		5		6		7		8		9		10	
	О	С	О	С	О	С	О	С	О	С	О	С	О	С	О	С
X_1	20		20		20		20		20		20		20		20	
X_2	19	19,03	19	19,03	19	19,03	19	19,03	19	19,03	19	19,03	19	19,03	19	19,03
X_3	19	18,942	18,9	18,923	18,8	18,878	18,7	18,828	19	18,961	18,9	18,862	18,8	18,879	18,7	18,845
a_1	0,5	0,485	0,50	0,485	0,50	0,485	0,5	0,485	0,5	0,485	0,5	0,485	0,5	0,485	0,5	0,485
a_2	0	0,044	0,05	0,053	0,1	0,076	0,15	0,101	0	0,034	0,05	0,084	0,1	0,075	0,15	0,093
Δa_1	0,015		0,015		0,015		0,015		0,015		0,015		0,015		0,015	
Δa_2	-0,029		0,012		0,039		0,064		-0,019		-0,019		0,04		0,072	
v_1	0,015		0,015		0,015		0,015		0,015		0,015		0,015		0,015	
v_1	-0,044		0,003		0,024		0,049		-0,034		-0,034		0,025		0,057	

Из табеле 10.14 могу се очитати вредности корекције сваке путање пролаза приликом обраде изданака и помоћу њих извршити корекцију (регенерисање) NC кода.

На слици 10.42-а приказан је генерисани *NC* код, док је на слици 10.42-б приказан *NC* код регенерисан уносом вредности потребне корекције путање по *X* оси, приликом обраде изданка 5.

```

NC kod kockica Disertacija - Notepad
File Edit Format View Help
%
012005
(Experiment Lazarevic 11-3-2017)
N10 G49 G54 G64 G17 G80 G0 G90 G40 G99
(NC Kod - Kockica 5 SS)
N20 T0001 M6
N30 X0. Y0. S4000 M3
N40 G00 Z5.

N50 G94 G1 X0. Y0. F500.
N60 G1 X3. Y-4.
N70 G1 Z-8.
N90 G1 X3. Y-4.

N100 G1 X2.5 Y-3.
N110 G1 X2.5 Y22.5
N120 G1 X-22.5 Y22.5
N130 G1 X-22.5 Y-2.5
N140 G1 X2.5 Y-2.5

N150 G1 X2.4 Y-3.
N160 G1 X2.4 Y22.4
N170 G1 X-22.4 Y22.4
N180 G1 X-22.4 Y-2.4
N190 G1 X2.4 Y-2.4

N350 G1 Z5.
N360 G00 Z200.
N370 M5
N380 M30
N390 M2
N400 M30
%

NC kod Regenerisan kockica Diserta...
File Edit Format View Help
%
012005
(Experiment Lazarevic 11-3-2017)
N10 G49 G54 G64 G17 G80 G0 G90 G40 G99
(NC Regenerisani Kod - Kockica 5 SS)
N20 T0001 M6
N30 X0. Y0. S4000 M3
N40 G00 Z5.

N50 G94 G1 X0. Y0. F500.
N60 G1 X3. Y-4.
N70 G1 Z-8.
N90 G1 X3. Y-4.

N100 G1 X2.515 Y-3.
N110 G1 X2.515 Y22.5
N120 G1 X-22.515 Y22.5
N130 G1 X-22.515 Y-2.5
N140 G1 X2.5 Y-2.5

N150 G1 X2.424 Y-3.
N160 G1 X2.424 Y22.4
N170 G1 X-22.424 Y22.4
N180 G1 X-22.424 Y-2.4
N190 G1 X2.424 Y-2.4

N350 G1 Z5.
N360 G00 Z200.
N370 M5
N380 M30
N390 M2
N400 M30
%

```

а) б)
Слика 10.42. Генерисани и регенерисани *NC* код за обраду изданка 5

На наведени начин може се генерисати и путања по *Y* оси.

Из наведеног експеримента се може извести закључак да се очекивана димензионална и геометријска мера обрадом глодањем вретенастим глодалом може остварити задавањем одговарајуће вредности дубине резања која би требало да доведе до тачне мере. Односно, корекцијом путање алата (регенерисањем *NC* кода), тј. задавањем одговарајућих вредности за дубину резања, могуће је остварити жељену тачност.

Поглавље 11

ГЕНЕРИСАЊЕ ПОВРШИНЕ, МЕРЕЊЕ ОДСТУПАЊА И АНАЛИЗА

Развој савремене мерне опреме креће се у смеру усавршавања бесконтактних уређаја који омогућавају добијање великог броја тачака које описују површину дела за кратко време. Међутим, координатне мерне машине још увек представљају прецизнију мерну опрему. У оквиру овог поглавља описан је поступак генерисања површине из облака тачака, начин мерења одступања генерисаних површина од *CAD* модела и извршена анализа добијених резултата мерења.

Делови који су мерени су делови добијени обрадом приликом експерименталних испитивања приказаних у потпоглављу 10.2. Мерења су вршена на координатној мерној машини (*CMM*) и различитим скенерима. Резултати мерења су процесирани у софтверима за реконструкцију површина и мерење и то *CATIA*, *MatLAB*, *PC DMIS* и *Gom Inspect*. На крају је извршена анализа и поређење добијених резултата мерења.

11.1 Добијање облака тачака

Делови добијени обрадом приликом експерименталних испитивања (потпоглавље 10.2) измерени су на *CMM* као и на три различита скенера. Коришћењем резултата мерења са *CMM* креиран је облак тачака и такав даље процесираан.

11.1.1 Добијање облака тачака на *CMM*

Мерење делова вршено је на *CNC* мерној машини *DEA GLOBAL Silver Performance* (слика 10.11), чије су перформансе наведене у потпоглављу 10.1. Резултати мерења, односно координате тачака су увезене у софтвер *PC DMIS* где су обрађене, а резултати приказани у потпоглављу 10.2.

У овом делу дисертације је приказан поступак добијања датотеке облака тачака из података резултата мерења са *CMM*, који се касније користио за мерење у софтверу *GOM Inspect*.

Да би се резултати мерења могли увести у софтвер за мерење *GOM Inspect*, потребно их је трансформисати у формат који програм препознаје.

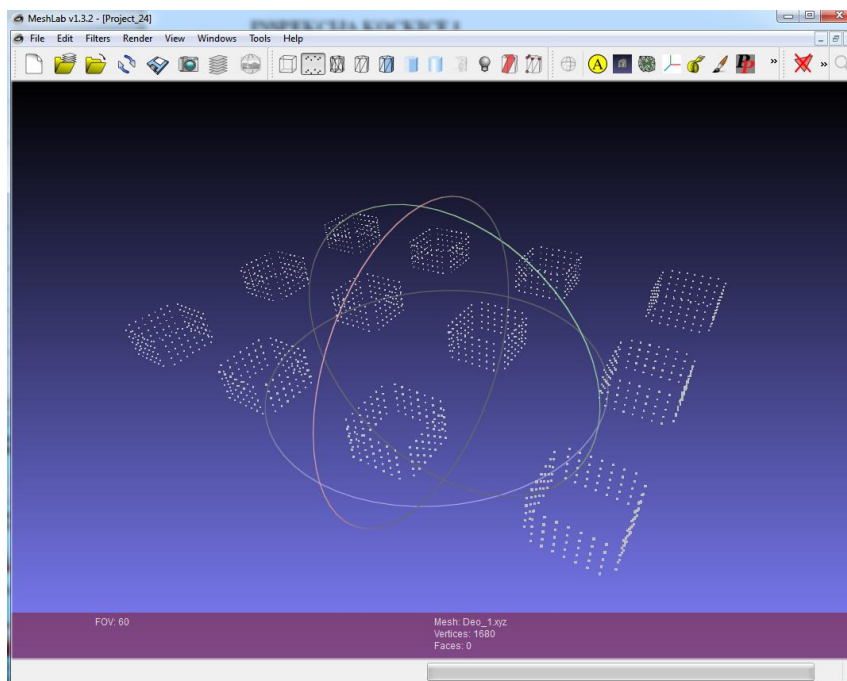
На слици 11.1 приказан је план мерења изданака на *CMM*, где су *PNT* - тачке које се налазе на (припадају) одговарајућој површини *PLN*. Изданци обрађени истосмерним глодањем обележени су са И, док су са С обележени изданци обрађени супротносмерним глодањем. Свака вертикална површина изданка мерена је преко матрице 5x7 тачака, па је добијено 35 тачака по једној површини изданка, што се може видети на слици 11.2.

У даљем раду су приказани само резултати добијени мерењем дела 1, обрађеног глодалом $\phi 6$ *VHM*.

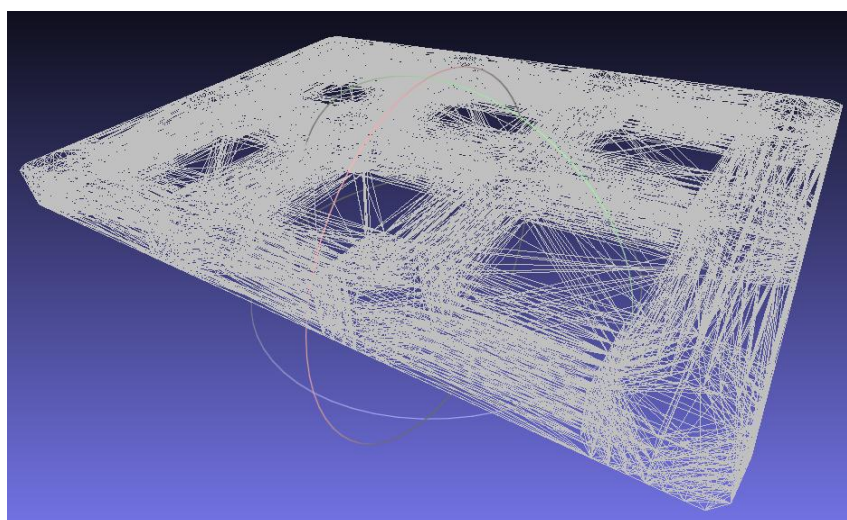


Слика 11.1. План мерења изданака на *CMM*

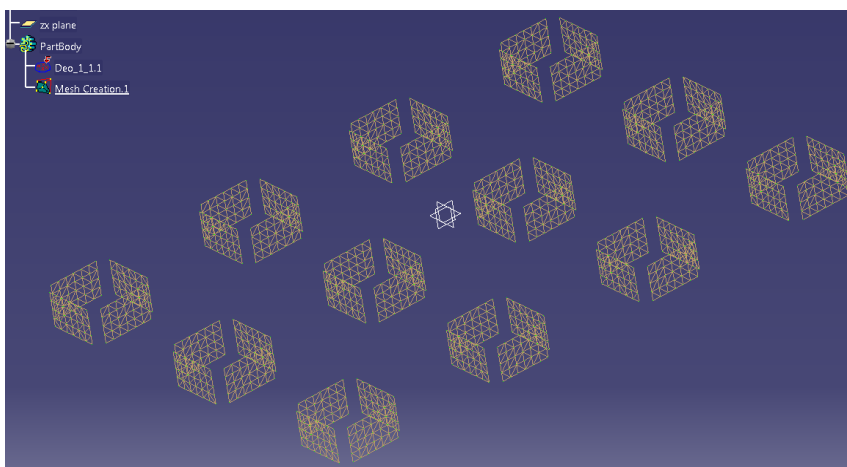
CMM на којој је извршено мерење не генерише стандардну датотеку облака тачака (*STL* датотеку). Међутим, као резултат мерења, између осталих, добијена је *XYZ* датотека, која садржи координате измерених тачака и она је послужила за добијање *STL* датотеке помоћу софтвера *MeshLab*. Након што је *XYZ* датотека увезена у *MeshLab* (слика 11.2), извршена је триангулација, а затим је иста извезена као *STL* датотека. Како триангулација није дала добру конфигурацију мреже (слика 11.3), *STL* датотека је поново увезена у *CATIA*-у, где је у модулу *Digitized Shape Editor* (о коме ће бити речи у потпоглављу 11.2.1) извршена накнадна триангулација задавањем максималног дозвољеног растојања између темена (тачака) троуглова. Овако је добијена задовољавајућа мрежа (слика 11.4). Извршено је још једно експортовање датотеке из *CATIA*-е и добијена одговарајућа (*STL*) датотека облака тачака која ће послужити за генерисање површине и мерење.



Слика 11.2. XYZ датотека увезена у MeshLab



Слика 11.3. Триангулација извршена у MeshLab-у



Слика 11.4. Триангулисани облак тачака дела 1 у програму CATIA

11.1.2 Добијање облака тачака помоћу скенера

Делови (обрађени у експерименту 10.2) су скенирани са три различита скенера и то скенером: *ATOS II*, *ATOS IIe* и *ATOS Compact Scann M5*.

Скенери помоћу којих је вршено скенирање делова приказани су на слици 11.5. Облик сензора *ATOS II* и *ATOS IIe* се не разликују геометријски, само им се електроника разликује. У табели 11.1 приказане су карактеристике наведених скенера.



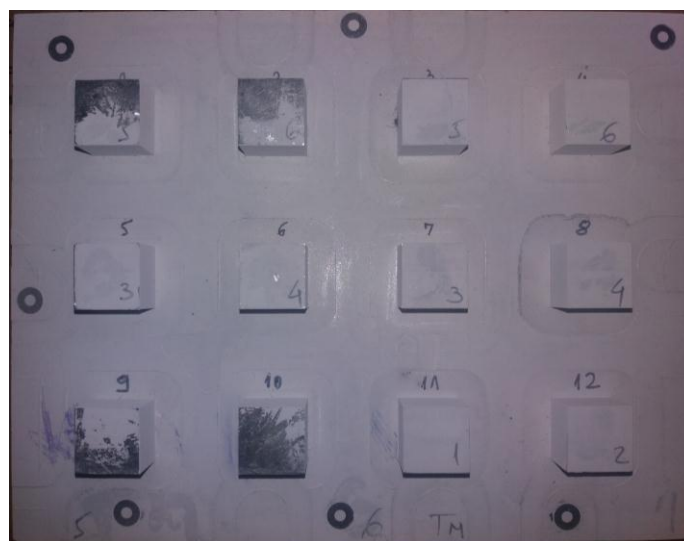
ATOS II / ATOS IIe

ATOS Compact Scann M5

Слика 11.5. Скенери коришћени у експерименту

Табела 11.1. Карактеристике скенера коришћених у експерименту

Конфигурација	<i>ATOS II</i>	<i>ATOS IIe</i>	<i>ATOS Compact Scann</i>
Број мерних тачака	1 400 000	1 400 000	-
Време мерења	1 s	1 s	1 s
Мерна површина, mm ²	175x140 - 2000x1600	175x140 - 2000x1600	40 x 30 - 1,200 x 900
Растојање између тачака, mm	0,12 - 1,4	0,12 - 1,4	0,017 - 0,481
Рачунарска подршка	<i>High-End PC / Notebook</i>	<i>High-End PC / Notebook</i>	<i>High-End PC / Notebook</i>
Управљач сензора	екстерни	интерни	интегрисани
Позиционирање тачака	да	да	да
Димензије сензора, mm ³	490 x 260 x 170	490 x 300 x 170	340 x 130 x 230
Тежина сензора, kg	5.2	7	4

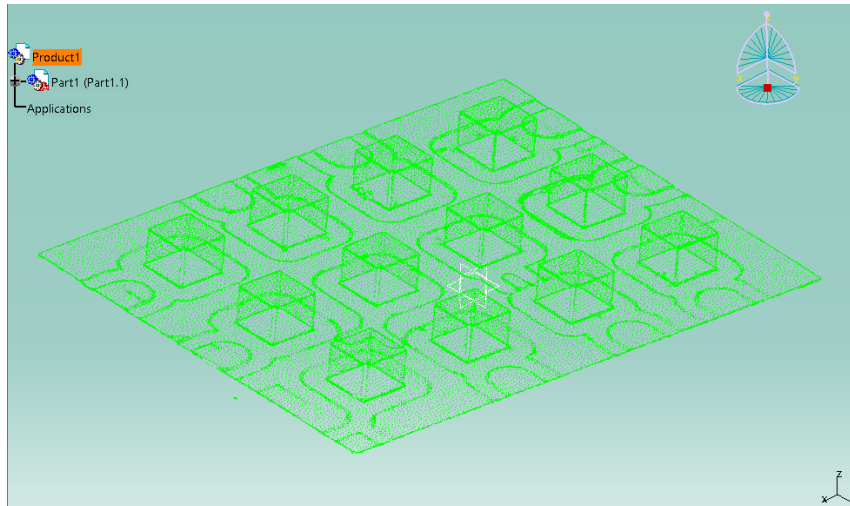


Слика 11.6. Скенирани део 1 - $\phi 6$ VHM посут прахом

Како су делови израђени од материјала рефлектујућих површина (алуминијума), није их било могуће скенирати па су посути прахом *NORD-TEST*, *Endringprufsystem*, *Entwickler U 89*, а затим скенирани (слика 11.6).

На слици 11.7 приказан је облак тачака дела 1 обрађеног глодалом $\phi 6$ *VHM* добијен помоћу скенера модела *ATOS II*, увезен у *CATIA*-у. Карактеристике облака тачака су:

- број триангулисаних површина (*facets*): 141098,
- број тачака: 71490,
- радијус облака: 117,974 mm и
- димензије облака: 183,555x145,075x30,539 mm.



Слика 11.7. Облак тачака дела 1 добијен помоћу скенера *ATOS II*

11.2 Генерисање површине из облака тачака

Да би извршили мерење помоћу података добијених скенираних површине, софтвери најчешће захтевају претходно извршену реконструкцију површина из облака тачака. У том случају користе се технике реверзног инжењерства (*RE*) о којима је било речи у поглављу 5. Међутим, како су површине дела који је овде реконструисан равне, постоји потреба само за пре-процесирањем облака тачака у циљу одстрањивања тачака ван опсега и сличних неправилности до којих долази приликом скенирања. Генерисање површина је извршено апроксимацијом површинама кроз облак тачака, чиме су сачуване информације о одступању облака тачака и омогућено даље процесирање. Овде је прво представљен алгоритам за пре-процесирање и процесирање мреже дела из облака тачака и извршено је генерисање апроксимативном површином области дела облака тачака у програму *CATIA*. Генерисање површине дела апроксимативним површинама је изведено и у програму *GOM Inspect*. Такође ја на примеру једног изданка приказано генерисање провлачењем интерполационе криве површине кроз област облака тачака у програму *MatLAB*.

11.2.1 Генерисање површине у програму *CATIA*

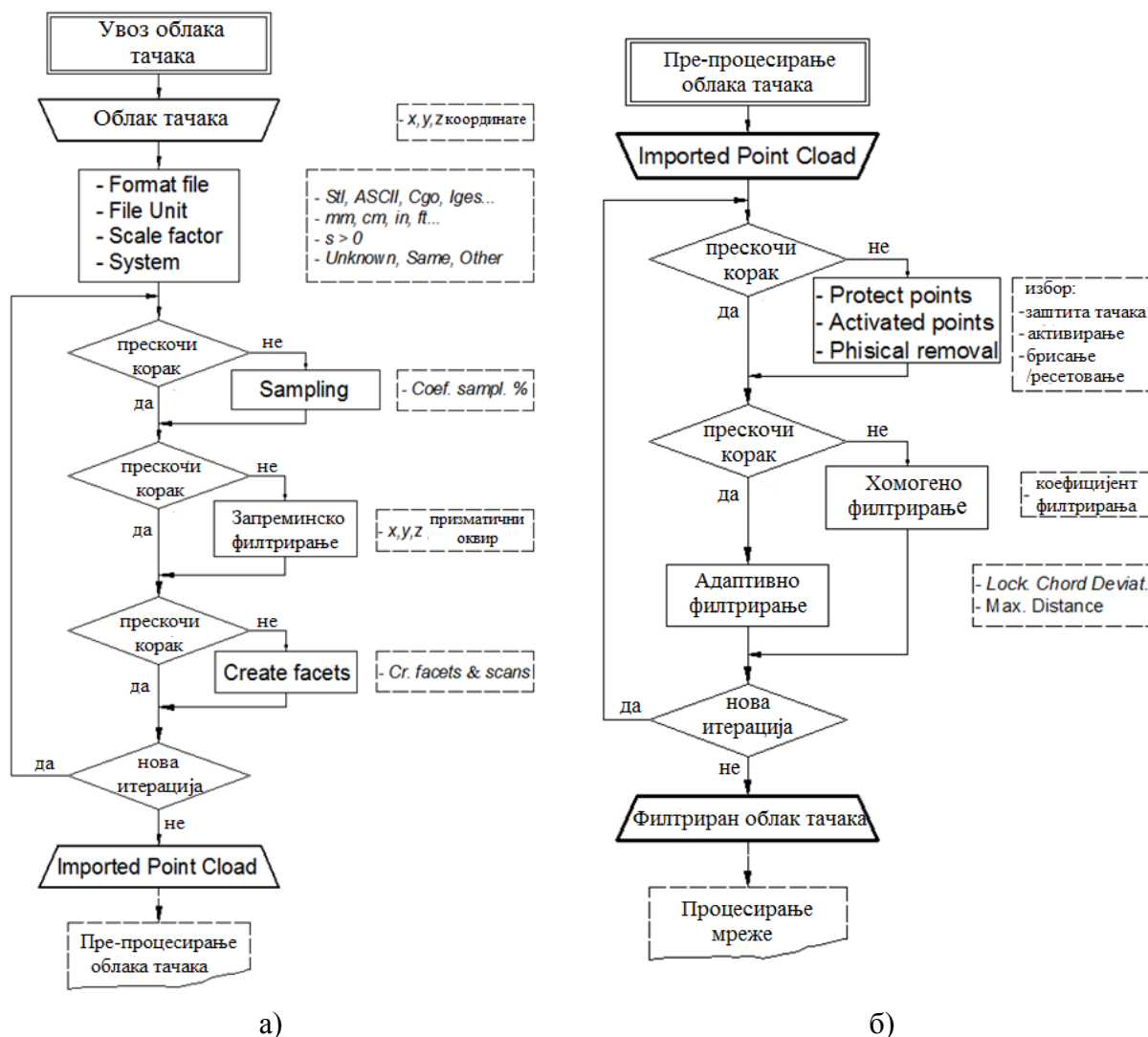
Генерисање површине скенираног дела у програмском окружењу *CATIA* може се остварити комбиновањем три постојећа модула:

- *Digitized Shape Editor*,
- *Quick Surface Reconstruction* и
- *Generative Shape Design*.

11.2.1.1 Пре-процесирање мреже

Пре него се приступи генерисању површине, потребно је извршити пре-процесирање и процесирање облака тачака. У наставку је дат алгоритам који обухвата већи број алата и метода које *CATIA* приликом пре-процесирања мреже примењује, као и основне параметре које одређена фаза у процесу захтева.

Алгоритам подразумева појединачне (*single*) облаке тачака, тако да изостаје опис алата за уравнање (*Cloud Reposit*) као и уједињење више делова облака тачака у један.



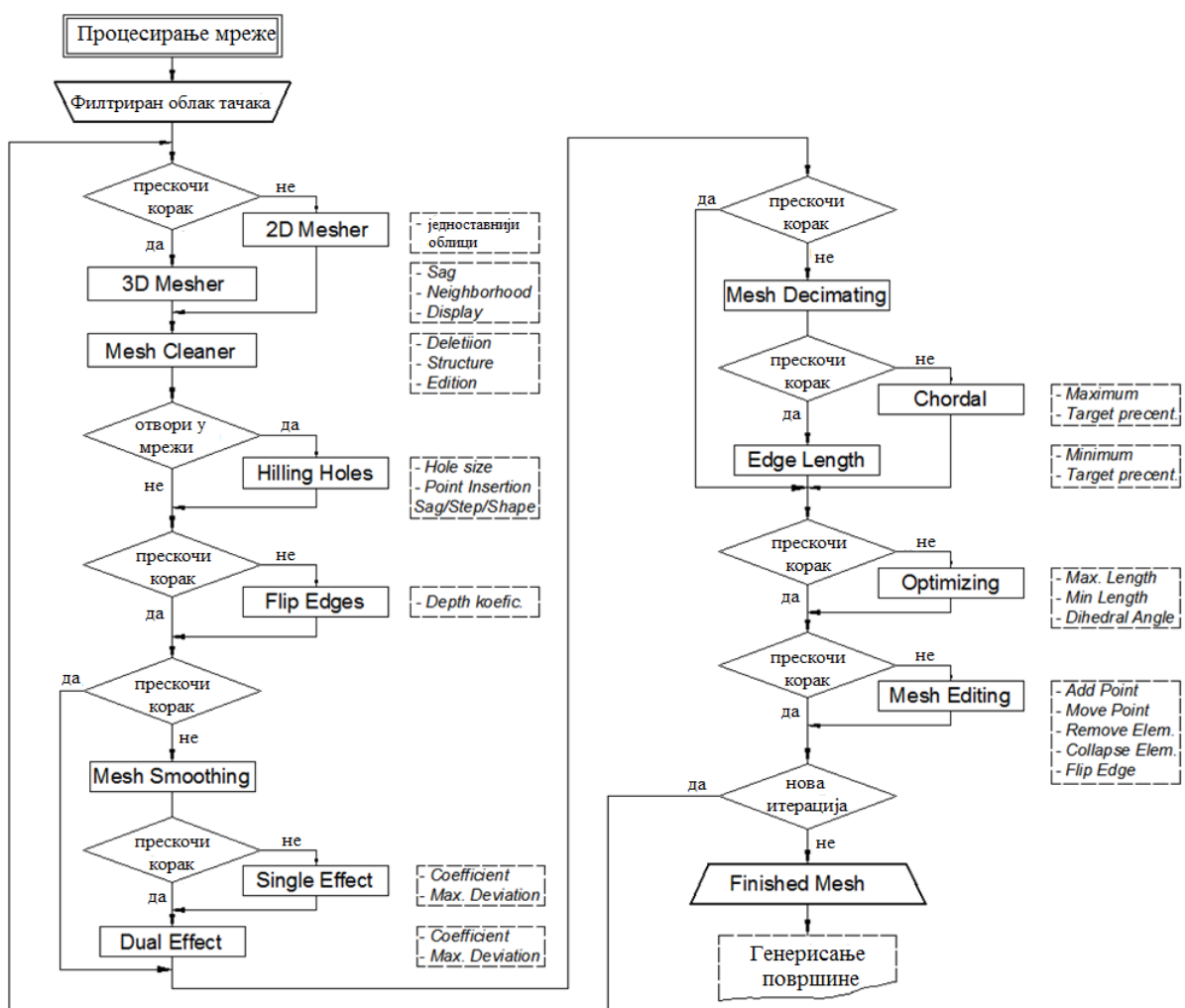
Слика 11.8. Алгоритам увоза и пре-процесирања облака тачака у *CATIA*-и

Приликом увоза облака тачака, потребно је изабрати формат увезене датотеке као и јединицу мере. Осим тога, могуће је извршити филтрирање броја тачака униформним семпловањем уносом *sampling* процента (што је корисно приликом увоза облака са великим бројем тачака). У овом кораку се може извршити и скалирање облака тачака по потреби (уносом вредности за *scale factor*). Уколико се изабере *Update* опција *Import* прозора, може се извршити и ручно запреминско филтрирање, директно у радном прозору, померањем стрелица на правоугаоном оквиру облака тачака. Такође је могуће креирати мрежу фасета (поље *Create facets*), односно скенове (избором *Create scans*) и тако увести облак са мрежом (слика 11.8-а).

Пре-процесирање облака тачака (слика 11.8-б) своди се на избор опција у оквиру *Filter* команде, односно ручно брисање непотребних тачака избором команде *Remove*. Остале опције у склопу ових алата тичу се начина за избор, односно активирање одређеног дела облака (*Activate*), као и заштите (*Protect*) одређеног ентитета (*Scan/Grid, Cell* или *Point*) облака тачака.

11.2.1.2 Процесирање мреже

Процесирање мреже представља поступак креирања и регенерисања мреже. *CATIA* садржи аутоматске и мануелне алате за креирање, офсет, глачање и чишћење мреже, попуњавање отвора, децимацију и оптимизацију мреже и сл. Као и мануелне алате за едитовање: додавање и померање темена мреже, брисање ентитета мреже (фасета, ивица, тачака), колапс темена, флип ивице итд. На слици 11.9 приказан је алгоритам поступка процесирања мреже које користи *CATIA*, са основним уносом параметара које одређена фаза у процесу захтева.



Слика 11.9. Алгоритам процесирања мреже у *CATIA*-и

11.2.1.3 Генерисање површине

CATIA садржи 3 раније поменута модула (*Digitized Shape Editor, Generative Shape Design* и *Quick Surface Reconstruction*) помоћу којих се може извршити пре-процесирање и процесирање мреже, као и генерисање површинског модела. Из облака тачака, тј. пречишћене мреже се може доћи до површинског модела креирањем кривих линија преко мреже, а затим њиховим повезивањем у површину. Команде за креирање

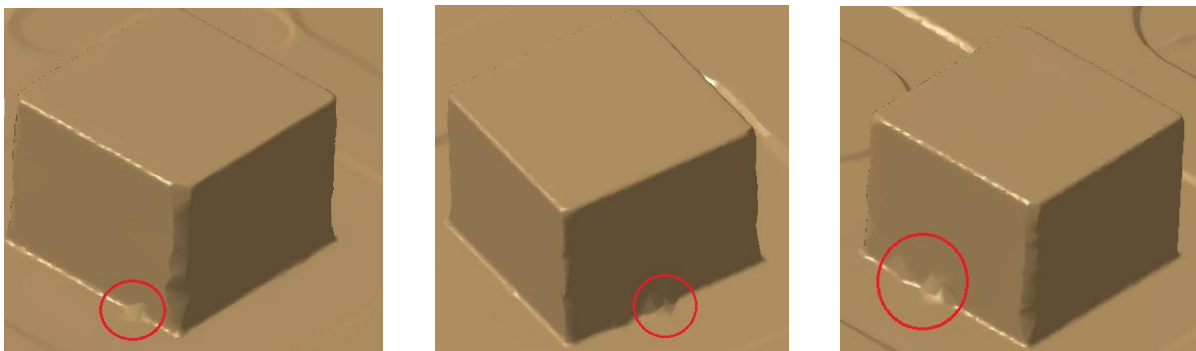
линије из модула *Digitized Shape Editor* у склопу *Surface Creation* подменија су *3D Curve*, *Curve on Mesh* и *Curve from Scan*. Након креирања карактеристичних линија на мрежи преласком у модул *Generative Shape Design*, кроз линије се могу провући површине. Алати за креирање површина се налазе у склупу подменија *Surfaces*. У зависности од потребе, на располагању су команде: *Sweep*, *Adaptive Sweep*, *Fill*, *Multi-sections Surface* и *Blend*. Трећи модул (*Quick Surface Reconstruction*) нуди алате за „брже“ генерисање површине из мреже. Алати се налазе у оквиру подменија *Surface Creation* и у зависности од потребе могу се употребити: *Basic Surface Reconstruction*, *Power Fit*, *Multi-sections Surface* и *Automatic Surface* команде.

Како је у овом експерименту реконструкција површине дела рађена у циљу даље примене у софтверу за мерење одступања и како су површине измереног дела равне, генерисање површине дела рађено је у модулу *Quick Surface Reconstruction*, постављањем апроксимативних равни кроз одређене сегменте површина (облака тачака).

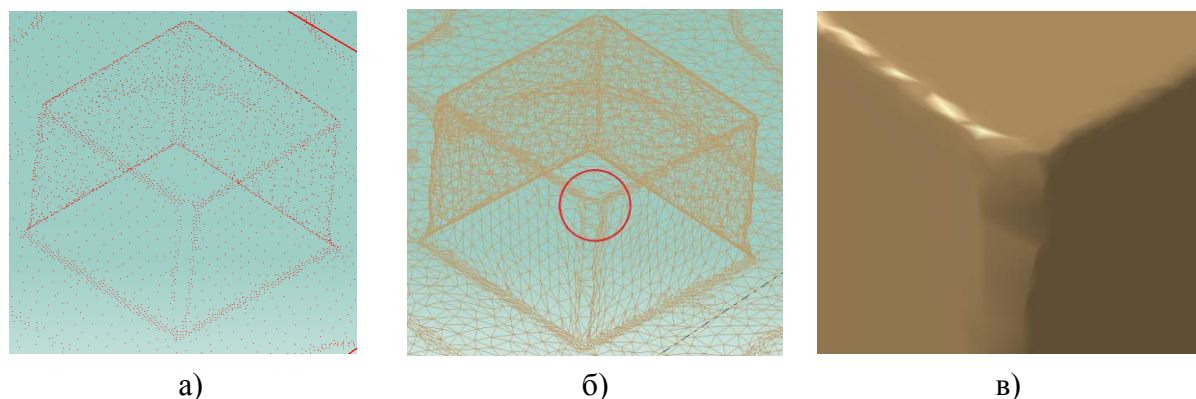
11.2.1.4 Генерисање површине дела 1 ($\phi 6$ VHM)

У програм је увезен сиров облак тачака дела обрађеног глодалом $\phi 6$ VHM добијен помоћу скенера модела *ATOS II* (слика 11.1).

Површине од интреса за мерење су бочне површине изданака, па су само оне посматране. На облаку није било тачака ван опсега, а грешке на мрежи се налазе углавном на ивицама изданака. На слици 11.10 приказана су карактеристична одступања мреже. На целокупној мрежи примећено је једно *non-manifold* (које које дели две неповезане мреже) теме и једна шупљина, налазили су се на граничним површинама, па нису узети у обзир.



Слика 11.10. Неправилности на триангулисаном облаку



а)

б)

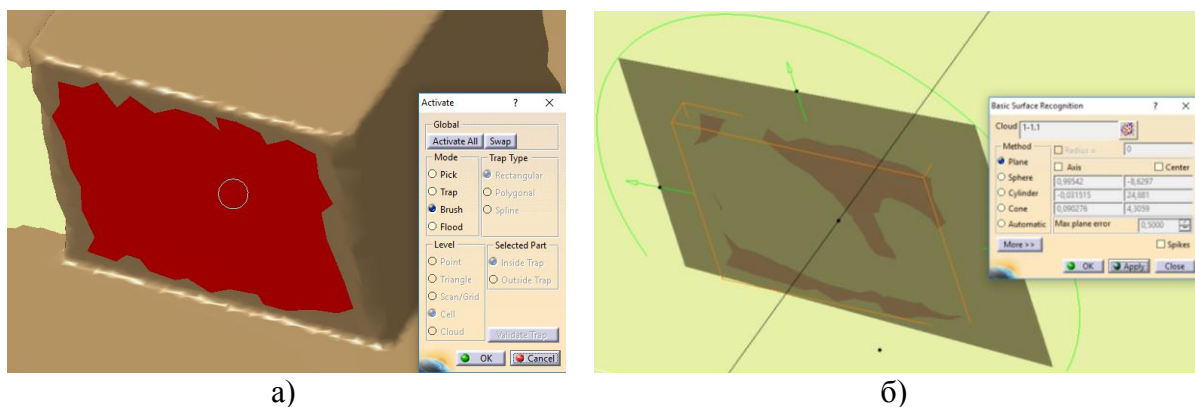
в)

Слика 11.11. Триангулисање облака тачака и карактеристичне неправилности на ивицама

Један од недостатака скенирања оптичким скенером представља недостатак скенираних тачака на ивицама и прелазним површинама. На слици 11.11-а јасно се виде ови недостаци. Овај недостатак се даље компликује триангулацијом, која преко алгоритма спаја постојеће тачке (слика 11.11-б). На овај начин добио би се део без јасно дефинисаних ивица (слика 11.11-в), односно намеће се потреба за накнадним извлачењем ивица.

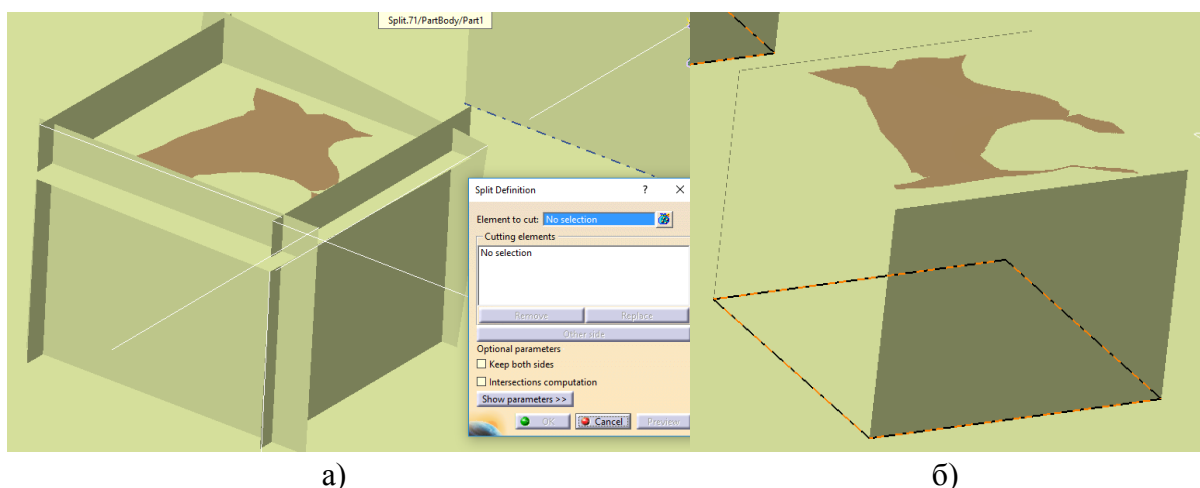
Како су површине делова, које је касније потребно обрадити у неком од програма за мерење, равне, нема потребе за детаљним процесирањем површина. Тако су искоришћене апроксимативне равни и провучене кроз одређене области облака тачака.

Реконструкција површине је извршена у модулу *Quick Surface Reconstruction*. Овај модул садржи алате за апроксимацију дела (области) облака тачака једном равни. Нејпре је потребно активирати облак тачака одређене области - део површине (слика 11.12-а), како би се извршила апроксимација површином (слика 11.12-б). На овај начин бира се само део површине изданка од интереса чиме су избегнуте лоше скениране ивице изданка.



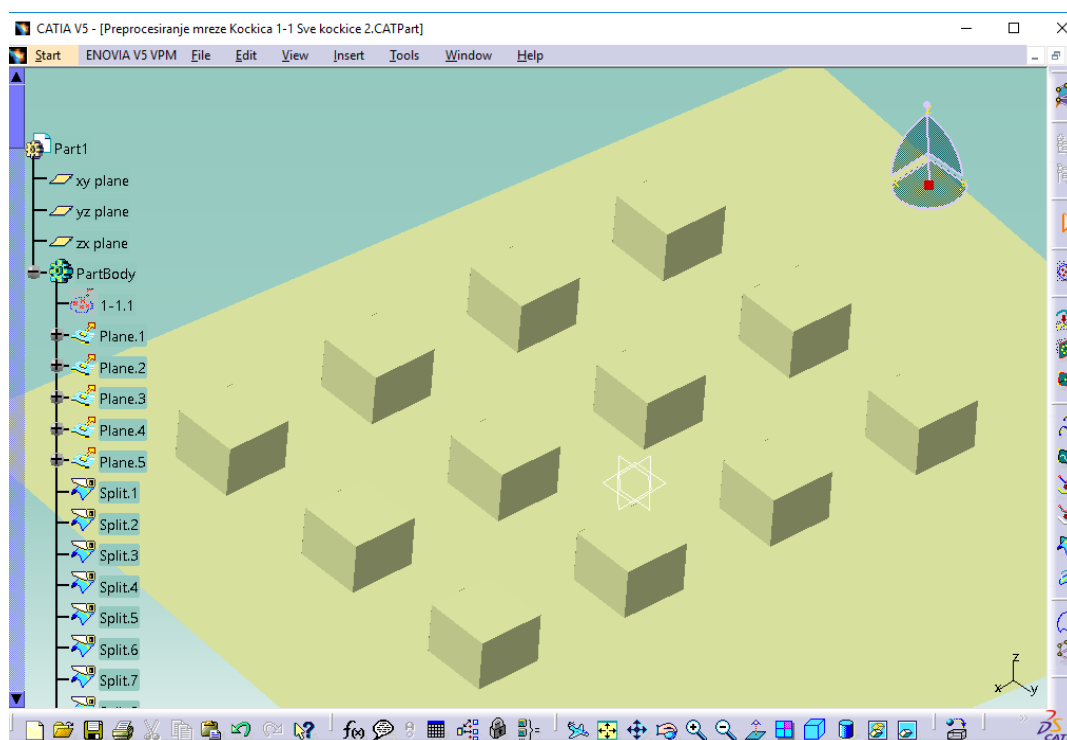
Слика 11.12. Активирање области облака тачака и постављање апроксимираних равни

Поступак се понавља за све вертикалне површине, као и за горње површине изданка. Делови површина који се преклапају са суседним се тримују (одсецају) (слика 11.13-а) и формира изданак (слика 11.13-б).



Слика 11.13. Одсецање површина које се преклапају и формирање изданка

Аналогно се креирају и све остале површине и добија површински модел дела (слика 11.14). Корисно је нагласити да овакве (апроксимираних) површине у себи носе податке како о одступањима од димензија тако и геометријска (од облика и положаја) одступања, тако да се накнадно могу употребити за њихово мерење.

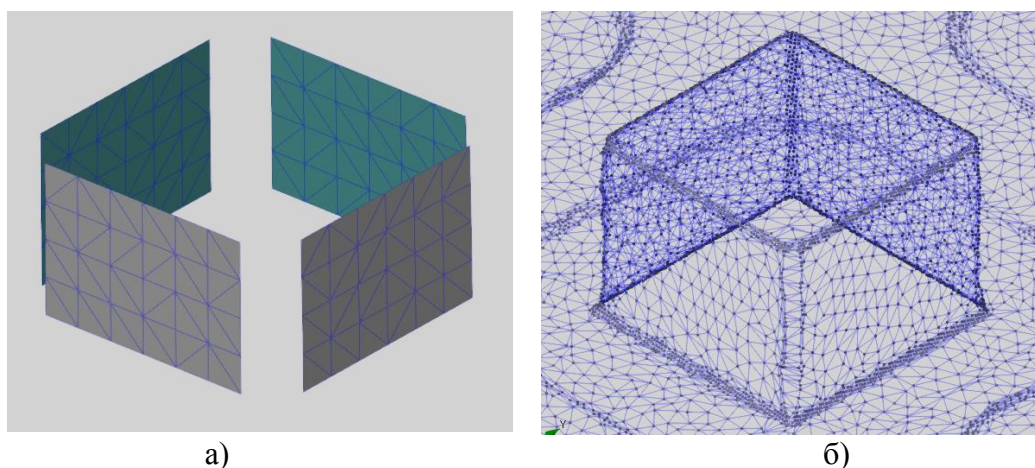


Слика 11.14. Реконструисан комплетан део

11.2.2 Генерисање површине из облака тачака у *GOM Inspect* -у

Gom Inspect такође садржи команде за пре-процесирање и процесирање облака тачака, односно мреже облака тачака. Такође садржи и велики број алата за генерисање површине из мреже. У наставку је приказано генерисање површине у програму *Gom Inspect* на примеру облака тачака дела 1 добијеног на мерној машини (СММ) и скенеру.

На слици 11.15 приказан је триангулисани изданак дела 1 са СММ и скенра у програму *Gom Inspect*-у. На слици 11.15-а приказан је део облака добијен на СММ, а на слици 11.15-б исти изданак облака добијеног на скенеру. Са слика се може приметити разлика у мрежи и распореду тачака.

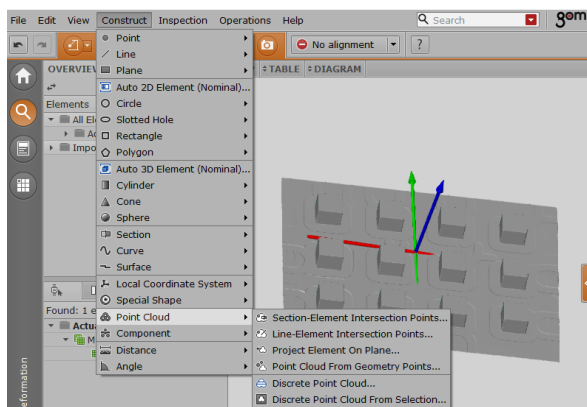


а)

б)

Слика 11.15. Триангулисани изданак дела 1 са СММ и скенра у програму *GOM Inspect*

Команде за пре-процесирање и процесирање мреже налазе се у менију *Construct*, односно подменију *Point Cloud* (слика 11.16).

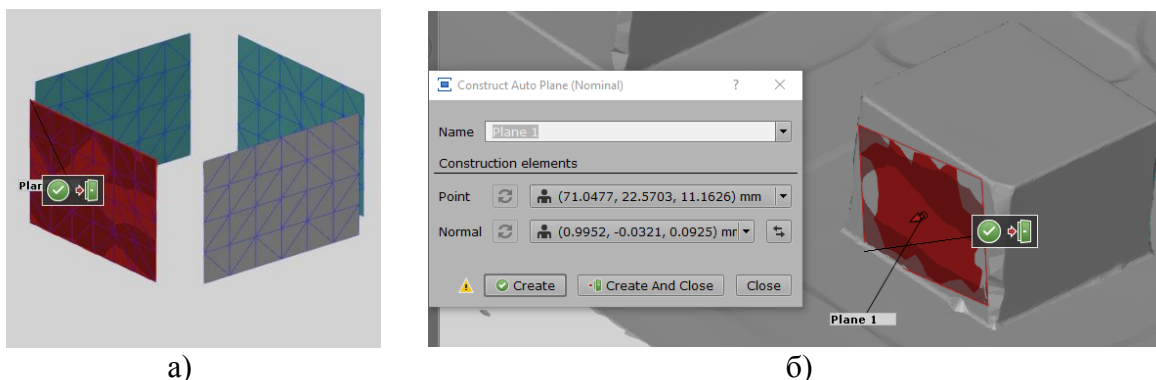


Слика 11.16. Команде за рад са облаком тачака

Генерисање површине се може извршити преко кривих линија (*Construct – Curve*) и провлачењем површина (*Surface*) кроз линије. Други начин генерисања површине је реконструкција преко апроксимативних површина (команде *Auto 3D Element*, *Cylinder*, *Cone*, *Sphere* из менија *Construct*).

Генерисање површине дела 1 ($\phi 6 VHM$) извршена је преко апроксимативних равних површина и то само површина које је накнадно требало мерити.

Апроксимација равном површином дела облака тачака извршена је прво креирањем равни (*Plane 1*) преко команде *Auto Plane* из менија *Construct/Plane* избором површине изданка. На слика 11.17-а приказана је креирана површина на облаку добијеном на *SMM*, док је на слици 11.176-б раван креирана на облаку добијеном на скенеру.

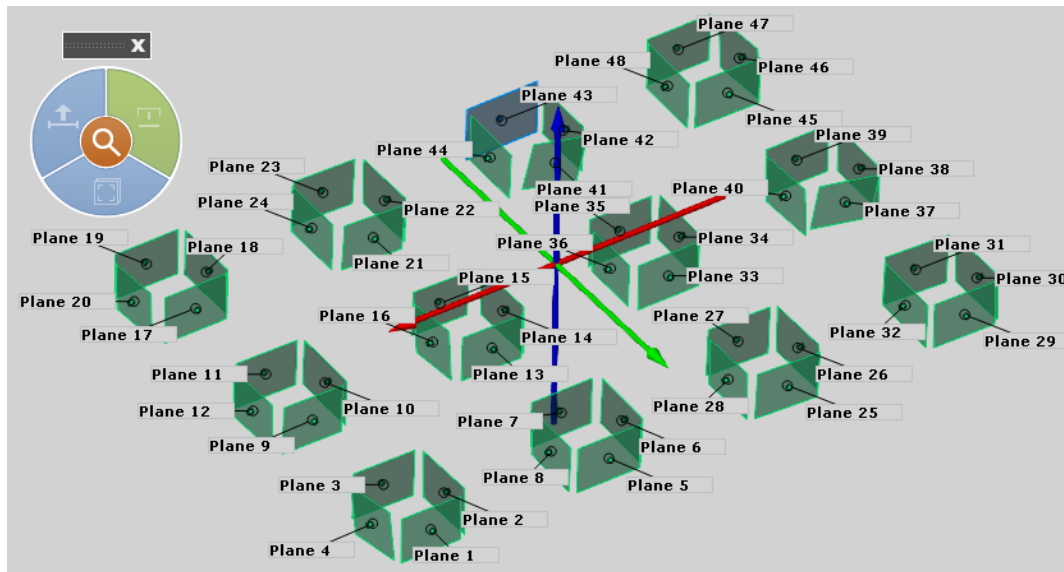


Слика 11.17. Креирање равни на површини изданка

Затим се приступило апроксимацији равни (*Fitting Plane*) (слика 11.18). *GOM Inspect* нуди могућност избора између две методе апроксимације најмањег квадрата и то Гаусову (која је коришћена овде) и Чебашијеву.

Слика 11.18. Апроксимирање равни површине изданка за *SMM* и скениран облак

Понављањем наведеног поступка на бочним површинама свих изданака, као и горњих површина, поступак генерисања површина је завршен и део је спреман за мерење (слика 11.19).



Слика 11.19. Генерисане површине свих изданака

11.2.3 Генерисање површине из облака тачака у *MatLAB*-у

Површине се могу генерисати из облака тачака и у софтверу *MatLAB*. Овај софтвер садржи модул за аутоматску интерполацију или апроксимацију по изабраном моделу. Модул *Surface Fitting Tool* омогућава провлачење површине кроз задате тачке. Могућа је линеарна, кубна или интерполација површином добијеном методом најмањих квадрата. Такође је могуће задати једначину површине која ће интерполирати или апроксимирати задате тачке.

Други начин је писање програма који би аутоматски генерисао површину на основу координата облака тачака, односно уносом *STL* или *XYZ* датотеке добијене са скенера или *CMM*. На овај начин могу се генерисати параметарске као што су *Bezier*-ове и *NURBS* површине.

У наставку је описан поступак генерисања површина првог изданка дела 1, добијеног обрадом глодањем глодалом $\phi 10$ *VHM*, дат у експерименталном делу дисертације (потпоглаве 10.2), помоћу резултата мерења добијених помоћу координатне мерне машине (*CMM*). Као резултат мерења на *CMM* добијена је *XYZ* датотека. Датотека садржи просторне координате тачака и координате вектора положаја (слика 11.20). Из *XYZ* датотеке у програму *MatLAB* су издведене само просторне *XYZ* координате. Овде координате вектора облака тачака нису искоришћене, док се оне могу искористити при апроксимирању *Bezier*-овим и *NURBS* површинама.

Како су делови мерени преко матрице 7×5 тачака по једној површини изданка, тако је у програм унето 35 координата по површини изданка, односно 140 тачака по изданку. Кроз тачке је провучена интерполациона површина трећег степена задавањем команде за дефинисање *2D* мреже (*meshgrid*) и команде (*griddata*) којом се дефинише интерполациона раван.

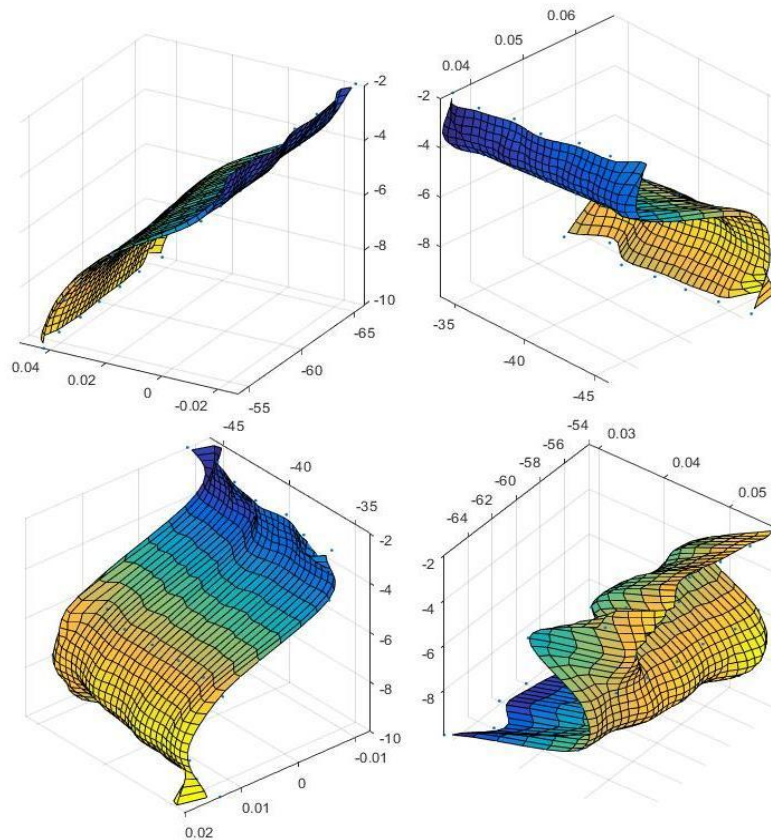
На слици 11.21 приказане су генерисане бочне површине првог изданка дела 1, $\phi 10$ *VHM*, добијене у програму *MatLAB*.

```

k3v3.xyz - Notepad
File Edit Format View Help
XYZIJK METRIC
17.380053,0.289216,-0.061028,-0.000705,0.000226,1.000000,12.700000
PNT1 -68.911872,-41.536448,-2.651367,-0.999692,-0.024809,0.000879
-1.731560,1.017055,0.000000,0.000000,-0.000000,1.000000,12.700000
PNT2 -59.967084,-40.068355,0.000000,1.000000,-0.000035,0.000000
PNT3 -65.969506,-48.067163,-10.008266,-0.000035,-1.000000,0.000000
PNT4 -63.971492,-48.068529,-10.003810,-0.000035,-1.000000,0.000000
PNT5 -61.970876,-48.068721,-9.999355,-0.000035,-1.000000,0.000000
PNT6 -59.965296,-48.068634,-9.999402,-0.000035,-1.000000,0.000000
PNT7 -57.968630,-48.068245,-9.999727,-0.000035,-1.000000,0.000000
PNT8 -55.971504,-48.067379,-10.000052,-0.000035,-1.000000,0.000000
PNT9 -53.970623,-48.066724,-9.998785,-0.000035,-1.000000,0.000000
PNT38 -65.988289,-48.068486,-7.992681,-0.000035,-1.000000,0.000000
PNT39 -63.972214,-48.067078,-8.000419,-0.000035,-1.000000,0.000000
PNT40 -61.971505,-48.067270,-8.002058,-0.000035,-1.000000,0.000000
PNT41 -59.965460,-48.066986,-8.001917,-0.000035,-1.000000,0.000000
PNT42 -57.970306,-48.065969,-8.001773,-0.000035,-1.000000,0.000000
PNT43 -55.971578,-48.065542,-8.001724,-0.000035,-1.000000,0.000000
PNT44 -53.968728,-48.064943,-8.001676,-0.000035,-1.000000,0.000000
PNT45 -65.986843,-48.061745,-5.997823,-0.000035,-1.000000,0.000000
PNT46 -63.972158,-48.062143,-5.999560,-0.000035,-1.000000,0.000000
PNT47 -61.972588,-48.061606,-6.000636,-0.000035,-1.000000,0.000000
PNT48 -59.966554,-48.060760,-6.001527,-0.000035,-1.000000,0.000000
PNT49 -57.970454,-48.060195,-6.001758,-0.000035,-1.000000,0.000000
PNT50 -55.971250,-48.060133,-6.001522,-0.000035,-1.000000,0.000000
PNT51 -53.968678,-48.059633,-6.001474,-0.000035,-1.000000,0.000000
PNT52 -65.985816,-48.058478,-3.991340,-0.000035,-1.000000,0.000000
PNT53 -63.973787,-48.057428,-4.001138,-0.000035,-1.000000,0.000000
PNT54 -61.972323,-48.057887,-4.001840,-0.000035,-1.000000,0.000000
PNT55 -59.966571,-48.056952,-4.001324,-0.000035,-1.000000,0.000000
PNT56 -57.971404,-48.056591,-4.000993,-0.000035,-1.000000,0.000000
PNT57 -55.971371,-48.055764,-4.001038,-0.000035,-1.000000,0.000000
PNT58 -53.968508,-48.055822,-4.001177,-0.000035,-1.000000,0.000000
PNT59 -65.997444,-48.065675,-2.003411,-0.000035,-1.000000,0.000000
PNT60 -63.973261,-48.067487,-2.002807,-0.000035,-1.000000,0.000000
PNT61 -61.971820,-48.066727,-2.002290,-0.000035,-1.000000,0.000000
PNT62 -59.967748,-48.066199,-2.001586,-0.000035,-1.000000,0.000000
PNT63 -57.970142,-48.065980,-2.001443,-0.000035,-1.000000,0.000000
PNT64 -55.971691,-48.065746,-2.000831,-0.000035,-1.000000,0.000000
PNT65 -53.969495,-48.065253,-2.000783,-0.000035,-1.000000,0.000000
PNT66 -51.964434,-46.068674,-9.997602,1.000000,-0.000035,0.000000
PNT67 -51.964869,-44.069413,-9.996734,1.000000,-0.000035,0.000000
PNT68 -51.965522,-42.068362,-9.996991,1.000000,-0.000035,0.000000
PNT69 -51.966252,-40.068537,-9.997154,1.000000,-0.000035,0.000000
PNT70 -51.966244,-38.072851,-9.997315,1.000000,-0.000035,0.000000
PNT71 -51.967560,-36.066669,-9.997855,1.000000,-0.000035,0.000000
PNT72 -51.967023,-34.074235,-9.998016,1.000000,-0.000035,0.000000

```

Слика 11.20. XYZ датотека добијена мерењем дела 1 (фб VHM) на СММ



Слика 11.21. Бочне површина изданка добијене у програму MatLAB

У наставку је приказан програмски код који провлачи интерполационе површине трећег степена (приказане на слици 10.21) кроз координате тачака добијене мерењем на координатној мерној машини.

```

% DEO 1
% КОСКА 1L

```

% POVRSINA 1 (PLN 3) TACKE PNT 3-9, 38-65

```
K1P1=[-65.977329,-48.045040,-10.002442,0.000304,-1.000000,0.000000
-63.979103,-48.045692,-10.001352,0.000304,-1.000000,0.000000
-61.978539,-48.045111,-9.995013,0.000304,-1.000000,0.000000
-59.979569,-48.044916,-9.993923,0.000304,-1.000000,0.000000
-57.981165,-48.044162,-9.994896,0.000304,-1.000000,0.000000
-55.978067,-48.044228,-9.995495,0.000304,-1.000000,0.000000
-53.978263,-48.042249,-9.996188,0.000304,-1.000000,0.000000
-65.968609,-48.036866,-7.995777,0.000304,-1.000000,0.000000
-63.979475,-48.037940,-7.992715,0.000304,-1.000000,0.000000
-61.975349,-48.037532,-7.994440,0.000304,-1.000000,0.000000
-59.980509,-48.036610,-7.996817,0.000304,-1.000000,0.000000
-57.980137,-48.035659,-7.997885,0.000304,-1.000000,0.000000
-55.977037,-48.036100,-7.998484,0.000304,-1.000000,0.000000
-53.978072,-48.034968,-7.998144,0.000304,-1.000000,0.000000
-65.970248,-48.019937,-5.995207,0.000304,-1.000000,0.000000
-63.980270,-48.021195,-5.994020,0.000304,-1.000000,0.000000
-61.975211,-48.020127,-5.996214,0.000304,-1.000000,0.000000
-59.978309,-48.019195,-5.999343,0.000304,-1.000000,0.000000
-57.978591,-48.018435,-6.000691,0.000304,-1.000000,0.000000
-55.974653,-48.018027,-6.000166,0.000304,-1.000000,0.000000
-53.978309,-48.017564,-5.999544,0.000304,-1.000000,0.000000
-65.969335,-47.989214,-3.994740,0.000304,-1.000000,0.000000
-63.979181,-47.988504,-3.996180,0.000304,-1.000000,0.000000
-61.975335,-47.988566,-3.997342,0.000304,-1.000000,0.000000
-59.976748,-47.986968,-3.999252,0.000304,-1.000000,0.000000
-57.977401,-47.986960,-4.000319,0.000304,-1.000000,0.000000
-55.973839,-47.986367,-4.000637,0.000304,-1.000000,0.000000
-53.977683,-47.985906,-4.000484,0.000304,-1.000000,0.000000
-65.980430,-47.975809,-2.003917,0.000304,-1.000000,0.000000
-63.979022,-47.975318,-1.999452,0.000304,-1.000000,0.000000
-61.976865,-47.974635,-1.994801,0.000304,-1.000000,0.000000
-59.978267,-47.975006,-1.995773,0.000304,-1.000000,0.000000
-57.978464,-47.972651,-1.996373,0.000304,-1.000000,0.000000
-55.975824,-47.975063,-1.996970,0.000304,-1.000000,0.000000
-53.978160,-47.976094,-1.997192,0.000304,-1.000000,0.000000];
```

```
x=K1P1(:, 1);
y=K1P1(:, 3);
z=(K1P1(:, 2)+48)*(-1);
```

```
xlin = linspace(-68,-52,40);
ylin = linspace(-12,0,40);
[X,Y] = meshgrid(xlin,ylin);
Z = griddata(x,y,z,X,Y,'cubic');
```

```
subplot(2,2,1)
mesh(X,Y,Z)
surf(X,Y,Z)
axis tight; hold on
plot3(x,y,z,')
view(-100,50)
hold on
```

% POVRSINA 2 (PLN 4) TACKE PNT 66-100

```
K1P2=[-51.938406,-45.967795,-9.999841,1.000000,0.000304,-0.000000
-51.939358,-43.967077,-9.999718,1.000000,0.000304,-0.000000
-51.940312,-41.966076,-9.996221,1.000000,0.000304,-0.000000
```

```

-51.940865,-39.969761,-9.995065,1.000000,0.000304,-0.000000
-51.941920,-37.967544,-9.994850,1.000000,0.000304,-0.000000
-51.938835,-35.967836,-9.994260,1.000000,0.000304,-0.000000
-51.942226,-33.967037,-9.994792,1.000000,0.000304,-0.000000
-51.934851,-45.957773,-7.992424,1.000000,0.000304,-0.000000
-51.934814,-43.966986,-7.990516,1.000000,0.000304,-0.000000
-51.934277,-41.964670,-7.995832,1.000000,0.000304,-0.000000
-51.935678,-39.967705,-7.997020,1.000000,0.000304,-0.000000
-51.935320,-37.966887,-7.997367,1.000000,0.000304,-0.000000
-51.935976,-35.968886,-7.997525,1.000000,0.000304,-0.000000
-51.934786,-33.965438,-7.997404,1.000000,0.000304,-0.000000
-51.939222,-45.956797,-5.993345,1.000000,0.000304,-0.000000
-51.940485,-43.968644,-5.994715,1.000000,0.000304,-0.000000
-51.941921,-41.965023,-5.996282,1.000000,0.000304,-0.000000
-51.942097,-39.969458,-5.997657,1.000000,0.000304,-0.000000
-51.943245,-37.967242,-5.998941,1.000000,0.000304,-0.000000
-51.943446,-35.966989,-6.000131,1.000000,0.000304,-0.000000
-51.943751,-33.964488,-6.001323,1.000000,0.000304,-0.000000
-51.959510,-45.959747,-3.993320,1.000000,0.000304,-0.000000
-51.960601,-43.968593,-3.995067,1.000000,0.000304,-0.000000
-51.961191,-41.965530,-3.996728,1.000000,0.000304,-0.000000
-51.961745,-39.969405,-3.997916,1.000000,0.000304,-0.000000
-51.962329,-37.967467,-3.999294,1.000000,0.000304,-0.000000
-51.962806,-35.968247,-4.000483,1.000000,0.000304,-0.000000
-51.963493,-33.964435,-4.001675,1.000000,0.000304,-0.000000
-51.959036,-45.971312,-2.001547,1.000000,0.000304,-0.000000
-51.959999,-43.968531,-2.000113,1.000000,0.000304,-0.000000
-51.960593,-41.964246,-1.996056,1.000000,0.000304,-0.000000
-51.962644,-39.968690,-1.995836,1.000000,0.000304,-0.000000
-51.962386,-37.966372,-1.996372,1.000000,0.000304,-0.000000
-51.963796,-35.967907,-1.996436,1.000000,0.000304,-0.000000
-51.963453,-33.963995,-1.997534,1.000000,0.000304,-0.000000];

```

```

x=K1P2(:, 2);
y=K1P2(:, 3);
z=K1P2(:, 1)+52;

```

```

xlin = linspace(-48,-32,40);
ylin = linspace(-12,0,40);
[X,Y] = meshgrid(xlin,ylin);
Z = griddata(x,y,z,X,Y,'cubic');

```

```

subplot(2,2,2)
mesh(X,Y,Z)
surf(X,Y,Z)
axis tight; hold on
plot3(x,y,z, '.')
view(-100,50)
hold on

```

```
% POVRSINA 3 (PLN 5) TACKE PNT 101-135
```

```

K1P3=[-53.973322,-31.960083,-9.999761,-0.000304,1.000000,-0.000000
-55.974136,-31.966004,-9.996628,-0.000304,1.000000,-0.000000
-57.975061,-31.968737,-9.991528,-0.000304,1.000000,-0.000000
-59.968775,-31.970028,-9.989618,-0.000304,1.000000,-0.000000
-61.971401,-31.970428,-9.989675,-0.000304,1.000000,-0.000000
-63.974606,-31.967552,-9.990391,-0.000304,1.000000,-0.000000
-65.972057,-31.971489,-9.991104,-0.000304,1.000000,-0.000000
-53.979348,-31.946830,-7.994312,-0.000304,1.000000,-0.000000

```

```

-55.973361,-31.944843,-7.994280,-0.000304,1.000000,-0.000000
-57.974566,-31.947861,-7.994055,-0.000304,1.000000,-0.000000
-59.971101,-31.947477,-7.988678,-0.000304,1.000000,-0.000000
-61.974006,-31.948161,-7.989202,-0.000304,1.000000,-0.000000
-63.975122,-31.950524,-7.991322,-0.000304,1.000000,-0.000000
-65.973904,-31.950999,-7.990912,-0.000304,1.000000,-0.000000
-53.979781,-31.945551,-5.993359,-0.000304,1.000000,-0.000000
-55.973222,-31.945436,-5.993326,-0.000304,1.000000,-0.000000
-57.974437,-31.946673,-5.992913,-0.000304,1.000000,-0.000000
-59.970126,-31.946944,-5.992599,-0.000304,1.000000,-0.000000
-61.973029,-31.947815,-5.992186,-0.000304,1.000000,-0.000000
-63.975090,-31.948868,-5.991587,-0.000304,1.000000,-0.000000
-65.973396,-31.950465,-5.991270,-0.000304,1.000000,-0.000000
-53.979604,-31.953455,-3.990244,-0.000304,1.000000,-0.000000
-55.974630,-31.955037,-3.992365,-0.000304,1.000000,-0.000000
-57.972571,-31.954757,-3.992143,-0.000304,1.000000,-0.000000
-59.968628,-31.956436,-3.991827,-0.000304,1.000000,-0.000000
-61.973974,-31.956382,-3.991884,-0.000304,1.000000,-0.000000
-63.973282,-31.945985,-3.992042,-0.000304,1.000000,-0.000000
-65.973968,-31.958657,-3.992561,-0.000304,1.000000,-0.000000
-53.968934,-31.942752,-2.003830,-0.000304,1.000000,-0.000000
-55.974745,-31.943166,-1.998450,-0.000304,1.000000,-0.000000
-57.973336,-31.944012,-1.992508,-0.000304,1.000000,-0.000000
-59.973426,-31.945054,-1.989378,-0.000304,1.000000,-0.000000
-61.971659,-31.942995,-1.990844,-0.000304,1.000000,-0.000000
-63.976139,-31.947343,-1.990617,-0.000304,1.000000,-0.000000
-65.973800,-31.946874,-1.990583,-0.000304,1.000000,-0.000000];

```

```

x=K1P3(:, 1);
y=K1P3(:, 3);
z=K1P3(:, 2)+32;

```

```

xlin = linspace(-68,-52,40);
ylin = linspace(-12,0,40);
[X,Y] = meshgrid(xlin,ylin);
Z = griddata(x,y,z,X,Y,'cubic');

```

```

subplot(2,2,3)
mesh(X,Y,Z)
surf(X,Y,Z)
axis tight; hold on
plot3(x,y,z,')
view(-100,50)
hold on

```

```
% POVRSINA 4 (PLN 6) TACKE PNT 136-170
```

```

K1P4=[-68.013846,-33.963741,-10.000812,-1.000000,-0.000304,0.000000
-68.013275,-35.962958,-9.996623,-1.000000,-0.000304,0.000000
-68.012594,-37.965362,-9.991962,-1.000000,-0.000304,0.000000
-68.011572,-39.961204,-9.990213,-1.000000,-0.000304,0.000000
-68.010323,-41.964827,-9.990802,-1.000000,-0.000304,0.000000
-68.010140,-43.961799,-9.990364,-1.000000,-0.000304,0.000000
-68.009448,-45.966643,-9.990483,-1.000000,-0.000304,0.000000
-68.019193,-33.972701,-7.991508,-1.000000,-0.000304,0.000000
-68.019232,-35.962924,-7.991074,-1.000000,-0.000304,0.000000
-68.019210,-37.965053,-7.990913,-1.000000,-0.000304,0.000000
-68.017622,-39.961831,-7.992351,-1.000000,-0.000304,0.000000
-68.017688,-41.964992,-7.992659,-1.000000,-0.000304,0.000000
-68.015913,-43.961768,-7.993252,-1.000000,-0.000304,0.000000

```

```

-68.015222,-45.966050,-7.992247,-1.000000,-0.000304,0.000000
-68.013338,-33.972985,-5.993742,-1.000000,-0.000304,0.000000
-68.012063,-35.963482,-5.993215,-1.000000,-0.000304,0.000000
-68.011758,-37.965985,-5.993616,-1.000000,-0.000304,0.000000
-68.011763,-39.962958,-5.993085,-1.000000,-0.000304,0.000000
-68.011929,-41.964901,-5.995081,-1.000000,-0.000304,0.000000
-68.010339,-43.962053,-5.994174,-1.000000,-0.000304,0.000000
-68.009458,-45.966991,-5.995231,-1.000000,-0.000304,0.000000
-67.994540,-33.973949,-3.992137,-1.000000,-0.000304,0.000000
-67.993927,-35.963325,-3.992547,-1.000000,-0.000304,0.000000
-67.993621,-37.966110,-3.993980,-1.000000,-0.000304,0.000000
-67.994567,-39.962433,-3.995886,-1.000000,-0.000304,0.000000
-67.991349,-41.965951,-3.994601,-1.000000,-0.000304,0.000000
-67.990791,-43.962827,-3.994257,-1.000000,-0.000304,0.000000
-67.989725,-45.967576,-3.995032,-1.000000,-0.000304,0.000000
-67.994103,-33.960298,-2.003097,-1.000000,-0.000304,0.000000
-67.994355,-35.963457,-1.998905,-1.000000,-0.000304,0.000000
-67.992729,-37.967168,-1.993401,-1.000000,-0.000304,0.000000
-67.993492,-39.962456,-1.990620,-1.000000,-0.000304,0.000000
-67.992521,-41.966737,-1.991959,-1.000000,-0.000304,0.000000
-67.990839,-43.963702,-1.992458,-1.000000,-0.000304,0.000000
-67.991461,-45.968178,-1.992297,-1.000000,-0.000304,0.000000];

```

```

x=K1P4(:, 2);
y=K1P4(:, 3);
z=(K1P4(:, 1)+68)*(-1);

```

```

xlin = linspace(-48,-32,40);
ylin = linspace(-12,0,40);
[X,Y] = meshgrid(xlin,ylin);
Z = griddata(x,y,z,X,Y,'cubic');

```

```

subplot(2,2,4)
mesh(X,Y,Z)
surf(X,Y,Z)
axis tight; hold on
plot3(x,y,z, '.')
view(-100,50)
hold on

```

Предност *MatLAB*-а у односу на друге програме за реконструкцију површине, била би у скалирању оса, тако да су одступања прегледнија и лако се могу прочитати. Са слике се визуелно могу пратити одступања интерполационе површине. Даљим математичким програмирањем у програму *MatLAB* могу се одредити и апроксимативне равни, односно димензионална и геометријска одступања.

11.3 Мерење одступања

Мерење одступања облака тачака од номиналног *CAD* модела вршено је применом претходно описаних софтвера (поглавље 6). Овде су резултати мерења (координате облака тачака) добијени на *CMM* (експеримент из потпоглавља 10.3 и обрађени у *PC DMIS*) прво увезени у софтвер *GOM Inspect V8*. Након добијања резултата мерења одступања помоћу *GOM Inspect*-а извршено је поређење са резултатима добијеним софтвером *CMM - PC DMIS*. Такође сви делови су скенирани на три различита скенера (*ATOS II*, *ATOS IIe* и *ATOS Compact Scen M5*) и добијени су резултати димензионалних и геометријских одступања помоћу програма *GOM Inspect*. У овом делу рада су упоређени само резултати мерења дела 1 ($\phi 6$ *VHM*).

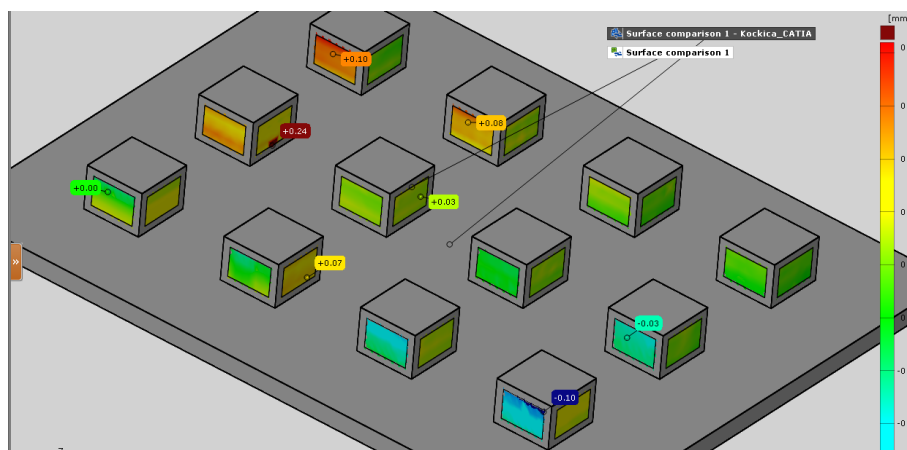
11.3.1 Мерење одступања облака тачака дела 1 ($\phi 6$ VHM) добијеног на CMM у GOM Inspect-у

Мерење одступања облака тачака (добијеног на CMM) од номиналног дела 1 ($\phi 6$ VHM) извршено је у софтверском пакету GOM Inspect V8.

Први корак представља увоз (STL) датотеке облака тачака и (IGS) датотеке 3D модела у GOM Inspect. Након увоза, извршено је поравнање облака тачака са номиналним моделом. GOM Inspect садржи алате за аутоматско поравнање (*Prealignment*, *Compute additional best-fit* и сл.). Међутима, да поравнање не би довело до померања облака тачака у односу на номинални модел, поравнање је извршено преко координатних система облака тачака и номиналног модела.

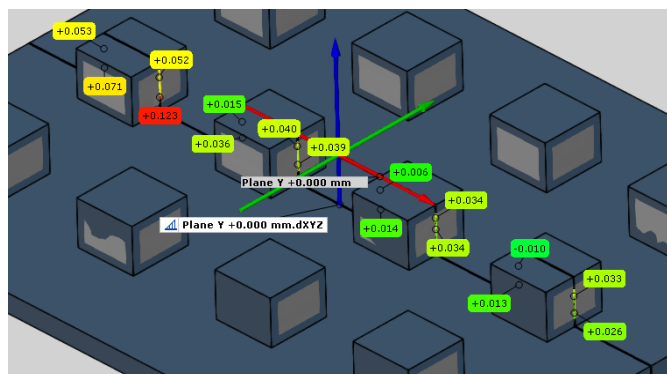
Следећи корак је поређење облака тачака са CAD моделом (*Surface Comparison on CAD*) када програм израчунава одступања облака тачак од CAD модела. Тако се добија приказ одступања, где црвена боја даје позитивно одступање, плава негативно, а зелена тачке без одступања (слика 11.22).

GOM Inspect садржи команду за мерење одступања карактеристичних тачака (*Deviation Labels*), која произвољним избором мери одступања тачака од модела. Изабране су карактеристичне тачке и констатовано је да се одступање тачака од CAD модела креће у интервалу од $-0,10$ до $+0,24$ mm (слика 11.22), док је боја у сагласности са приказаном легендом са десне стране.



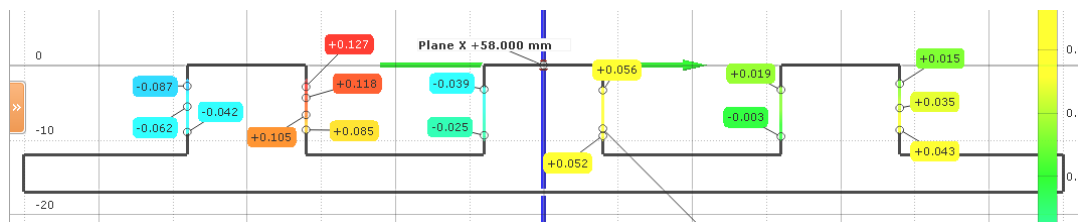
Слика 11.22. Измерена одступања карактеристичних тачака

На делу је могуће поставити и пресечне равни (*Inspection Section*) избором правца постављања и растојања од координатног система и пратити одступања тачака од посматраног пресека (слика 11.23).

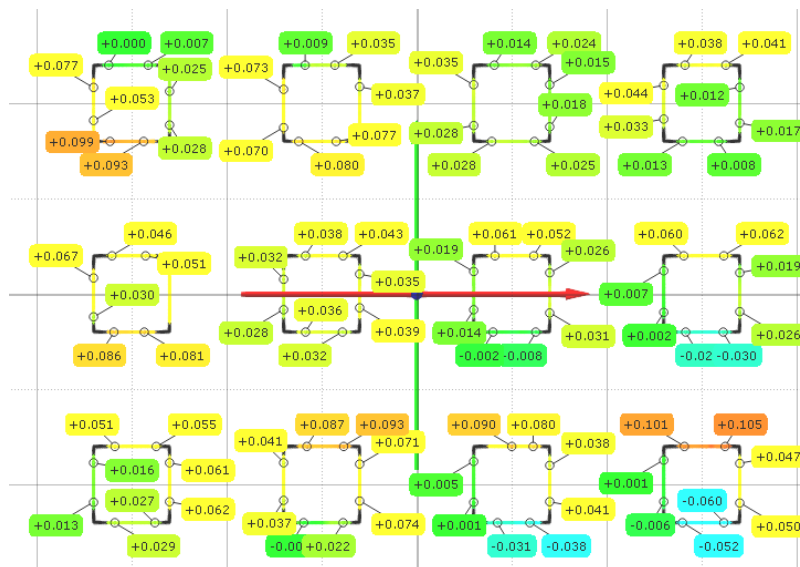


Слика 11.23. Попречни пресеци и карактеристична одступања

На слици 11.24 приказан је попречни X пресек дела са одступањима, док је на слици 11.25 приказан пресек по Z оси.

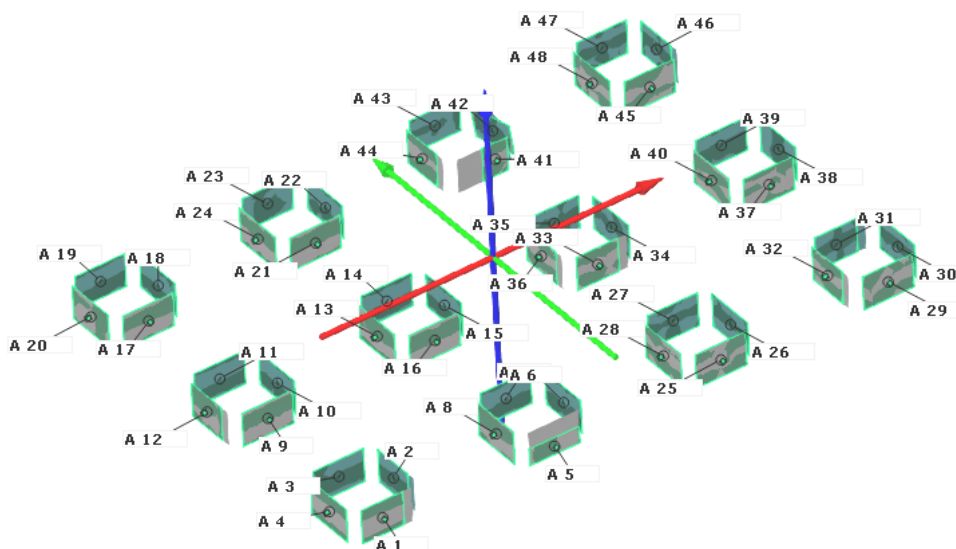


Слика 11.24. Попречни Y -пресек и измерена карактеристична одступања



Слика 11.25. Попречни Z -пресек и измерена карактеристична одступања

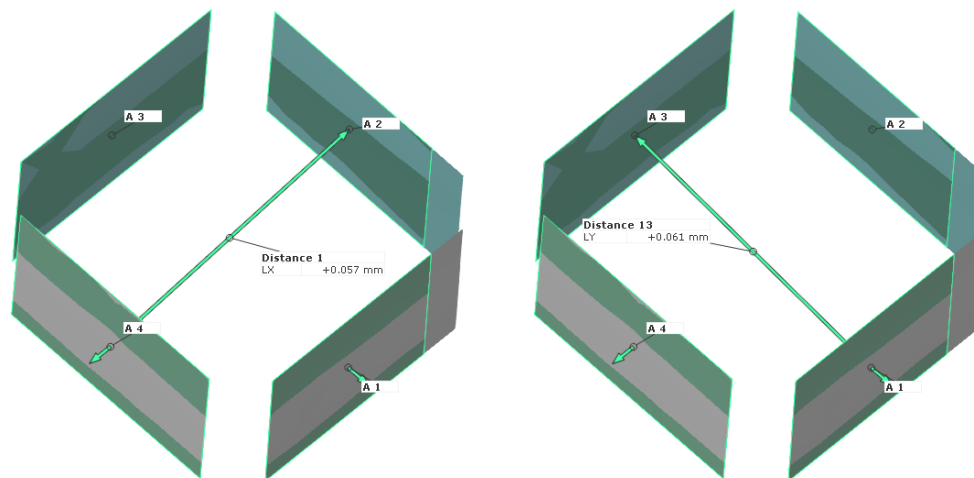
Следећи корак представља мерење димензионалних и геометријских одступања на основу генерисаних (апроксимираних) површина. Апроксимацијом су добијене површине (A1, A2, ... A48) са средишњом тачком (слика 11.26).



Слика 11.26. Апроксимативне равни и средишње тачке равни

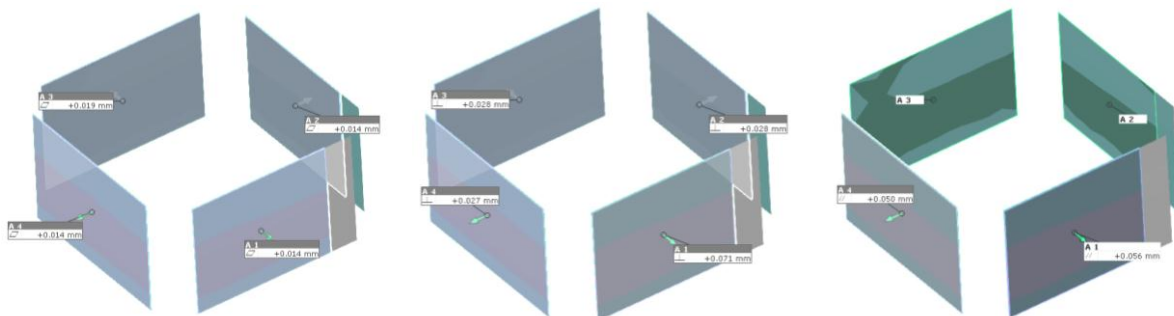
Код мерења одступања од дужинске мере, односно мерења растојања између две равни које су произвољног положаја у простору, поставља се питање које растојање између апроксимираних равни треба изабрати и израчунати. Овде је изабрано растојање између

средњих тачака апроксимативних равни и као такво је анализирано. Задавањем номиналне мере програм израчунава и исписује одступање (*Distance LX*) у оквир (слика 11.27).



Слика 11.27. Израчуната растојања (*X* и *Y*) између средишњих тачака равни

Геометријска одступања (одступања од равности, управности и паралелности) одређују се избором апроксимативних равни и избором толеранције из менија *Inspection*. Одступања од управности и паралелности захтевају избор референтне равни. Код управности референтна раван представља горња површина изданка, док је код паралелности за референтну раван мерене површине изабрана њој супротна површина изданка. Израчунате вредности геометријских одступања су приказане у оквиру (слика 11.28).



Слика 11.28. Измерена геометријска одступања површина

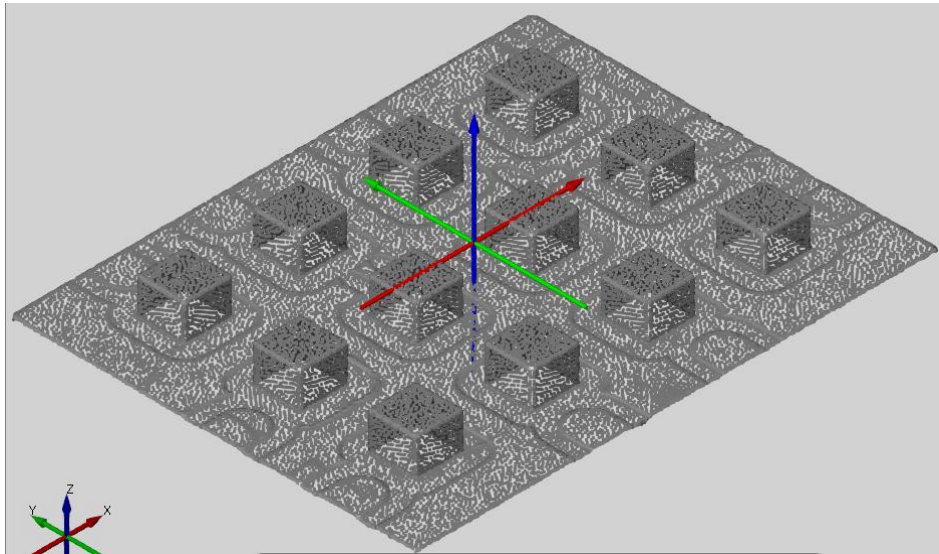
11.3.2 Мерење одступања облака тачака дела 1 ($\phi 6$ VHM) добијених на скенерима у *GOM Inspection*-у

Делови који су раније обрађени глодањем (експеримент 2) скенирани су са три различита скенера и то скенером: *ATOS II*, *ATOS IIe* и *ATOS Compact Scen M5*. Добијени облаци тачака су увезени у софтвер *GOM Inspection* и извршено је мерење димензионалних и геометријских одступања облака тачака од *CAD* модела.

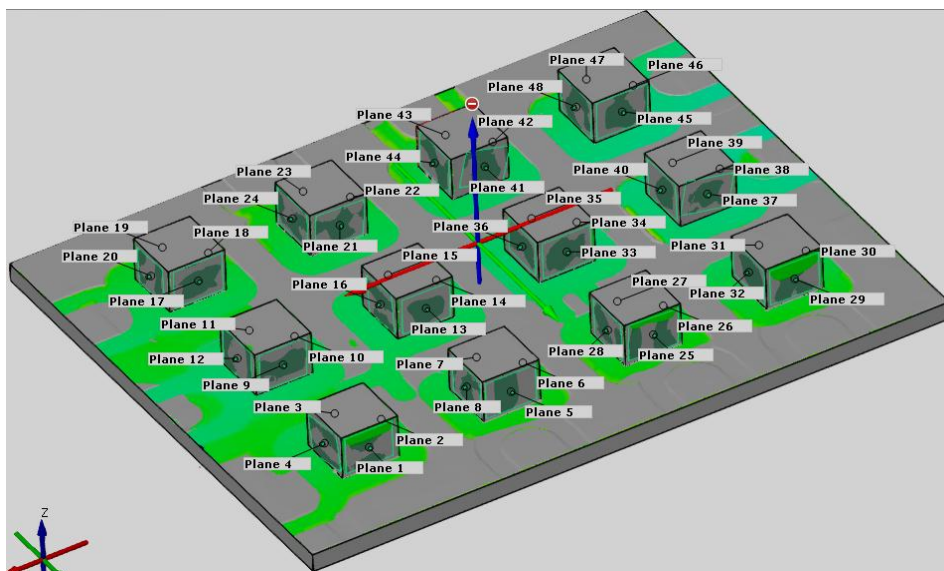
Поступак мерења облака тачака добијених на скенерима у *GOM Inspection*-у аналоган је поступку који је описан у потпоглављу 11.3.1.

Прво су увезене датотеке облака тачака (слика 11.29) и *3D CAD* модела дела, затим је извршено њихово уравнивање. Извршено је поређење одступања облака од модела, а затим су креиране апроксимативне равни на бочним површинама изданака (слика

10.30). На основу апроксимативних равни извршено је мерење димензионалних и геометријских одступања.



Слика 11.29. Облак тачака дела 1 ($\phi 6$ VHM) увезен у GOM Inspect



Слика 11.30. Апроксимирае површина на изданцима

Након извршеног мерења могуће је креирати извештаје мерења. GOM Inspect нуди извештаје у формату PDF, Excel и сличне. Овде су резултати мерења експортирани у Excel формату и у истом добијени дијаграми одступања.

11.3.3 Поређење измерених резултата одступања дела 1 ($\phi 6$ VHM) добијених на CMM у PC DMIS-у и GOM Inspect-у

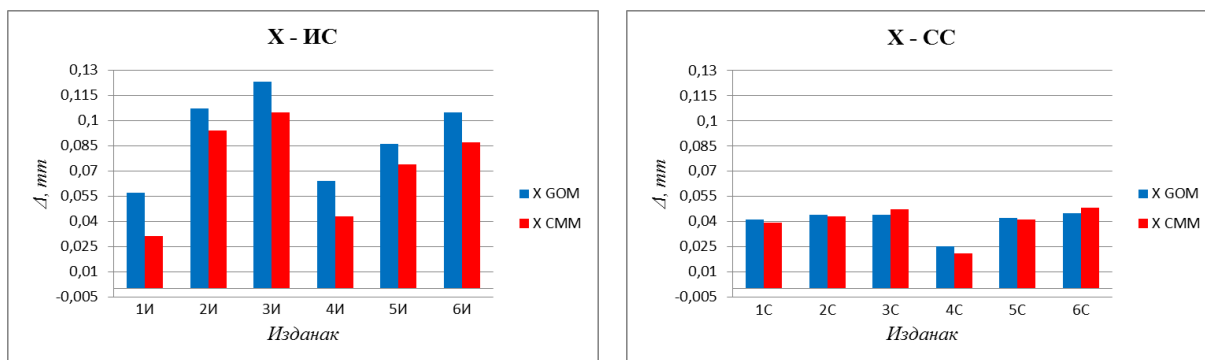
Резултати мерења добијени у GOM Inspect-у упоређени су са резултатима мерења обрађеним у PC DMIS-у (табела 11.2). Вредности приказане у табели, осим за димензионална одступања, представљају просечна одступања површина изданака од равности, управости и паралелности.

На основу одступања из табеле, у софтверу Microsoft Excel, обрађени су резултати и добијени дијаграми на којима се уочава разлика у мерењу наведених програма.

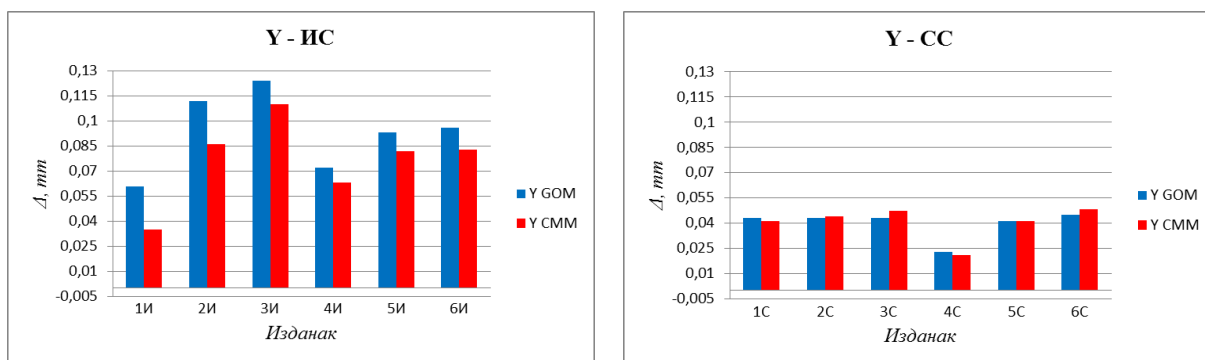
Табела 11.2. Поређење резултата мерења - GOM inspect и CMM

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
X GOM	0,057	0,107	0,123	0,064	0,086	0,105	0,041	0,044	0,044	0,025	0,042	0,045
X CMM	0,031	0,094	0,105	0,043	0,074	0,087	0,039	0,043	0,047	0,021	0,041	0,048
Y GOM	0,061	0,112	0,124	0,072	0,093	0,096	0,043	0,043	0,043	0,023	0,041	0,045
Y CMM	0,035	0,086	0,11	0,063	0,082	0,083	0,041	0,044	0,047	0,021	0,041	0,048
- GOM	0,015	0,021	0,028	0,012	0,018	0,023	0,015	0,023	0,014	0,017	0,013	0,026
- CMM	0,016	0,022	0,069	0,015	0,020	0,023	0,018	0,029	0,019	0,018	0,016	0,026
⊥ GOM	0,039	0,036	0,031	0,015	0,032	0,041	0,037	0,044	0,018	0,028	0,032	0,043
⊥ CMM	0,035	0,039	0,075	0,018	0,027	0,035	0,037	0,045	0,021	0,020	0,029	0,034
// GOM	0,054	0,022	0,037	0,017	0,021	0,032	0,028	0,027	0,015	0,031	0,024	0,049
// CMM	0,055	0,030	0,050	0,016	0,026	0,030	0,029	0,044	0,026	0,031	0,022	0,042

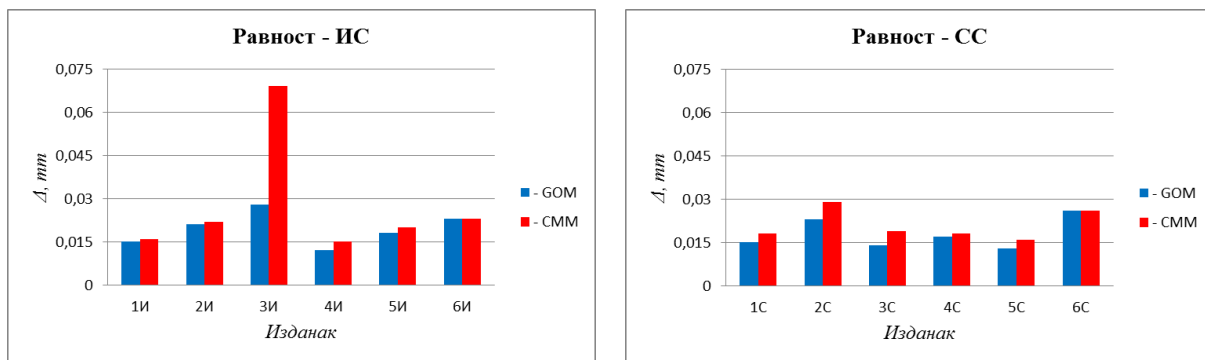
Резултати су добијени из истог облака тачака (добијеног на CMM), обрађеног у програму GOM Inspect (X GOM) и помоћу програма PC DMIS (X CMM).



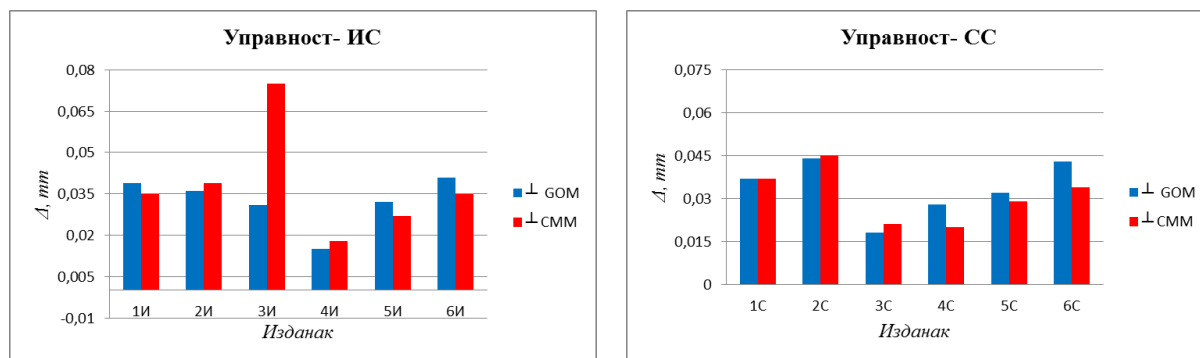
Слика 11.31-а. Поређење одступања изданака по X оси



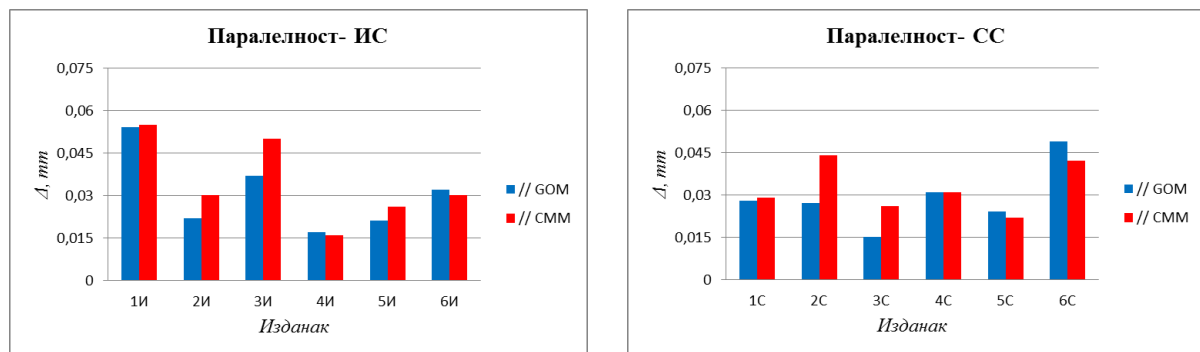
Слика 11.31-б. Поређење одступања изданака по Y оси



Слика 11.31-в. Поређење одступања површина изданака од равности



Слика 11.31-г. Поређење одступања површина изданака од управности



Слика 11.31-д. Поређење одступања површина изданака од паралелности

На основу дијаграма приказаних на сликама 11.31-а,б,в,г,д може се констатовати да постоје разлике у резултатима мерења истог облака тачака (добијеног на *CMM*) у програму *PC DMIS* у односу на програм *GOM Inspect*. Код изданака обрађених истосмерним (ИС) глодањем разлике су израженије него код изданака обрађених супротносмерним (СС) глодањем. Примећена је значајна разлика код измерене равности и управности изданка 3И, што оставља простор за даље истраживање. Претпоставља се да је разлике изазвало рачунање различитом методом интерполације.

10.3.4 Поређење измерених резултата одступања дела 1 ($\phi 6$ *VHM*) добијених на *CMM* у *PC DMIS*-у и резултата добијених скенерима у *GOM Inspect*-у

Овде ће бити упоређени резултати мерења изданака дела 1 добијеног глодањем глодалом $\phi 6$ *VHM*. С обзиром да је унапред претпостављено да су резултати добијени на *CMM* тачнији, исти су изабрани за референтне, па су на основу њих изведени коментари у вези прецизности коришћених скенера.

Након скенирања, добијени облаци тачака увезени су у софтвер *GOM inspect* и извршено је мерење димензионалних и геометријских одступања делова. Резултати мерења димензионалних одступања (по *X* и *Y*) и просечне вредности (одступања површина по изданку) геометријских одступања (– равности, ⊥ управности и // паралелности) и вредности одступања облака тачак добијених на *CMM* израчунати у програму *GOM inspect*, приказани су у табели 11.3.

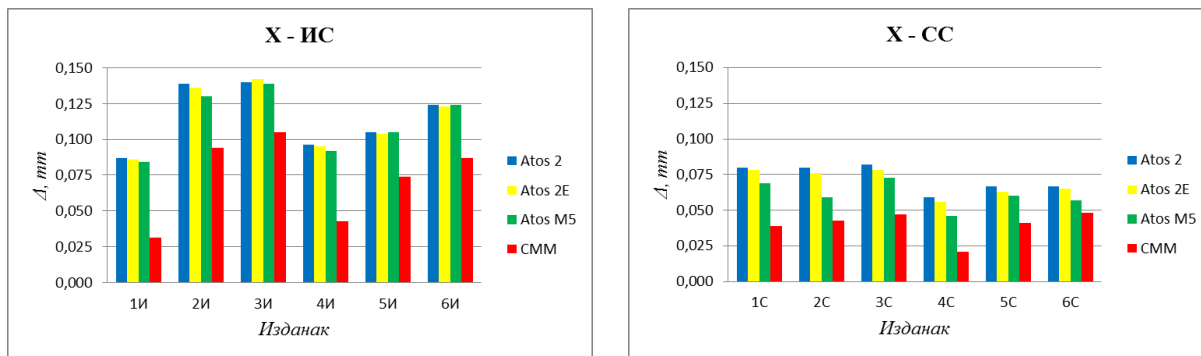
Поступак генерисања површина у програму *GOM Inspect*, облака тачака добијеног на скенеру, описан је у потпоглављу 11.2.2. Мерења димензионалних и геометријских одступања описан је у потпоглављу 11.3.2.

Вредности одступања од димензионалних и геометријских одступања измерени у програму *PC DMIS* из резултата мерења на *CMM*, раније су коришћени и приказани у потпоглављу 10.2.

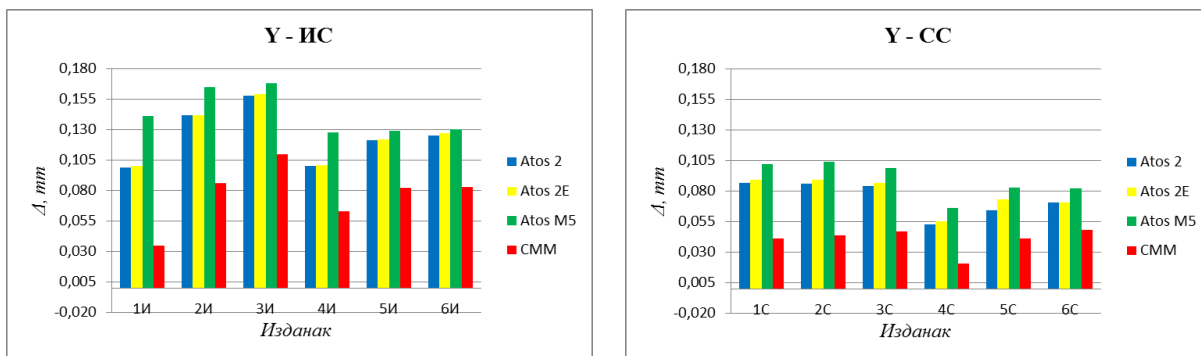
Табела 11.3. Резултати мерења димензионалних и геометријских одступања

		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
X	CMM	0,031	0,094	0,105	0,043	0,074	0,087	0,039	0,043	0,047	0,021	0,041	0,048
	ATOS II	0,087	0,139	0,140	0,096	0,105	0,124	0,080	0,080	0,082	0,059	0,067	0,067
	ATOS IIe	0,086	0,136	0,142	0,095	0,104	0,123	0,078	0,076	0,078	0,056	0,063	0,065
	ATOS M5	0,084	0,130	0,139	0,092	0,105	0,124	0,069	0,059	0,073	0,046	0,060	0,057
Y	CMM	0,035	0,086	0,11	0,063	0,082	0,083	0,041	0,044	0,047	0,021	0,041	0,048
	ATOS II	0,099	0,142	0,158	0,100	0,121	0,125	0,087	0,086	0,084	0,053	0,064	0,071
	ATOS IIe	0,100	0,142	0,159	0,101	0,122	0,127	0,089	0,089	0,087	0,055	0,073	0,071
	ATOS M5	0,141	0,165	0,168	0,128	0,129	0,13	0,102	0,104	0,099	0,066	0,083	0,082
-	CMM	0,016	0,022	0,069	0,015	0,020	0,023	0,018	0,029	0,019	0,018	0,016	0,026
	ATOS II	0,023	0,035	0,026	0,018	0,022	0,029	0,024	0,043	0,022	0,022	0,047	0,017
	ATOS IIe	0,016	0,022	0,023	0,015	0,017	0,022	0,017	0,017	0,014	0,017	0,011	0,012
	ATOS M5	0,017	0,029	0,032	0,029	0,027	0,026	0,022	0,022	0,028	0,020	0,031	0,020
⊥	CMM	0,035	0,039	0,075	0,018	0,027	0,035	0,037	0,045	0,021	0,020	0,029	0,034
	ATOS II	0,049	0,061	0,037	0,024	0,044	0,054	0,041	0,069	0,025	0,028	0,067	0,042
	ATOS IIe	0,041	0,040	0,032	0,019	0,038	0,045	0,037	0,039	0,019	0,023	0,033	0,036
	ATOS M5	0,052	0,051	0,048	0,043	0,055	0,049	0,043	0,049	0,034	0,027	0,051	0,049
//	CMM	0,055	0,030	0,050	0,016	0,026	0,030	0,029	0,044	0,026	0,031	0,022	0,042
	ATOS II	0,062	0,071	0,066	0,035	0,035	0,060	0,047	0,069	0,033	0,032	0,094	0,026
	ATOS IIe	0,053	0,033	0,053	0,022	0,030	0,042	0,035	0,033	0,020	0,027	0,025	0,014
	ATOS M5	0,078	0,045	0,081	0,071	0,047	0,049	0,029	0,032	0,051	0,036	0,046	0,038

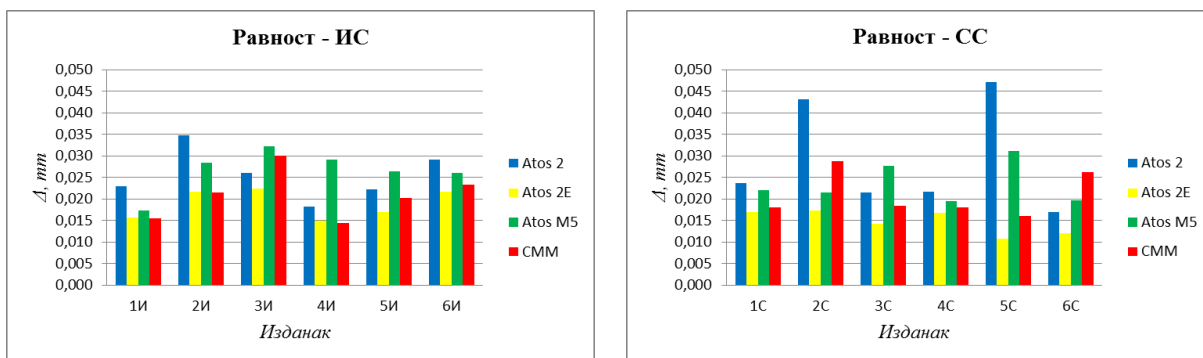
Резултати измерених одступања, односно преосечне вредности по површинама изданака приказани су на следећим дијаграмима (слике 11.32).



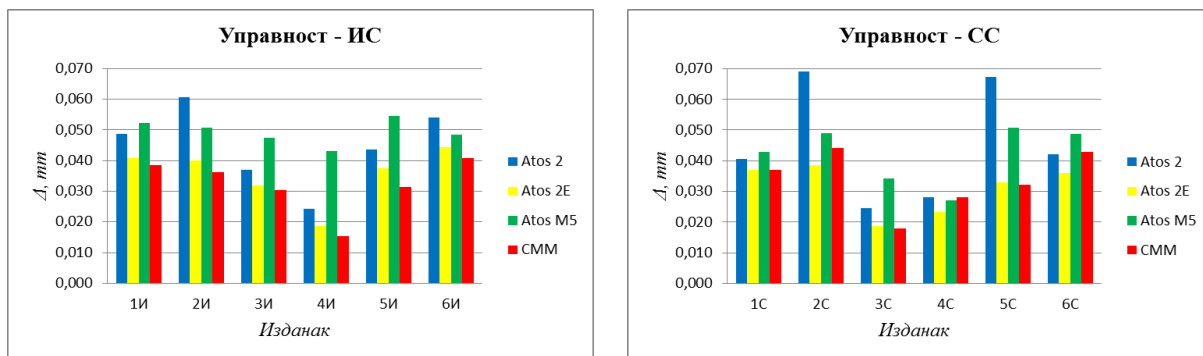
Слика 11.32-а. Поређење одступања по X-оси



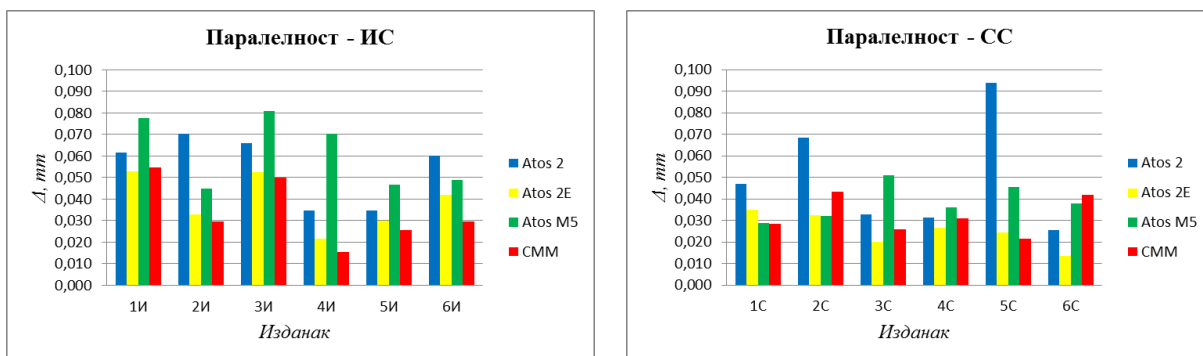
Слика 11.32-б. Поређење одступања по Y-оси



Слика 11.32-в. Поређење одступања од равности



Слика 11.32-г. Поређење одступања од управности



Слика 11.32-д. Поређење одступања од паралелности

На основу дијаграма приказаних на сликама 11.32-а,б,в,г,д може се закључити да су разлике у одступању измерених вредности, добијених на различитим скенерима у односу на координатну мерну машину, видне. Одређивањем средње вредности одступања скенера у односу на одступања измерена на мерној машини констатовано је да је модел скенера *ATOS M5* показао највеће одступање (од 0,014 mm), њега следи скенер типа *ATOS II* (са одступањем од 0,11 mm), док је најмање укупно одступање у односу на координатну мерну машину постигнут скенером типа *ATOS IIe* (0,002 mm).

Поглавље 12

РАЗВОЈ МОДЕЛА ЗА РЕГЕНЕРИСАЊЕ NC КОДА

CAD/CAM системи могу да генеришу *CNC* програме на основу геометрије дела, али не помажу програмерима у избору одговарајућих режима резања, геометрија алата и других параметара процеса. Комерцијални *CAM* софтвери су намењени за генерисање *NC* програма углавном са математичке тачке гледишта и обично садрже константне параметре резања за одређену путању алата и не симулирају очекивани квалитет обрађених површина, а такође не узимају у обзир механичке аспекте процеса глодања као што су силе резања и девијација резаног алата. Сходно томе, машинска пракса се у већини случајева при операцији глодањем вретенастих глодалом ослања на постојећа знања, а параметри процеса резања нису оптимални. Недовољно позната зависност *NC* кода и захтева за квалитетом обрађене површине (димензионалне и геометријске тачности и храпавости) намеће потребу за развојем оваквог модела.

У оквиру овог поглавља анализиран је модел за управљање улазним параметрима процеса обраде са аспекта решавања проблема регенерисања *NC* кода у циљу побољшања квалитета обрађеног дела.

Тачност обраде зависи од одступања положаја резне ивице алата од теоретски захтеване вредности, односно одступања стварне путање алата од очекиване путање алата. Тачност обраде је условљена постојањем геометријских грешака, неуниформне термичке експанзије елемената структуре машине и статичко/динамичког оптерећења елемената производног процеса: алат - део - прибор - машина. Као последица ових фактора, ствара се резултујућа грешка која се јавља као грешка између резног алата и радног дела и на коју може да се утиче регенерисањем *NC* кода. Квалитет генерисане површине може се побољшати регенерисањем *NC* кода посредством поступака компензације путање алата као и оптимизацијом параметара процеса различитим методама.

Као што је наведено у поглављу 7, утицајни параметри на грешку/квалитет генерисане површине глодањем, могу се поделити на:

- технолошке параметре, у које спадају: дубина резања, ширина резања, брзина резања, помоћно кретање, хлађење и сл,
- параметре геометрије алата, односно: хабање алата, пречник алата, број зуба, угао спирале, грудни и леђни угао, материјал алата,
- параметре материјала обрађиваног дела, као што су: еластичност, пластичност, заостали напони, микроструктура и сл.,
- параметре машине алатке и то: стезање алата, силе резања, радна околина, угиб (савијање) делова машине и стезног прибора и
- параметри стратегије обраде, као што су: истосмерна и супротносмерна обрада, прилаз алата, угао захвата и сл.

Досадашњим експерименталним истраживањима у вези компензације путање алата (преглед литературе се може наћи у раду [1]) парцијално је испитиван утицај већег броја наведених утицајних параметара на грешку обраде, односно на квалитет генерисане површине глодањем.

Резултати бројних експерименталних истраживања на тему оптимизације технолошких параметара обраде, могу се наћи у литератури [263-268].

Досадашња експериментална истраживања су довела до развоја великог броја модела који предвиђају грешку обраде и изведене су многе корелативне зависности између улазних параметара процеса обраде и параметара квалитета добијеног дела. Међутим, модели углавном посматрају утицај параметара на грешке обраде појединачно (или неколико параметара истовремено). Такође, модели се углавном односе на један од параметара квалитета обраде (нпр. хрпавост, димензионалне или геометријске грешке и др.).

Са друге стране, многа истраживања су вршена у циљу корекције добијених грешака обраде компензацијом путање алата и оптимизацијом технолошких параметара обраде.

Како је утицај параметара обраде пресудан на настанак грешака обраде, то се може оптимизацијом параметара обраде или корекцијом путање алата при регенерисању *NC* кода, сваки утицајни фактори на грешку обраде посматрати посебно.

12.1 Елементи модела

Основни елементи модела за регенерисање *NC* кода, развијеног у овој дисертацији (слика 12.1), чине првенствено *CAD/CAM* систем у који се увозе улазне информације потребне за генерисање *NC* кода. Увозе се подаци везани за технолошке параметре, геометрију резног алата, као и захтеви пројектовања задати кроз *CAD/CAT* модел дела.

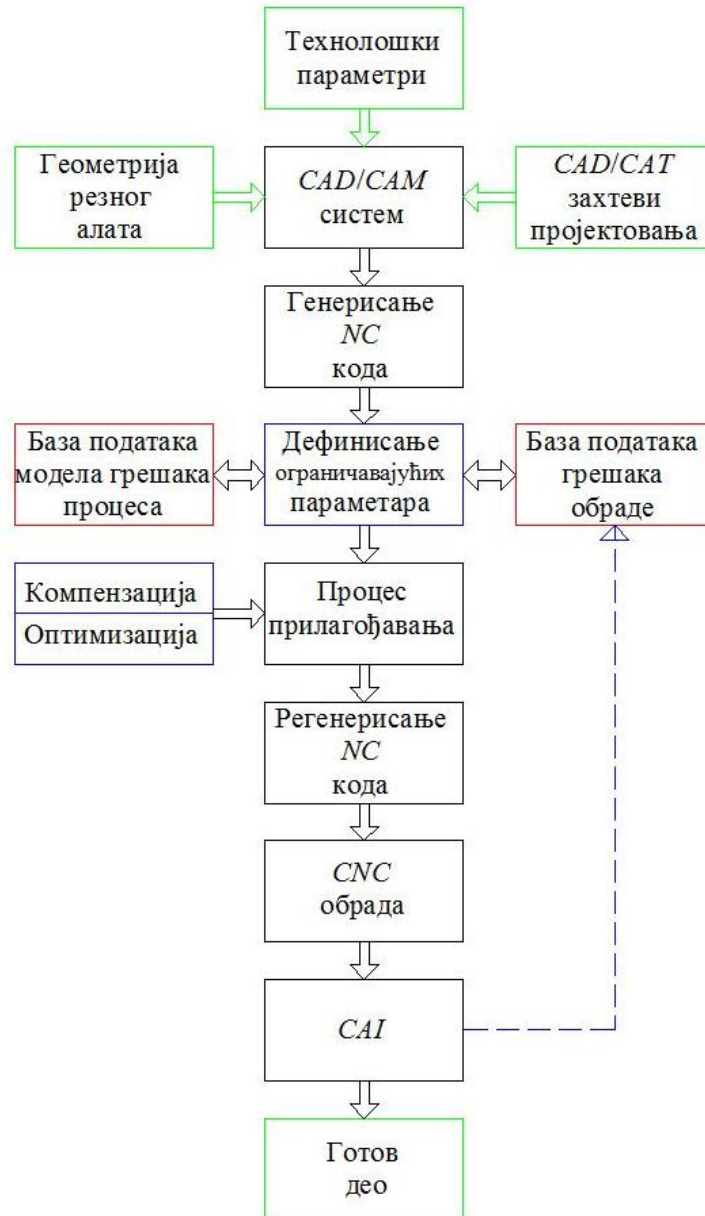
На основу улазних параметара *CAM* систем генерише стандардни *NC* код. Затим припремак дела, са улазним информацијама и генерисаним *NC* кодом, прелази у фазу дефинисања ограничавајућих параметара процеса.

Дефинисање ограничавајућих параметара представља релацију између базе података модела грешке процеса и базе података грешке обраде. База података модела грешке процеса представља базу постојећег „знања“ на основу којих се бира постојећи модел зависности како би се грешка обраде елиминисала.

Уколико систем препозна модел грешке из базе података грешака процеса, примењује се и врши процес прилагођавања. У процесу прилагођавања врши се избор поступка отклањања грешке. Отклањање грешке обраде се може извршити поступком компензације или оптимизације параметара обраде. Након процеса прилагођавања извршава се поступак регенерисања *NC* кода, а затим и обрада на *CNC* машини алатки.

Обрађени део се затим мери неким уређаје за мерење (координатном мерном машином или бесконтактним уређајем) и резултати мерења се анализирају поступцима рачунаром подржаног мерења (CAI).

Резултати мерења се шаљу у базу података грешке обраде, а део, уколико задовољава захтеве пројектовања, излази из процеса обраде или, ако не задовољава захтеве појектовања (техничког цртежа), а процени се да је могућа дорада, враћа се на дораду.

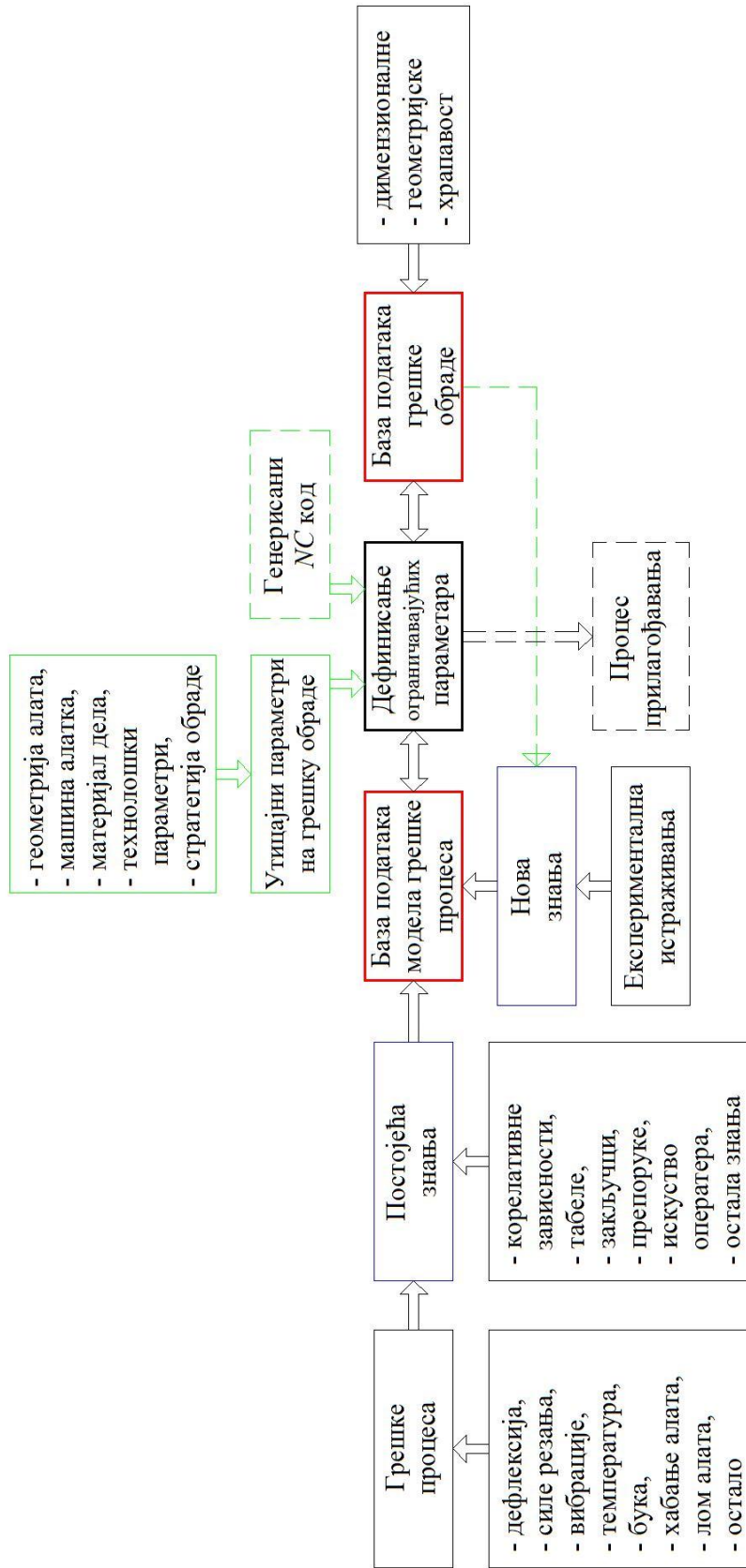


Слика 12.1. Модел за регенерисање NC кода

12.2 База података модела грешака процеса

База података модела грешака процеса представља везу између улазних и излазних података и базе грешака обраде (слика 12.2).

Грешке процеса представљају непожељне појаве до којих долази током процеса обраде. У грешке процеса се убрајају: угиб алата и обрађиваног дела, вибрације које се јављају током обраде, температура, бука, отпори резања, лом алата, хабање алата и др.



Слика 12.2. База података модела грешака процеса

База података модела грешака процеса садржи сва досадашња знања, односно искуства и она се непрестано поткрепљује новим знањима добијених експерименталним истраживањима и оних која проистичу из обраде у производним условима. Постојећа знања представљају корелативне и друге зависности добијене непрестаним испитивањима, постојеће табеле, закључци, препоруке, а ако у бази не постоји одговарајуће знање, искористиће се и искуство оператера.

Корелативне зависности представљају везу између квалитета обраде, утицајних фактора на грешке обраде и грешака процеса. Утицајни фактори су везани за познате (измерене) параметре грешака везане за геометрију и стезање алата, машину алатку, материјал обрађиваног дела, стратегију обраде као и технолошке параметре.

Захваљујући бази података модела грешака процеса, а с обзиром на утицајне параметре на грешку обраде, информација из *CAD/CAM* система са захтевима пројектовања, технолошких параметара и геометрије алата, унапред се може претпоставити очекивана грешка обраде и извршити њена корекција регенерисањем *NC* кода.

12.3 База података грешака обраде

Из базе података грешака обраде може се одредити (предвидети) очекивана грешка на основу улазних параметара обраде и модела грешака процеса. База података грешака обраде је база постојећих резултата експерименталних испитивања.

Грешке обраде дефинишу квалитет обраде дела и садрже информације о димензионалним и геометријским одступањима, као и о информације о квалитету обрађене површине, односно храпавости.

Ова база података се поткрепљује сталним испитивањима и у зависности је са моделом грешака процеса. Информације о грешкама су усклађене са стандардима о димензионалним и геометријским толеранцијама као и о прописима везаним за површинске храпавост.

У базу се увозе подаци добијени рачунаром подржаног мерења (*CAI*) обрађеног дела, односно мерењем одступања резултата (облака тачака) добијених на мерном (контактном или бесконтактном) уређају и *CAD/CAT* модела у складу са захтевима пројектовања.

Применом *CAM* система генерише се *NC* код који у себи садржи очекивани квалитет обрађене површине. Поређењем ових информација са подацима садржаним у бази података са резултатима експерименталних истраживања добија се информација о адекватности предложених услова обраде генерисаних у *NC* коду. Уколико постоји неусклађеност, односно уколико се констатује да је у предложеним условима обраде експерименталним испитивањима добијен квалитет површине који не одговара захтевима, неопходно је кориговати предложене услове обраде, односно у *NC* код унети кориговане податке. Приказани модел треба да омогући корекцију *NC* кода на основу грешака процеса (хабање алата, угиб, стабилност, крутост система алат-део-машина и др.).

Део се обрађује у новим условима обраде, а подаци о коначном квалитету обрађене површине се складиште у бази података грешака обраде.

Овакав модел поседује могућност уноса великог броја утицајних параметара на грешке обраде и модела грешака процеса, а који могу да се контролишу корекцијом *NC* кода.

У базу података се може унети и *CAD* модел са додељеним толеранцијама, алатима за рачунаром подржано толерисање и тако упоређивати добијена димензионална и геометријска одступања са дозвољеним.

За разлику од претходно наведених модела, модел предложен у овој дисертацији узима у обзир све постојеће моделе и све утицајне параметре на квалитет генерисане површине, као и начине компензације и оптимизације, било да се ради о храпавости, димензионалној тачности или геометријској тачности дела. Такође, модел може применити било који постојећи приступ компензације путање алата или оптимизације технолошких параметара.

Такође, ранији модели су се базирали или на *off-line* или на *on-line* компензацији или оптимизацији обраде. Наведени модел врши компензацију и оптимизацију комбинацијом обе, односно, ако модел грешке процеса постоји у бази података, компензација и оптимизација ће се одвијати поступком *on-line*, у супротном, одвијаће се поступком *off-line* компензације или оптимизације, с тенденцијом да прерасте у *on-line* компензацију или оптимизацију накнадним добијањем одговарајућих корелативних зависности параметара процеса и жељеног квалитета обраде.

Поглавље 13

ЗАКЉУЧАК

У циљу регенерисања *NC* кода применом *3D* анализе одступања која се јављају током обраде и савремене мерне опреме, како би се дошло по потребних теоретских знања и развоја модела за регенерисање *NC* кода, истраживања су започета анализом основних информација потребних за геометријско димензионисање и толерисање применом рачунара.

Геометријска одступања су неминовна на сваком произведеном делу услед производне непрецизности и мерне несигурности. Из разлога праћења, ограничавања, мерења и контроле геометријских одступања, у пројектовање поизвода је уведено геометријско димензионисање и толерисање (*GD&T*). Међутим, поставља се питање шта *GD&T* представља у систему израде и тачности дела, препознавању елемената дела од стране машине и могуће корекције програмског кода у циљу побољшања квалитета. Све ово довело је до потребе за успостављањем зависности између захтева цртежа и пројектовања дела, израде дела, његовог мерења (на координатној мерној машини или на неком оптичком мерном уређају), добијања извештаја мерења и препознавања тачности односно нетачности, и *NC* програмског кода. Другим речима, да се путем програмског кода машине алатке индиректно утиче на геометријска одступања и тачност израде дела.

Интеграција интелигентног пројектовања у производњу, монтажу и мерење, подразумева да је информација о толеранцији од стране рачунара и мерне опреме читљива. Вођена индустријском потребом и напредком рачунарства, актуелна истраживања су фокусирана на моделирању и презентацији информације о толеранцији, како би произвела геометријске толеранције читљиве од стране рачунара. Развијени су разни приступи моделирању толеранције који нуде различите нивое

софистицираности и могућности. Моделирање толеранција се обично постиже употребом алата за рачунаром подржано толерисање.

Током последње деценије напредак технологије хардвера и софтвера резултирао је машинама које су потенцијално способне за мерења високих прецизности, а координатна метрологија је постала есенцијална за индустријску димензионалну метрологију. У дисертацији је извршена анализа мерних система, мерних сензора, софтвера за обраду и приказ резултата мерења. Као и мерна несигурност координатних мерних машина.

Како неконтактни системи за скенирање свакодневно постају све присутнији у индустријском мерењу, иако су још увек мање тачности наспрам одговарајућих контактних система, њиховим усавршавањем и интегрисањем у производњу омогућава се мерење директно на машини, *off-line* или *on-line* а самим тим и могућност за корекцијом *NC* програма у циљу повећања квалитета обраде дела. У дисертацији је анализирано постојеће стање везано за неконтактне системе и њихов развој. Такође је проучаван поступак генерисања површинског модела из облака тачака и проблема који се том приликом јављају. Може се очекивати да овако убрзан развој ускоро доведе до интензивне примене неконтактних мерних уређаја у индустријском мерењу, повлачећи за собом и поступке генерисања и анализу површина из облака тачак.

Планирање рачунаром подржаног мерења је тема истраживања дуже од 30 година. Већина ових система је развијена за координатне мерне машине, док је истраживање мерења неконтактним уређајима у порасту задњих година. То је допинело интензивном развоју реверзног инжењерства.

Смањење трошкова производње је од суштинског значаја за унапређење конкурентности производних предузећа. Квалитет обрађеног дела је уско везан за остварену тачност димензија, зато је важно развити методологије за њену идентификацију и системе за потребне компензације, односно корекције *NC* кода у циљу побољшања тачности израде дела. Постоје два основна приступа која се користе за побољшање тачности израде делова: мапирање померања алат-део и корекција завршне путање алата или интерполација позиције алата компензацијом димензионалних грешака. У дисертацији је изабрана метода корекције завршне путање алата и корекција параметара услова обраде.

Топографија површине код обраде обимним глодањем вретенастим глодалом је у директној вези са параметрима режима обраде (дубина резања, брзина резања, брзина помоћног кретања) и постављања и стежања глодала, радијалног одступања зуба, угiba глодала услед отпора резања, динамике система, хабања зуба глодала и др. Изведен је математички модел који путање кретања зуба глодала и површинску топографију узимајући у обзир грешку стежања глодала и (радијално) одступање мера зуба заснован на параметарским једначинама са циклоидним путањама сечива зуба алата које је извео *Martellotti*. Његов модел је узимао у обзир грешку услед паралелне померености и нагнутост осе глодала у односу на осу обртања алата. Увођењем у овај модел радијално одступање зуба глодала добијен је унапређени математички модел који знатно реалније описује топографију површине добијене глодањем. Модел је развијен преко матрица трансформације, закошености и ротације референтних координатних система модела. Бројним експерименталним испитивањима је верификован развијени математички

модел. Може се закључити да се познавањем нетачности постављања глодала на вратило машине избором адекватних параметара услова обраде може управљати квалитетом обрађене површине.

У овиму дисертације извршен је велики број експерименталних истраживања при чему је претпоставка била да су елементи машине и стезног прибора апсолутно крути и да не представљају потенцијални извор грешака обраде. Вршена је обрада делова од алуминијума са различитим технолошким параметрима. Коришћена су равна вретенаста глодала различите геометрије, машина на којој су вршене обраде је троосна глодалица. Примењиване су различите стратегије обраде. Мерења су вршена савременом мерном опремом и то координатном мерном машином и различитим оптичким скенерима. Резултати добијени помоћу мерне опреме увезени су у софтвер за мерење и добијена су димензионална и геометријска одступања. Квалитет површине је мерен уређајем за мерење храпавости. Резултати мерења приказани су одговарајућим дијаграмима помоћу адекватног софтвера.

Утицај ширине резања на димензионална одступања цилиндричних и призматичних изданака, анализиран је у оквиру првог експеримента и добијене су корелативне зависности. Услед дефлексије алата дошло је до одступања обрађиване површине од потребне тачности дефинисане моделом. Како је обрада вршена различитим стратегијама, закључено је да се приликом истосмерног глодања и цилиндричних и призматичних изданака, повећањем ширине резања, повећава и одступање од номиналне мере, док за супротносмерно глодање важи обрнуто. Ово се може објаснити тиме што код истосмерног глодања вретенасто глодало са повећањем ширине резања све више тежи да „побегне“ (одбије се) од обрађиваног дела, док код супротносмерног глодања алат, са повећањем ширине резања, тежи да привуче предмет обраде ка себи. На тај начин захвата се више материјала него што је поступком потребно. Такође је констатовано да путања алата (кружна или праволинијска) не утиче на димензионалну тачност.

Следећа експериментална испитивања обухватила су утицај промене технолошких параметара обраде (брзине резања и брзине помоћног кретања) на димензионална и геометријска одступања, као и на површинску храпавост. Обрада је вршена глодалима различите геометрије и различитим стратегијама обраде. Приказана је обрада три дела од алуминијума са призматичним изданицима. Сваки изданак делова је обрађиван различитим параметрима и глодалима различите геометрије. Добијене су корелативне зависности и закључено да се променом технолошких параметара може утицати на грешку обраде. Уочено је да је храпавост већа при мањој брзини резања и већа код обраде поступком истосмерног него код супротносмерног глодања, што је у складу са ранијим теоретским принципима.

Наредним експериментом приказан је утицај стезања (паралелне померености осе и нагнутости осе) глодала као и утицај одступања зуба глодала на генерисање површинске топографије обрађиваног дела. Такође је изведен математички модел који ове неправилности, геометрију алата и технолошке параметре резања, узима у обзир. Модел је показао добро поклапање добијених линија профила топографије површине дела са добијеном топографијом површине настале глодањем, што је и визуелно приказано на одговарајућим фотографијама. Констатовано је да развијени модел веома

добро описује микро геометрију површине, односно њену топографију, код обраде глодањем при чему су у обзир узете и нетачности стезања голодала и одступања положаја зуба. Такође је констатовано да је могуће параметрима услова обраде (брзина резања и брзина помоћног кретања) утицати на квалитет (топографије) површине генерисане глодањем и у случају нетачности позиционирања и стезања глодала.

Експерименталним истраживањима је анализиран и утицај промене дубине резања, односно претпостављене корекције путање алата, на геометријску и димензионалну тачност обрађеног дела. Обрада је вршена различитим малим дубинама резања и без заузимања нове дубине резања ($a=0$), са различитим стратегијама обраде. Експеримент је показао да задате (оčekиване) дубине резања нису остварене, тј. да није уклоњен очекивани слоја материјала дела. Односно, очекиване и стварне (добијене) димензионалне мере дела нису једнаке и да постоји одређено одступање, које се разликује за различите вредности дубине резања.

Следећа истраживања у дисертацији односе се на добијање облака тачака савременим мерним уређајима, генерисање површине из облака тачака, мерење одступања и анализу резултата. Делови са призматичним изданима коришћени у претходним експерименталним истраживањима, након мерења на координатној мерној машини и добијених вредности димензионалних и геометријских одступања у софтверу *PC DMIS*, коришћени су у овом поглављу за оптичко скенирање савременом мерном безконтактном опремом *ATOS*.

У дисертацији су најпре приказани снимљени облаци тачака добијени помоћу координатне мерне машине (претварањем *XYZ* датотеке у *STL* датотеку) и облаци тачака добијени помоћу три различита *ATOS* скенера. Облаци тачака послужили су даље за генерисање површина. Генерисање површина извршено је у три различита софтвера (*CATIA*, *GomInspect* и *MatLAB*) додељивањем апроксимативних равни свакој површини изданка (у програму *CATIA* и *GomInspect*), односно провлачењем интерполационе криве површине кроз области бочних површи облака тачака изданка (у *MatLAB* -у). Развијена апликација за постављање интерполационих криве површине кроз области бочних површи облака тачака изданка применом софтвера *MatLAB*-а.

Апроксимиране површине послужиле су за мерење димензионалних и геометријских одступања облака тачака делова од номиналног *CAD* модела. Најпре је облак тачака, добијен помоћу координатне мерне машине, увезен у *GomInspect* софтвер и извршено мерење димензионалних и геометријских одступања облака тачака дела од *CAD* модела. Облаци тачака добијени на оптичким скенерима такође су увезени у *GomInspect* софтвер и добијена су одступања.

Затим је извршено поређење резултата мерења истог облака тачака добијених у софтверу *PC DMIS* са резултатима добијених у софтверу *GomInspect*. Извршено је поређење резултата мерења и закључено да постоје незнатне разлике у измереним вредностима код димензионалних и геометријских одступања. Констатовано је да су се разлике у мерама истог облака тачака, применом два различита софтвера за мерења, десила услед различитих математичких метода апроксимације површине.

Извршено је и поређење измерених вредности димензионалних одступања истих делова снимљених на различитим скенерима. Примећено је да су се измерене

вредности разликовале. Вредности измерених одступања облака тачака добијени скенерима су упоређени и са мерама добијеним са координатне мерне машине помоћу софтвера *PC DMIS*. Констатовано је да су одступања облака тачака снимљеног на координатној мерној машини мања од вредности одступања облака тачака добијених на оптичким скенерима. Из наведеног се може донети закључак о већој тачности поступка мерења димензионалних и геометријских одступања помоћу координатне мерне машине него мерења истог дела на оптичким скенерима. Такође је констатовано да су и облаци тачака добијени различитим оптичким скенерима показали различита димензионална и геометријска одступања од номиналног *CAD* модела.

У оквиру дисертације развијен је модел за управљање улазним параметрима процеса обраде са аспекта решавања проблема регенерисања *NC* кода у циљу повећања тачности обраде и побољшања квалитета обрађене површине.

Модел садржи улазне податке о машини алатки, резним алатима, предмету обраде, као и *CAD* податке, односно захтеве квалитета коначног производа. Применом *SAM* система генерише се *NC* код који у себи садржи очекивану тачност дела и квалитет обрађене површине. Поређењем ових информација са подацима садржаним у бази података са резултатима експерименталних истраживања добија се информација о адекватности предложених услова обраде генерисаних у *NC* коду. Уколико постоји неусклађеност, односно уколико се констатује да је у предложеним условима обраде експерименталним испитивањима добијена тачност и квалитет обрађене површине који не одговара захтевима, приступа се кориговању предложених услова обраде, односно у *NC* код се уносе нови подаци. Приказани модел омогућује корекцију *NC* кода и на основу грешака обраде (хабање алата, угиб алата, стабилности и крутост система алат - предмет обраде - стезни прибор - машина и др.).

Развијени модел претпоставља интеграцију *CAD/CAT* у складу са захтевима пројектованог дела и базе података о условима обраде, излазним параметрима процеса обраде и квалитету обраде, *SAM* система за генерисање *NC* кода, примени координатне метрологије, примени реверзног инжењерства за генерисање површина на основу облака тачака готовог дела и примени *CAI* система, односно одговарајућих софтвера за мерење и контролу тачности.

Правци будућег истраживања који произилазе из ове дисертације односе се на даљи развој приказаног модела за регенерисање *NC* кода у циљу побољшања тачности обраде и квалитета обрађене површине и развоја мерних и софтверских апликација за индустријску примену.

Првенствено, даље истраживање се односи на експериментална испитивања обраде других материјала, са другим условима обраде, прикупљање нових података и попуњавање базе података о излазним параметрима процеса обраде (отпори резања, температуре резања, топографија обрађене површине, хабање алата, вибрације и др.) и базе грешака обраде (остварена тачност обраде: тачност мера, паралелност, управност, саосност, и др.). Ово подразумева експериментална истраживања као и непрекидни мониторинг и прикупљање података из производог процеса, успостављање нових корелативних зависности, креирање математичких модела и сл.

Коначни циљ будућих истраживања и развоја модела била би његова имплементација у управљачку јединицу машине алатке и развој интелигентних *CAD/CAM/CAI* система. Машина алатка би била у директној интеракцији са савременим мерним системима и безконтактним сензорима, савременим софтверима за обраду података добијених са мерне опреме и израчунавање вредности мерених величина, њихових одступања, смештање добијених података у одговарајућу базу података и аутоматску корекцију *NC* кода. Развијени систем треба да омогући интеграцију савремених мерних уређаја на машину, мониторинг обраде и *on-line* мерења и аутоматизацију корекције *NC* кода у циљу повећања тачности обраде и квалитета обрађене површине.

ЛИТЕРАТУРА

- [1] M. Samir, O. Tunde, *A review of machine tool accuracy enhancement through error compensation in serial and parallel kinematic machines*, Int. J. Precision Technology, Vol. 1, Nos. 3/4, 251-286 (2010).
- [2] C. Lukasz, K. Roman, W. Andrzej, *Machining error compensation for objects bounded by curvilinear surfaces*, Acta mechanica et automatica, vol. 6 no. 1, 26-30 (2012).
- [3] M. Sortino, S. Belfio, B. Motyl, G. Totis, *Compensation of geometrical errors of CAM/CNC machined parts by means of 3D workpiece model adaptation*, Computer-Aided Design 48 28–38 (2014).
- [4] E. T. Fortini, *Dimensioning for Interchangeable Manufacture*. New York, Industrial Press (1967).
- [5] O. R. Wade, *Tolerance Control in Design and Manufacturing*. New York, Industrial Press (1967).
- [6] S. D. Nigam, J. U. Turner, *Review of statistical approaches to tolerance analysis*. CAD Computer Aided Design 27 (Compendex): 6-15 (1995).
- [7] J. U. Turner, *Relative positioning of parts in assembly using mathematical programming*. Comput Aided Des 22 (7): 394–400 (1990).
- [8] K. W. Chase, G. Jinsong, S. P. Magleby, *General 2-D tolerance analysis of mechanical assemblies with small kinematic adjustments*. Journal of Design and Manufacturing 5 (Copyright 1996, IEE): 263-274 (1995).
- [9] J. Gao, K. W. Chase, S. P. Magleby, *Generalized 3-D tolerance analysis of mechanical assemblies with small kinematic adjustments*. IIE Transactions (Institute of Industrial Engineers) 30 (Compendex): 367-377 (1998).
- [10] U. Roy, B. Li, *Representation and interpretation of geometric tolerances for polyhedral objects-I. Form tolerances*. Computer-Aided Design 30 (2): 151-161 (1998).
- [11] F. Houten, H. Kals, M. Giordano, *Mathematical Representation of Tolerance Zones. Global consistency of tolerances: proceedings of the 6th CIRP International Seminar on Computer-Aided Tolerancing*, University of Twente, Enschede, The Netherlands, 22-24 March, 1999, Kluwer Academic (1999)..
- [12] A. Mujezinovic, J. K. Davidson, J. J. Shah, *A New Mathematical Model for Geometric Tolerances as Applied to Polygonal Faces*, Journal of Mechanical Design 126 (3): 504-518 (2004).
- [13] D. Flack, *Measurement Good Practice Guide No. 41, CMM measurement strategies*, ISSN 1368-6550, National Physical Laboratory, (2014).
- [14] J.A. Bosch (ed.), *Coordinate measuring machines and systems*, pp. 496., I M. Dekker, CRC Press, (1995).
- [15] H. Kunzmann, F. Waldele, *Performance of CMMs*, Annals of the CIRP, Vol. 37/2., pp. 633-640 (1988).
- [16] R. G. Wilhelm, R. Hocken, H. Schwenke, *Task specific uncertainty in coordinate measurement*. Annals of the CIRP Vol. 52/2., pp 553–563 (2001).
- [17] N. Singh, *Reverse engineering - a general review*, International Journal of Advanced Engineering Research and Studies, Vol. II/ Issue I/Oct.-Dec., 24-28 (2012).
- [18] V. Raja, K. J. Fernandes, *Reverse Engineering: An Industrial perspective*: Springer-Verlag London Limited, (2008).
- [19] I. Budak, *Development of the system for intelligent pre-processing of 3D digitalisation results from free-form surfaces*, Disertation, Ljubljana (2009).

- [20] W. Böehler, A. Marbs, *3D Scanning Instruments*. Proc. of the CIPA WG6 Int. Workshop on scanning for cultural heritage recording, (2002).
- [21] Creaform teaching manual reverse engineering, *Reverse engineering of physical objects – teaching manual*, Creaform Inc. (2014).
- [22] M. Berger, A. Tagliasacchi, L. M. Seversky, P. Alliez, J. A. Levine, A. Sharf, C. T. Silva, *State of the art in surface reconstruction from point clouds*, Strasbourg, France. 1 (1), pp.161-185, EUROGRAPHICS star report, (2014).
- [23] F. Zhao, X. Xu, S.Q. Xie, *Computer-Aided Inspection Planning - The state of the art*, Computers in Industry 60 453–466 (2009).
- [24] H. A. ElMaraghy, W. H. ElMaraghy, *Computer-Aided Inspection Planning (CAIP)*, in: J.J. Shah et al. (Eds.), *Advances in Feature Based Manufacturing*, Elsevier, pp. 363–396 (1994).
- [25] Y. Zhao, *An Integrated Process Planning System for Machining and Inspection*, Chemical and Process Engineering, University of Auckland, (2009).
- [26] M-W. Cho, H. Lee, G-S. Yoon, J-H. Choi, *A computer-aided inspection planning system for on-machine measurement-Part II: Local inspection planning*, KSME International Journal 18 (2004).
- [27] S.C. Chung, *CAD/CAM integration of on-the-machine measuring and inspection system for free-formed surfaces*, Proceedings of American Society for Precision Engineering 20 267–270 (1999).
- [28] H. Lee, M-W. Cho, G-S. Yoon, J-H. Choi, *A computer-aided inspection planning system for on-machine measurement-Part I: Global inspection planning*, KSME International Journal 18 (8) (2004).
- [29] G. Lukacs, J. Lockhart, M. Facello, *Non-contact whole-part inspection*, Geomagic, Inc. (2011).
- [30] M. Arizmendi, J. Fernandez, A. Gil, F. Veiga, *Effect of tool setting error on the topography of surfaces machined by peripheral milling*, International Journal of Machine Tools & Manufacture, 49, 36–52 (2009).
- [31] S. Mekid, T. Ogedengbe, *A review of machine tool accuracy enhancement through error compensation in serial and parallel kinematic machines*, Int. J. Precision Technology, Vol. 1, Nos. 3/4, (2010).
- [32] B. Schleich, S. Wartzack, *Evaluation of geometric tolerances and generation of variational part representatives for tolerance analysis*, Int J Adv Manuf Technol 79:959–983 (2015).
- [33] E. Rezvani, H. Ghayour, M. Kasiri, *Effect of cutting speed parameters on the surface roughness of Al5083 due to recrystallization*, Mech. Sci., 7, 85–91, (2016).
- [34] B. C. Routara, A. Bandyopadhyay, P. Sahoo, *Roughness modelling and optimization in CNC end milling using response surface method: effect of workpiece material variation*. Int. J. Adv. Manuf. Technol., 40, pp. 1166–1180 (2009).
- [35] ISO 4287:1997, *Geometrical product specifications (GPS) - Terms, definitions and surface texture parameters*, (1997).
- [36] M. E. Martellotti, *An analysis of the milling process*, Transactions of the American Society of Mechanical Engineers 63 677-700 (1941).
- [37] W. A. Kline, R. E. DeVor, I.A. Shareef, *The prediction of surface accuracy in end milling*, ASME Journal of Engineering for Industry 104 272-278 (1982).
- [38] W. A. Kline, R. E. DeVor, *The effect of runout on cutting geometry and forces in end milling*, International Journal of Machine Tool Design and Research 23 123-140 (1983).

- [39] T. S. Babin, J. M. Lee, J.W. Sutherland, S.G. Kapoor, *A model for end milled surface topography*, in: Proceedings of the 13th North American Manufacturing Research Conference, SME, pp. 362-368 (1985).
- [40] T. S. Babin, J. W. Sutherland, S.G. Kapoor, *On the geometry of end milled surfaces*, in: Proceedings of the 14th North American Manufacturing Research Conference, SME, pp. 168-176 (1986).
- [41] F. Ismail, M. A. Elbestawi, R. Du, K. Urbasik, *Generation of milled surfaces including tool dynamics and wear*, ASME Journal of Engineering for Industry 115 245-252 (1993).
- [42] T. L. Schmitz, J. Couey, E. Marsh, N. Mauntler, D. Hughes, *Runout effects in milling: surface finish, surface location error, and stability*, International Journal of Machine Tools and Manufacture 47 841-851 (2007).
- [43] H. Z. Li, X. P. Li, *A numerical study of the effects of cutter runout on milling process geometry based on true tooth trajectory*, International Journal of Advanced Manufacturing Technology 25 435-443 (2005).
- [44] T. Gao, W. H. Zhang, K.P. Qiu, M. Wan, *Numerical simulation of machined surface topography and roughness in milling process*, ASME Journal of Manufacturing Science and Engineering 128 (1) 96-103 (2006).
- [45] J. A. Stori, P. K. Wright, C. King, *Integration of process simulation in machining parameter optimization*, Journal of Manufacturing Science and Engineering 121, 134-143 (1999).
- [46] S. Ranganath, J. W. Sutherland, *An improved method for cutter runout modeling in the peripheral milling process*, Machining Science and Technology 6 (1) (2002) 1-20.
- [47] S. H. Ryu, H. S. Lee, C. N. Chu, *The form error prediction in side wall machining considering tool deflection*, International Journal of Machine Tools and Manufacture 43 1405-1411 (2003).
- [48] O. E. K. K. Omar, T. El-Wardany, E. Ng, M. A. Elbestawi, *An improved cutting force and surface topography prediction model in end milling*, International Journal of Machine Tools and Manufacture 46 1263-1275 (2007).
- [49] K. F. Ehmann, M. S. Hong, *A generalized model of the surface generation process in metal cutting*, Annals of the CIRP 43 (1) 483-486 (1994).
- [50] Z. Q. Liu, *Repetitive measurement and compensation to improve workpiece machining accuracy*. International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 15, 85-89, (1999).
- [51] R. Ramesh, M. A. Mannan, A. N. Poo, *Error compensation in machine tools - A review. Part I: Geometric, cutting-force induced and fixture dependent errors*. International Journal of Machine Tools & Manufacture, 40, 1257-1284, (2000).
- [52] R. Ramesh, M. A. Mannan, A. N. Poo, *Error compensation in machine tools - A review. Part II: Thermal errors*. International Journal of Machine Tools & Manufacture, 40, 1257-1284, (2000).
- [53] M. G. Mehrabi, G. O'Neal, B. K. Min, Z. Pasek, Y. Koren, P. Szuba, *Improving machining accuracy in precision line boring*. Journal of Intelligent Manufacturing, 13, 379-389, (2002).
- [54] S. M. Wang, H. J. Yu, H. W. Liao, *A new high-efficiency error compensation system for CNC multi-axis machine tools*. International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 28, 518-526, (2006).
- [55] J. P. Loose, S. Zhou, D. Ceglarek, *Kinematic analysis of dimensional variation propagation for multistage machining processes with general fixture layouts*. IEEE Transactions on Automation Science and Engineering, 4(2), 141-152, (2007).

- [56] M. Rahou, A. Cheikh, F. Sebaa, *Real time compensation of machining errors for machine tools NC based on systematic dispersion*. Engineering and Technology, 32, 10–16, (2009).
- [57] L. C. Hale, *Principles and techniques for designing precision machines*. Ph.D. thesis. Livermore: University of California, (1999).
- [58] S. Sartori, G. X. Zhang, *Geometric error measurement and compensation of machines*. Annals of the CIRP, 44(2), 599–609, (1995).
- [59] H. B. Voelcker, C. U. S. S. O., *A Current Perspective on Tolerancing and Metrology*, Mechanical and A. Engineering. Sibley School of Mechanical and Aerospace Engineering, Cornell University, (1993).
- [60] H. B. Voelcker, *The current state of affairs in dimensional tolerancing: 1997*. Integrated Manufacturing Systems 9(4): 205-217 (1998).
- [61] G. R. Cogorno, *Geometric dimensioning and tolerancing for mechanical design*. New York, McGraw-Hill Professional, (2006).
- [62] J. J. Shah, G. Ameta, Z. Shen, J. Davidson, *Navigating the tolerance analysis maze*. Computer-Aided Design and Applications 4(Compendex): 705-718 (2007).
- [63] ISO 1101:2012, *Geometrical product specifications (GPS) – Geometrical tolerancing – Tolerances of form, orientation, location and run-out*, Third edition. International Organization for Standardization, Geneva, (2012).
- [64] G. L. Hirpa, *Current status and challenges of using geometric tolerance information in intelligent manufacturing systems*, Adv. Manuf. 2:13–21, DOI 10.1007/s40436-014-0056-3, Shanghai University and Springer-Verlag Berlin Heidelberg (2014).
- [65] ISO 5459:1999, *Datum and datum systems for geometrical tolerancing on technical drawings*, (1999).
- [66] SRPS M.A1.244:1974, *Толеранције облика и положаја - Дефиниције и ознаке на цртежима*, (1974).
- [67] ISO 14660 -1:1999, *Geometrical Product Specifications (GPS) -- Geometrical features -- Part 1: General terms and definitions*, (1999).
- [68] I. Simion, *Models for geometric product specification*, U.P.B. Sci. Bull., Series D, Vol. 70, No.2, ISSN 1454-2358 (2008).
- [69] G. Taguchi, *Introduction to quality engineering: designing quality into products and processes*. Asian Productivity Organization, Tokyo, (1986).
- [70] D. J. Lee, A. C. Thornton, *The identification and use of key characteristics in the product development process*. The 1996 ASME Design Engineering Technical Conferences and Computers in Engineering Conference August 18-22, 1996., Irvine, California, ASME (1996).
- [71] L. Y. Zheng, C. A. McMahon, L. Li, L. Ding J. Jamshidi, *Key characteristics management in product lifecycle management: a survey of methodologies and practices*. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part B (Journal of Engineering Manufacture) (2008).
- [72] Y. S. Hong, T. C. Chang, *A comprehensive review of tolerancing research*. International Journal of Production Research 40 (Copyright 2002, IEE): 2425-2459 (2002).
- [73] X. Zhao, TM. Pasupathy, RG. Wilhelm, *Modelling and representation of geometric tolerances information in integrated measurement processes*. Comput Ind 57:319–330 (2006).
- [74] AAG. Requicha, SC. Chan, *Representation of geometric features tolerances and attributes in solid models based on constructive geometry*. IEEE J Robot Autom RA-2(3):156–166 (1986).

- [75] J. Guilfor, JD. Turner, *Representational primitives for geometric tolerancing*. Comput Aided Des 25(9):577–586 (1993).
- [76] GL. Samuel, MS. Shunmugam, *Evaluation of circularity from coordinate and form data using computational geometric techniques*. Precis Eng 24 (3): 251–263 (2000).
- [77] GL. Samuel, MS. Shunmugam, *Evaluation of straightness and flatness error using computational geometric techniques*. Comput Aided Des 31 (13): 829–843 (1999).
- [78] S. Gupta, JU. Turner, *Variational solid modelling for tolerance analysis*. In: Proceedings of ASME International Conference on Computer Engineering, CA, USA, pp 487–494, (1991).
- [79] J-C. Tsai, MR. Cutkosky, *Representation and reasoning of geometric tolerances in design*. Artif Intell Eng Des Anal Manuf 11:325–341 (1997).
- [80] U. Roy, B. Li, *Representation and interpretation of polyhedral objects II*. Comput Aided Des 31:273–285 (1999).
- [81] U. Prisco, G. Giorleo, *Overview of current CAT systems*. Integrated Computer-Aided Engineering 9(Copyright 2003, IEE): 373-387 (2002).
- [82] M. Maciej, *Tolerance analysis and synthesis of assemblies subject to loading with process integration and design optimization tools*, A thesis submitted in fulfilment of the requirements of the degree of Doctor of Philosophy, School of Aerospace, Mechanical and Manufacturing Engineering, RMIT University, Melbourne, Australia, (2013).
- [83] K. W. Chase, W. H. Greenwood, *Design Issues in Mechanical Tolerance Analysis*. ASME Manufacturing Review 1(1): 50-59 (1988).
- [84] J. J. Shah, M. Mäntylä, *Parametric and Feature-Based Cad/Cam: Concepts, Techniques, and Applications*, Wiley (1995).
- [85] P. N. Rao, *CAD/CAM: Principles and Applications*, McGraw-Hill Education (India) Pvt Limited, (2004).
- [86] Eiteljorg, H., K. Fernie and J. Huggett (2003). *CAD: a guide to good practice*, Oxbow.
- [87] I. Stroud, H. Nagy, *Solid Modelling and CAD Systems: How to Survive a CAD System*, Springer, (2011).
- [88] Z. Shen, G. Ameta, J. J. Shah, J. K. Davidson, *A comparative study of tolerance analysis methods*. Journal of Computing and Information Science in Engineering 5: 247 (2005).
- [89] F. Chiesi, L. Governi, *Tolerance analysis with eM-TolMate*. Transactions of the ASME. Journal of Computing and Information Science in Engineering 3 (Copyright 2003, IEE): 100-105 (2003).
- [90] A. Clément, A. Desrochers, A. Riviere, *Theory and practice of 3-D tolerancing for assembly*, École de technologie supérieure (1991).
- [91] A. Clement, A. Riviere, *Tolerancing versus nominal modeling in next generation CAD/CAM system* (1993).
- [92] A. Desrochers, A. Clément, *A dimensioning and tolerancing assistance model for CAD/CAM systems*. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology 9(6): 352-361 (1994).
- [93] O. Salomons, H. Jonge Poerink, F. Slooten, F. Houten, H. Kals, *A computer aided tolerancing tool based on kinematic analogies*, Citeseer (1995).
- [94] Sigmetrix. CETOL. L. CYBERNET SYSTEMS CO.: CAT software tool, (2012).
- [95] Z. Zou, E. P. Morse, *A gap-based approach to capture fitting conditions for mechanical assembly*. Computer-Aided Design 36 (8): 691-700 (2004).
- [96] E. P. Morse, X. You, *Implementation of GapSpace Analysis*. ASME Conference Proceedings, 329-333 (2005).
- [97] X. You, *GapSpace multi-dimensional assembly analysis*, The University of North Carolina (2008).

- [98] J. J. Shah, B. C. Zhang, *Attributed graph model for geometric tolerancing*, 18th Annual ASME Design Automation Conference - Scottsdale, AZ, USA (1992).
- [99] J. Davidson, A. Muiezinovic, J. Shah, *A new mathematical model for geometric tolerances as applied to round faces*. Journal of Mechanical Design 124 (4): 609-622 (2002).
- [100] E. Makelainen, Y. Ramseier, S. Salmensuu, J. Heilala, P. Voho, O. Vaatainen, *Assembly process level tolerance analysis for electromechanical products*. 2001 IEEE International Symposium on Assembly and Task Planning (ISATP) (2001),
- [101] J. Turner, A. Gangoiti, "Tolerance analysis approaches in commercial software." Concurrent Engineering 1(2): 11-23 (1991)..
- [102] K. W. Chase, A. R. Parkinson, *A survey of research in the application of tolerance analysis to the design of mechanical assemblies*. Research in Engineering Design 3(1): 23-37 (1991).
- [103] O. W. Salomons, F. van Houten and H. Kals, *Current status of CAT systems*. Geometric design tolerancing: theories, standards and applications: 438-452 (1998)..
- [104] S. Zhengshu, *Tolerance analysis with EDS/VisVSA*. Transactions of the ASME. Journal of Computing and Information Science in Engineering 3 (Copyright 2003, IEE): 95-99 (2003).
- [105] A. Armillotta, *A method for computer-aided specification of geometric tolerances*. Computer-Aided Design, 45 1604–1616. Elsevier, (2013).
- [106] H. Chen, S. Jin, Z. Li, X. Lai (2014) *A comprehensive study of three dimensional tolerance analysis methods*. Computer-Aided Design 53 1–13. Elsevier, (2014).
- [107] SC. Liu, SJ. Hu, *Variation simulation for deformable sheet metal assembly using finite element methods*. Trans ASME, J Manuf Sci Eng 119: 368–74 (1997).
- [108] KW. Chase, SP. Magleby, J. Gao, *Tolerance analysis of 2-D and 3-D mechanical assemblies with small kinematic adjustments*. In: Zhang HC, editor. Advanced tolerancing techniques. New York: John Wiley & Sons; pp. 103–37 (1997).
- [109] RC. Hillyard, IC. Braid, *Analysis of dimensions and tolerances in computer-aided mechanical design*. Comput-Aided Des 10 (3): pp. 161–6 (1978).
- [110] AAG. Requicha, *Representation of tolerances in solid modeling: issues and alternative approaches*. In: Pickett MS, Boyse WJ, editors. Solid modeling by computers: from theory to applications. New York: Plenum Press; 3–22 (1984).
- [111] R Jayaraman, V. Srinivasan, *Geometric tolerancing: I and II. Virtual boundary requirement*. IBM J Res Dev; 33 (2) (1989).
- [112] JU. Turner, *A feasibility space approach for automated tolerancing*. Trans ASME, J Eng Ind 115 (3): 341–6 (1993).
- [113] A. Wirtz, *Vectorial tolerancing a basic element for quality control*. In: Proceedings of the 3rd CIRP seminar on computer aided tolerancing. pp. 115–28 (1993).
- [114] L. Laperrière, P. Lafond, *Modeling tolerances and dispersions of mechanical assemblies using virtual joints*. In: CD-ROM proceedings of 25th ASME design automation conference, (1999).
- [115] GA. Kramer, *Solving geometric constraint systems: a case study in kinematics*. MIT Press; (1992).
- [116] VT. Portman, *Modelling spatial dimensional chains for CAD/CAM applications*. In: F. Kimura, editor. Proceedings of the 4th CIRP design seminar on computeraided tolerancing. pp. 71–85 (1995).
- [117] A. Desrochers, A. Rivičre, *A matrix approach to the representation of tolerance zones and clearances*. Int J Adv Manuf Technol, 13:630–6 (1997).

- [118] A. Clément, A. Rivičre, *Tolerancing versus nominal modeling in next generation CAD/CAM system*. In: Proceedings of the CIRP seminar on computer aided tolerancing, pp. 97–113 (1993).
- [119] D. Teissandier, Y. Couétard, A. Gérard, *A computer aided tolerancing model: proportioned assembly clearance volume*. Comput-Aided Des 31 (3): 805–17 (1999).
- [120] ET. Fortini, *Dimensioning for interchangeable manufacture*. New York: Industrial Press; (1967).
- [121] DH. Evans, *Statistical tolerancing: state of the art, part 2. Methods of estimating moments*. J Qual Technol 7 (1): 1–12 (1975).
- [122] DB. Parkinson, *The application of reliability method to tolerancing*. ASME J Mech Des 104: 612–8 (1982).
- [123] JR, D’Errico NA. Zaino, *Statistical tolerancing using a modification of Taguchi’s method*. Technometrics 30 (4): 397–405, (1988).
- [124] DD. Grossman, *Monte Carlo simulation of tolerancing in discrete parts manufacturing and assembly*. Technical report STAN-CS-76-555. Computer Science Dep., Stanford University, USA; (1976).
- [125] A. Desrochers, *A CAD/CAM representation model applied to tolerance transfer methods*. ASME J Mech Des 125:14–22 (2003).
- [126] *International vocabulary of metrology – Basic and general concepts and associated terms (VIM)*, JCGM 200:2012.
- [127] *Evaluation of measurement data - Guide to the expression of uncertainty in measurement*, JCGM 100:2008.
- [128] ISO 5725-1:1994, *Accuracy (trueness and precision) of measurement methods and results - Part 1: General principles and definitions*, (1994).
- [129] N. Zaimović-Uzunović, S. Lemeš, D. Denjo, A. Softić, *Proizvodna mjerenja*, Univerzitet u Zenici, Mašinski fakultet, (2009).
- [130] V. Majstorović, J. Hodolič: *Numerički upravljane merne mašine*, Monografija, Fakultet tehničkih nauka, Institut za proizvodno mašinstvo, Novi Sad, (1998).
- [131] ISO 10360-2:2009, *Geometrical product specifications (GPS) - Acceptance and reverification tests for coordinate measuring machines (CMM) - Part 2: CMMs used for measuring linear dimensions*, Geneva, Switzerland, (2009).
- [132] S. Hammad Mian and A. Al-Ahmari, *New developments in coordinate measuring machines for manufacturing industries*, Int. J. Metrol. Qual. Eng. 5, 101 (2014).
- [133] <http://wenzelamerica.com/probing/renishaw-cmm-stylus-best-in-class>, (НОВЕМБАР 2016).
- [134] <http://www.koordinatenmesstechnik.de/en/navigation/sensors-for-coordinate-measuring-machines/tactile-sensors.html>, (НОВЕМБАР 2016).
- [135] <http://www.koordinatenmesstechnik.de/en/navigation/sensors-for-coordinate-measuring-machines/tactile-sensors/touch-trigger-tactile-sensors.html>, (НОВЕМБАР 2016).
- [136] <http://www.koordinatenmesstechnik.de/en/navigation/sensors-for-coordinate-measuring-machines/tactile-sensors/measuring-tactile-sensors.html>, (НОВЕМБАР 2016).
- [137] <http://www.koordinatenmesstechnik.de/en/navigation/sensors-for-coordinate-measuring-machines/tactile-sensors/measuring-tactile-optical-sensor.html>, (НОВЕМБАР 2016).
- [138] <http://www.hexagonmi.com/en-US/products/coordinate-measuring-machines/cmm-sensors/non-contact-sensor/hpl-laser-scanning-sensor>, (НОВЕМБАР 2016).
- [139] http://www.directindustry.com/prod/faro-europe-gmbh-co-kg/product-21421-1716249.html?utm_source=ProductDetail&utm_medium=Web&utm_content=SimilarProduct&utm_campaign=CA, (НОВЕМБАР 2016).

- [140] http://www.mitutoyo.com/press_releases/surfacemeasure-606t3-beam-line-laser-scanner, (јануар 2016).
- [141] http://www.globalspec.com/learnmore/manufacturing_process_equipment/inspection_tools_instruments/dimensional_scanners, (новембар 2016).
- [142] <http://www.koordinatenmesstechnik.de/en/navigation/sensors-for-coordinate-measuring-machines/multisensor-technology.html>, (новембар 2016).
- [143] <http://isoconsultantpune.com/measurement-system-analysis>, (новембар 2016).
- [144] <https://measurement-solutions.co.uk/products/delcam-powershape>, (новембар 2016).
- [145] V. Carbone, M. Carocci, E. Savio, G. Sansoni, L. De Chiffre, *Combination of a Vision System and a Coordinate Measuring Machine for the Reverse Engineering of Freeform Surfaces*, The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 17: 263-271 (2001).
- [146] BL. Curless, *New Methods for Surface Reconstruction from Range Images*, Doctoral Dissertation, Stanford University, (1997).
- [147] <http://www.directindustry.com>, (новембар 2016).
- [148] B. V. Trifković, *Analiza metroloških karakteristika uređaja za optičku digitalizaciju stomatoloških CAD/CAM sistema*, Doktorska disertacija, Stomatološki fakultet, Beograd, (2012).
- [149] C. Fröhlich, M. Mettenleiter, *Terrestrial Laser Scanning– New Perspectives in 3D Surveying*, International Archives of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, XXXVI - 8/W2, (2004).
- [150] M. Popović, *Digitalna obrada slike*, Akademska misao, Beograd (2006).
- [151] A. Persson, M. Andersson, A. Oden, G. Sandborgh, *A three-dimensional evaluation of laser scanner and a touch-probe scanner*, J Prosthet Dent, 95: 194-200 (2006).
- [152] S. Shah, G. Sundarm, D. Bartlett, M. Sherriff, *The use of 3D laser scanner using superimpositional software to assess the accuracy of impression techniques*, J Denti 32: 653-658 (2004).
- [153] <http://www.mmsonline.com/articles/photogrammetry-collects-precision-3d-data-inunlikely-places>, (новембар 2016).
- [154] R. Barreto, *Using DLP Development kits for Optical metrology systems*, DLPA026, Texas Instruments Incorporated, (2011).
- [155] <http://www.3doesscanner.com/29-pts-s-3d-scanner.html>, (новембар 2016).
- [156] <http://shapefidelity.com/wp-content/uploads/2014/05/compressor-housing.jpg>, (новембар 2016).
- [157] D. Page, A. Koschan, S. Voisin, N. Ali, M. Abidi, *3D CAD model generation of mechanical parts using coded-pattern projection and laser triangulation systems*, Assembly Automation, Vol. 25 Iss: 3, pp. 230 – 238, 2005.
- [158] K. Wolf, D. Roller, D. Schafer, *An approach to computer-aided quality control based on 3D coordinate metrology*, Journal of Materials Processing Technology, Vol. 107, Iss: 1–3, pp. 96–110, (2000).
- [159] http://www.webexhibits.org/pigments/i/intro/3d/zoom/SLwork1_L.png, (јануар 2016).
- [160] <http://www.3d-engineering.net/white-light-scanning.htm>, (новембар 2016).
- [161] <http://www.exactmetrology.com/3d-scanning-technology/blue-light-scanning>, (новембар 2016).
- [162] <https://www.linkedin.com/pulse/tech-news-faro-cobalt-3d-imager-multi-array-andrew-mcewen>, (новембар 2016).
- [163] N. Zaimović - Uzonović, *Mjerna tehnika*, Zenica, (2006).
- [164] C. Leone, Lab Manager, *Optical Gaging Products, Inc. Laser Measurement Options*, Understanding laser measurement, www.ogpnet.com, (новембар 2016).
- [165] <http://www.gefos.cz/web/en/3d-scanning>, (новембар 2016).

- [166] <http://www.renishaw.com/en/interferometry-explained--7854>, (новембар 2016).
- [167] M. A. V. Chapman, R. Ferguson-Kelly, A. Holloway, W. Lee, *Interferometric angle measurement and the hardware options available from Renishaw*, Technical white paper: TE326, Renishaw, Apply innovation, (2016).
- [168] <http://www.explainthatstuff.com/howinterferometerswork.html>, (новембар 2016).
- [169] <http://www.henschke-geraetebau.de/pics/interferenz.jpg>, (новембар 2016).
- [170] <https://www.bohrwerksservice.de/en/laservermessung>, (новембар 2016).
- [171] <http://www.faro-europe.com/lp/robot-calibration/index-en.html>, (новембар 2016).
- [172] <http://www.oasisalignment.com/blog/laser-trackers-3d-precision-measurement>, (децембар 2016).
- [173] J. Noel, *Advantages of CT in 3D Scanning of Industrial Parts*, 3D Scanning Technologies Magazine, (2008).
- [174] http://www.hamamatsu.com/eu/en/community/xndt/app-industrial/industrial_ct.html, (децембар 2016).
- [175] W. R. Garrett, H. R. Splettstosser, D. E. Titus, *Radiography in Modern Industry*, Eastman Kodak Company, (1980).
- [176] http://photos1.blogger.com/blogger/2836/1845/1600/X-ray_Tube.jpg, (децембар 2016).
- [177] <http://www.exactmetrology.com/3d-scanning-services/industrial-ct-scanning-services> (децембар 2016)
- [178] A. Cantatore, P. Muller, *Introduction to computed tomography*, Manufacturing Engineering Department of Mechanical Engineering Technical University of Denmark, (2011).
- [179] A. Grdić, *Moderni trokoordinatni mjerni sustavi*, Završni rad, Sveučilište u Zagrebu, Fakultet strojarstva i brodogradnje, (2015).
- [180] K. H. Lee, H. Woo, T. Suk, *Point Data Reduction Using 3D Grids*. Int J Adv Manuf Technol, 18., 201–210, (2001).
- [181] J. Roca-Pardinas, H. Lorenzo, P. Arias, J. Armestob, *From laser point clouds to surfaces: Statistical nonparametric methods for three-dimensional reconstruction*, Computer-Aided Design 40, 646–652, (2008).
- [182] F. Blasi, G. Monno, A. E. Uva, *Implicit surfaces modeling for objects reconstruction from scattered 3D points clouds*, XII ADM International Conference, Rimini, Italy, (2001).
- [183] N. D'Apuzzo, *Photogrammetry and Machine Vision - 3 Point cloud processing, surface generation, texturing*, Institute of Geodesy and Photogrammetry, Zurich, (2013).
- [184] J. Delmerico, *The Point Cloud Library By Example*, University at Buffalo, The State University of New York, (2013).
- [185] <http://www.avante-technology.com/emendo-stl-validation-repair-software/> (децембар 2016).
- [186] M. Kazhdan, M. Bolitho, H. Hoppe, *Poisson surface reconstruction*. In Proc. of the EG/SIGGRAPH, Symposium on Geometry processing, (2006).
- [187] C. Oztireli, G. Guennebaud, M. Gross, *Feature preserving point set surfaces based on non-linear kernel regression*. In Computer Graphics Forum, (2009).
- [188] Y. Lipman, D. Cohen-Or, D. Levin, H. Tal-Ezer, *Parameterization-free projection for geometry reconstruction*. ACM Trans. Graph. (Proc. SIGGRAPH), (2007).
- [189] P. Mullen, F. De Goes, M. Desbrun, D. Cohensteiner, P. Alliez, *Signing the unsigned: Robust surface reconstruction from raw pointsets*. Computer Graphics Forum (Proc. of the Symposium on Geometry Processing), (2010).
- [190] O. Van Kaick, H. Zhang, G. Hamarneh, D. Cohen-Or: *A survey on shape correspondence*. Computer Graphics Forum, (STAR Proceedings of Eurographics), (2011).

- [191] J. C. Carr, R. K. Beatson, J. B. Cherrie, T. J. Mitchell, W. R. Fright, B. C. McCallum, T. R. Evans, *Reconstruction and representation of 3d objects with radial basis functions*. In Proc. of ACM SIGGRAPH, (2001).
- [192] M. Kazhdan, *Reconstruction of solid models from oriented point sets*, In Proc. of the EG/SIGGRAPH, Symposium on Geometry processing, (2005).
- [193] A. Hornung, L. Kobbelt, *Robust reconstruction of watertight 3d models from non-uniformly sampled point clouds without normal information*, In Computer Graphics Forum, (Proc. of the Symposium on Geometry Processing), (2006).
- [194] P. Alliez, D. Cohen-Steiner, Y. Tong, M. Desbrun, *Voronoi-based variational reconstruction of unoriented point sets*, In Computer Graphics Forum, (Proc. of the Symposium on Geometry Processing), (2007).
- [195] A. Sharf, T. Lewiner, G. Shklarski, S. Toledo, D. Cohen-Or, *Interactive topology-aware surface reconstruction*, ACM Trans. Graph, (Proc. SIGGRAPH), (2007).
- [196] I. Budak, M. Soković, J. Hodolič, J. Kopač, *Softver za pre-procesiranje rezultata 3D-digitalizacije*. Dokumentacija tehničkog rešenja. Galeb Group, Šabac, Republika Srbija. (2010).
- [197] D. Xiao, H. Lin, C. Xian, S. Gao, *CAD mesh model segmentation by clustering*, Computers & Graphics, (2011).
- [198] <https://www.linkedin.com/pulse/forward-thinking-reverse-engineering-john-graham> (децембар 2016).
- [199] H. Lina, C. Taib, G. Wang, *A mesh reconstruction algorithm driven by an intrinsic property of a point cloud*, Computer-Aided Design 36 1–9 (2004).
- [200] D. Salomon, *Curves and Surfaces for Computer Graphics*, Springer Science and Business Media, Inc, New York, (2006).
- [201] V. Rovenski, *Modeling of Curves and Surfaces with MATLAB*, Springer Science and Business Media, LLC, New York, (2010).
- [202] <http://www.innovia3d.com/services/computer-aided-inspection> (децембар 2016).
- [203] Whitehouse, D., *Surfaces and Their Measurement*, London: Hermes PentonLtd, (2002).
- [204] K.-D. Kim, S.-C. Chung, *Synthesis of the measurement system on the machine tool*, International Journal of Production Research 39 (2001).
- [205] <http://www.renishaw.com/en/lp2-modular-probe-system-6750>, (децембар 2016).
- [206] <http://www.qualitymag.com/articles/93037-laser-calibration-at-the-speed-of-lightcomparatively-speaking>, (децембар 2016).
- [207] <https://calvaryrobotics.com/author/user/page/3>, (јануар 2017).
- [208] R. Kamath, *On-Machine Inspection and Acceptance (OMIA)*, Master of Science Dissertation, University of Missouri-Rolla, USA, (2000).
- [209] F. S. Y. Wong, K. B. Chuah, P. K. Venuvinod, *Automated extraction of dimensional inspection features from part computer-aided design models*, International Journal of Production Research 43 (12) (2005).
- [210] H. A. EIMaraghy, P. H. Gu, *Expert system for inspection planning*, Annals of the CIRP 37 (1) (1987).
- [211] H. A. Helmy, *Feature Recognition and CAD-Directed Inspection Using Solid Geometric Representation*, PhD Thesis, Lehigh University, (1991).
- [212] S. Joshi, T.C. Chang, *Graph-based Heuristics for recognition of machined features from a 3D Solid model*, Computer-Aided Design 20 (2) (1988).
- [213] S. Joshi, T.C. Chang, *Expert process planning system with solid model interface*, International Journal of Production Research 26 (5) (1988).
- [214] A.J. Medland, G. Mullineux, C. Butler, B.E. Jones, *The integration of coordinate measuring machines within a design and manufacturing environment*, Proceedings of

- the Institution of Mechanical Engineers, Part B, *Journal of Engineering Manufacture* 207 (B2) (1993).
- [215] F. L. Merat, G. M. Radack, K. Roumina, S. Ruegsegger, *Automated inspection planning within the rapid design system*, in: Proceedings of IEEE International Conference on Systems Engineering, (1991).
- [216] H. T. Yau, C. H. Menq, *An automated dimensional inspection environment for manufactured parts using coordinate measuring machines*, *International Journal of Production Research* 30 (7) (1992).
- [217] J. D. T. Tannock, D. R. Cox, H. Lee, J. H. SimsWilliams, *Intelligent inspection planning and computer aided inspection*, Proceedings of the Institute of Mechanical Engineering, Part B: *Journal of Engineering Manufacture* 207 (1993).
- [218] T. H. Hopp, K.C. Lau, *A hierarchical model-based control system for inspection*, in: Proceedings, of the 5th International Symposium on Automated Integrated Manufacturing, (1983).
- [219] T. H. Hopp, *CAD-directed inspection*, *Annals of the CIRP* 33 (1) (1984).
- [220] IBM Corp., *Valisys—for quality in the making*, An Advertising Booklet, (1989).
- [221] VW-GEDAS, Audimess, *Graphic-interactive Programming System of CNC-Coordinate Measuring Machines*, Version 1.1, (1990).
- [222] N. P. Juster, L. H. Hsu, A. D. Pennington, *The selection of surfaces for inspection planning*, in: J.J. Shah et al. (Eds.), *Advances in Feature Based Manufacturing*, (1994).
- [223] C. H. Menq, H. T. Yau, G. Y. Lai, *Automated precision measurement of surface profile in CAD directed inspection*, *IEEE Transactions on Robotics and Automation* 8 (2) (1992).
- [224] M. J. Corrigan, *Inspection Plan and Code Generation for Coordinate Measuring Machines in a Product Modeling Environment*, PhD Thesis, Loughborough University of Technology, (1990).
- [225] Sira Ltd., *Design to Inspection Project*, Technical Report, Sira DtoI Project, Sira Ltd., (1992).
- [226] M. W. Cho, K. Kim, *New inspection planning strategy for sculptured surfaces using coordinate measuring machine*, *International Journal of Production Research* 33 (22) (1995).
- [227] R. Bogue, *Car manufacturer uses novel laser scanner to reduce time to production*, *Assembly Automation* 28 (2) 113–114 (2008).
- [228] E. Vezzetti, *Reverse engineering: a selective sampling acquisition approach*, *International Journal of Advanced Manufacturing Technology* 33 (2007) 521–529.
- [229] U. Minoni, F. Cavalli, *Surface quality control device for on-line applications*, *Measurement* 41 774–782 (2008).
- [230] J. J. Auilar, J. Santolaria, D. Guillomia, J. Pastor, C. Cajal, *Accuracy Analysis of Laser Scanning Probes Used in Coordinate Measurement: Simulation and Experiments*, VDI Berichte, Issue 1860, pp. 739–774+797 (2004),.
- [231] M. -W. Cho, H. Lee, G. -S. Yoon, J. Choi, *A feature-based inspection planning system for coordinate measuring machines*, *International Journal of Advanced Manufacturing Technology* 26 1078–1087 (2005).
- [232] B. C. Jiang, S. D. Chiu, *Form tolerance-based measurement points determination with CMM*, *Journal of Intelligent Manufacturing* 13 101–108 (2002).
- [233] T. Woo, R. Liang, *Optimal sampling for coordinate measurement: its definition and algorithm*, *Quality Through Engineering Design* 333–346 (1993).
- [234] J. W. Lee, M. K. Kim, K. Kim, *Optimal probe path generation and new guide point selection methods*, *Engineering Application of Artificial Intelligence* 7 (4) 439–445 (1994).

- [235] I. Ainsworth, M. Ristic, D. Brujic, *CAD-based measurement path planning for freeform shapes using contact probes*, International Journal of Advanced Manufacturing Technology 16 23–31 (2000).
- [236] V. A. Albuquerque, F. W. Liou, O. R. Mitchell, *Inspection point placement and path planning algorithms for automatic CMM inspection*, International Journal of Computer Integrated Manufacturing 13 (2) 107–120 (2000).
- [237] Y. J. Lin, P. Murugappan, *A new algorithm for CAD-directed CMM dimensional inspection*, International Journal of Advanced Manufacturing Technology 16 107–112 (2000).
- [238] <http://www.qualitymag.com/articles/91150-contact-vs-noncontact-measurement-for-computer-aided-inspection>, (јануар 2013).
- [239] <http://www.hexagonmi.com/products/software/pc-dmis>, (јануар 2017).
- [240] <http://advancedinspect.com/event/pc-dmis-user-group-meeting>, (јануар 2017).
- [241] <http://www.hexagonmi.com/products/software/pc-dmis/pcdmis-cmm-388>, (јануар 2017).
- [242] <http://www.gom-inspect.com/en/company.php>, (фебруар 2017).
- [243] Kramer, T.R. and X. Xu, *STEP in a Nutshell*, in *Advanced Design and Manufacturing Based on STEP*, X. Xu, Editor. p. 1-19 (2009).
- [244] H. Schwenke, W. Knapp, H. Haitjema, A. Weckenmann, R. Schmitt, F. Delbressine, *Geometric error measurement and compensation of machines - An update*, CIRP Annals - Manufacturing Technology, (2008).
- [245] R. Stryczek, *A metaheuristic for fast machining error compensation*, J Intell Manuf 27:1209–1220 (2016).
- [246] M. Radovanović, *Određivanje elemenata preseka reznog sloja kod obimnog glodanja sa velikim pomakom*, Istraživanje i razvoj, Časopis instituta „14 Oktobar“ Kruševac, IMK-14, V, Br. 10, ISSN 0354-6829, (1999).
- [247] M. Brezocnik, M. Kovacic, M. Ficko, *Prediction of surface roughness with genetic programming*. J Mater Process Technol. 157-158, pp. 28-36 (2004).
- [248] M. Dotcheva, K. Dotchev, I. Popov, *Modelling and Optimisation of Up-and Down-Milling Processes for a Representative Pocket Feature*, International Journal Of Precision Engineering And Manufacturing Vol. 14, No. 5, Pp. 703-708, (2013).
- [249] M. Arizmendi, J. Fernandez, A. Gil, F. Veiga, *Effect of tool setting error on the topography of surfaces machined by peripheral milling*, International Journal of Machine Tools & Manufacture 49 36–52 (2009).
- [250] M. Arizmendi, F. J. Campa, J. Fernandez, L. N. Lopez de Lacalle, A. Gil, E. Bilbao, F. Veiga, A. Lamikiz, *Model for surface topography prediction in peripheral milling considering tool vibration*, CIRP Annals - Manufacturing Technology 58 93–96 (2009).
- [251] M. Arizmendi, J. Fernandez, A. Gil, F. Veiga, *Model for the prediction of heterogeneity bands in the topography of surfaces machined by peripheral milling considering tool runout*, International Journal of Machine Tools & Manufacture 50 51–64 (2010).
- [252] M. Arizmendi, J. Fernandez, A. Gil, F. Veiga, *Identification of tool parallel axis offset through the analysis of the topography of surfaces machined by peripheral milling*, International Journal of Machine Tools and Manufacture, 50 12, pp. 1097–1114, (2010).
- [253] J. W. Sutherland, R.E. DeVor, *An improved method for cutting force and surface error prediction in flexible end milling systems*, ASME Journal of Engineering for Industry 108 (1986) 269-279.

- [254] Z. Đorđević, *Novi pristup razvoju sistema upravljanja alatnim mašinama*, Magistarski rad, Univerzitet „Svetozar Marković“ Mašinski fakultet u Kragujevcu, (1991).
- [255] Y. Altintas, P. Lee, *Mechanics and dynamics of ball end milling*, Transactions of ASME, Journal of Manufacturing Science and Engineering 120 684–692 (1998).
- [256] G. M. Kim, B. H. Kim & C. N. Chu, *Estimation of cutter deflection and form error in ball-endmilling processes*, International Journal of Machine Tools and Manufacture, 43, 917–924 (2003).
- [257] J. C. Ziegert, P. Kalle, *Error compensation in machine tools: A neural network approach*. Journal of Intelligent Manufacturing, 5, 143–151, (1994).
- [258] A. El Ouafi, M. Guillot, A. Bedruni, *Accuracy enhancement of multi-axis CNC machines through on-line neurocompensation*. Journal of Intelligent Manufacturing, 11, 535–545, (2000).
- [259] M.W. Cho, G. H. Kim, T. I. Seo, Y. C. Hong, H. H. Cheng, *Integrated machining error compensation method using OMM data and modified PNN algorithm*. International Journal of Machine Tools & Manufacturing, 46, 1417–1427, (2006).
- [260] V. Marinescu, I. Constantin, C. Apostu, F. B. Marin, M. Banu, A. Epureanu, *Adaptive dimensional control based on incycle geometry monitoring and programming for CNC turning center*. International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 55, 1079–1097, (2011).
- [261] K. K. Mäkelä, J. Huapana, M. Kananen, J. A. Karkalainen, *Improving accuracy of aging CNC machines without physical changes*. In IEEE international symposium on ISAPT (pp. 1–5), (2011).
- [262] G. Cui, Y. Lu, J. Li, D. Gao, Y. Yao, *Geometric error compensation software system for CNC machine tools based on NC program reconstructing*. International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 63, 169–180, (2012).
- [263] A. Iqbal, N. He, L. Li, and N.U. Dar, *A fuzzy expert system for optimizing parameters and predicting performance measures in hard-milling process*, Expert Systems with Applications, 32(4), 1020-1027 (2007).
- [264] Z.G. Wang, M. Rahman, Y.S. Wong, And J. Sun, *Optimization of multi-pass milling using parallel genetic algorithm and parallel genetic simulated annealing*, International Journal of Machine Tools and Manufacture, 45(15), 1726-1734 (2005).
- [265] T.H. Hou, C.H. Su, and W.L. Liu, *Parameters optimization of a nano-particle wet milling process using the Taguchi method, response surface method and genetic algorithm*, Powder Technology, 173(3), 153-162 (2007).
- [266] D. Fratila, and C. Caizar, *Application of Taguchi method to selection of optimal lubrication and cutting conditions in face milling of AlMg*, Journal of Cleaner Production, 19(6), 640-645 (2011).
- [267] M.R. Razfar, R.F. Zinati, and M. Haghshenas, *Optimum surface roughness prediction in face milling by using neural network and harmony search algorithm*, The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 52 (5-8), 487-495 (2011).
- [268] T. Ozel, and T. Altan, *Process simulation using finite element method—prediction of cutting forces, tool stresses and temperatures in high-speed flat end milling*, International Journal of Machine Tools and Manufacture, 40 (5), 713-738 (2000).