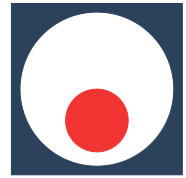




УНИВЕРЗИТЕТ У КРАГУЈЕВЦУ
ФАКУЛТЕТ ЗА МАШИНСТВО
И ГРАЂЕВИНАРСТВО У КРАЉЕВУ



Александра В. Петровић

**ОПТИМИЗАЦИЈА ПУТАЊЕ ГЛОДАЛА ПРИ КОНТУРНОЈ
ОБРАДИ ВЕЛИКИМ БРЗИНАМА РЕЗАЊА**

Докторска дисертација

Краљево, 2016.

ИДЕНТИФИКАЦИОНА СТРАНИЦА

I. АУТОР	
Име и презиме:	Александра Петровић
Датум и место рођења:	16.11.1972., Зеница, Босна и Херцеговина
II. ДОКТОРСКА ДИСЕРТАЦИЈА	
Наслов:	ОПТИМИЗАЦИЈА ПУТАЊЕ ГЛОДАЛА ПРИ КОНТУРНОЈ ОБРАДИ ВЕЛИКИМ БРЗИНАМА РЕЗАЊА
Број страница:	235
Број слика:	222
Број библиографских података:	99
Установа и место где је рад израђен:	Факултет за машинство и грађевинарство у Краљеву, Универзитета у Крагујевцу
Научна област (УДК):	производно машинство (621.914)
Ментор:	др Љубомир Лукић , редовни професор
III. ОЦЕНА И ОДБРАНА	
Датум пријаве теме:	24.4.2013. године
Број одлуке и датум прихватања докторске дисертације:	332/9 од 12.6.2013. године
Комисија за оцену подобности теме и кандидата:	др Љубомир Лукић , редовни професор Факултет за машинство и грађевинарство у Краљеву
	др Илија Ћосић , редовни професор Факултет техничких наука у Новом Саду
	др Милан Коларевић , ванредни професор, Факултет за машинство и грађевинарство у Краљеву
	др Миомир Вукићевић , ванредни професор, Факултет за машинство и грађевинарство у Краљеву
	др Зоран Петровић , ванредни професор, Факултет за машинство и грађевинарство у Краљеву
Комисија за оцену и одбрану док-торске дисертације:	др Илија Ћосић , редовни професор – емеритус, Факултет техничких наука у Новом Саду
	др Радомир Славковић , редовни професор Факултет техничких наука у Чачку
	др Миомир Вукићевић , ванредни професор, Факултет за машинство и грађевинарство у Краљеву
	др Мирко Ђапић , ванредни професор, Факултет за машинство и грађевинарство у Краљеву
	др Милан Коларевић , ванредни професор, Факултет за машинство и грађевинарство у Краљеву
Датум одбране дисертације:	

ПРЕДГОВОР

Ова докторска дисертација је настала као резултат вишегодишњег научно - истраживачког рада на Катедри за производно машинство и у оквиру Центра за производне технологије и системе, Факултета за машинство и грађевинарство у Краљеву, Универзитета у Крагујевцу. У дисертацији су приказани резултати стручног и научног усавршавања који су реализовани кроз програм докторских студија на Факултету за машинство и грађевинарство у Краљеву.

Првенствено се захваљујем ментору, др Љубомиру Лукићу на стручној помоћи, указаном поверењу и подршци током израде докторске дисертације. Посебну захвалност дугујем колеги др Слободану Ивановићу на помоћи у реализацији програмског система за праћење елемената и фактора обраде дуж путање алата.

Захваљујем се породици на стрпљењу, разумевању и подршци коју су ми пружали током година истраживачког рада, а посебно у фази израде дисертације.

Краљево, јуна 2016.

Александра Петровић

Садржај

1. УВОД	1
1.1. Мотивација	3
1.2. Циљеви истраживања	4
1.3. Место проблема истраживања	6
1.4. Структура рада	7
2. СИЛЕ И СТАБИЛНОСТ ПРОЦЕСА РЕЗАЊА	9
2.1. Моделирање процеса резања	10
2.1.1. Мерчантов модел формирања струготине	11
2.1.2. Окслијев модел формирања струготине	12
2.1.3. Конститутивни модел материјала	13
2.2. Моделирање сила резања при обимном глодању	13
2.2.1. Општи модел силе резања	14
2.2.2. Одређивање коефицијената силе резања на основу механизма резања	18
2.2.3. Одређивање коефицијената силе резања механичким моделом	19
2.2.4. Модел нормализоване силе резања	20
2.2.5. Проширен модел силе резања	22
2.3. Стабилност процеса обимног глодања	23
2.4. Закључне напомене	26
3. МОДЕЛИРАЊЕ ЗОНЕ ЗАХВАТА, ПРОФИЛА БРЗИНЕ ПОМОЋНОГ КРЕТАЊА И ПРОИЗВОДНОСТИ ОБРАДЕ	27
3.1. Зона захвата	28
3.2. Методе моделирања зоне захвата	32
3.2.1. Аналитичке методе	32
3.2.2. Дискретизоване методе	33
3.2.3. Методе засноване на моделирању телима	39
3.3. Анализа дисконтинуитета путање и моделирање профила брзине помоћног кретања дуж путање алата	41
3.4. Производност обраде	43
3.5. Закључне напомене	44
4. NS ПУТАЊА АЛАТА	46
4.1. Генерисање путање алата	48
4.2. Путање алата за обраду глодањем великим брзинама	50
4.2.1. Стратегије обраде углова	52
4.2.2. Генеричке путање алата	53
4.2.3. Путање алата прилагођене граници џепа	55
4.2.4. Путање алата са константним углом захвата	60
4.3. Путање алата у САМ системима	62
4.4. Закључне напомене	64
5. ПРОГРАМСКИ СИСТЕМ ЗА ПРАЋЕЊЕ ЕЛЕМЕНАТА И ФАКТОРА ОБРАДЕ ДУЖ ПУТАЊЕ АЛАТА ...	65
5.1. Структура NS програма	66
5.1.1. Структура NS програмског блока	67
5.1.2. Анализа података у NS програмима	69
5.1.3. Коришћење података из NS програма	87
5.2. Опис програмског система за праћење елемената и фактора обраде дуж путање алата ...	88
5.2.1. Коришћење података из NS програма	88
5.2.2. Избор алата	91
5.2.3. Путања алата	91
5.2.4. Геометријски (матрични) опис припремка	93

5.2.5.	Геометријски (матрични) опис алата	100
5.2.6.	Геометријски опис путање алата.....	105
5.2.7.	Израчунавање елемената процеса резања према међусобном положају припремка и алата на путањи.....	111
5.2.8.	Одређивање профила брзине помоћног кретања дуж путање алата	153
5.2.9.	Одређивање сила резања дуж путање алата	160
5.3.	Закључне напомене	169
6.	ВЕРИФИКАЦИЈА ПРОГРАМСКОГ СИСТЕМА ЗА ПРАЂЕЊЕ ЕЛЕМЕНАТА И ФАКТОРА ОБРАДЕ ДУЖ ПУТАЊЕ АЛАТА	171
6.1.	Верификација одређивања зоне захвата дуж путање	172
6.1.1.	Пример 1	172
6.1.2.	Пример 2	180
6.2.	Верификација одређивања профила брзине помоћног кретања дуж путање	185
6.3.	Верификација методе одређивања сила резања дуж путање	187
6.4.	Закључне напомене	189
7.	ПРИМЕНА ПРОГРАМСКОГ СИСТЕМА ЗА ПРАЂЕЊЕ ЕЛЕМЕНАТА И ФАКТОРА ОБРАДЕ ДУЖ ПУТАЊЕ АЛАТА	190
7.1.	Пример одређивања елемената и фактора обраде дуж путање алата	191
7.1.1.	НС програми за пример обраде унутрашње контуре	192
7.1.2.	Положај алата у тачкама промене правца кретања и изглед обратка.....	195
7.1.3.	Дијаграми дубине и ширине резања и угла захвата дуж путање алата.....	199
7.1.4.	Дијаграми брзине помоћног кретања, броја обртаја, корака и времена обраде дуж путање алата	201
7.1.5.	Дијаграми сила резања.....	203
7.2.	Критеријуми за оцену адекватности путање алата.....	204
7.3.	Избор најадекватније путање алата	207
7.3.1.	Вишекритеријумско одлучивање.....	207
7.3.2.	Примена вишекритеријумског одлучивања при избору најадекватније путање алата 208	
7.4.	Закључне напомене	212
8.	ЗАКЉУЧАК.....	214
	Литература.....	217
	Прилог.....	224

Резиме

Обрада унутрашњих и спољашњих контура обимним глодањем може се извести различитим путањама алата. При одређивању путање алата у САМ системима пројектант искуственим и интуитивним избором између понуђених опција и даље има велики утицај на генерисање коначног облика путање алата, тако да на генерисану путању значајно утиче индивидуална процена. При контурном глодању, било која изабрана стратегија обраде (једносмерно, паралелно контури, спирално, трохоидно, ...) и примена било ког САМ система резултираће путањом алата која обезбеђује геометријску и димензиону тачност обратка.

САМ системи користе сопствене алгоритме за генерисање путање алата и за исту изабрану стратегију обраде, сваки САМ пакет даје различиту путању алата. У данашњим условима високих захтева у погледу продуктивности, испуњење само геометријских захтева није довољно, потребно је узети у обзир и технолошке аспекте и потрошњу енергије. Технолошки аспекти обухватају могућност остваривања најкраћег времена обраде, минималног хабања алата, минималне и константне силе резања и стабилног процеса обраде.

Оптимизација путање обраде се заснива на анализи могућих путања алата и одређивању елемената обраде који зависе од изабране путање алата и утичу на главне факторе обраде. Дубина и ширина резања, угао захвата и профил брзине помоћног кретања идентификовани су као кључни елементи зависни од путање, чије вредности и варирање дуж путање утичу на силу резања и стабилност процеса обраде. Познавање промене вредности ових кључних елемената дуж путање је неопходно за симулацију процеса и одређивање главних фактора обраде дуж путање алата.

NC програми садрже технолошке податке укључујући број обртаја и корак, кинематске и геометријске податке који укључују врсту кретања алата и координате положаја алата током процеса обраде. Међутим, елементи процеса обраде као што су угао захвата, дубина и ширина резања нису садржани у NC програмима. Потребни елементи процеса резања могу се израчунати уколико су, осим података садржаних у генерисаном NC програму, дефинисане геомеријске карактеристике припремка и алата. Да би се израчунали сви геометријски параметри путање алата, подаци из NC програма генерисани неким од САМ система морају се учитати у базу података и обрадити.

Развијена је методологија трансформације NC програма и генерисања параметара потребних за прорачун и симулацију кретања алата. Математички опис припремка и алата коришћени су заједно са подацима о кретању алата за симулацију процеса глодања. Подаци о кључним елементима обраде и њиховој промени дуж путање алата послужили су као основа за развој методологије за избор најадекватније путање алата узимајући у обзир захтеве за минималном силом резања и минималним варијацијама силе резања дуж путање, минималним временом обраде и стабилним процесом обраде.

Кључне речи: CNC обрада, путања алата, NC програм, зона захвата

Научна област: Машинство

Ужа научна област: Производно машинство

Abstract

Peripheral pocket or contour milling can be performed with different tool paths. Technology designers of multi axis CNC machining use their experience and intuition to choose some of options offered by CAM systems that determine the final shape of tool path, thus the generated tool path largely depend on individual judgment. In contour machining using peripheral mills, each selected type of tool path available in CAM program (zig-zag, contour parallel, spiral ...) will result with geometry and dimension accuracy.

CAM systems use their own algorithms for tool path generation, and for the same chosen tool path strategy, each CAM package gives different tool path. When high productivity of manufacturing is demanded, geometrical criteria are not enough and it is necessary to consider technological aspects and energy consumption. Technological aspects include obtaining minimum machining time, minimum tool wear, minimum cutting force, minimum cutting force variation and stability of machining process.

Tool path optimization is based on analysis of possible tool paths and determination of cutting elements which are dependable of chosen tool path and are affecting the main processing factors. Axial and radial depth of cut, engagement angle, feed and feed rate profile are identified as key parameters which depend on tool path and their values and variations along the tool path influence the cutting force and process stability. Knowledge of values and changes of those key machining parameters along the tool path is necessary for simulation and monitoring of the main cutting factors during the machining process.

The NC program contains technological data including specified speed and feed rate, and kinematic and geometric data including the mode of tool movement and coordinates of cutter positions during milling. However, cutting process elements, such as engagement angle, radial and axial depth of cut are not contained in the NC programs. Required elements of the cutting process can be calculated if, in addition to data contained in the generated NC programs, geometric characteristics of blank and geometric and technological characteristics of the tool are defined. To calculate geometrical parameters, first of all, NC code data generated by some of the CAM packages have to be imported into a database and processed.

NC code transformation methodology and generation of tool path parameters necessary for calculating all elements needed for tool movement simulation from given NC programs are shown. Blank and tool mathematical description are used with tool movement information for simulation of milling process. Simulation of cutting parameters, and their variation along the tool path, is used as base for development of methodology for choosing the most adequate tool path for contour machining considering minimum cutting force and cutting force variation, minimum machining time and process stability.

Keywords: CNC machining, tool path, NC program, engagement zone

Scientific discipline: Mechanical engineering

Scientific sub discipline: Manufacturing engineering

Енглеске скраћенице

CAM – Computer Aided Manufacturing

NC – Numerical Control

HSM - High Speed Machining

SLD – Stability Lobe Diagram

CL – Cutter Location

CWE - Cutter Workpiece Engagement

APT - Automatically Programmed Tool

MRR - Material Removal Rate

CEF- Cutter Engagement Feature

CNC- Computer Numerical Control

ISO - International Organization for Standardization

CAD - Computer Aided Design

CEF- Cutter Engagement Feature

CSG - Constructive solid geometry

PP – Post processor

Списак слика

Слика 1.1. Примери различитих путања алата за обраду исте контуре генерисаних једним САМ системом.....	3
Слика 1.2. Подручје истраживања у докторској дисертацији	5
Слика 2.1. Геометрија резања: (а) ортогонално резање, (б) косо резање.....	10
Слика 2.2. Формирање струготине.....	11
Слика 2.3. Мерчантов дијаграм сила [6]	11
Слика 2.4. Моделирање примарне и секундарне зоне резања [68].....	12
Слика 2.5. Шематски приказ обимног глодања [40]	13
Слика 2.6. Општи модел глодала [69]	14
Слика 2.7. Облици глодала изведени из општег модела глодала [69].....	14
Слика 2.8. Геометријски модел глодала и сила резања [69]	15
Слика 2.9. Геометрија ваљкастог глодала са хеликоидним сечивима [38]	16
Слика 2.10. Формирање струготине у процесу глодања [38]	16
Слика 2.11. Утицај релативне фазне разлике узастопних пролаза сечива глодала на дебљину струготине:(а) $\epsilon=0$ rad, (б) $\epsilon=\pi/2$ rad, (в) $\epsilon=\pi$ rad [40].....	17
Слика 2.12. Блок дијаграм процеса глодања [40]	17
Слика 2.13. Трохоидна и циркуларна трајекторија зуба глодала.....	18
Слика 2.14. Компромис између производности и постојаности алата [28]	21
Слика 2.15. Приказ обимног глодања при обради различитих површина: (а) обрада равне, (б) обрада конкавне и (в) обрада конвексне површине [28]	22
Слика 2.16. Експериментално одређене компоненте силе резања при обимном глодању равне површине [28]	22
Слика 2.17. Контактна зона и сила трења између зоне хабања алата и обратка при косом резању [23]	23
Слика 2.18. Дијаграм стабилности за обраду глодањем [39]	24
Слика 2.19. Стратегије за обезбеђење стабилног процеса обраде [29]	25
Слика 2.20. Одређивање дијаграма стабилности обрадног система директно на обратку [36]	25
Слика 3.1. Елементи зоне резања: (а) дубина и ширина резања, (б) дефиниција углова захвата.....	28
Слика 3.2. Утицај углова захвата на удео истосмерног и супротносмерног глодања за различиту дубину резања.....	29
Слика 3.3. Промена угла захвата током обраде унутрашње контуре: (а), (б), (е) и (з) угао 180° , (д), (ж) и (и) угао 90° , (ђ) и (ј) угао између 90° и 180° и (г) и (к) угао 0°	29
Слика 3.4. Промена угла захвата током обраде спољашње контуре.....	30
Слика 3.5. Промена угла захвата при истој дубини резања за обраду: (а) конкавне површине, (б) равне површине и (в) конвексне површине.....	30
Слика 3.6. Различите ширине резања при једном обртају алата	32
Слика 3.7. 3D симулација обраде – метода Z вектора [72].....	33
Слика 3.8. 2D симулација обраде – метода пиксели [72].....	34
Слика 3.9. Симулација обраде – метода пиксела [63].....	34
Слика 3.10. Одређивање зоне захвата – операције са битима за пример са слике 3.9 [63].....	35
Слика 3.11. Ажурирање обратка – операције са битима за пример са слике 3.9 [63].....	35
Слика 3.12. Пример делта маске алата [66].....	36
Слика 3.13. Пун захват алата [66]	37
Слика 3.14. Делимични захват из једног дела [66].....	37
Слика 3.15. Делимични захват алата из два дела [66].....	37
Слика 3.16. Поређење потребне меморије [66]	38
Слика 3.17. 8-битна компресија битмап слике алата [66]	38
Слика 3.18. Секвенце обраде применом тачне методе [66].....	39
Слика 3.19. Пресек обима алата и обратка [66].....	39
Слика 3.20. Пресек алата и обратка – CEF мапирање [74]	40
Слика 3.21. Модел времена обраде заснован на трапезоидном профилу брзине помоћног кретања [76]	42
Слика 3.22. Попречни пресек алата у захвату [52]	43
Слика 3.23. Захват алата и брзина помоћног кретања при кружном кретању алата:	

(а) по конкавној површини, (б) по конвексној површини [52]	44
Слика 4.1. Три типичне путање алата: (а) једносмерно, (б) двосмерно и (в) кретање алата паралелно контури	47
Слика 4.2 Контурно паралелно глодање: (а) од центра ка периферији и (б) од периферије ка центру	48
Слика 4.3. Различити проблеми који настају при офсетовању: (а) двозначност,	49
Слика 4.4. Два типа кретања алата дуплом петљом: (а) први тип петље (б) други тип петље [3] ...	52
Слика 4.5. Стратегије обраде угла: (а) конвенционално, (б) једноструком петљом и (в) двоструком петљом [77]	53
Слика 4.6. Путања првог пролаза алата паралелна контури и варијација дубине резања [68]	54
Слика 4.7. Концепција модификације путање алата [68]	54
Слика 4.8. Путања алата са константном дужином резања [68]	55
Слика 4.9. Путања завршног пролаза: (а) неприлагођена путања алата, (б) прилагођена путања алата [68]	55
Слика 4.10. Примери раздвајања подручја офсетовањем код неконвексних џепова [68]	56
Слика 4.11. Растући М-дискови на медијалној оси и кружни лукови којима се поравнава путања [79]	56
Слика 4.12. Еволуција неконвексне затворене контуре по закону померања пропорционалног кривини [68]: (а), (б), (в), (г), (д), (ђ), (е) и (ж)- фазе у еволуцији контуре	57
Слика 4.13. Суперпонирање еволуција криве у различитим тренуцима: (а) са малим временским кораком; (б) са великим временским кораком [68]	57
Слика 4.14. Крива нултог реда у различитим фазама еволуције по модификованом закону померања у складу са кривином [68]	58
Слика 4.15. Упоредни приказ различитих начина генерисања путања алата за обраду џепа [80]: (а) путања паралелна контури, (б) путања по Лапласовој контури и (в) спирална путања паралелна контури	58
Слика 4.16. Илустрација методе [75] за генерисање путање: (а) контуре по којима се води криволинијска путања, (б) криволинијска путања алата за обраду удубљења	59
Слика 4.17. Услови тангентности за офсетовање ка центру удубљења при константном углу захвата [51]	60
Слика 4.18. Услови тангентности за офсетовање ка периферији удубљења при константном углу захвата [51]	61
Слика 4.19. Концепт алгоритма за генерисање путање алата са модификованим углом захвата [62]	62
Слика 4.20. Напредне функције САМ система [82]	63
Слика 4.21. Прилагођавајуће спиралне путање и интелигентно раздвајање подручја обраде у iMachining [83]	63
Слика 5.1. Могуће путање алата и x_c, y_c, z_c за исте $x_1, y_1, z_1, x_2, y_2, z_2, r$ и исту кружну интерполацију (а) иста почетна и крајња тачка за исту врсту кружне интерполације а различите центре интерполације, (б) елементи за одређивање центра кружне интерполације	78
Слика 5.2. Почетни угао α_0 за различите врсте кружне интерполације и међусобне положаја почетне и крајње тачке интерполације: (а) G02, $y_2 \geq y_1$ и $x_2 \geq x_1$, (б) G02, $y_2 \geq y_1$ и $x_1 \geq x_2$, (в) G02, $y_1 \geq y_2$ и $x_1 \geq x_2$, (г) G02, $y_1 \geq y_2$ и $x_2 \geq x_1$, (д) G03, $y_2 \geq y_1$ и $x_2 \geq x_1$, (ђ) G03, $y_2 \geq y_1$ и $x_1 \geq x_2$, (е) G03, $y_1 \geq y_2$ и $x_1 \geq x_2$, (ж) G03, $y_1 \geq y_2$ и $x_2 \geq x_1$	86
Слика 5.3. Приказ преноса програмских блокова у NC табеле и израчунавање одговарајућих параметара	89
Слика 5.4. Пренос кинематских параметара у NC табелу	90
Слика 5.5. Приказ преноса програмских блокова у NC табеле и израчунавање одговарајућих параметара	91
Слика 5.6. Приказ додељивања алата и њихових атрибута местима у магацину алата	92
Слика 5.7. Приказ израчунавања параметара NC програма и параметара алата из NC табеле	92
Слика 5.8. ASCII датотека која садржи податке о путањи	93
Слика 5.9. ASCII датотека која садржи податке о алату	93
Слика 5.10. Пример припремке: (а) изглед припремке, (б) растеризована слика припремке у XY равни	93
Слика 5.11. Принцип читања bitmap датотеке	94
Слика 5.12. Принцип увећања димензија матрица W_x, W_y и W_z : (а) растеризована слика припремке у XY равни, (б) припремак пре увећања димензија матрица W_x, W_y и W_z и (в) припремак после увећања димензија матрица W_x, W_y и W_z	95

Слика 5.13. Различите резолуције мреже припремка W	95
Слика 5.14. Померање припремка у координатном систему.....	96
Слика 5.15. Дуплирање положаја тачке i и j на мрежи припремка:(а) мрежа припремка пре дуплирања положаја тачке, (б) мрежа припремка после дуплирања положаја тачке	97
Слика 5.16. Координате тачака на мрежи: (а) у матрици Wz , (б) у матрици $W2z$	97
Слика 5.17. Трансформација припремка кроз одређивање координате $W2z$ одговарајућих тачака у матрици $W2z$: (а) $W2z(2j-1,2i-1)$, (б) $W2z(2j,2i-1)$, (в) $W2z(2j-1,2i)$, (г) $W2z(2j,2i)$	98
Слика 5.18. Трансформисана мрежа припремка у три различите резолуције припремка:	99
Слика 5.19. Пример ASCII датотеке за мрежу приказану на слици 5.18а	99
Слика 5.20. Трансформација bitmap датотеке у мрежу припремка: (а) bitmap датотека, (б) мрежа припремка.....	100
Слика 5.21. Координате тачака на мрежи цилиндричног алата	100
Слика 5.22. Координате тачака на мрежи конусног алата.....	101
Слика 5.23. Координате тачака на мрежи сферног алата.....	102
Слика 5.24 Мреже три различита алата: (а) цилиндрично глодало (б), конусно глодало и (в) сферно глодало.....	102
Слика 5.25. ASCII датотека - пример за мрежу приказану на слици 5.24в.....	103
Слика 5.26. Матрице координата тачака на изводници алата: (а) цилиндричног глодала, (б) конусног глодала и (в) сферног глодала.....	104
Слика 5.27. Парови координата тачака на изводницама алата: (а) цилиндричног глодала, (б) конусног глодала и (в) сферног глодала.....	105
Слика 5.28. Пример трансформисаног NC програма у ASCII датотеци	105
Слика 5.29. Сегменти путање према ASCII датотеци са слике 5.28.....	106
Слика 5.30. Декомпоновање путање на елементарне делове.....	107
Слика 5.31. Координате тачака на елементарној путањи и углови: (а) за $Pg(m) = 'G01'$: (б) за $Pg(m) = 'G02'$	108
Слика 5.32. Координате тачака на елементарној путањи и углови: (а) за $Pg(m) = 'G03'$: (б) за $Pg(m) = {'G81', 'G82', ...}$	110
Слика 5.33. Дубина и ширина резања и угао захвата.....	111
Слика 5.34. Кретање алата по елементарној путањи: (а) сегмент путање алата, (б) положај алата у почетној и крајњој тачки сегмента	112
Слика 5.35. Пресек обима алата и мреже обратка: (а) положај алата у свакој тачки елементарне путање, (б) положај алата у једној тачки елементарне путање	113
Слика 5.36. Координате тачака у којима обим алата пресеца мрежу обратка: (а) пресек са вертикалним линијама и (б) пресек са хоризонталним линијама мреже обратка	113
Слика 5.37. Координате тачака у којима алат пресеца мрежу обратка: (а) одговарајући централни углови и (б) елементарни углови између суседних тачака пресека.....	116
Слика 5.38. Пресек два полигона	117
Слика 5.39. Пресек обима алата и обратка као пресек два полигона: (а) координате одговарајућих тачака, (б) увеличани приказ	118
Слика 5.40. Карактеристични случајеви пресека полигона алата и обратка: (а) пресек у једној тачки, (б) пресек у три тачке, (в) пресек у две тачке, (г) пресек у четири тачке	119
Слика 5.41. Пресечне тачке Oix и Oiy полигона Op и свих полигона Wp : (а) произвољна тачка пресека, (б) крајње тачке пресека.....	120
Слика 5.42. Дефинисање полигона Wp као линије коју чине паралелне дужи.....	121
Слика 5.43. Линије састављене од сегмената Wp : (а) паралелних хоризонталних и (б) паралелних вертикалних сегмената Wp	123
Слика 5.44. Линија Wp састављена од паралелних сегмената одређена матрицама координата тачака Wpx и Wpy : (а) пресек са обимом алата у произвољној тачки, (б) крајње тачке пресека са обимом алата.....	124
Слика 5.45. Линија састављена од паралелних сегмената за целу мрежу припремка W	126
Слика 5.46. Две суседне пресечне тачке на обиму алата: (а) координате пресечних тачака, (б) координате јединичног пресечног дела мреже	127
Слика 5.47. Провера контакта пресечне тачке на обиму алата са припремком: (а) $O1z(k) \geq W2z(2\cdot j,2\cdot i)$, (б) $O1z(k) < W2z(2\cdot j,2\cdot i)$, (в) $O1z(k) < W2z(2\cdot j,2\cdot i)$ и $O1z(k) < w_{z0}$	127
Слика 5.48. Пресек обима алата и припремка: (а) линија контакта алата и припремка, (б) контактне тачака са обе стране правца кретања и одговарајући геометријски елементи	128
Слика 5.49 Координате горњих контактних тачака $K1w, K2w$: (а) $O1z(k) < W2z(2\cdot j,2\cdot i)$ и	128
Слика 5.50. Контактне тачке на елементарној путањи алата: (а) координате доњих	

контактних тачака $K1z$ и $K2z$ и (б) координате горњих контактних тачака $K1w$ и $K2w$	132
Слика 5.51. Контактне тачке у различитим тачкама исте елементарне путање: (а) једна ширина глодања, (б) две различите ширине глодања при једном обртају алата.....	132
Слика 5.52. Геометријски елементи за одређивање дубине резања, ширине резања и угла захвата у тачки n : (а) изометријски приказ, (б) приказ у равни XU	134
Слика 5.53. Елементи резања за прву тачку елементарне путање: (а) приказ у равни XU , (б) изометријски приказ	135
Слика 5.54. Елементи резања за крајњу тачку елементарне путање: (а) приказ у равни XU , (б) изометријски приказ	135
Слика 5.55. Положај тачке на мрежи обратка $Wz(j,i)$	136
Слика 5.56. Одређивање z координате тачака унутар обима алата за случај када је.....	137
Слика 5.57. Промена матрица координата тачака на мрежи обратка за пример са слике 5.53	138
Слика 5.58. Промена матрица координата тачака на мрежи обратка за пример са слике 5.54	138
Слика 5.59. Измена мреже обратка: (а) за пример са слике 5.35 и (б) за пример са слике 5.29	139
Слика 5.60. Положај пресека обима алата и јединичног поља мреже обратка: (а) приближно пола површине пресечног поља мреже обратка унутар обима алата, (б) већи део површине пресечног поља ван обима алата.....	139
Слика 5.61. Одлучивање о одузимању z координате јединичног поља мреже обрадка на основу положаја пресека са обимом алата и функције e	140
Слика 5.62. Дијаграм промене дубине резања са леве и десне стране за пример са слике 5.29	148
Слика 5.63. Дијаграм промене ширине резања са леве и десне стране за пример са слике 5.29	149
Слика 5.64. Дијаграм промене угла захвата са леве и десне стране за пример са слике 5.29.....	149
Слика 5.65. Дијаграм промене угла захвата и почетног угла захвата са леве и десне стране за пример са слике 5.29.....	150
Слика 5.66. Дијаграм промене укупне дубине резања за пример са слике 5.29.....	150
Слика 5.67. Дијаграм промене просечне ширине резања за пример са слике 5.29	151
Слика 5.68. Дијаграм промене угла захвата за пример са слике 5.29	151
Слика 5.69. Дијаграм расподеле контаката за пример са слике 5.29	152
Слика 5.70. Тродимензионални приказ дијаграма промене дубине резања за пример са слике 5.29	152
Слика 5.71. Тродимензионални приказ дијаграма промене угла захвата за пример са слике 5.29	153
Слика 5.72. Трапезоидни профил брзине помоћног кретања за $S_{md} > S_{ma}$	154
Слика 5.73. Трапезоидни профил брзине помоћног кретања за $S_{md} < S_{ma}$	155
Слика 5.74. Дијаграм промене брзине помоћног кретања за пример са слике 5.29	155
Слика 5.75. Дијаграм промене броја обртаја за пример са слике 5.29	156
Слика 5.76. Дијаграм промене корака за пример са слике 5.29	156
Слика 5.77. Дијаграм времена обраде за пример са слике 5.29.....	157
Слика 5.78. Дијаграм промене брзине помоћног кретања током времена за пример са слике 5.29	157
Слика 5.79. Дијаграм промене обртаја током времена за пример са слике 5.29.....	158
Слика 5.80. Дијаграм промене корака током времена за пример са слике 5.29.....	158
Слика 5.81. Дијаграм промене дужине пута током времена за пример са слике 5.29	159
Слика 5.82. Тродимензионални приказ дијаграма промене брзине помоћног кретања за пример са слике 5.29.....	159
Слика 5.83. Сила при супротносмерном глодању пројектована на три координатна правца за пример са слике 5.29.....	162
Слика 5.84. Сила при истосмерном глодању пројектована на три координатна правца за пример са слике 5.29	163
Слика 5.85. Укупна сила резања пројектована на три координатна правца за пример са слике 5.29	163
Слика 5.86. Промена брзине резања за пример са слике 5.29.....	164
Слика 5.87. Силе резања при обимном глодању [8]	165
Слика 5.88. Дијаграми сила резања при супротносмерном глодању према [8] за пример са слике 5.29	167
Слика 5.89. Дијаграми сила резања при истосмерном глодању према [8] за пример са слике 5.29	168
Слика 5.90. Дијаграм средње обимне силе резања према [8] за пример са слике 5.29	168
Слика 5.91. Дијаграм технолошке брзине према [8] за пример са слике 5.29	169

Слика 5.92. Блок дијаграм програмског система за праћење елемената и фактора обраде дуж путање алата	170
Слика 6.1. Пример 1: углови захвата при обради спољашње контуре према [94].....	172
Слика 6.2. Пример 1: углови захвата добијени при обради спољашње контуре према [66]	173
Слика 6.3. Припремак за пример 1: (а) 1пиксел=0,5 mm, (б) 1пиксел=0,1 mm.....	173
Слика 6.4. Положај алата и обртка у тачкама промене правца кретања за пример 1: (а) 1пиксел = 0,5 mm, (б) 1пиксел=0,1 mm.....	174
Слика 6.5. Детаљ положаја алата и обртка у тачкама промене правца кретања за пример 1: (а) 1пиксел=0,5 mm, (б) 1пиксел=0,1 mm	174
Слика 6.6. Положај алата и обрађеног дела у тачкама промене правца кретања за пример 1: (а) 1пиксел=0,5 mm, (б) 1пиксел=0,1 mm	175
Слика 6.7. Детаљ положаја алата и обрађеног дела у тачкама промене правца кретања за пример 1: (а) 1пиксел=0,5 mm, (б) 1пиксел=0,1 mm	175
Слика 6.8. Укупна дубина резања за пример 1 (1пиксел=0,5 mm).....	176
Слика 6.9. Угао захвата за пример 1 (1пиксел=0,5 mm).....	176
Слика 6.10. Укупна дубина резања за пример 1 (1пиксел=0,1 mm).....	178
Слика 6.11. Угао захвата за пример 1 (1пиксел=0,1 mm).....	178
Слика 6.12. Део дијаграма угла захвата за детаљ путање приказан на слици 6.7:.....	179
Слика 6.13. 3D дијаграм промене дубине резања дуж путање за пример 1:	180
Слика 6.14. Пример 2: путања алата за обраду унутрашње контуре [66].....	180
Слика 6.15. Пример 2: Обрадак и положаји глодала на почетку и крају сваког сегмента путање алата (1пиксел=0,5 mm)	181
Слика 6.16. Пример 2: Резултати добијени у Нешићевом докторату [66]: (а) промена почетног и крајњег угла захвата, (б) промена укупног угла захвата дуж путање	181
Слика 6.17. Пример 2: Резултати добијени у дисертацији за промену угла захвата (1пиксел=0,5 mm).....	182
Слика 6.18. Пример 2: Резултати добијени у дисертацији за промену угла захвата (1пиксел=0,1 mm).....	182
Слика 6.19. Пример 2: Упоредни приказ укупног угла захвата: (а) добијеног у [66] и (б) добијеног у дисертацији (1пиксел=0,1mm).....	183
Слика 6.20. Пример 2: илустрација положаја глодала, правца кретања и угла захвата у 9 карактеристичних тачака путање алата: (а) линеарна интерполација са кретањем алата дуж обе осе, (б) линеарна интерполација са кретањем алата у правцу у осе, (в) линеарна интерполација са кретањем алата у правцу x осе, (г), (д), (ђ) кружна интерполација, (е), (ж), (з) линеарна интерполација.....	184
Слика 6.21. Профил брзине помоћног кретања за пример 1 добијен симулацијом [66]: (а) пројектованна x осу, (б) пројектован на у осу.....	186
Слика 6.22. Профил брзине помоћног кретања за пример 1 добијен експериментално [66].....	186
Слика 6.23. Профил брзине помоћног кретања за пример 1 добијен у дисертацији	186
Слика 6.24. Упоредни приказ брзине помоћног кретања: (а) добијене експериментално у [66], (б) добијене применом програмског система у дисертацији	187
Слика 6.25. Компоненте силе резања добијене у [66]: (а) резултати симулације, (б) експериментални резултати	188
Слика 6.26. Дијаграм сила резања добијен применом програмског система за праћење фактора обраде дуж путање алата	189
Слика 7.1. Пример: скица обрађене контуре са димензијама	191
Слика 7.2. NC програм 1: изглед путање и изабране опције.....	192
Слика 7.3. NC програм 2: изглед путање и изабране опције	192
Слика 7.4. NC програм 3: изглед путање и изабране опције.....	193
Слика 7.5. NC програм 4: изглед путање и изабране опције.....	193
Слика 7.6. NC програм 5: изглед путање и изабране опције	193
Слика 7.7. NC програм 6: изглед путање и изабране опције.....	194
Слика 7.8. NC програм 7: изглед путање и изабране опције.....	194
Слика 7.9. NC програм 8: изглед путање и изабране опције	194
Слика 7.10. NC програм 9: изглед путање и изабране опције.....	195
Слика 7.11. NC програм 10: изглед путање и изабране опције.....	195
Слика 7.12. NC програм 1-положај алата и обртка у тачкама промене правца кретања: (а) 1пиксел=1mm, (б) 1пиксел=0,2 mm	196
Слика 7.13. NC програм 2-положај алата и обртка у тачкама промене правца кретања:	

(a) 1пиксел=1mm, (б) 1пиксел=0,2 mm.....	196
Слика 7.14. NC програм 3-положај алата и обратка у тачкама промене правца кретања:	
(a) 1пиксел=1mm, (б) 1пиксел=0,2 mm.....	196
Слика 7.15. NC програм 4-положај алата и обратка у тачкама промене правца кретања:	
(a) 1пиксел=1mm, (б) 1пиксел=0,2 mm.....	197
Слика 7.16. NC програм 5-положај алата и обратка у тачкама промене правца кретања:	
(a) 1пиксел=1mm, (б) 1пиксел=0,2 mm.....	197
Слика 7.17. NC програм 6-положај алата и обратка у тачкама промене правца кретања:	
(a) 1пиксел=1mm, (б) 1пиксел=0,2 mm.....	197
Слика 7.18. NC програм 7-положај алата и обратка у тачкама промене правца кретања:	
(a) 1пиксел=1mm, (б) 1пиксел=0,2 mm.....	198
Слика 7.19. NC програм 8-положај алата и обратка у тачкама промене правца кретања:	
(a) 1пиксел=1mm, (б) 1пиксел=0,2 mm.....	198
Слика 7.20. NC програм 9-положај алата и обратка у тачкама промене правца кретања:	
(a) 1пиксел=1mm, (б) 1пиксел=0,2 mm.....	198
Слика 7.21. NC програм 10 -положај алата и обратка у тачкама промене правца кретања:	
(a) 1пиксел=1mm, (б) 1пиксел=0,2 mm.....	199
Слика 7.22. NC програм 1-дијаграми промене елемената процеса обраде са леве и десне стране:	
(a) дубина резања, (б) ширина резања 1пиксел=0,2 mm.....	199
Слика 7.23. NC програм 1-дијаграми промене елемената процеса обраде са леве и десне стране:	
(a) угао захвата, (б) почетни и укупни угао захвата	200
Слика 7.24. NC програм 1-дијаграми промене укупних вредности елемената процеса обраде:	
(a) дубина резања, (б) ширина резања	200
Слика 7.25. NC програм 1-дијаграми промене укупних вредности елемената процеса обраде:	
(a) угао захвата, (б) расподела контаката	200
Слика 7.26. NC програм 1: просторни приказ промене дубине резања дуж путање алата.....	201
Слика 7.27. NC програм 1-дијаграми промене фактора процеса обраде дуж путање алата:	
(a) брзина помоћног кретања, (б) број обртаја	201
Слика 7.28. NC програм 1-дијаграми промене фактора процеса обраде дуж путање алата:	
(a) корак, (б) време обраде	202
Слика 7.29. NC програм 1-дијаграми промене фактора процеса обраде током времена:	202
Слика 7.30. NC програм 1-дијаграми промене фактора процеса обраде током времена:	202
Слика 7.31. NC програм 1: дијаграми сила резања при супротносмерном глодању према моделу [7]	203
Слика 7.32. NC програм 1: дијаграми сила резања при истосмерном глодању према моделу [7]... ..	203
Слика 7.33. NC програм 1: дијаграми укпне силе резања према моделу [7]	204
Слика 7.34. Почетна матрица одлучивања.....	208
Слика 7.35. Формирање нормализоване матрице и тежинске нормализоване матрице	209
Слика 7.36. Матрица сагласности и матрица сагласне доминације.....	210
Слика 7.37. Матрица несагласности и матрица несагласне доминације	211
Слика 7.38. Матрица агрегатне доминације и утврђивање решења.....	212

Списак табела

Табела 2.1 - Модели сила резања (слика 2.8)	15
Табела 3.1 - Угао захвата при обради конкавне, конвексне и равне површине.....	31
Табела 5.1 - Структура NC програма	67
Табела 5.2 - Структура NC програмског блока [87]	67
Табела 5.3 - Најчешће коришћене G-функције	68
Табела 5.4 - Најчешће коришћене M-функције	68
Табела 5.5 - Вредности координата за функције G00 и G01	71
Табела 5.6 - Вредности координата за функције G81, G82, ... G89.....	72
Табела 5.7 - Вредности координата за функције G81, G82, ... G89.....	72
Табела 5.8 - Вредности координата за функције G98.....	73
Табела 5.9 - Вредности координата за функције G98 и G99	73
Табела 5.10 - Полупречник r , почетни угао α_0 и угао α кружне интерполације за задате x_c, y_c, z_c	75
Табела 5.11 - Координате центра кружне интерполације за функцију G17.....	79
Табела 5.12 - Координате центра кружне интерполације за функцију G18.....	81
Табела 5.13 - Координате центра кружне интерполације за функцију G19.....	83
Табела 5.14 - NC програмски блок [86].....	87
Табела 5.15 - Запис табеле базе података [86]	87
Табела 5.16 - Структура записа "NC програми" у табели базе података	88
Табела 5.17 - Структура записа „алати“ у табели базе података	88
Табела 5.18 - Елементи процеса резања у две тачке (слика 5.51)	135
Табела 5.19 - Структура датотеке елемената процеса резања („nnnnn_put“).....	141
Табела 5.20 - Део датотеке елемената процеса обраде за пример приказан на слици 5.59а (01011_put).....	141
Табела 5.21 - Део датотеке елемената процеса обраде за пример са слике 5.59б (01021_put)	142
Табела 5.22 - Структура датотеке („nnnnn_put_rr_Ttt“) са подацима о свакој тачки путање	142
Табела 5.23 - Структура датотеке 01011_put_01_T01 за пример са слике 5.59а	143
Табела 5.24 - Структура датотеке 01021_put_01_T01 за пример са слике 5.59б	143
Табела 5.25 - Структура датотеке контаката „nnnnn_put_rr_Ttt_1“	145
Табела 5.26 - Датотека расподеле контаката 01011_put_01_T01_1 за пример приказан на слици 5.29а	145
Табела 5.27- Датотека расподеле контаката 01021_put_01_T01_1 за пример приказан на слици 5.29б	146
Табела 5.28 - Специфичне силе резања	162
Табела 6.1 - Вредности и одступања угла захвата за пример 1 варијанта (а)	177
Табела 6.2 - Вредности и одступања угла захвата за пример 1 варијанта (б).....	179
Табела 6.3 - Провера тачности одређивања угла захвата у 9 карактеристичних тачака за пример 2.....	185

Табела 6.4 - Провера тачности одређивања угла захвата на два сегмента кружне интерполације.....	185
Табела 6.5 - Специфичне силе резања [66].....	188
Табела 7.1 - Расподела интервала дубине резања у процентима за 10 различитих путања алата	205
Табела 7.2 - Учешће врсте глодања у процентима за 10 различитих путања алата	206
Табела 7.3 - Пут и време обраде за 10 различитих путања алата	206
Табела 7.4 - Средња вредност силе и средње аритметичко одступање силе од средње вредности за 10 различитих путања алата	207

ПОГЛАВІЄ

1

УВОД

Продуктивност обрадних процеса у високо аутоматизованим технолошким системима је постала императив модерне рачунарски интегрисане производње у индустрији прераде метала. Сви процеси манипулације обратком, измене алата, контроле остварене тачности мера и облика су аутоматизовани и њихово време је сведено на минимум, па су савремена истраживања у производним технологијама усмерена у интердисциплинарну област обрадних процеса који се одвијају при високим брзинама резања и моделирање главних фактора обраде у тим условима.

Истраживања процеса обраде метала скидањем струготине, спадају у најстарија научна истраживања у производним технологијама. Тајлор (Frederick Winslow Taylor, 1856-1915) је експериментисао 26 година и извео преко 50.000 експеримената, при чему је настало 400 тона струготине и направио је велике трошкове својим лабораторијским испитивањима [1]. Суштина његовог рада се заснивала на изналажењу оптималних режима резања при обради метала. Поставио је своју чувену Тајлор-ову једначину којом дефинише зависност брзине резања од других параметара обрадног процеса, која се и данас налази у свим уџбеницима за теорију обраде метала резањем. Тајлор је био пионир у оптимизацији обрадних процеса, имајући за циљ продуктивност и економичност процеса резања у индустријској производњи. На бази тог закључка Тајлор је поставио принципе научног менаџмента [2]. Бројна истраживања у свету, која су названа Тајлоризама, проширила су се и на просторе бивше Југославије после другог светског рата. Систематско истраживање обрадљивости домаћих конструкционих материјала при обради домаћим алатима дало је значајне научне резултате, који су објављени на најпознатијим научним скуповима у свету и најеминентнијим светским часописима тог времена. Велики проблем ових истраживања је био неопходан дуготрајни лабораторијски рад у складу са научним методама планирања вишефакторних експеримената у коме су били велики трошкови материјала који се обрађује и алата који се хабају у експериментима, да би се добили параметри обрадљивости за одређене обрадне услове. Презентација тих резултата је била у виду проширених израза, табела, коефицијената и номограма, тако да су ти резултати остали неадекватно искоришћени јер су били приказани у неповољном облику са аспекта модерних информатичких технологија.

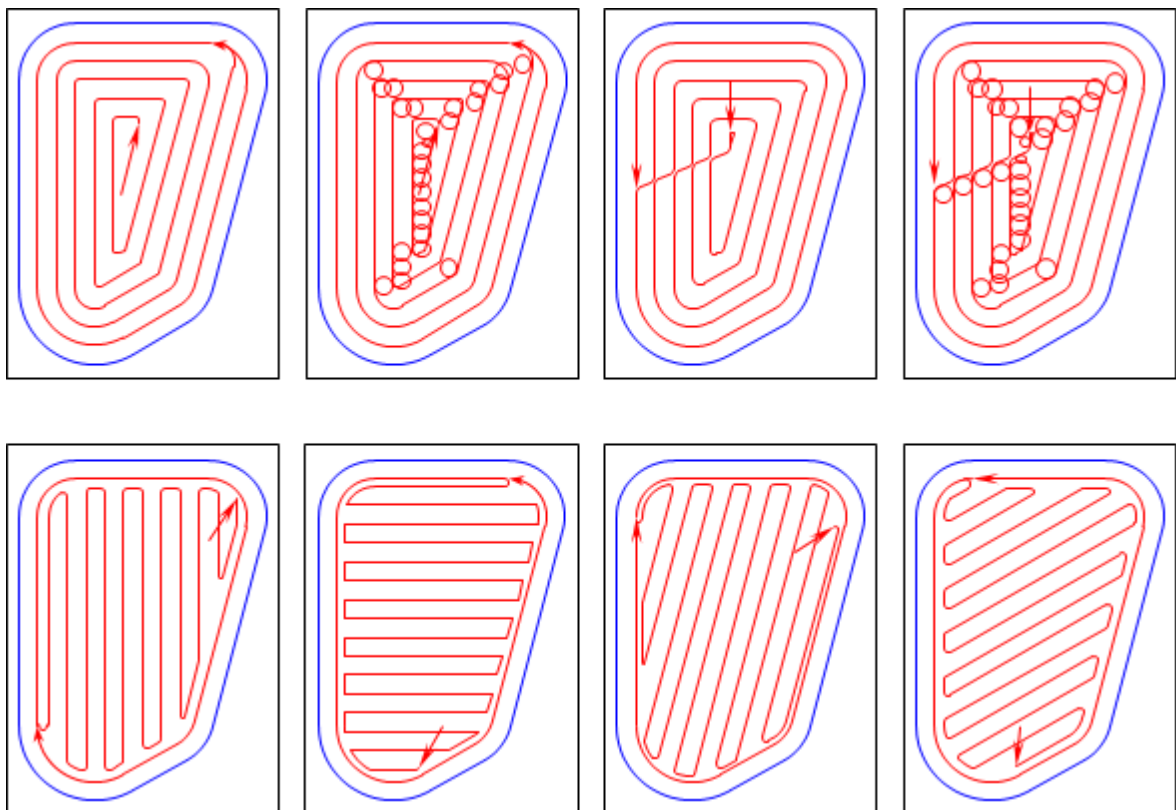
Данас, када рачунарски системи и модерни софтверски алати омогућују најкомплексније прорачуне, анимацију, визуелизацију и реалну симулацију појава у процесима резања, а на бази најсложенијих алгоритама и аналитичких веза међу параметарима обрадљивости, постоји могућност да се реализују истраживања у области главних фактора обраде уз адекватно коришћење могућности рачунарских метода, а само уз експерименталну практичну верификацију постигнутих резултата. Данас су истраживања у области обраде метала резањем изузетно актуелна, али нису привелегија само великих истраживачких центара, добро опремљених скупом лабораториском опремом, већ се истраживања изводе и у малим истраживачким центрима на универзитетима и научним институтима широм света.

Након појаве високобрзинске обраде (*HSM- High Speed Machining*) у авионској и аутомобилској индустрији за обраду сложених делова од алуминијума и његових легура, обрада великим брзинама је постала популарна као иновативна технологија у свим областима производње [3]. Обрада великим брзинама поставља и неке нове захтеве у погледу облика путање алата, услед кинематичких и динамичких ограничења саме машине алатке [4].

1.1. Мотивација

Велики проценат свих врста обраде глодањем је обрада унутрашњих и спољашњих контура двоипоосним обимним глодањем. У пракси се и даље најчешће примењују класичне стратегије обраде у једном смеру, у два смера и контурно глодање. У скорије време, у оквиру САМ (*Computer Aided Manufacturing*) система, идући у сусрет HSM технологијама, развијене су апликације које подржавају обраду контура у смислу примене трохоидних, спиралних и D стратегија за генерисање путања алата.

У пројектовању технолошких процеса за обрадне системе са CNC (*Computer Numerical Control*) управљањем, применом САМ система, велики део инжењерских активности који се односи на израчунавање путање алата одређених геометријских параметара је аутоматизован, тако да се путања алата аутоматски генерише преузимањем параметара насталих геометријским моделирањем обратка. Када је у питању одређивање стратегије обраде за једну технолошку форму одређеног геометријског облика, где је пречник вретенастог глодала довољно мали у односу на димензије површине која се обрађује, у свим САМ системима се данас даје пројектанту више могућности избора врсте путање, коју он треба да изабере на основу свог личног знања и искуства. Више различитих пројектаната, користећи исти САМ систем могу различитим избором стратегије обраде (слика 1.1) постићи доста различите резултате у погледу продуктивности обрадног процеса.



Слика 1.1. Примери различитих путања алата за обраду исте контуре генерисаних једним САМ системом

Путања алата се генерише на основу облика контуре (удубљења или испупчења), пречника алата и задате номиналне дубине резања, тако да обрадак у потпуности буде обрађен.

Путања алата се обично добија паралелним померањем (офсетовањем) контуре ка унутрашњости или ка спољашњости.

САМ системи користе сопствене алгоритме за генерисање путање алата и за исту изабрану стратегију обраде, сваки САМ систем даје различиту путању алата [5].

При контурном глодању, било која изабрана стратегија обраде и примена било ког САМ система резултираће путањом алата која обезбеђује геометријску и димензиону тачност обратка.

У данашњим условима високих захтева у погледу продуктивности, испуњење само геометријских захтева није довољно, потребно је узети у обзир и технолошке аспекте и потрошњу енергије. Технолошки аспекти обухватају могућност остваривања најкраћег времена обраде, минималног хабања алата, минималне и константне силе резања, високог квалитета обрађене површине и стабилног процеса обраде.

Која од могућих путања алата за обраду неког дела у највећој мери испуњава наведене технолошке захтеве може се утврдити само експерименталним мерењем сила резања, хабања алата, квалитета обрађене површине, стабилности процеса обраде и других карактеристичних параметара обрадног система.

1.2. Циљеви истраживања

Циљ докторске дисертације је да се смањи утицај недовољног искуства пројектанта CNC технологија на показатеље продуктивности и економичности обрадних процеса, иако су они пројектовани применом модерних САМ система

Основна идеја овога рада је да се развије методологија за процену адекватности програмираних путања алата, према различитим критеријумима, као што су минимална сила резања, минималне варијације силе резања током процеса обраде, динамичка стабилност процеса обраде, минимално хабање алата, максимална и константна производност обрадног процеса.

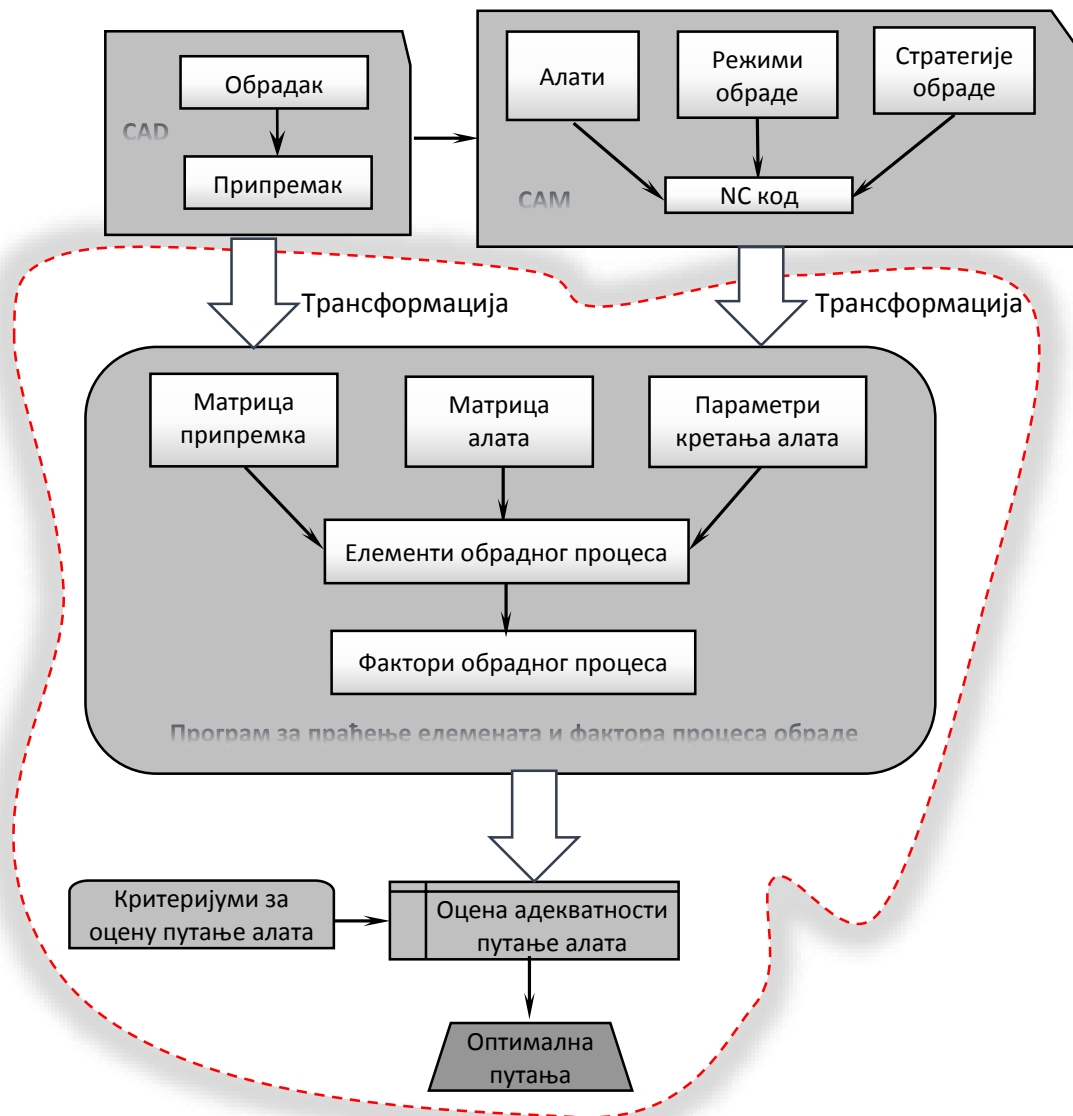
Да би се ова идеја остварила неопходно је најпре утврдити који елементи обрадног процеса зависе од путање алата, односно који су то кључни елементи које треба анализирати. Путањом алата дефинисани су правци кретања алата, радијуси кривина путање, промене правца кретања, као и номинална дубина и ширина резања. Потребно је утврдити који елементи обрадног процеса се мењају услед промене путање алата.

Примарни циљ истраживања је развити методологију и програмски систем за праћење промене кључних елемената обрадног процеса дуж путање алата. У ту сврху, прво је потребно трансформисати NC (*Numerical Control*) програм који се добија као излаз из САМ система, прорачунати све елементе који су дефинисани NC програмом и учитати их у програм за реализацију. Затим је потребно дефинисати алат и припремак у погодном облику за учитавање у програм. Следећи корак је дефинисање положаја алата дуж путање у односу на обрадак, одређивање зоне контакта алата и обратка и ажурирање обратка (генерисање обратка у тренутку када се алат налази у изабраној тачки на путањи). На основу наведених корака могуће је прорачунати кључне елементе обрадног процеса контурног глодања.

Из претходног проистиче и следећи циљ истраживања, а то је потврда ваљаности развијеног програма за праћење кључних елемената процеса обраде дуж путање алата на конкретним примерима.

На основу анализе литературе из области истраживања, потребно је сагледати проблем са више аспеката и утврдити зависности технолошких показатеља обрадног процеса од кључних елемената обраде. Један од циљева истраживања је изабрати и применити постојеће моделе за прорачун вредности фактора обраде, који ће се користити као критеријуми за оцену адекватности путање алата.

Крајњи циљ рада је адекватна оцена различитих путања алата, генерисаних САМ системима, за обраду једног удубљења, према дефинисаним критеријумима, на примеру из индустријске праксе. Реализација програмског система за праћење елемената и фактора обраде дуж путање алата и оцена путања алата по изабраним критеријумима су главни циљеви истраживања (слика 1.2).



Слика 1.2. Подручје истраживања у докторској дисертацији

За реализацију програмског система за праћење елемената и фактора обраде дуж путање алата коришћен је програмски пакет *Matlab*.

1.3. Место проблема истраживања

Проблем истраживања обухвата комплексну целину анализе процеса глодања са различитих аспеката.

Основни принципи обраде метала резањем постављени су још 1906. године у Тајлоровом раду који успоставља везу између брзине резања и постојаности алата, која се примењује и данас. Интензивно проучавање обраде метала резањем почиње педесетих година прошлог века са појавом првих аналитичких модела обраде резањем [6]. Данас су научни принципи обраде метала резањем и њихове практичне примене сумирани у универзитетским уџбеницима [7], [8], али су и даље актуелан предмет истраживања.

Моделирање сила резања при обимном глодању је један од највише проучаваних проблема. Према теорији о предвиђању фактора обраде (енг. *Predictive machining theory*) на основу карактеристика материјала, геометрије алата и услова обраде, развијени су многи модели ([9], [10], [11], [12]). Модели засновани на специфичној сили резања која се дефинише у функцији дебљине струготине ([13], [14]), такође заузимају значајно место. Динамички модели прецизно предвиђају силу резања како за стабилан тако и за нестабилан процес обраде ([15],[16],[17]). Постоје и генерализоване форме глодала за обимно глодање за које су формиран модели сила резања [18]. Праћење и контрола сила резања током процеса обраде је још један сегмент интересовања истраживача [19].

Појавом високобрзинске обраде установљено је да она доводи до повећања сила резања и температуре у зони резања што убрзава процес хабања алата [20]. Развијени су модели сила резања у функцији хабања алата ([21], [22], [23]), испитивани утицаји геометрије алата и брзине резања на компоненте силе резања и температуру у зони резања ([24], [25], [26]) и развијене су методе за праћење хабања алата током процеса обраде [27] и за управљање хабањем контролом сила резања [28].

Самопобудне вибрације (енг. *chatter*) које настају у процесу обраде, постале су ограничавајући фактор у остваривању веће производности и жељеног квалитета обрађене површине, због чега су важна тема интересовања у индустријским и академским круговима, још од шесдесетих година прошлог века [29]. Утврђено је да је утицај нестабилног процеса резања на квалитет обрађене површине знатно већи од утицаја варијације силе резања током процеса обраде [17], при обради великим брзинама резања. Развијени су аналитички модели за предвиђање стабилности процеса глодања ([30], [31], [32], [33], [34]), модели за детекцију самопобудних вибрација према фреквентном спектру сила резања [15] и према звучном сигналу [35]. Једноставне методе за експериментално одређивање дијаграма стабилности (енг. *SLD- Stability Lobes Diagram*) такође су разрађене [36]. Спречавање самопобудних вибрација при процесу обимног глодања је и даље неисцрпна тема ([37], [38], [39], [40], [41]).

Велики број радова бави се различитим начинима генерисања путања алата за двоипосно ([42], [43], [44], [45]) глодање једноставних удубљења (цепова) и испупчења (острва), као и за обраду сложених просторних облика ([45], [46], [47], [48], [49], [50]).

Са појавом високо брзинске обраде дошли су до изражаја проблеми са класичним облицима путање алата услед варирања зоне захвата и оштрих дисконтинуитета брзине помоћног кретања, што је ограничавало њихову ефикасност [51]. Појавила су се два различита приступа решавању проблема: модификовање брзине помоћног кретања и модификовање саме путање алата у циљу максималног искоришћења могућности високобрзинске обраде. Примена променљивог корака, који се адаптира тако да се оствари константно оптерећење алата ([52], [53]), да се минимизира грешка обраде [54] или време обраде [55] допринела је и унапређењу САМ система.

Примена трохонидних путања [56], спиралних путања [57] и глатких кривих [51] су само неки од начина модификације путање алата за примену високобрзинске обраде. Присутне су и методе за оптимизацију путања алата у циљу остваривања константне производности [58], смањења димензионих грешака услед извијања алата [59], обезбеђења жељеног квалитета обрађене површине [60], остваривања константне ширине резања код обраде тродимензионалних контура [61] и остваривања константног угла захвата код претходне [51] и код завршне [62] обраде.

Како је путањом алата одређена зона захвата алата и обратка (енг. *CWE-Cutter Workpiece Engagement*), за одређивање било ког фактора обраде дуж путање алата потребно је познавати елементе зоне захвата. Значајан број радова је фокусиран на моделирање зоне захвата ([63],[52],[64],[58]) за потребе симулације процеса глодања [65].

Постојећи алгоритми за одређивање зоне захвата користе као улазну информацију АРТ (*Automatically Programmed Tool*) фајлове [66] који нису доступни у свим САМ системима. Постојеће методе за одређивање зоне захвата ограничене су првенствено на призматичне облике припремка. Следеће ограничење је облик алата, најчешће је предвиђено само цилиндрично глодало. Према томе, посебан изазов у овом раду је проналажање начина да се наведени недостаци постојећих метода превазиђу.

У расположивој литератури постоје разни приступи оптимизацији путање алата са различитих појединачних аспеката, али не постоји методологија за поређење расположивих путања алата, тако да за корисника САМ система и даље остаје недоумица при избору опција које доводе до генерисања коначног облика путање алат.

1.4. Структура рада

Дисертација је организована у осам поглавља и садржи Прилог са дијаграмима промене елемената и фактора обраде дуж путање алата за различите путање алата.

Друго, треће и четврто поглавље рада садрже теоријску анализу и детаљан преглед литературе, претходних истраживања и тренутног стања у области која је предмет истраживања.

Друго поглавље је посвећено анализи и систематизацији постојећих модела сила резања при обради обимним глодањем. Дат је и осврт на проблем стабилности процеса обраде и методе за спречавање појаве штетних вибрација при обради.

За моделирање зоне захвата користе се различите методе које су описане и анализиране у трећем поглављу. Модел за описивање промене брзине помоћног кретања, такође је приказан у овом делу рада.

Анализа генерисања NC програма, различите стратегије за дефинисање путање алата и специфичности путања за обраду високобрзинским глодањем дати су у четвртом поглављу.

У петом поглављу је описан програмски систем за праћење елемената и фактора обраде дуж путање алата. Оно садржи: анализу података из NC програма, трансформацију тих података и њихово учитавање у програм *Matlab*, геометријски опис припремка и алата у *Matlab*-у, генерисање положаја алата дуж путање у односу на обратак, одређивање контакта алата и обратка, ажурирање обратка, прорачун елемената зоне захвата алата и обратка, прорачун профила брзине помоћног кретања и сила резања дуж путање алата. Ово поглавље садржи оригиналне резултате истраживања који представљају научни допринос дисертације.

Верификација развијеног програма према примерима доступним у литератури приказана је у шестом поглављу.

На примеру NC програма, генерисаних у два САМ система и једним ручно написаним програмом, за обраду исте унутрашње контуре, показане су могућности развијеног програма за праћење елемената и фактора обраде дуж путање алата. Упоредивањем различитих путања алата по различитим критеријумима у седмом поглављу су приказане могућности избора наједаквитније путање алата.

У закључку је указано на правце будућег истраживања и истакнути су кључни резултати остварени у раду.

ПОГЛАВЉЕ

2

СИЛЕ И СТАБИЛНОСТ ПРОЦЕСА РЕЗАЊА

У процесу обраде метала резањем, појављују се отпори резања који утичу на деформације у примарној и секундарној зони резања, температуру у зони резања, стабилност процеса резања, квалитет обрађене површине и хабање алата. Један од главних задатака у проучавању процеса резања је предвиђање сила резања при задатим режимима обраде. Већина истраживања везаних за управљање силама резања имају за циљ или ефикасно продужење постојаности алата или спречавање појаве самопобудних вибрација у процесу резања.

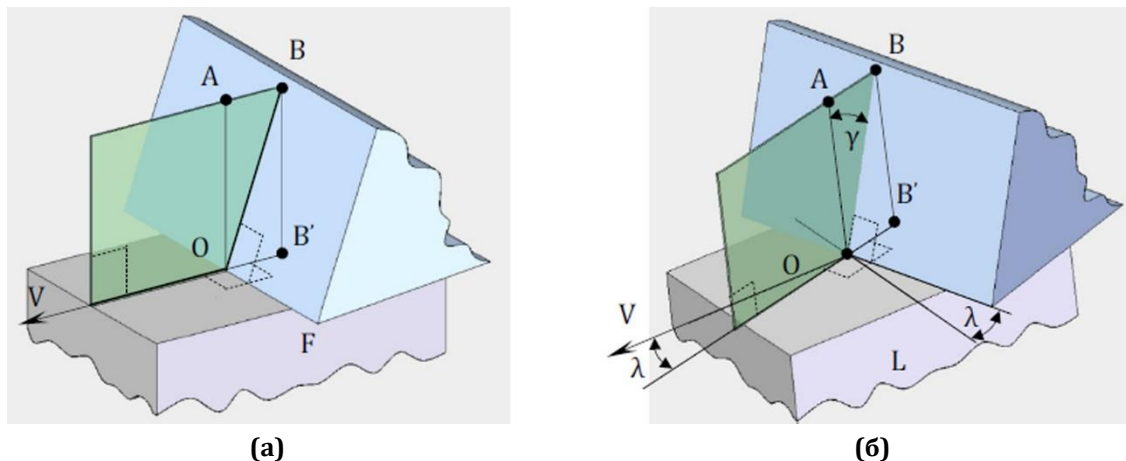
2.1. Моделирање процеса резања

Сви процеси обраде резањем заснивају се на истим механичким принципима, али се њихова геометрија и кинематика међусобно разликују [7].

Уопштено, процес резања је динамичка интеракција између машине алатке, резног алата и обратка. Према томе, математички опис процеса резања треба да обухвати:

- кинематику,
- динамику,
- геометрију формирања струготине и
- механичка и термодинамичка својства обратка [33].

Иако су операције резања углавном тродимензионалне и геометријски комплексне, једноставан случај дводимензионалног ортогоналног резања обично се користи за објашњење механизма стварања струготине. При ортогоналном резању, резна ивица је управна на правац релативног кретања алата и обратка, односно на правац брзине резања v (слика 2.1а), док је код косог резања брзина резања нагнута за угао λ у односу на раван управну на резну ивицу алата (слика 2.1б).

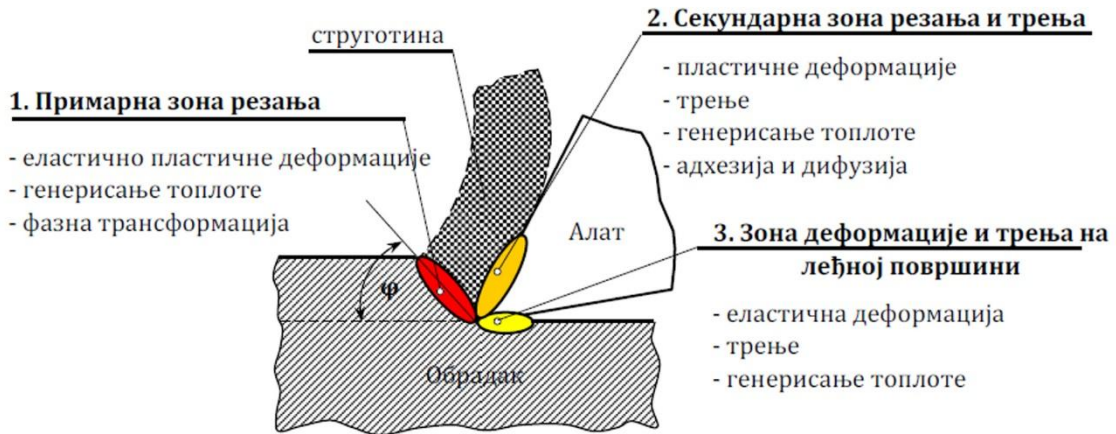


Слика 2.1. Геометрија резања: (а) ортогонално резање, (б) косо резање

Уочавају се три зоне деформисања у процесу формирања струготине:

- Примарна зона резања: при продирању резног клина алата у обрадак, долази до деформације материјала испред алата и његовог одвајања и стварања струготине.

- Секундарна зона резања: одвојен материјал, струготина, делимично се деформише и креће дуж грудне површине алата.
- Терцијерна зона резања: назива се и зона трења између леђне површине алата и обрађене површине.

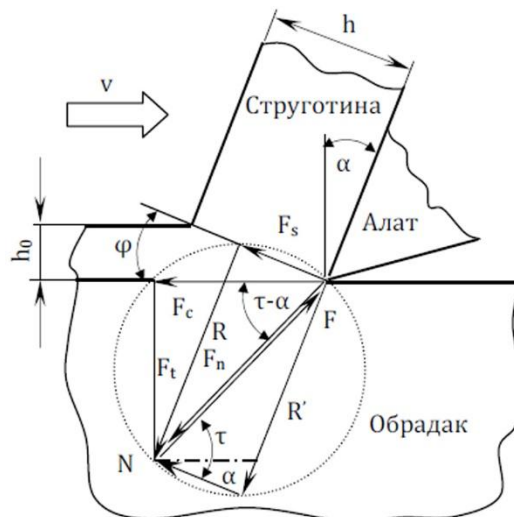


Слика 2.2. Формирање струготине

Током двадесетог века, научници су покушавали да развију адекватан модел који објашњава појаве у зони резања и предвиђа три основна аспекта: облик струготине, силе и температуре резања, али до данас није развијен опште прихваћен модел [33].

2.1.1. Мерчантов модел формирања струготине

Један од првих модела формирања струготине (слика 2.3) за дводимензионално ортогонално резање, који претпоставља да је зона резања танка равна, развио је Мерчант (*Merchant, M. Eugene*) још 1945. године [67].



Слика 2.3. Мерчантов дијаграм сила [6]

На слици 2.3 обележени су: v – брзина резања, F_c – сила резања, F_t – сила продирања, F_s – смичућа сила, F – сила трења, F_n – нормална смичућа сила, N – сила нормална на грудну површину, R – резултантна сила којом обрадак делује на струготину, R' – резултантна сила којом делује алат, φ – угао смицања, α – грудни угао, τ – угао трења, h – дебелина струготине, h_0 – дубина резања.

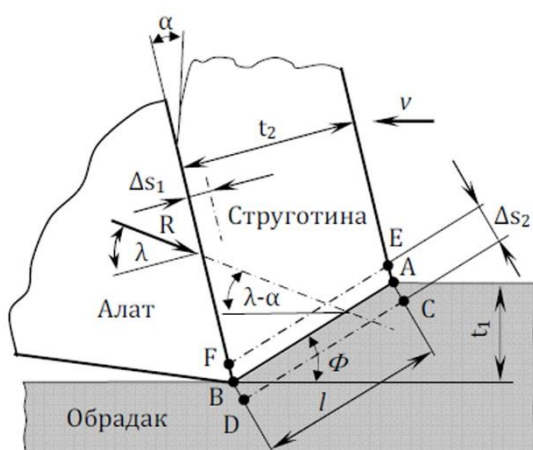
Кључна променљива у Мерчантовом приступу је угао смицања φ . Оптимална вредност угла смицања се рачуна по принципу минималне енергије [6]:

$$\varphi = \frac{1}{4}\pi - \frac{\tau}{2} + \frac{\alpha}{2} \quad (2.1)$$

Мерчант је развио елегантан модел који је, иако није био у најбољој корелацији са експерименталним резултатима, остварио значајан утицај у овој научној области [33].

2.1.2. Окслијев модел формирања струготине

Окслијев (*Oxley*) модел формирања струготине (*Oxley predictive model*) претпоставља постојање две зоне резања: примарне зоне резања (чији је центар на равни АВ) и секундарне зоне резања дуж контакта алата и струготине (слика 2.4).



Слика 2.4. Моделирање примарне и секундарне зоне резања [68]

На слици 2.4 обележени су: v – брзина резања, R – резултантна сила којом алат делује на струготину, Φ – угао смицања, α – грудни угао, λ – угао трења; t_2 – дебелина струготине; t_1 – дубина резања, l – дужина примарне зоне резања, Δs_2 – дебелина примарне зоне резања, Δs_1 – дебелина секундарне зоне резања.

Примарна зона резања је претпостављена као зона коначне дебелине, страна паралелних равни АВ, чији је пресек област (EACDBF). Са једне стране зоне (CD) материјал улази у зону резања на собној температури и нормалним условима, док са друге стране (EF) деформисани материјал излази из зоне резања и претвара се у струготину.

За дефинисање силе резања по Окслијевим моделу кључни параметри s (релативна дебелина примарне зоне), δ (релативна дебелина секундарне зоне резања) и угао смицања Φ одређују се по принципу минималног рада [68].

2.1.3. Конститутивни модел материјала

Конститутивним моделом материјала (*The Johnson-Cook constitutive model*) одређује се напон течења материјала узимајући у обзир температуру и брзину деформације и [68]:

$$\sigma = (A + B\varepsilon^n) \left(1 + C \ln\left(\frac{\dot{\varepsilon}}{\dot{\varepsilon}_0}\right)\right) \left(1 - \left(\frac{T - T_r}{T_m - T_r}\right)^m\right), \quad (2.2)$$

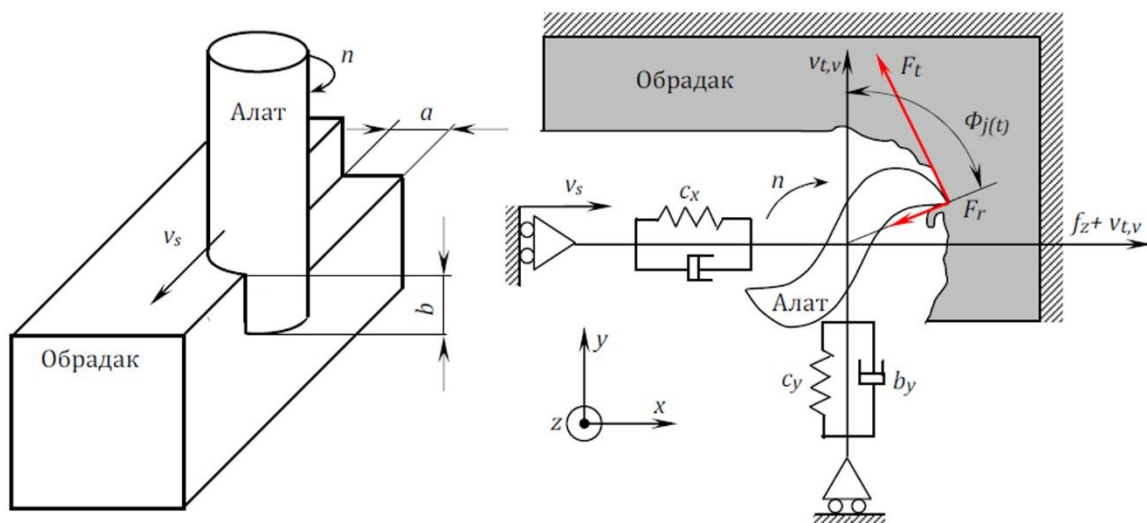
где су T_r и $\dot{\varepsilon}_0$ референтне вредности температуре (собна температура) и брзине деформације, T – температура, $\dot{\varepsilon}$ – брзина деформације, ε –релативна деформација, T_m – температура топљења материјала, а A, B, C, m, n – константе које зависе од врсте материјала. Овај модел је значајан јер у претходним моделима сила резања, ефекти пластичне деформације при великим деформацијама, великим брзинама деформације и високој температури, и промене у структури материјала нису узимани у обзир.

2.2. Моделирање сила резања при обимном глодању

При обимном глодању, алат изводи главно обртно кретање и помоћно праволинијско кретање. Отпори резања делују на резну ивица алата у аксијалном, радијалном и тангенцијалном правцу.

При моделирању отпора резања код обимног глодања, веза између држача алата и алата се моделира као систем са два степена слободе: маса-крутост-пригушење, где су c_x и c_y константе крутости, а b_x и b_y , константе пригушења у x и y правцу.

При обимном глодању цилиндричним глодалом (слика 2.5), отпор резања у аксијалном правцу се обично занемарује пошто су доминантни отпори резања у радијалном (F_r) и тангентијалном (F_t) правцу.

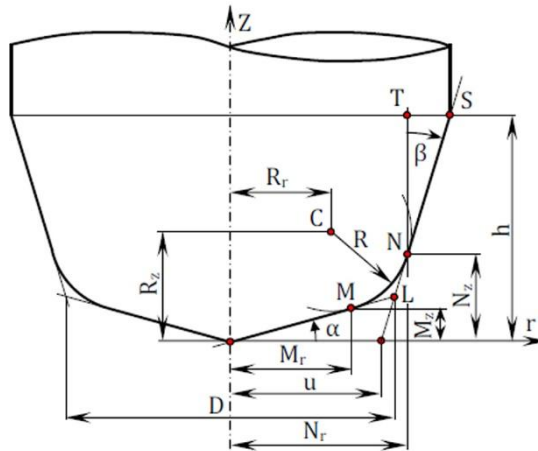


Слика 2.5. Шематски приказ обимног глодања [40]

Карактеристични елементи процеса обраде приказани на слици су: n – број обртаја, v_s – брзина помоћног кретања, a –дубина резања и b –ширина резања.

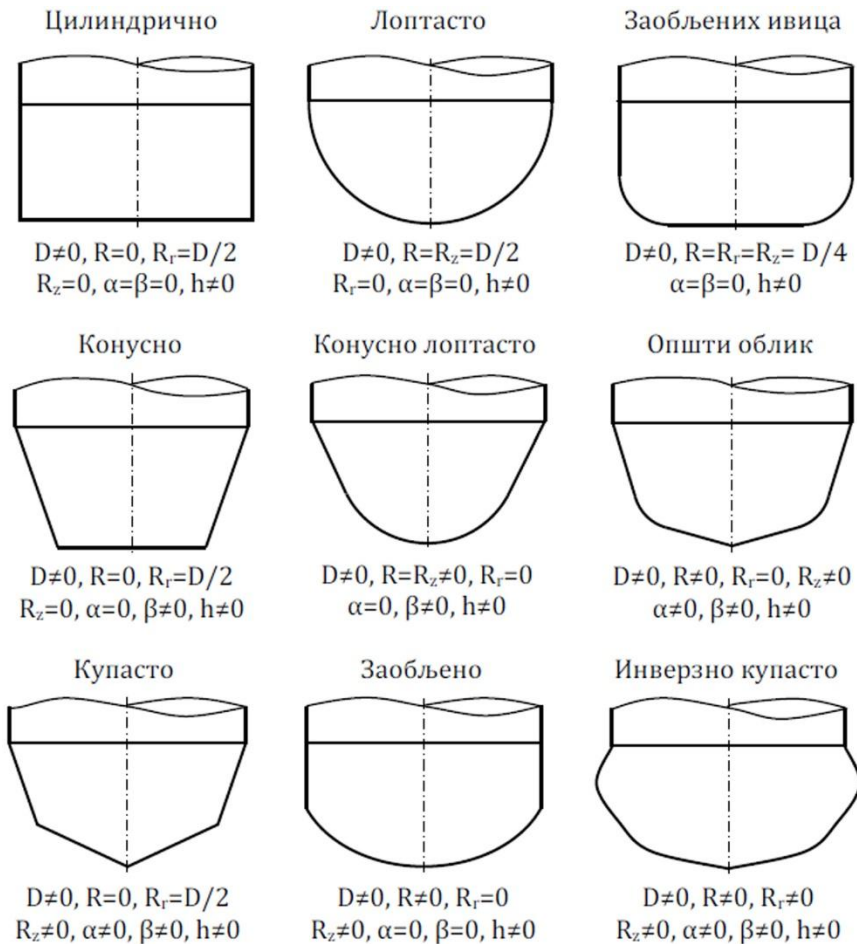
2.2.1. Општи модел силе резања

Општи модел сила резања се заснива на општем облику глодала дефинисаном према [69] на начин приказан на слици 2.6.



Слика 2.6. Општи модел глодала [69]

Према овом моделу, обвојница сваког глодала дефинисана је са 7 параметара: $CUTTER/D$, R , R_r , R_z , a , b , h (слика 2.6). За различите вредности ових параметара добијају се скоро сви облици глодала који се користе у металопрерађивачкој пракси (слика 2.7).



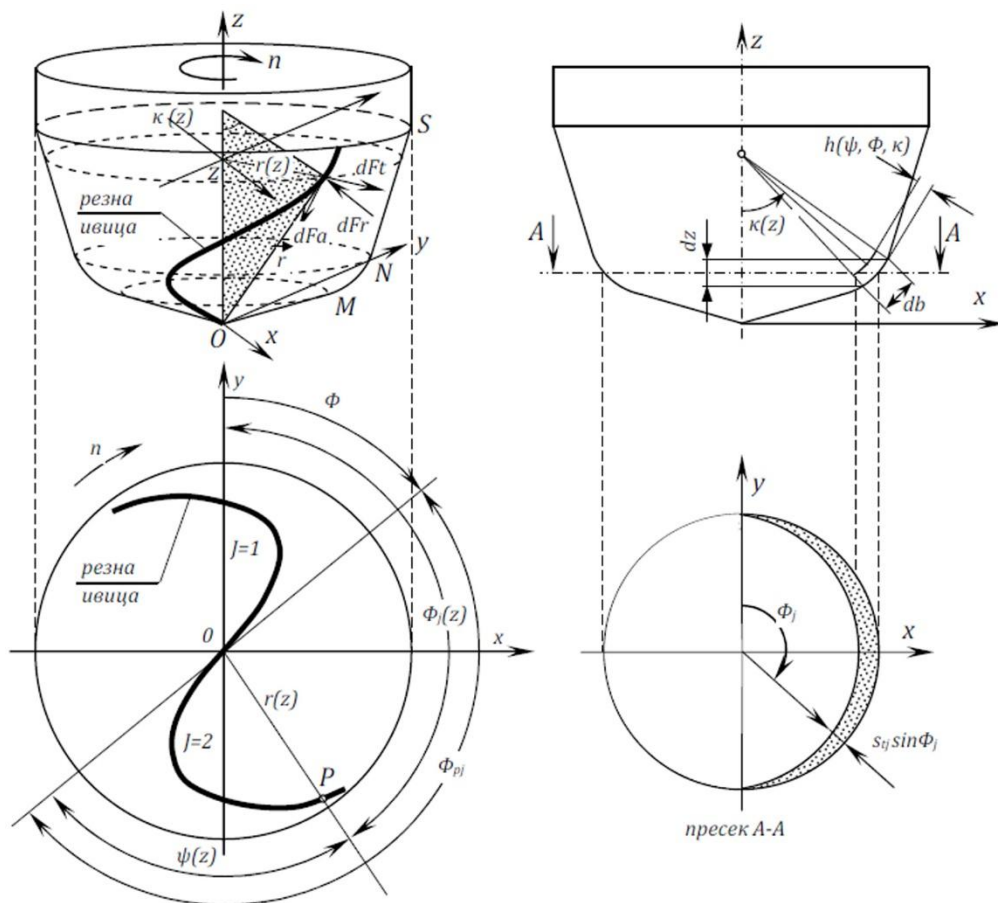
Слика 2.7. Облици глодала изведени из општег модела глодала [69]

Силе резања се моделирају на различите начине у функцији од дебљине струготине $h_j(t)$, ширине резања (аксијалне дубине резања) b и положаја сечива алата (зуба глодала) у захвату (табела 2.1): $F=F(b, h_j(t), \Phi_j(t))$.

Табела 2.1 – Модели сила резања (слика 2.8)

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

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 (слика 2.8), а $K_{tc}, K_{te}, K_{rc}, K_{re}$ су параметри који зависе од комбинације алата и врсте материјала обрадка и експериментално се одређују.



Слика 2.8. Геометријски модел глодала и сила резања [69]

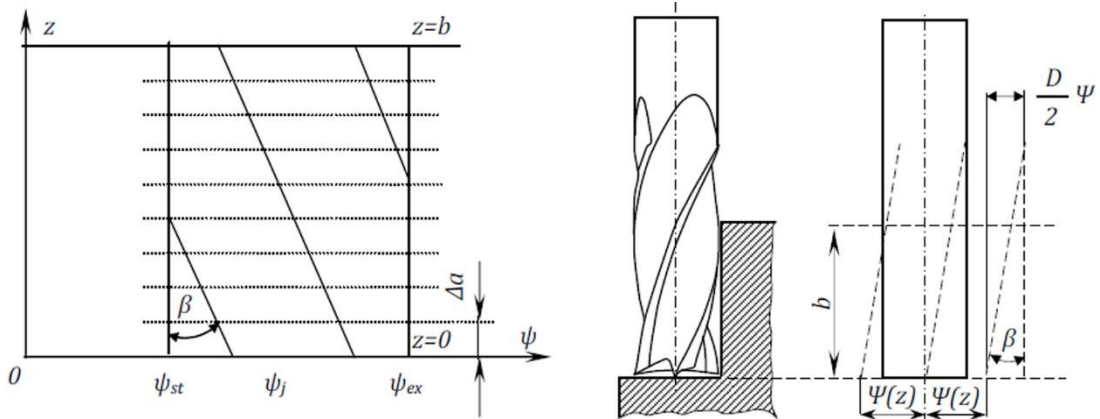
Угао који j -о сечиво алата заклапа са правцем нормалним на правац кретања алата $\phi_j(t)$ на висини z :

$$\phi_j(z) = \phi + j\phi_p - \psi(z), \tag{2.3}$$

где је (слика 2.9): j - редни број сечива алата, $\phi_p(z)$ - угао нагиба j -ог сечива у односу на претходни (за случај да сва сечива немају исти угао завојнице), ϕ - угао ротације резне

ивице при $z=0$, $\psi(z)$ –радијални угао кашњења (угао положаја резне ивице на висини z у XU равни у односу на положај при $z=0$). Радијални угао кашњења се одређује у функцији од пречника глодала D и локалног угла завојнице β :

$$\psi(z) = \frac{2tg\beta}{D}z. \quad (2.4)$$

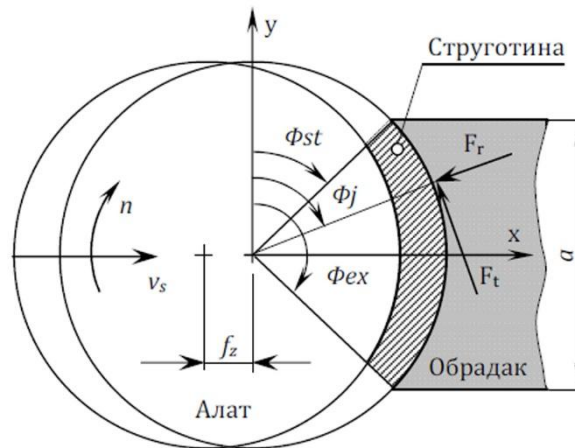


Слика 2.9. Геометрија ваљкастог глодала са хеликоидним сечивима [38]

Функција која описује да ли је j -о сечиво глодала у захвату или није одређује се као:

$$g_j(\phi_j(t)) = \begin{cases} 1, & \phi_{st} \leq \phi_j(t) \leq \phi_{ex} \wedge h_j(t) > 0 \\ 0, & \text{else} \end{cases}, \quad (2.5)$$

где су ϕ_{st} и ϕ_{ex} , почетни и крајњи угао захвата (слика 2.10).



Слика 2.10. Формирање струготине у процесу глодања [38]

Одређивање дебљине струготине је кључни фактор за тачну симулацију сила резања. Дебљина струготине се одређује као растојање између две узастопне путање зуба глодала на обратку. Ове трајекторије могу да одступају од номиналних услед радијалног бацања, извијања алата, топлотних деформација алата или хабања алата [13].

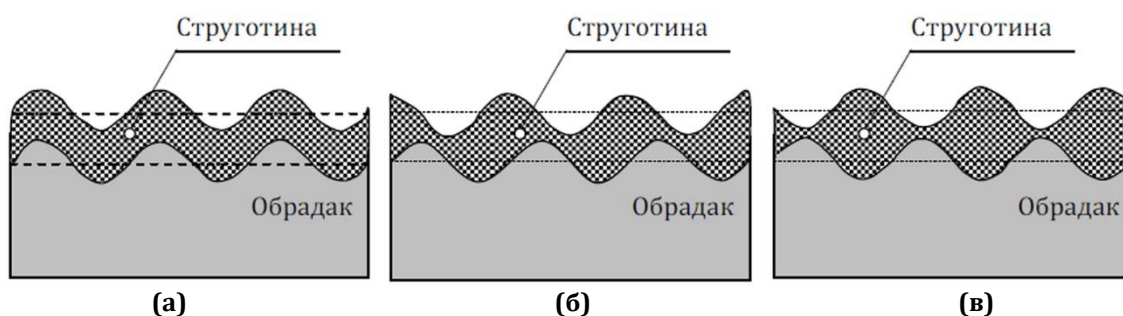
Дебљина струготине се може изразити као:

$$h_j(t) = h_{j,stat}(t) + h_{j,dyn}(t), \quad (2.6)$$

где је $h_{j,stat}(t)$ – статичка компонента, а $h_{j,dyn}(t)$ – динамичка компонента дебљине струготине.

Разлика између тренутне и претходне таласасте површине настале при обради назива се динамичка дебљина струготине (слика 2.11):

$$h_{j,dyn}(t) = [\sin \phi_j(t) \quad \cos \phi_j(t)] \left(\underline{v}_t(t) - \underline{v}_t(t - \tau) \right). \quad (2.7)$$

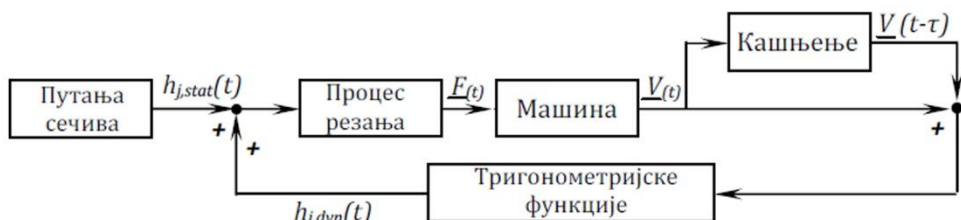


Слика 2.11. Утицај релативне фазне разлике узастопних пролаза сечива глодала на дебљину струготине: (а) $\varepsilon=0 \text{ rad}$, (б) $\varepsilon=\pi/2 \text{ rad}$, (в) $\varepsilon=\pi \text{ rad}$ [40]

Положаји резне ивице у тренутном пролазу сечива и у претходном су обележени са $\underline{v}_t(t)$ и $\underline{v}_t(t - \tau)$, а период фазног кашњења τ израчунава се као:

$$\tau = \frac{60}{Nn}, \quad (2.8)$$

где је N број сечива глодала, а n број обртаја глодала у минути.



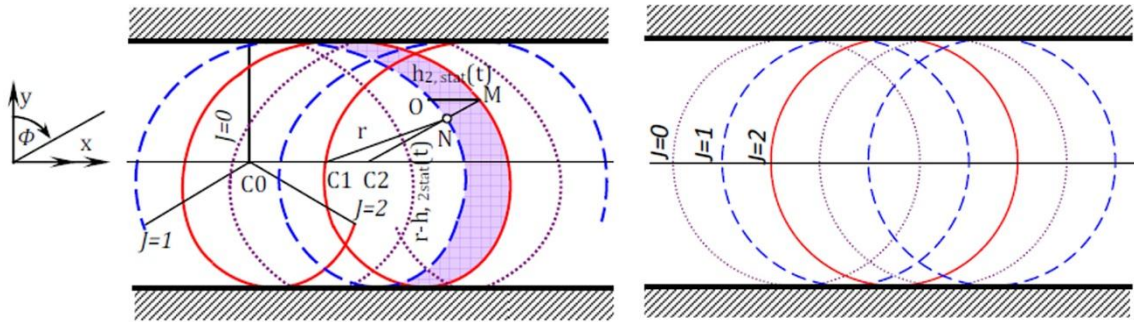
Слика 2.12. Блок дијаграм процеса глодања [40]

Стварна трајекторија сечива глодала је трохоида, али се често претпоставља кружна трајекторија (слика 2.13) с обзиром да ефекти трохоидног кретања сечива глодала долазе до изражаја при малој релативној дубини захвата, односно при малом односу дубине резања и пречника глодала.

За циркуларну путању сечива глодала (слика 2.13), статичка компонента дебљине струготине израчунава се према изразу:

$$h_{j,stat}(t) = f_z \sin \phi_j(t), \quad (2.9)$$

где су f_z корак по зубу, а $\phi_j(t)$ угао који j -о сечиво глодала заклапа са у осом (осом управном на правац помоћног кретања алата).



Слика 2.13. Трохоидна и циркуларна трајекторија зуба глодала

За трохидну путању зуба глодала (слика 2.13), статичка компонента дебљине струготине израчунава се према изразу:

$$h_{j,stat}(t) = r - r \cos \left(\frac{\theta f_z \cos \phi_j(t)}{f_z \cos \phi_j(t) + \theta r} \right) + \left(\frac{f_z \theta r}{f_z \cos \phi_j(t) + \theta r} \right) \sin \phi_j(t), \quad (2.10)$$

где је:

$$\tau_j = \frac{\hat{t} \theta r}{f_z \cos \phi_j(t) + \theta r}, \quad (2.11)$$

а θ је угао између два суседна зуба глодала:

$$\theta = \frac{2\pi}{N} = \hat{t} n. \quad (2.12)$$

У моделу сила, коефицијенти K_{tc} , K_{rc} , K_{te} и K_{re} се одређују експериментално и зависе од комбинације материјала обратка и алата. Сила резања се дели на две компоненте: компонента силе на резној ивици (индекс e од енглеске речи *edge*) и компонента силе резања (индекс c од енглеске речи *cutting*). Компонента силе на резној ивици је последица трења на леђној површини и продирања резне ивице кроз материјал и представљена је коефицијентима K_{te} и K_{re} по јединици ширине. Компонента силе резања је последица процеса резања у зони резања и трења на грудној површини и представљена је коефицијентима K_{tc} и K_{rc} по јединици површине. За одређивање коефицијената силе резања користе се две методе: модел заснован на механизму резања и механички модел.

2.2.2. Одређивање коефицијената силе резања на основу механизма резања

Коефицијенти силе резања на основу механизма резања (енг. *Mechanics of Cutting Model*) се одређују из аналитичког модела косог резања. Угао резања φ_c , угао трења β_a и напон течења при резању τ_s се одређују из експеримента ортогоналног резања (испитивања стругањем). Експеримент се изводи за различите брзине резања и грудне углове, а величине које се мере су дебљина струготине и сила резања.

Уводе се претпоставке: угао резања при ортогоналном резању је једнак нормалном углу резања при косом резању ($\varphi_c \equiv \varphi_n$); нормални грудни угао при косом резању једнак је грудном углу при ортогоналном резању ($\alpha_r \equiv \alpha_n$); угао одвођења струготине једнак је углу нагиба сечива ($\eta \equiv i$); угао трења β_a и напон течења при резању τ_s су исти при ортогоналном

и косом резању за дати број обртаја, корак по зубу и комбинацију материјала алата и обратка.

Коефицијенти силе резања могу се изразити аналитички [70]:

$$K_{tc} = \frac{\tau_s}{\sin \phi_n} \frac{\cos(\beta_n - \alpha_n) + \tan i \tan \eta \sin \beta_n}{\sqrt{\cos^2(\phi_n + \beta_n - \alpha_n) + \tan^2 \eta \sin^2 \beta_n}},$$

$$K_{rc} = \frac{\tau_s}{\sin \phi_n \cos i} \frac{\sin(\beta_n - \alpha_n)}{\sqrt{\cos^2(\phi_n + \beta_n - \alpha_n) + \tan^2 \eta \sin^2 \beta_n}} \quad (2.13)$$

Углавном се експерименти понављају у одређеном распону брзина резања, грудних углова и недеформисане дебљине струготине.

Пошто је геометрија алата обухваћена моделом, могуће је одредити коефицијенте за алат и пре него што је он направљен, што је основна предност овог модела. Проблем је што су експерименти дуготрајни, па се за брзу калибрацију силе резања користи механички модел.

2.2.3. Одређивање коефицијената силе резања механичким моделом

Коефицијенти силе резања применом механичког модела (енг. *Mechanistic Model*) одређују се на основу експеримената глодања жљеба (угао захвата је 180°) при различитим корацима за исту ширину резања и број обртаја. Мере се силе у сва три правца. Укупна сила за један обртај се дели са бројем сечива, како би се избегао утицај радијалног бацања алата.

Коефицијенти силе резања се одређују изједначавањем експериментално утврђених просечних сила резања са аналитичким изразима за силе резања при глодању жљеба. Просечне силе резања по обртају се могу представити према [7] изразима:

$$\bar{F}_x = -\frac{Nb}{4} K_{rc} f_z - \frac{Nb}{\pi} K_{re},$$

$$\bar{F}_y = +\frac{Nb}{4} K_{tc} f_z + \frac{Nb}{\pi} K_{te},$$

$$\bar{F}_z = +\frac{Nb}{4} K_{ac} f_z + \frac{Nb}{\pi} K_{ae},$$
(2.14)

где су \bar{F}_x , \bar{F}_y и \bar{F}_z просечне силе резања током једног обртаја алата и правцу помоћног кретања, у правцу нормалном на правац помоћног кретања и у аксијалном правцу, респективно, b је ширина резања и f_z је корак по сечиву.

Просечна вредност сила резања, за случај линеарне зависности од корака, може се приказати као:

$$\bar{F}_q = \bar{F}_{qc} f_z + \bar{F}_{qe} \quad (q = x, y, z). \quad (2.15)$$

Просечне вредности сила резања за сваку вредност корака се мере и компоненте силе резања се одређују линеарном регресијом. Применом једначина (2.14) и (2.15) добијају се изрази за коефицијенте силе резања:

$$\begin{aligned}
 K_{tc} &= + \frac{4\bar{F}_{yc}}{Nb} & \text{и} & & K_{te} &= + \frac{\pi\bar{F}_{ye}}{Nb}, \\
 K_{rc} &= - \frac{4\bar{F}_{xc}}{Nb} & \text{и} & & K_{re} &= - \frac{\pi\bar{F}_{xe}}{Nb}.
 \end{aligned}
 \tag{2.16}$$

Експеримент се понавља за сваку комбинацију геометрије алата и материјала обратка за различите бројеве обртаја, кораке и ширине резања.

Већина познатих механичких модела се заснива на мерењу просечне силе резања, на чију тачност утичу карактеристике пиезоелектричних сензора. Зато се препоручује да се коефицијенти одређују при малим брзинама резања, при чему се неки феномени (омекшавање материјала, одвајање струготине итд.) који се јављају при великим брзинама резања не узимају у обзир [11].

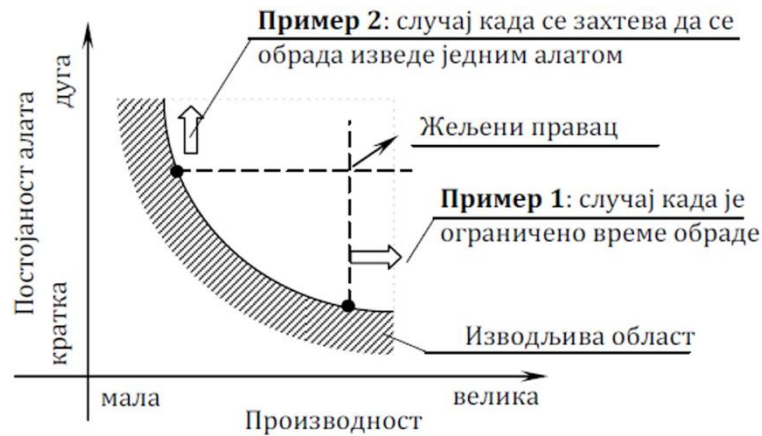
Расподела дебљине струготине дуж резне ивице у контакту са обратком је неравномерна. Свака тачка на резној ивици заузима различит угаони положај и према томе, одговара јој различита дебљина струготине. Варијације дебљине струготине дуж резне ивице у захвату доводе до варијације резултујуће силе резања. У том случају је уобичајено да се користи нумеричка интеграција за одређивање силе која делује на сечиво глодала. Резна ивица се дели на елементарне дискове, а резултујућа сила се одређује сабирањем свих сила које делују на све елементарне дискове.

Нови модел за одређивање силе резања који је предложен у [13], заснива се на просечној дебљини сруготине на сечиву глодала у захвату.

2.2.4. Модел нормализоване силе резања

Основни недостатак општег модела силе резања је у томе што не узима у обзир појаве које су последица самог процеса резања, као што је хабање алата, загревање алата и обратка итд.

При повећању брзине обраде долази до скраћења постојаности алата што доводи до већих трошкова алата, што значи да се за повећање производности мора се смањити постојаност алата. Ограничења у практичној реализацији процеса обраде одређују шта ће бити приоритет. Уколико је, на пример, рок за завршетак процеса кратак, смањиће се постојаност алата, а уколико је битно да се комплетна обрада заврши једним алатом (обрада калуца) смањиће се производност (слика 2.14).



- :Оптимални процес при задатим ограничењима

Слика 2.14. Компромис између производности и постојаности алата [28]

Да би се проценио утицај хабања на силе резања, потребно је издвојити компоненту силе резања која је последица режима резања и геометрије процеса резања. То се може урадити помоћу модела силе резања који успоставља везу између режима обраде и силе резања. Многи модели су предложени у литератури, а овде је приказан модел који је развио Какино (*Kakino, Yoshiaki*) са сарадницима а чији је преглед дат у [28]. Аутори модела су експериментално доказали тачност модела нарочито при обради тврђих материјала великим брзинама резања.

Овим моделом сила резања у XU равни представља се као функција t_m - максималне недеформисане дебљине струготине и L - дужине обима глодала који је у захвату:

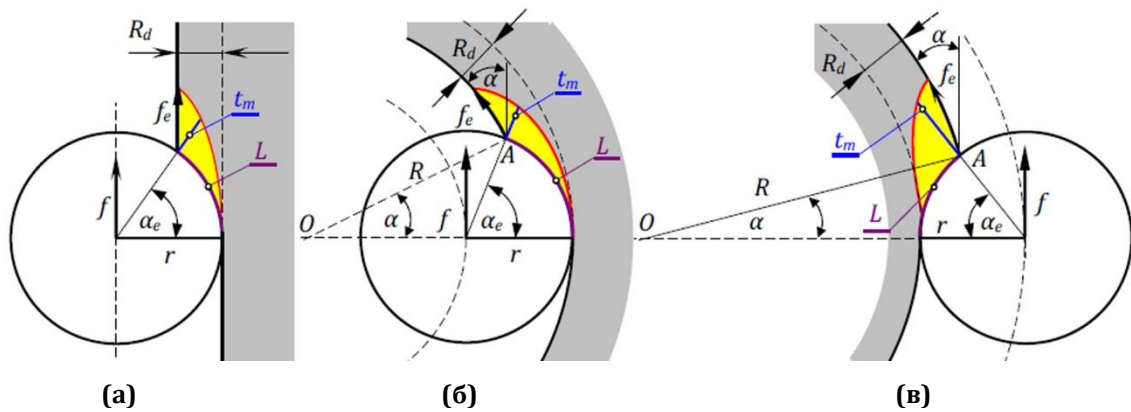
$$F = F_0 + \beta_1 X_1 + \beta_2 X_2 + \beta_{11} X_1^2 + \beta_{22} X_2^2 + \beta_{12} X_1 X_2, \quad (2.17)$$

где је:

$$\begin{aligned} X_1 &= (t_m - t_{m0})/\delta t_m, \\ X_2 &= (L - L_0)/\delta L. \end{aligned} \quad (2.18)$$

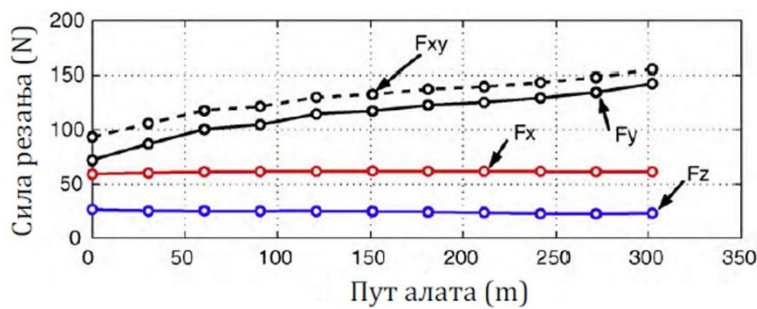
При чему су t_{m0} , δt_m , L_0 , и δL средње вредности, а β_1 , β_2 , β_{11} , β_{22} и β_{12} - коефицијенти који се експериментално одређују. F_0 је нормализована сила резања која одговара $X_1 = X_2 = 0$, она представља утицај хабања које се повећава у току процеса резања (јер искључује утицај геометрије путање алата и услова резања).

Графички приказ овог модела (слика 2.15) дат је за обраду три различите површине. Параметри процеса глодања су: R_d - дубина резања, r - полупречник глодала, f - корак по сечиву, α_{en} - угао захвата и R - радијус кривине путање у тачки захвата.



Слика 2.15. Приказ обимног глодања при обради различитих површина: (а) обрада равне, (б) обрада конкавне и (в) обрада конвексне површине [28]

Ибараки (*Ibaraki, Soichi*) је користио једноставне експерименте како би доказао утицај хабања алата на силе резања применом нормализованог модела силе [28]. Главне вредности сила резања дуж путање (слика 2.16), измерене су трокомпонентним пијезоелектричним динамометром.



F_x - сила у правцу помоћног кретања

F_y - сила у правцу нормалном на правац помоћног кретања

F_z - сила у аксијалном правцу

Слика 2.16. Експериментално одређене компоненте силе резања при обимном глодању равне површине [28]

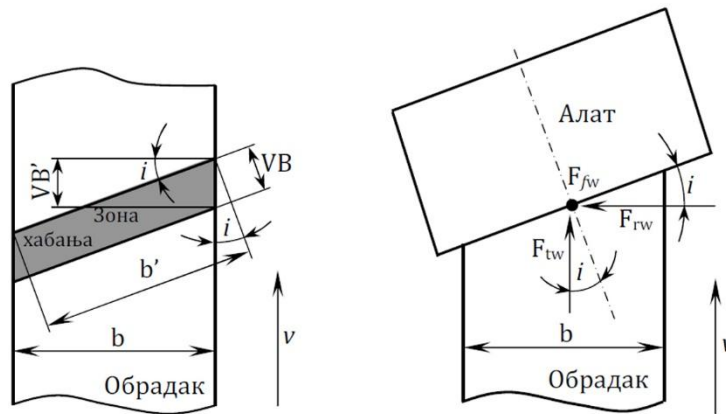
Овај експеримент показује да се компонента силе у правцу нормалном на правац помоћног кретања повећава дуж путање, што се може сматрати последицом хабања алата, с обзиром да су сви остали елементи процеса непромењени.

2.2.5. Проширен модел силе резања

Утицај хабања леђне површина алата на силу резања може се обухватити проширењем општег модела сила [23]. При анализи силе трења у зони хабања алата, сила услед хабања леђне површине алата се дефинише преко зоне контакта између алата и обратка. Ширина зоне резања се мери у равни резне ивице и нормално на резну ивицу (слика 2.17), тако да је ефективна зона хабања VB' већа од номиналне зоне хабања VB [23]. Ефективна дужина контакта b' и величина зоне хабања VB' се могу изразити:

$$b' = \frac{b}{\cos i'} \quad (2.19)$$

$$VB' = \frac{VB}{\cos i'}$$



Слика 2.17. Контактна зона и сила трења између зоне хабања алата и обратка при косом резању [23]

Сила трења у правцу кретања алата F_{tw} је колинеарна са брзином резања, док је попречна компонента F_{fw} нормална на брзину резања. Сила трења нема трећу компоненту и може се изразити:

$$F_{tw} = \int_0^{b'} C_{tw} VB db = \frac{C_{tw} b VB}{\cos i},$$

$$F_{rw} = \int_0^{b'} C_{rw} VB db = \frac{C_{rw} b VB}{\cos i},$$
(2.20)

где су C_{tw} и C_{rw} фактори интензитета силе трења и одређују се експериментално.

Укупна сила резања у тангенцијалном и радијалном правцу добија се додавањем одговарајућих компоненти силе трења изразима општег модела сила (табела 2.1).

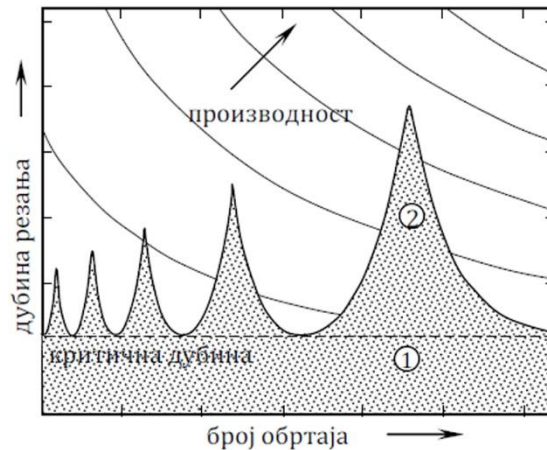
2.3. Стабилност процеса обимног глодања

Самопобудне вибрације настају при било ком процесу обраде. Карактеришу их велике осцилације у силама резања и хаотичном релативном кретању између алата и обратка [38] што резултира израженом храпавошћу обрађене површине, интензивним хабањем алата и главног вретена и пропраћено је великом буком. Иако је Тејлор још пре више од сто година указао да су самопобудне вибрације најделикатнија и неразрешена појава која настаје у процесу обраде, то важи и данас [39].

Самопобудне вибрације које настају током процеса обраде могу се уопштено поделити у две категорије: примарне и секундарне. Примарне самопобудне вибрације изазива сам процес обраде (трење између алата и обратка, термомеханичке појаве при формирању струготине, ...). Секундарне самопобудне вибрације изазива регенерисање таласастог облика површине обратка (слика 2.11). Услед вибрација алата настаје таласаста обрађена површина, а када следеће сечиво напада ову површину ствара нову таласасту површину, па дебљина струготине варира услед фазне разлике таласа сечива у захвату и претходног сечива, што значајно повећава вибрације. При повећању дубине и/или ширине резања, ефекат регенерисања површине долази до изражаја, што доводи до појаве нежељених вибрација. При обради великим брзинама губи се удео примарних и постају доминантне

регенеративне вибрације. Оне су и најчешћи узрок ове појаве, па се назив самопобудне вибрације обично везује за регенеративне самопобудне вибрације [29].

Анализом стабилности пороцеса обраде дошло се до тзв. дијаграма стабилности (слика 2.18) којима се одређује граница стабилног и нестабилног режима обраде у функције ширине или дубине резања и броја обртаја.



Слика 2.18. Дијаграм стабилности за обраду глодањем [39]

Применом дијаграма стабилности, оператер на машини алатки може изабрати режим обраде који одговара стабилном подручју рада. На дијаграму се види да за одређене дубине резања, при било ком броју обртаја процес остаје стабилан. Максимална вредност дубине резања за коју је процес обраде увек стабилан назива се критична дубина резања. Даље, може се приметити да се подручја стабилности изнад критичне дубине резања шире са повећањем броја обртаја алата, тако да при малим бројевима обртаја релативно мала промена у броју обртаја може довести до релативно велике промене у фазној разлици између суседних сечива глодала, односно до појаве нестабилности. Захваљујући ширим подручјима стабилности, при већим бројевима обртаја, продуктивност се може значајно повећати избором веће дубине резања у стабилном подручју.

Подручје испод критичне дубине се сматра конзервативним избором (зона 1, слика 2.18), а за тачније дијаграме стабилности може се изабрати режим којим се остварује већа производност без нежељених вибрација (зона 2, слика 2.18).

Класификација стратегија за идентификацију и спречавање самопобудних вибрација може се представити дијаграмом (слика 2.19) према [29].

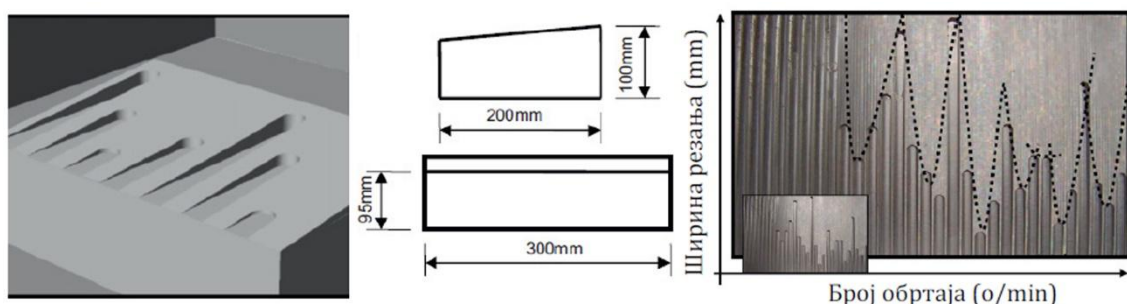
Прву групу стратегија чине све оне методе којима се стабилност обезбеђује избором режима обраде који припадају стабилном подручју рада на дијаграму стабилности. У оквиру ове групе разликују се стратегије у самом процесу обраде и ван њега. Методе ван процеса обраде подразумевају избор режима обраде у стабилном подручју рада на дијаграму стабилности који се за сваку комбинацију машине, држача алата, алата и обратка одређује пре процеса обраде. Методе у процесу обраде заснивају се на детектовању појаве самопобудних вибрација у току обраде и омогућавају промену режима обраде и прелазак у стабилно подручје рада.



Слика 2.19. Стратегије за обезбеђење стабилног процеса обраде [29]

Друга група стратегија укључује методе којима се самопобудне вибрације спречавају променом понашања система и модификовањем и померањем граница стабилности. У оквиру ове групе разликују се активне и пасивне стратегије. Пасивним стратегијама се понашање система мења модификацијом елемената система: машине, држача алата и алата. Активне стратегије се заснивају на примени одређених елемената којима се подиже и помера граница стабилности система.

Одређивање дијаграма стабилности за сваку комбинацију машине, држача алата, алата и материјала обратка, захтева велики број експеримената при различитим дубинама резања и бројевима обртаја. У раду [36] представљен је метод за одређивање дијаграма стабилности заснован на емпиријским тестовима на радним предметима који омогућавају постепено повећавање ширине резања у правцу помоћног кретања који представља ординату на дијаграму стабилности, док се број обртаја (апциса на дијаграму стабилности) повећава у сваком наредном пролазу. Ово је могуће захваљујући нагибу на обратку. Процес обраде се прекида чим се детектује појава самопобудних вибрација и тако се одређује граница између стабилног и нестабилног процеса обраде, односно дијаграм стабилности. На овај начин добија се физички дијаграм стабилности на самом обратку (слика 2.20).



Слика 2.20. Одређивање дијаграма стабилности обрадног система директно на обратку [36]

Методологија је добра за мала и средња предузећа која немају техничка знања ни скупу мерну опрему, с обзиром да је на овај начин за одређивање дијаграма стабилности довољно припремити обрадак под нагибом и имати микрофон за утврђивање настанка нестабилног процеса обраде мерењем звучног притиска.

2.4. Закључне напомене

Потреба за предвиђањем силе резања у току процеса обраде проистекла је из њеног утицаја на хабање алата и стабилност процеса обраде. Тежња многих и обимних истраживања процеса глодања је успостављање што тачнијег и свеобухватнијег модела силе резања. Управљање елементима обраде у циљу смањења силе резања и обезбеђења што мањих варијација силе резања током обраде је идеја водиља великог броја истраживања. У дисертацији је минимизација силе резања и њених варијација дуж путање алата коришћена као један од критеријума за оцену адекватности путање алата. Примењен је општи модел силе резања са линерном зависношћу, за цилиндрично глодало и циркуларну трајекторију сечива глодала, а за одређивање коефицијената силе резања коришћен је механички модел. У петом поглављу, овај модел силе резања је уграђен у програмски систем за праћење елемената и фактора обраде дуж путање алата, а у шестом поглављу је верификована његова примена.

Стабилан процес обраде је жељени исход сваког пројектованог поступка обраде, с обзиром да нестабилност обраде доводи до нежељених појава интензивног хабања алата и повећања храпавости обрађене површине. Према томе, различите методе за сузбијање самопобудних вибрација интензивно се развијају. У дисертацији је примењена стратегија примене ефеката дијаграма стабилности изван процеса обраде за обезбеђење стабилног процеса обраде. Како се дијаграми стабилности одређују у функцији дубине или ширине резања и броја обртаја глодала, у петом поглављу је одређена промена ова три елемента дуж путање алата. Као критеријум за оцену путање алата према стабилности процеса обраде коришћен је положај тачке одређене дужином или ширином резања и бројем обртаја на дијаграму стабилности.

**МОДЕЛИРАЊЕ ЗОНЕ ЗАХВАТА, ПРОФИЛА
БРЗИНЕ ПОМОЋНОГ КРЕТАЊА И
ПРОИЗВОДНОСТИ ОБРАДЕ**

Током обраде унутрашњих и спољашњих контура глодало изводи сложено помоћно кретање по површини, мењајући правац кретања у циљу остваривања жељеног облика обратка. При том кретању мења се зона захвата која се дефинише делом обима алата који је у захвату са обратком.

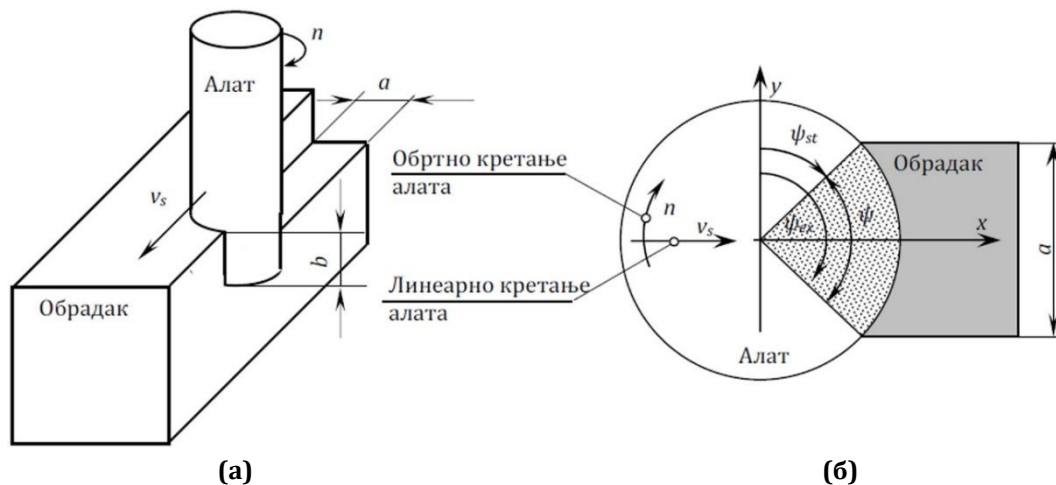
Путања кретања глодала се састоји углавном из линеарних и кружних сегмената и није континуална крива, што резултира променом брзине помоћног кретања у близини тачака спајања суседних сегмената путање. Анализа дисконтинуитета путање алата потребна је ради одређивања профила брзине помоћног кретања дуж путање алата.

Познавање зона захвата и профила брзине помоћног кретања омогућује и одређивање производности обраде дуж путање алата.

3.1. Зона захвата

Зона захвата описује који део обима алата у датом тренутку учествује у захвату са обратком. Током сложених операција глодања, обично је само део обима алата у захвату који се мења дуж путање алата. Зону захвата одређују угао захвата ψ , дубина a и ширина глодања b (слика 3.1).

Угао захвата је један од најважнијих параметара који одређује оптерећење алата. Угао захвата ψ се, код двоипоосног глодања, дефинише као угао који формирају тачка где алат улази у материјал, оса глодала и тачка где алат излази из материјала [66].

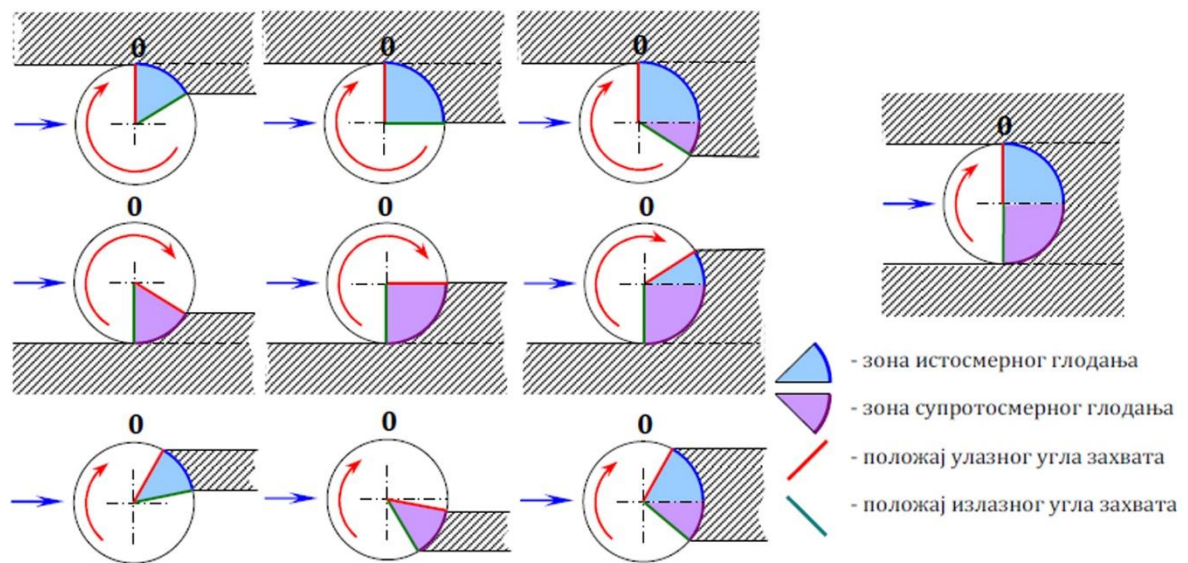


Слика 3.1. Елементи зоне резања: (а) дубина и ширина резања, (б) дефиниција углова захвата

Ако алат ротира у смеру казаљке на сату, а координатни систем алата је оријентисан тако да је X -оса усмерена у правцу брзине помоћног кретања v_s , а Z -оса се поклапа са осом глодала и усмерена је управно на обрадак, онда се могу дефинисати следећи углови (слика 3.1б): ψ_{st} је почетни угао захвата који формирају Y -оса, центар алата (пројекција осе алата на раван обрађене површине) и тачка где алат улази у материјал обратка, ψ_{ex} је излазни угао захвата који формирају Y -оса, центар алата и тачка где алат излази из материјала обратка. Очигледно је угао захвата (слика 3.1б) одређен изразом:

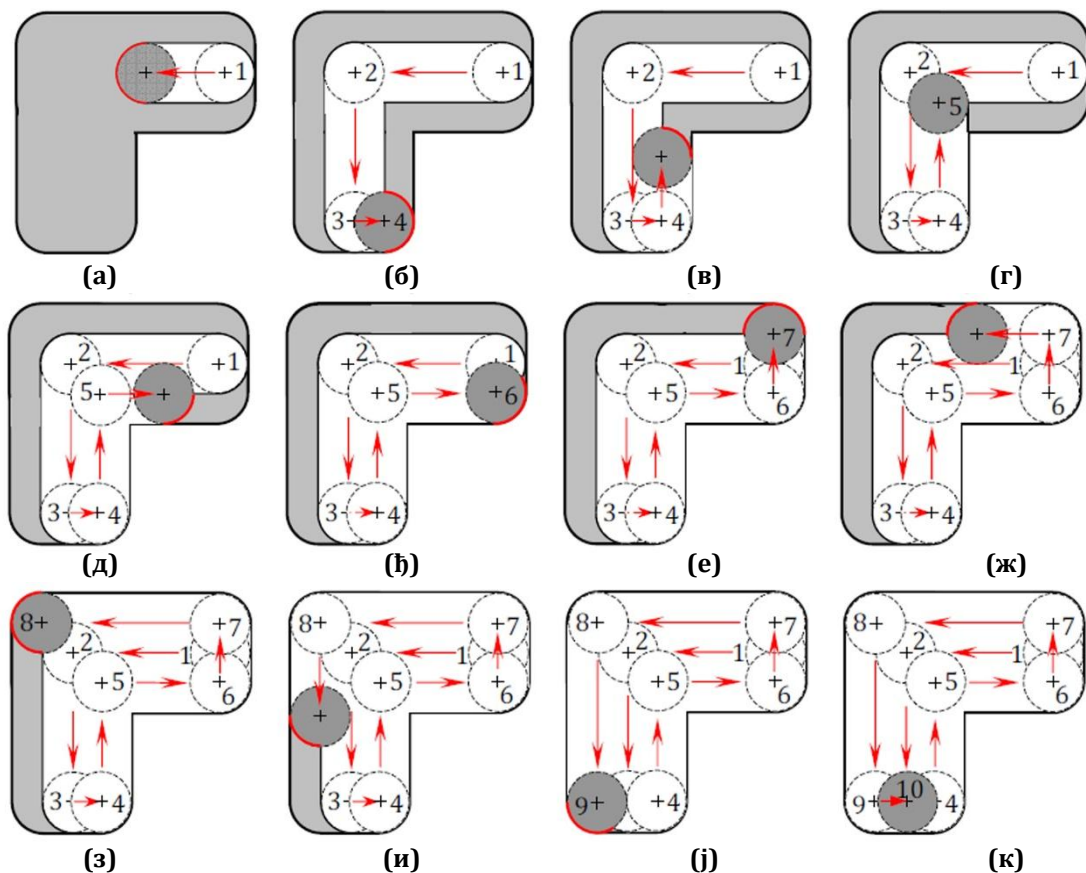
$$\psi = \psi_{ex} - \psi_{st}. \quad (3.1)$$

У свим моделима сила резања код глодања фигуришу углови захвата, па је потребно одредити, не само угао захвата, него и почетни и излазни угао захвата јер они одређују да ли је у питању истосмерно или супротносмерно глодање (слика 3.2).



Слика 3.2. Утицај угла захвата на удео истосмерног и супротносмерног глодања за различиту дубину резања

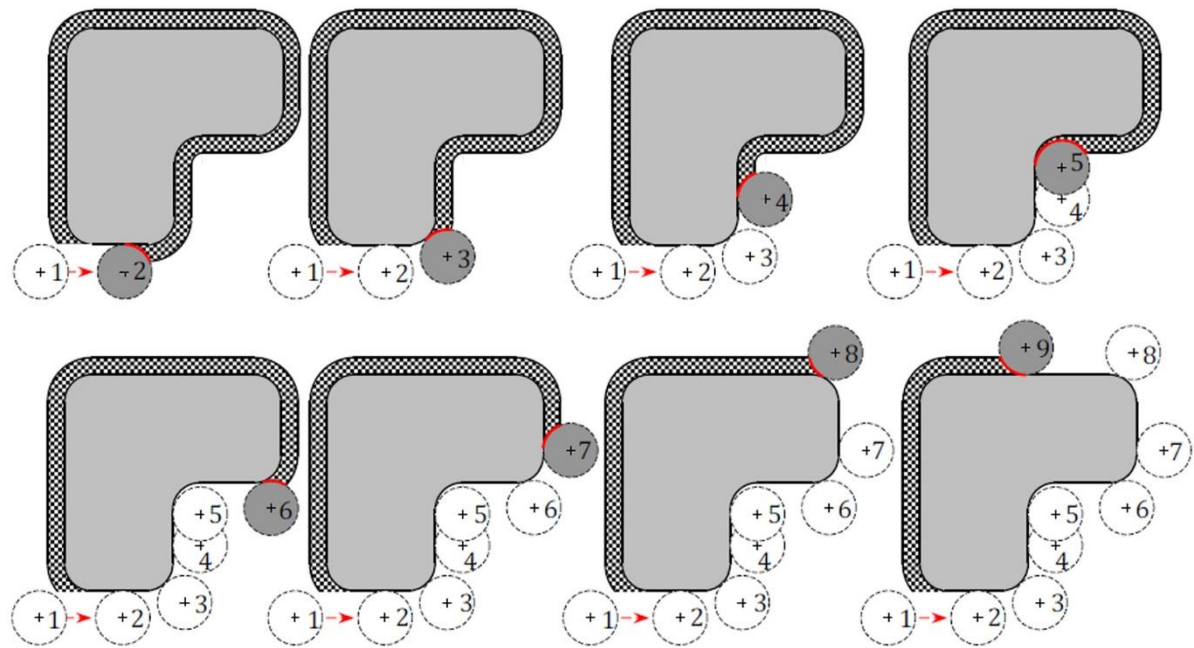
На примеру глодања унутрашње контуре (слика 3.3) илуструје се променљивост дубине резања и угла захвата дуж путање алата.



Слика 3.3. Промена угла захвата током обраде унутрашње контуре: (а), (б), (е) и (з) угао 180° , (д), (ж) и (и) угао 90° , (ћ) и (ј) угао између 90° и 180° и (з) и (к) угао 0°

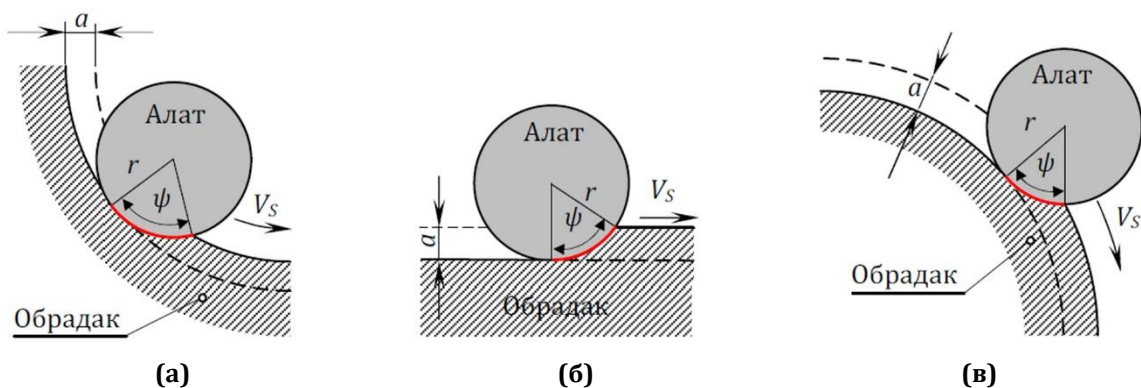
Пример глодања испупчења (слика 3.4) илуструје променљивост дубине резања и угла захвата током обраде спољашње контуре.

Очигледно је да се величина зоне захвата може драстично мењати дуж путање, а с обзиром да силе резања зависе управо од величине угла захвата и дубине резања и оне се мењају дуж путање. Нагло повећање дубине резања и угла захвата могу довести и до лома алата. Према томе праћење промене угла захвата и дубине резања је неопходно да би се могле пратити и контролисати силе резања. Познавање дубине резања и угла захвата на сваком сегменту путање алата омогућује и оцењивање адекватности путање, као и генерисање оптималне путање алата.



Слика 3.4. Промена угла захвата током обраде спољашње контуре

При истој дубини резања угао захвата ће се разликовати у зависности од облика површине која се обрађује. Најмањи угао захвата је при обради конвексне површине, затим при обради равне површине, а највећи је при обради конкавне површине (слика 3.5).



Слика 3.5. Промена угла захвата при истој дубини резања за обраду: (а) конкавне површине, (б) равне површине и (в) конвексне површине

Између дубине резања и угла захвата постоји аналитичка веза (табела 3.1), с тим што при обради цилиндричне површине угао захвата зависи и од радијуса кривине површине која се обрађује.

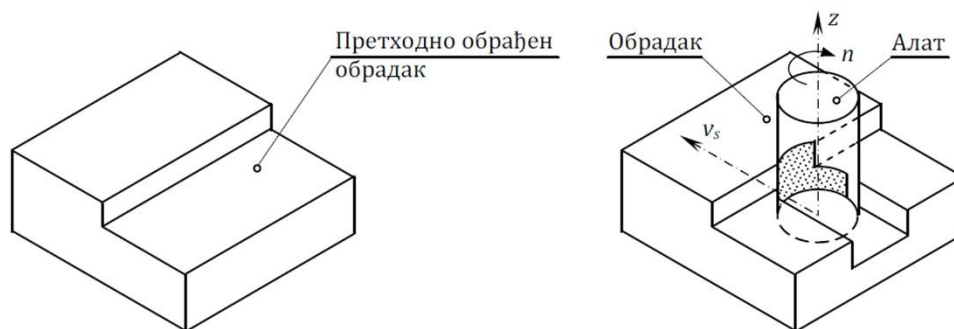
Табела 3.1 –Угао захвата при обради конкавне, конвексне и равне површине

Угао захвата за обраду конкавне површине	
	<p>Применом косинусне теореме: $(r - a)^2 = (r - R)^2 + R^2 - 2(r - R)R \cos \alpha,$ и везе између углова: $\psi = \pi - \alpha,$ добија се угао захвата: $\psi = \pi - \arccos \left(\frac{2R^2 + 2r(a - R) - a^2}{2R(r - R)} \right).$</p>
Угао захвата за обраду конвексне површине	
	<p>Применом косинусне теореме: $(r + a)^2 = (r + R)^2 + R^2 - 2(r + R)R \cos \psi,$ добија се угао захвата: $\psi = \arccos \left(\frac{2R^2 + 2r(R - a) - a^2}{2R(r + R)} \right).$</p>
Угао захвата за обраду равне површине	
	<p>Применом косинуса угла: $\cos \psi = \frac{R - a}{R},$ добија се угао захвата: $\psi = \arccos \left(\frac{R - a}{R} \right).$</p>

Код двоипосног глодања, обично је за дефинисање зоне захвата довољно одредити угао захвата, пошто је ширина резања непроменљива. Међутим, и код двоипосног глодања ширина резања може да буде променљива:

- Уколико припремак није призматичан, односно ако је добијен неким примарним процесом обраде (ливењем, ковањем). Тада је геометрија припремка комплексна и утиче на ширину глодања.
- Ако се претходно обрађен обрадак даље обрађује на нову ширину резања.

Могуће је да и при једном обртају алата постоји више различитих ширина резања истовремено (слика 3.6).



Слика 3.6. Различите ширине резања при једном обртају алата

Очигледно је да се зона захвата може у потпуности дефинисати уколико се на сваком елементарном сегменту путање алата знају вредности дубине и ширине резања и угла захвата, односно почетног и излазног угла захвата.

3.2. Методе моделирања зоне захвата

Развијен је велики број метода за одређивање зоне захвата у сваком тренутку током процеса глодања. Све ове методе могу се грубо сврстати у неку од следећих категорија:

- аналитичке методе,
- дискретизоване методе и
- методе засноване на моделирању телима (eng. *Solid modeller based*).

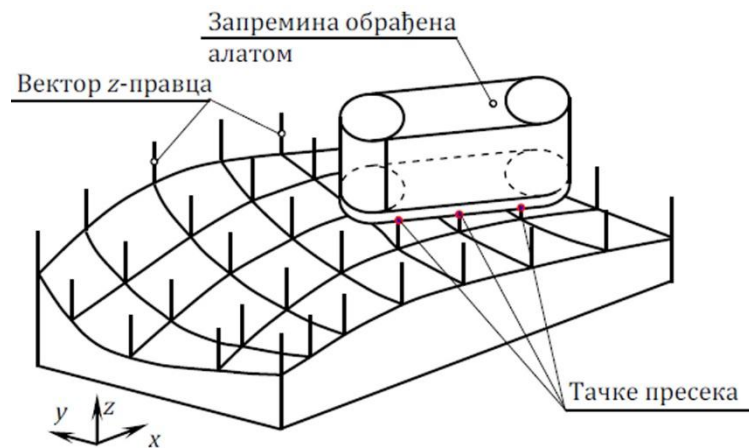
3.2.1. Аналитичке методе

У аналитичким методама користи се концепт полупростора (енг. *half spaces*) у проналажењу свих постојећих пресека правих и кружних линија обратка са алатом. Овом методом резултати се добијају веома брзо, међутим постоје и бројна ограничења примене услед њене аналитичке природе [71]. Постоје ограничења у погледу облика обратка (узима у обзир само ограничен број елемената контуре као што су кружни лукови и праве линије, такође на припремку не могу постојати шупљине и отвори), ограничења у моделирању обратка (морају се обезбедити једначине кругова и линија) и ограничења облика путање (путања алата не сме да сече сама себе).

3.2.2. Дискретизоване методе

У дискретизованим методама, акценат је на симулацији обраде процесом глодања помоћу компјутерске графике. Израз симулација обраде односи се на симулацију геометрије процеса резања где се од геометријског модела обратка одузима запремина (3D) или површина (2D) прекривена путањом алата. Примарни циљ ове симулације је верификација NC програм и провера да ли долази до колизије алата и обратка и да ли остају необрађени делови контуре. Постоје две подгрупе дискретизованих метода: векторске методе и технике Z -привременог складиштења (енг. *Z-buffer*).

Због своје једноставности векторска метода (слика 3.7) се често примењује у апликацијама троосног NC глодања.



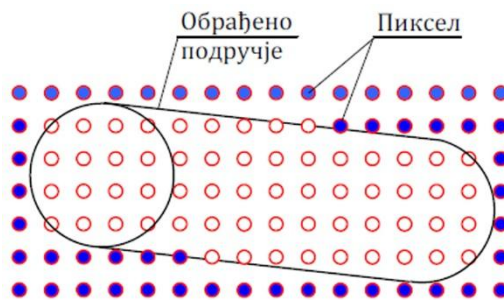
Слика 3.7. 3D симулација обраде – метода Z вектора [72]

За свако померање алата конструише се запремина прекривена путањом алата која одсеца Z векторе у тачкама њиховог узајамног пресека. Ако су Z вектори дефинисани на мрежи у XY-равни, онда се они могу представити као дводимензионални редови, у које се смештају интензитети Z вектора. Реултујући 2D ред се назива Z-мапа (енг. *Z-map*) или G-складиште (енг. *G-buffer*) [72]. X, Y координате елемента Z-мапе $z[i, j]$ могу се дефинисати:

$$x = x_0 + \Delta_x i, \quad y = y_0 + \Delta_y j, \quad (3.2)$$

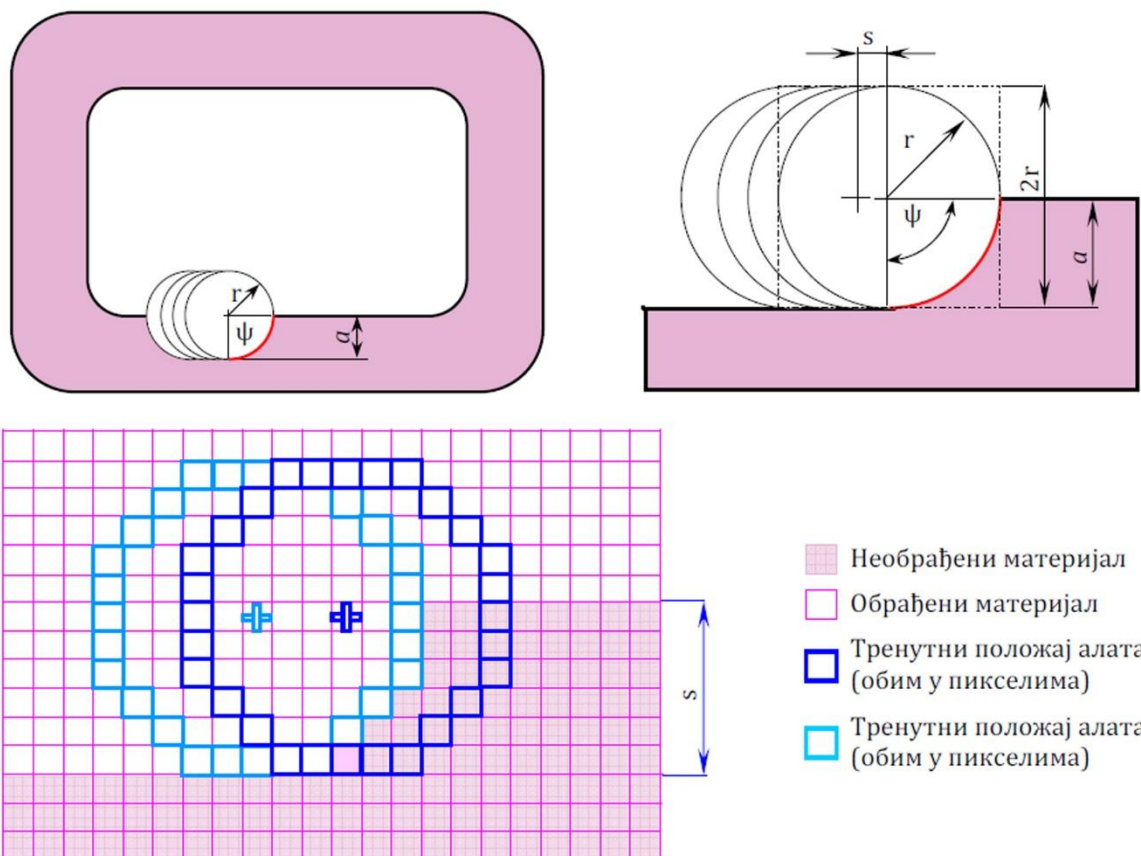
где x_0 и y_0 представљају координате доњег левог угла елемента Z-мапе, а Δ_x и Δ_y су интервали мреже.

За 2D симулацију обично се дводимензионална геометрија представља пикселима дефинисаним на мрежи, и вредности пиксела се смештају у 2D редове пиксела који се називају P-мапа (*P-map*) [72]. Пиксели P-мапе су обично испуњени „маркерима“ и при симулацији обраде бришу се маркери унутар површине прекривене путањом алата (слика 3.8).



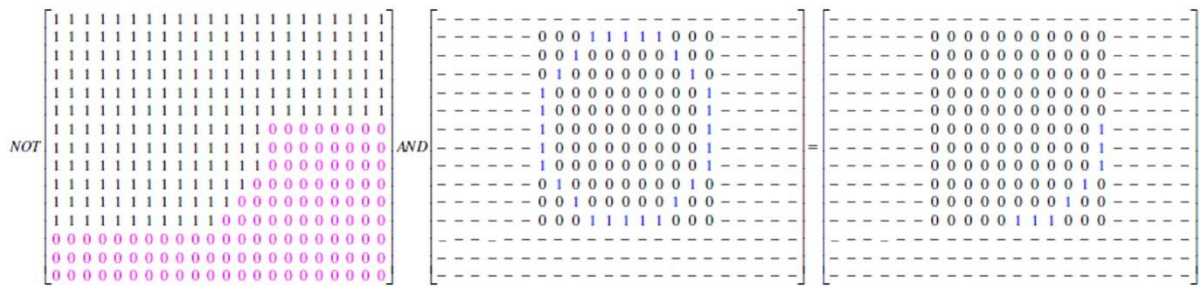
Слика 3.8. 2D симулација обраде – метода пиксела [72]

На слици 3.9 приказана је процедура одређивања зоне захвата симулацијом на бази пиксела. Површине обојене лила бојом представљају материјал обратка који треба да се обради, беле унутрашње површине представљају претходно обрађен материјал и потребно је одредити тренутни угао захвата ψ . Као што се види, и локална геометрија обратка и алата су дискретизовани.



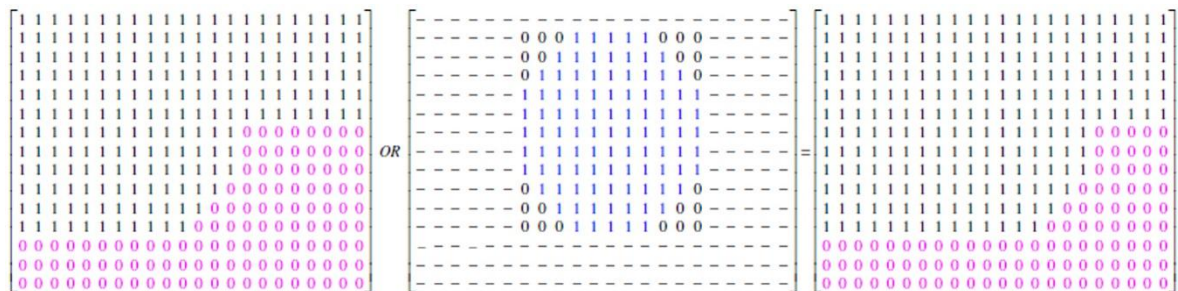
Слика 3.9. Симулација обраде – метода пиксела [63]

Обрадак је представљен матрицом бита: необрађени материјал представљен је битовима 0, а обрађен материјал је представљен битовима 1. Маска алата (обим алата) представљена је мапом бита са јединицама по обиму алата и нулама у унутрашњости (слика 3.10).



Слика 3.10. Одређивање зоне захвата – операције са битима за пример са слике 3.9 [63]

Тренутни обим алата у захвату може се одредити утврђивањем преклапања пиксела пресека обима алата у његовом тренутном положају и пиксела геометрије обратка. Одређивање пресека алата и обратка може се ефикасно добити читавањем бита различитих од 0 у резултату логичке операције “AND” између инверзне вредности битова обратка и битова обима алата (слика 3.10). Затим се ажурира мапа битова обратка применом логичке операције “OR” између маске алата (овога пута маска алата садржи јединице на целој површини алата) и мапе битова обратка (слика 3.11).



Слика 3.11. Ажурирање обратка – операције са битима за пример са слике 3.9 [63]

Оба ова процеса не захтевају велику меморију нити су рачунски веома захтевни. Тачност симулације зависи од две примарне променљиве: резолуције симулације (одређене полупречником алата у пикселима) и величине корака f између суседних тачака симулације. Очекивана грешка симулације при дубини резања a је $1/2$ величине пиксела. Да би се остварила грешка симулације мања од 5%, потребно је да буде испуњен услов [58]:

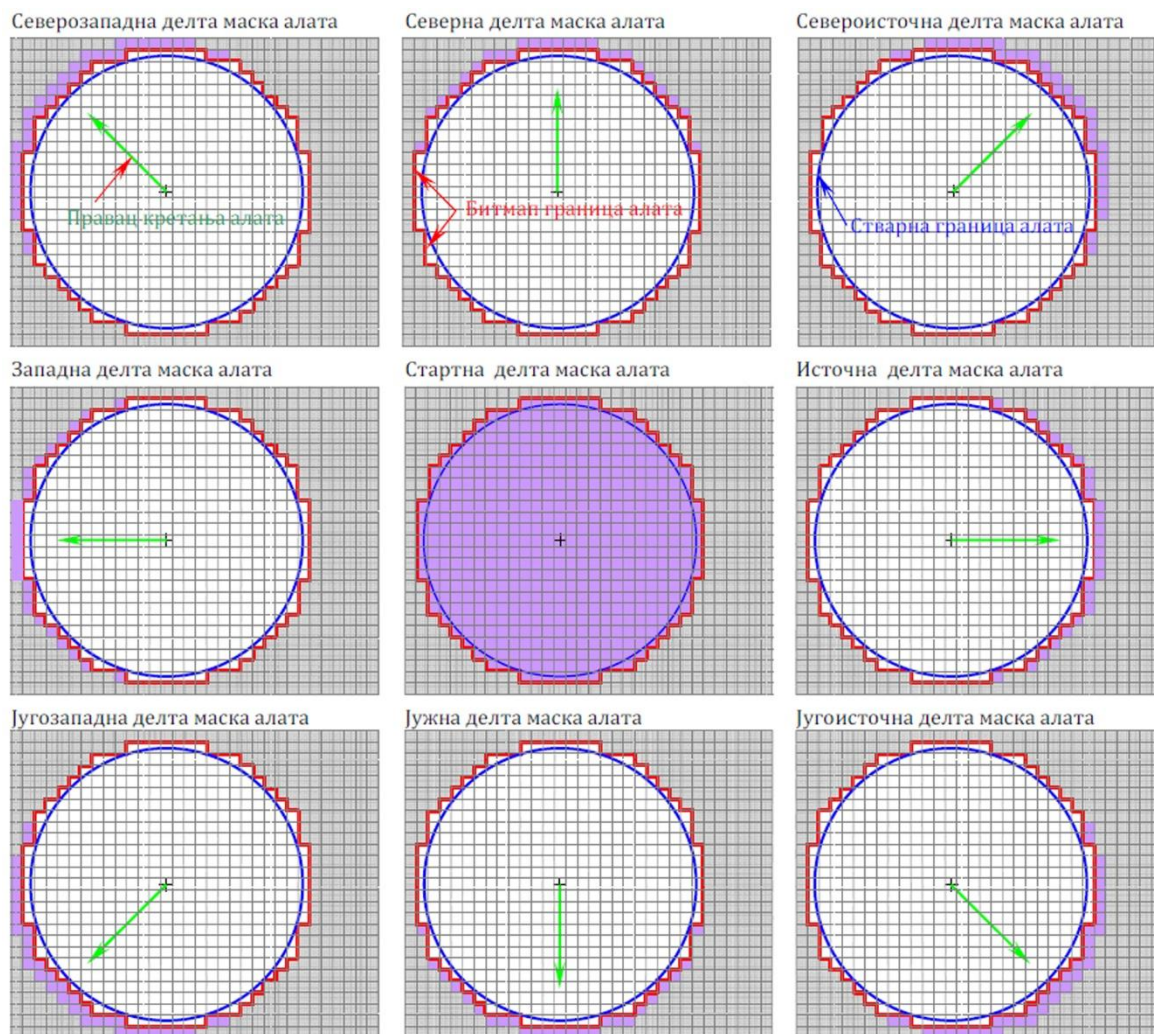
$$\text{величина пиксела}/2 \leq a \cdot 0,05 \tag{3.3}$$

Нешић је у својој дисертацији [66] унапредио ефикасност алгоритма за одређивање угла захвата методом пиксела коришћењем:

- Прерачунате маске алата (делта маске) – чиме се смањено број пиксела чије се стање проверава и мења у сваком кораку рекурзивног извршења алгоритма.
- Битних поља и кодираних стања пиксела – уместо матрица и RGB (енг. Red – Green – Blue) кодова боја где су битови представљени компонентама црвене, зелене и плаве боје у распону од најмањег (0) до највећег (255) интензитета боје, за складиштење битмапираних слика (енг. bitmap images).
- „uint8“ типа дефинисања – за боље искоришћење могућности рачунарског процесора.

У претходним верзијама алгоритма сви пиксели на масци алата морали су да се упореде са одговарајућим пикселима на битмап слици обратка. Са повећањем битмап резолуције број

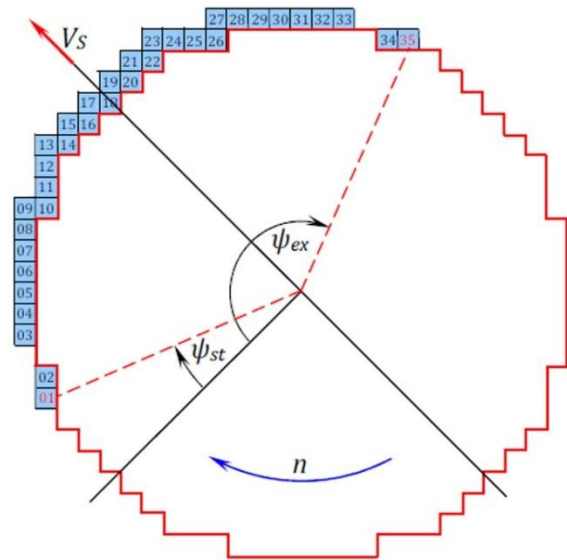
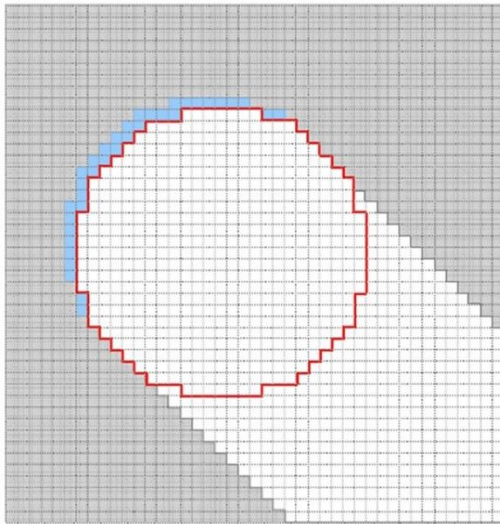
провера значајно расте, што превазилази рачунарске могућности. Нешићева идеја је да прерачуна ограничен број могућих маски алата. Наиме, само у стартној тачки потребно је проверити преклапање сваког пиксела на масци алата са битмап сликом обратка. За сваки нови положај алата, већина пиксела која лежи унутар границе је проверена у претходном кораку. Постоји тачно девет скупова делта пиксела које треба проверити за сваку маску алата. Ови скупови пиксела називају се „делта маске“. Сваки скуп одговара једном од девет могућих праваца у којима алат може да настави кретање из тренутне позиције. Ове делта маске могу да се прерачунавају као што је приказано на слици 3.12 за пример алата пречника 24mm и битмап резолуцију 1пиксел/mm. Примена прерачунатих делта маски значајно убрзава извршење програма.



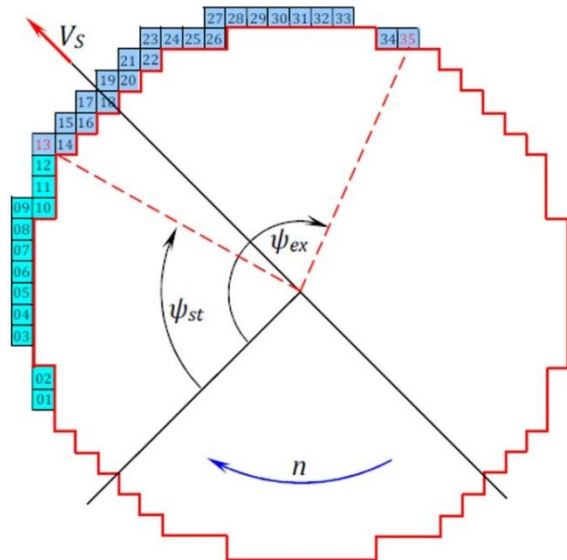
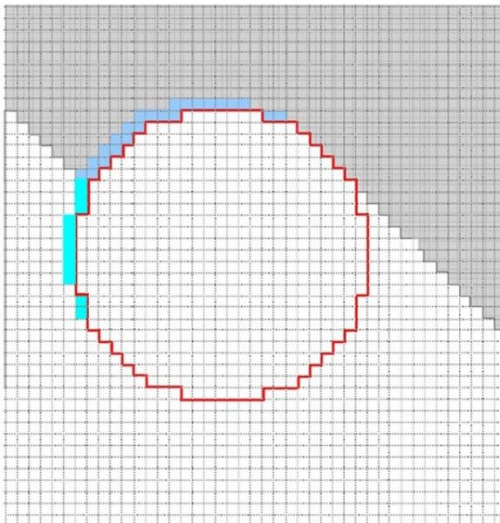
Слика 3.12. Пример делта маски алата [66]

У приказаном примеру (слика 3.12) ефикасност алгоритма за одређивање угла захвата је повећана 17 пута. Процењује се да ће се ефикасност повећати 10000 пута за алат пречника 20mm и резолуцију 1000пиксела/mm [66].

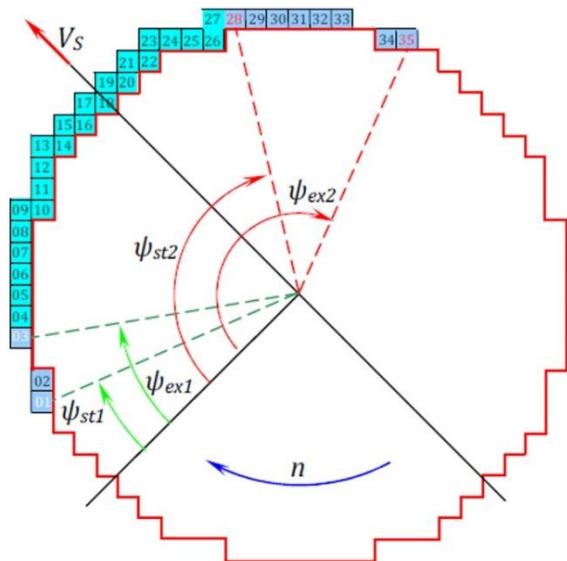
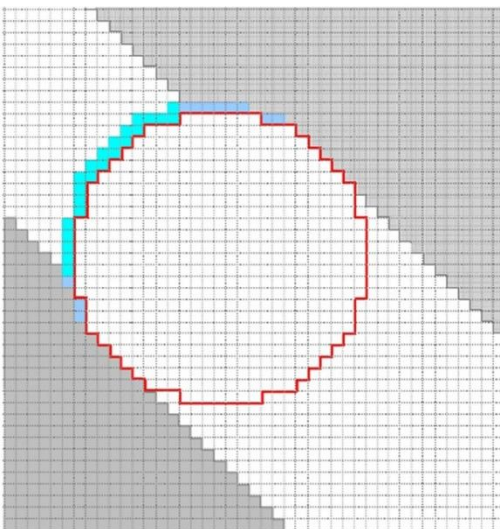
Захват може бити пун (180°), (слика 3.13) или делимичан (<180°), (слике 3.14 и 3.15). Делимичан захват може бити компликованији уколико се састоји од неколико одвојених делова (слика 3.15).



Слика 3.13. Пун захват алата [66]



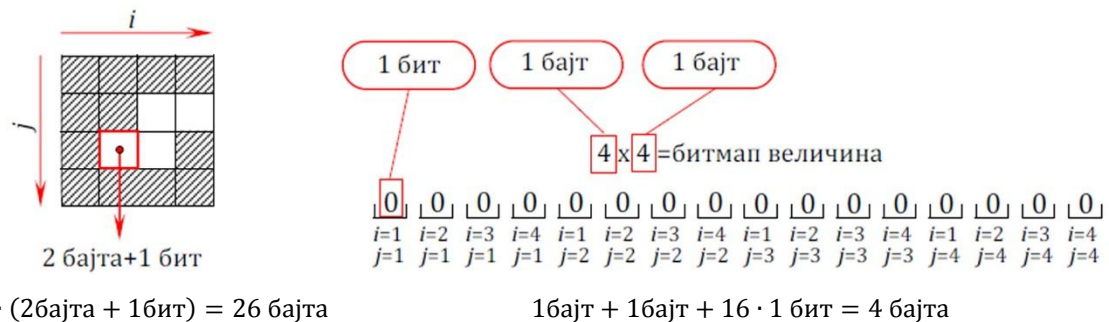
Слика 3.14. Делимични заххват из једног дела [66]



Слика 3.15. Делимични захват алата из два дела [66]

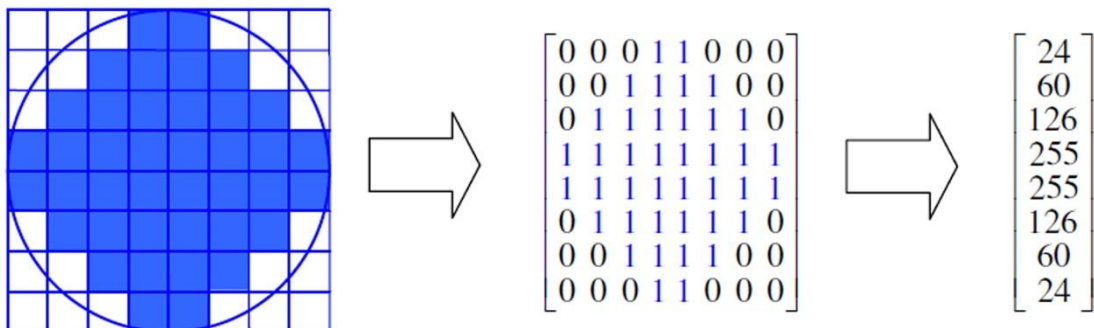
Да би се израчунали почетни и излазни угао, потребно је поређати пикселе који припадају свакој делта маски алата у низ. Пиксели суседни обиму алата добијају узастопне бројеве у смеру ротације алата. У сваком кораку обраде алгоритам утврђује који део низа пиксела се преклапа са необрађеним материјалом обратка. Затим се анализирају бројеви пиксела у том делу делта низа. Ако бројеви чине комплетан низ, без прекида, онда постоји једна зона захвата, а ако постоје прекиди број зона је за један већи од броја прекида. За сваки посебан део захвата идентификују се два пиксела са најмањим и највећим бројем и одређује се почетни и излазни угао захвата. Вредности сила резања за одвојене зоне захвата се одређују сабирањем појединачних вредности.

Битна поља представљају структуру података која омогућава складиштење вредности као кратких низова бита. Примена битних поља смањује потребну меморију рачунарског система (слика 3.16). За битмап слику величине 4пиксела×4пиксела у ранијим верзијама алгоритма, за сваки пиксел био је потребан 1 бит за X координату и 1 бит за Y координату, за његово смештање у матрицу. Применом битних поља величина матрице је уписана са 2 бита и координате пиксела се одређују само на основу њихове позиције у програмској речи.



Слика 3.16. Поређење потребне меморије [66]

Податак типа *uint* је врста броја. *Uint8* значи *Unsigned* (све вредности су позитивне), *Integers* (све вредности су цели бројеви), *8* (садржи само 8 бита информација). Како су кодови боја увек ненегативни, овај тип записа се често користи у компјутерској графичи. У случају битмап слике обрађеног материјала обратка, где је потребан само један бит за дефинисање стања сваког пиксела, процес промене стања се може значајно убрзати истовременим третирањем 8 пиксела. Зато је потребно да број пиксела у сваком реду буде дељив са 8. На слици 3.17 је приказана дискретизација битмап слике алата применом 8-битне компресије.

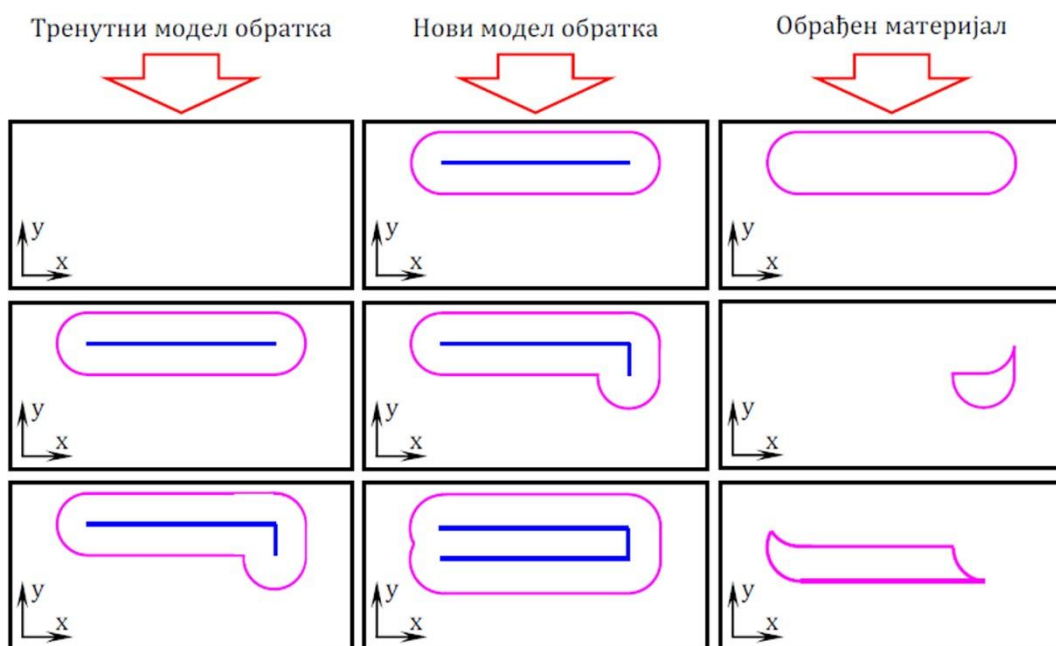


Слика 3.17. 8-битна компресија битмап слике алата [66]

3.2.3. Методе засноване на моделирању телима

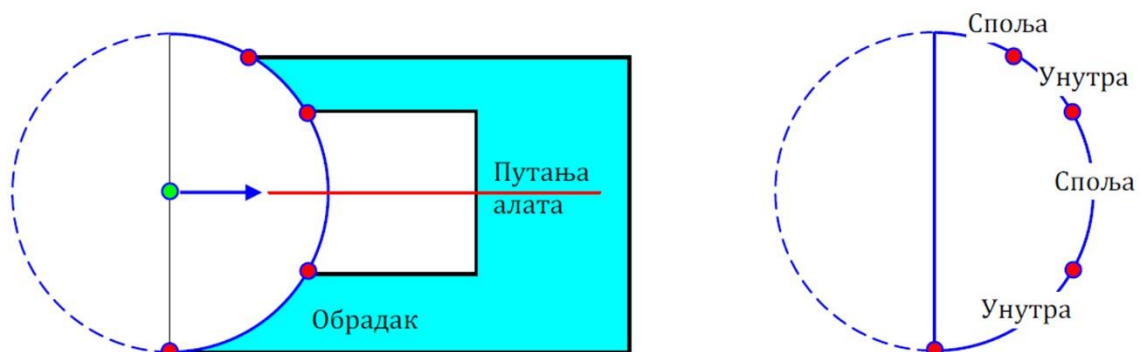
У методама заснованим на моделирању телима, користе се стандардне Булове операције за рачунање геометрије која настаје као пресек запремине настале кретањем алата и запремине обратка пре почетка тог кретања. Иако Булове операције захтевају више рачунања него дискретизоване методе, њима се добија тачна геометрија материјала у захвату у сваком кораку симулације. Ове методе се често називају и тачне методе.

У симулацији глодања применом тачне методе најпре се модел материјала који треба да се обради (путања центра алата окружена обликом који одговара површини прекривеној кретањем алата по тој путањи) одузима од тренутног модела обратка и добија се резултат обраде (нови модел обратка). Затим се одређује разлика новог и тренутног модела обратка и добија се облик обрађеног материјала и том кораку симулације (слика 3.18).



Слика 3.18. Секвенце обраде применом тачне методе [66]

Како би се одредио угао захвата, модел материјала који треба да се обради се пресеца са моделом алата. Упрошћен модел алата је полукруг ("D" - облик), пошто су у контакту са материјалом обратка само резне ивице на страни алата у правцу кретања алата. На слици 3.19а црвена линија представља путању центра алата, зелена тачка је тачка у којој се врши симулација и модел обратка је представљен плавом бојом.



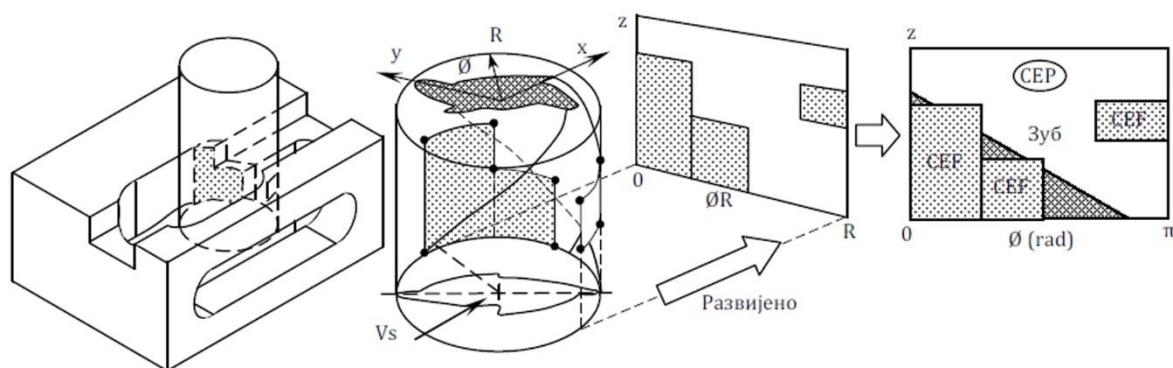
Слика 3.19. Пресек обима алата и обратка [66]

Затим се лучни део “D” – облика дели тачкама у којима пресеца модел обратка (слика 3.19б). Ове тачке деле лук на подручја која су у контакту са материјалом обратка и на подручја која нису у контакту са материјалом обратка. Крајње тачке подручја која су у контакту са материјалом обратка одређују угао захвата.

Метода издвајања пресека алата и обратка (*CWE - Cutter Workpiece Engagement*) припада групи метода заснованих на моделирању телима. *CWE* метода примењена је у раду [73] у обради на бази елементарних форми (примитива). На основу препознавања примитива (енг. *feature recognition*) развијена је база података различитих пресека алата и обратка који одговарају сваком примитиву. Дефинисан је примитив пресека алата и обратка (*CEF-Cutter Engagement Feature*), као скуп повезаних подручја на површини алата која одговара површини формираној на обратку током једног обрта алата.

Међутим, постоје два услова која морају бити испуњена да би се метода могла применити, тако да се примена модела не може генерализовати на реалне процесе двоипосног глодања. Први услов је да припремак мора бити призматичан, а други је да све површине које се обрађују морају бити међусобно нормалне. Такође, овај приступ зависи и од могућности самог система за препознавање примитива и његових ограничења.

Мердол (*Merdol*) је предложио рачунарски ефикасан алгоритам за симулацију дејства сечива глодала на произвољну зону захвата помоћу било конструктивне геометрије тела (*CSG - Constructive solid geometry*), било *Z* - привременог складиштења [74]. Тачке пресека алата и обратка (слика 3.20) се одређују аналитички за једноставне зоне захвата и нумерички за сложеније зоне.



Слика 3.20. Пресек алата и обратка – *CEF* мапирање [74]

Како се моделирањем конструктивним телима добијају информације о тачној граници међу телима алата и обратка, развијени метод има општу примену. Овај приступ не захтева систем за препознавање примитива и нема очигледних ограничења у погледу облика припремака.

На основу модела готовог дела, модела припремака и *NC* програма генерисаних било којим комерцијалним софтвером може се одредити зона захвата. Метода моделирања телима захтева примену Булових операција међу телима која се секу. Дуж путање, у сваком положају алата потребно је применити Булове операције за регенерисање тренутне геометрије обратка и проналажење пресека алата и тренутне геометрије обратка. У многим случајевима може се догодити да се зона захвата не мења дуж неког дела путање

алата. Такви делови путање називају се примитиви непроменљиве силе и представљени су у [73]. Ако су познати ови сегменти, број Булових операција се може значајно смањити.

3.3. Анализа дисконтинуитета путање и моделирање профила брзине помоћног кретања дуж путање алата

При високобрзинској обради метала глодањем, број обртаја и брзина помоћног кретања алата су далеко већи него при конвенционалном глодању у циљу минимизирања времена обраде. Међутим, при високобрзинској обради се не могу занемарити динамички ефекти обраде као што се обично чинило при пројектовању путање за обраду на конвенционалним машинама где је најкраћа путања подразумевала најмање време обраде [75].

Задати корак се прорачунава према принципима теорије обраде резањем или се усваја према препорукама произвођача алата. Величина корака зависи од материјала алата и обратка, геометрије алата и услова обраде. При прорачуну или избору корака не узима се у обзир геометрија путање алата односно промена вредности угла захвата током обраде а самим тим и варијације силе резања и брзине помоћног кретања. Брзина помоћног кретања и корак се одређују за најнеповољније услове обраде, односно за највећи могући угао захвата од 180° који настаје при глодању жлеба.

Интерполацијом се сваки линеарни или кружни део путање дели на јединичне сегменте. Управљачки систем шаље сигнале погонима сваке NC осе који обезбеђује да се њихово вратило мотора окрене тачно онолико колико је потребно да алат дође до крајње тачке сегмента путање. Да нема инерцијалних сила алат би стао на крају сваког јединичног сегмента чак и у случају линеарног кретања [66].

У сваком случају, у зависности од кривине на прелазу између суседних сегмената потребно је смањење брзине помоћног кретања за остваривање континуалног кретања алата. Модел [76] који су развили Ким (*Kim*) и Чои (*Choi*) омогућава процену оптималне брзине помоћног кретања на местима спајања два суседна сегмена путање.

Елементи овог модела (слика 3.21) су: $f_i(s)$ – брзина помоћног кретања алата на i -том сегменту путање која се састоји од n сегмената, $a_i(s)$ – брзина помоћног кретања алата у i -том интервалу убрзаног кретања, $u_i(s)$ – брзина помоћног кретања алата у i -том интервалу равномерног кретања, $d_i(s)$ – брзина помоћног кретања алата у i -том интервалу успореног кретања, s_{ia} – крајња тачка i -тог подручја убрзаног кретања, s_{id} – крајња тачка i -тог подручја успореног кретања, s_i – крајња тачка i -тог сегмента путање, $f_{ia}(= f_{(i-1)d})$ – брзина помоћног кретања алата на почетку i -тог подручја убрзаног кретања ($f_{ia} \leq f_{iu}$), $f_{iu}(= u_i)$ – брзина помоћног кретања алата у i -том подручју равномерног кретања, f_{id} – брзина помоћног кретања алата на крају i -тог подручја успореног кретања ($f_{id} \leq f_{iu}$) и s – укупни пређени пут дуж путање.

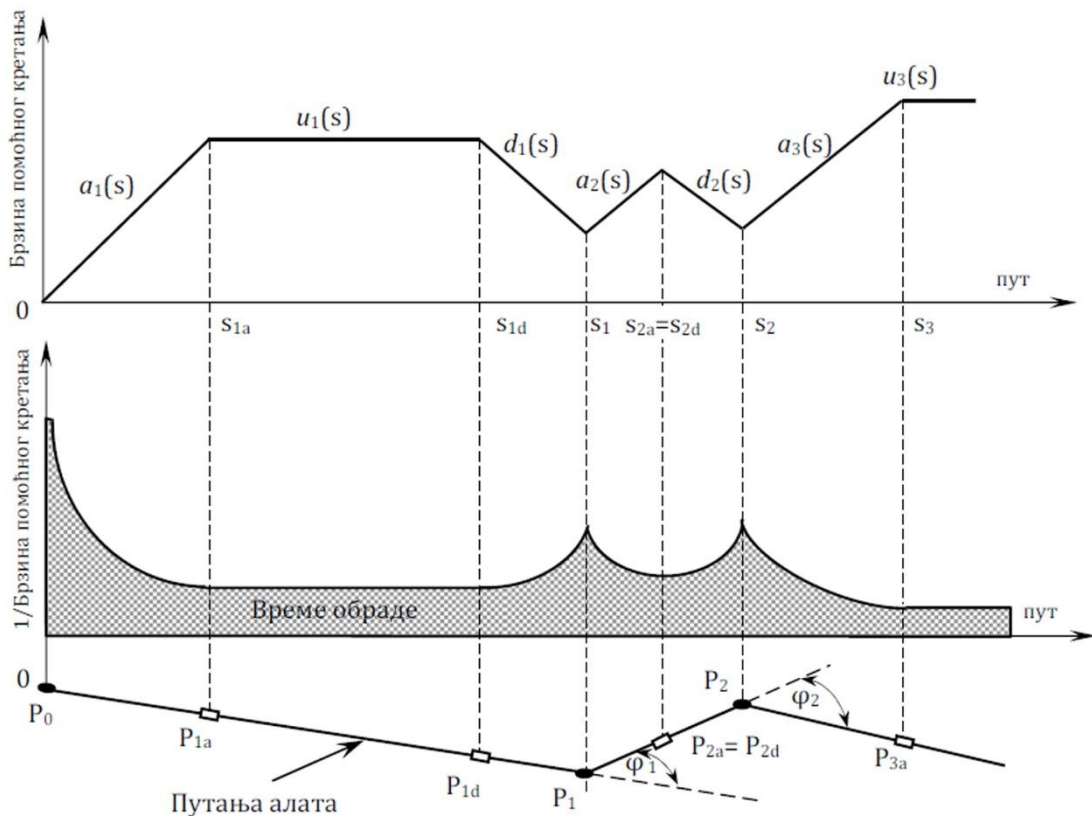
Брзина помоћног кретања на почетку и крају путање је нула ($f_{ia}=0, f_{nd}=0$), а у било којој другој тачки путање може се одредити према изразу:

$$f_i(s) = \sum_{i=1}^n [a_i(s) + u_i(s) + d_i(s)], \quad (3.4)$$

где је:

$$\begin{aligned}
 a_i(s) &= f_{ia} + k(s - s_{(i-1)}), & s_{(i-1)} \leq s \leq s_{ia}, & s_{ia} = s_{(i-1)} + \frac{f_{iu} - f_{ia}}{k}, \\
 u_i(s) &= a_i(s_{ia}), & a_i(s_{ia}) \leq f_{iu}, & s_{ia} \leq s \leq s_{id}, & s_{id} = s_{(i-1)} - \frac{f_{iu} - f_{id}}{k}, \\
 d_i(s) &= a_i(s_{ia}) - k(s - s_{ia}) - k(s - s_{id}), & s_{id} \leq s \leq s_i,
 \end{aligned}
 \tag{3.5}$$

а k је константа која зависи од CNC јединице која одређује нагиб трапезоидног профила брзине помоћног кретања и n је број сегмената путање алата.



Слика 3.21. Модел времена обраде заснован на трапезоидном профилу брзине помоћног кретања [76]

У свакој тачки спајања два суседна сегмента, брзина помоћног кретања мора да буде мања од две суседне равномерне (задате) брзине, да би се обезбедило стабилно кретање алата при промени правца кретања алата. Колико вредност брзине мора да се смањи зависи од угла између два суседна сегмента путање (φ_i): што је већи угао, брзина помоћног кретања мора више да се смањи.

Ким и Чои [76] су предложили следећу зависност између угла под којим се спајају два суседна сегмента путање и вредности брзине помоћног кретања на почетку нареденог сегмента.

$$f_{ia} = \min[f_{(i-1)u}, f_{iu}] \cdot \left(1 - \frac{|\varphi_i|}{\pi}\right)
 \tag{3.5}$$

Примена ове формуле је верификована у радовима [68] и [66] и укључена је у модел развијен у овом раду за одређивање профила брзине помоћног кретања дуж путање алата. У свакој тачки дисконтинуитета на путањи, добијеној на бази NC програма, проверава се услов према изразу (3.5) и према томе се усваја одговарајућа брзина помоћног кретања на почетку наредног сегмента.

Овај модел је заснован на трапезоидном профилу брзине помоћног кретања док су модели развијени у [66] и [7] засновани на постојању „трзаја“ (промене убрзања у јединици времена). У класичном трапезоидном моделу профила брзине помоћног кретања „трзај“ је занемерен и претпоставља се да се задато убрзање или успорење остварује тренутно, што при великим брзинама обраде доводи до динамичке нестабилности. Ако зависност убрзања од путање није глатка крива, може доћи до нежељених вибрација [7]. Ким и Чои [76] су закључили да је утицај убрзања и успорења помоћног кретања нарочито изражен при високобрзинској обради глодањем.

3.4. Производност обраде

Одређивање зоне захвата и профила брзине помоћног кретања алата дуж путање алата омогућава одређивање још једне важне променљиве процеса глодања, чија је максимизација често једна од функција циља у оптимизацији процеса обраде: производности обраде Q (MRR - *material removal rate*). Вредност производности за цилиндрично глодало може се одредити помоћу израза [74]:

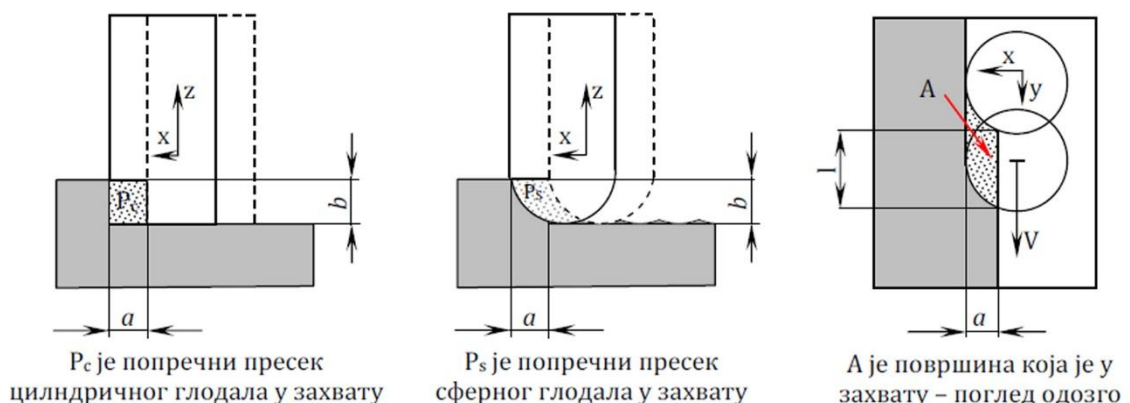
$$Q = b \cdot a \cdot s_z \cdot n \cdot N, \quad (3.7)$$

где је: b – ширина резања, a – дубина резања, s_z – корак по сечиву, n – број обртаја и N – број сечива алата.

Изрази за одређивање производности који узимају у обзир све микро и макро геометријске карактеристике за различите врсте глодала такође су развијени [52]. За линеарно кретање (слика 3.22), производност се може одредити према изразу:

$$Q = P_G \cdot v_s, \quad (3.8)$$

где је: P_G , ($G = C, S$) - површина попречног пресека алата у захвату (C -цилиндрично глодало, S - сферно глодало) а v_s – брзина помоћног кретања.



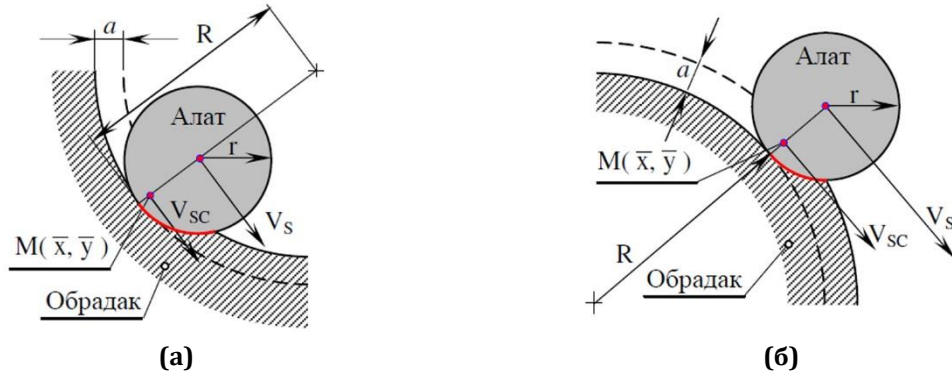
Слика 3.22. Попречни пресек алата у захвату [52]

Начин геометријског одређивања P_G у зависности од врсте глодала детаљно су приказани у [52].

Производност се у случају кретања алата полупречника r по кружној контури полупречника R и центра C (слика 3.23) одређује као:

$$Q = P_G \cdot v_{sc}, \quad (3.9)$$

где је v_{sc} брзина центра маса $M(\bar{x}, \bar{y})$ пресека P_G .



Слика 3.23. Захват алата и брзина помоћног кретања при кружном кретању алата: (а) по конкавној површини, (б) по конвексној површини [52]

За кретање алата по конкавној површини v_{sc} се одређује према изразу:

$$v_{sc(konk)} = \frac{v_s(R - \bar{m})}{R - r}, \quad (3.10)$$

а за кретање по конвексној површини према изразу:

$$v_{sc(konv)} = \frac{v_s(R + \bar{m})}{R + r}, \quad (3.11)$$

где је:

$$\bar{m} = \sqrt{(\bar{x})^2 + (\bar{y})^2}. \quad (3.12)$$

За одређивање производности потребно је знати положај центра масе дела алата који је у захвату са обратком и може се одредити на основу дубине резања, полупречника алата и полупречника површине која се обрађује. Такође је потребно знати и тренутну брзину помоћног кретања у свакој тачки путање.

3.5. Закључне напомене

У свим моделима силе резања код глодања фигуришу углови захвата, ширина резања и корак. Према томе, за моделирање силе резања неопходно је претходно одредити промену ових вредности дуж путање алата.

Зона захвата се може одредити применом различитих метода приказаних у овом поглављу. У истраживању у оквиру програма ове дисертације примењена је оригинална метода

заснована на комбинацији методе пиксела и примене Булових операција. Инспирација за примену ове методе проистекла је из рада [66], чији су делови и наведени.

Време обраде је један од најважнијих критеријума према коме се оцењује ефикасност путање алата. Теоријско време обраде се обично одређује сабирањем појединачних времена која се рачунају као количник дужине сваког сегмента путање алата и одговарајуће програмиране брзине помоћног кретања [76].

Теоријско време обраде је увек мање од стварног зато што не узима у обзир утицај карактеристика убрзања и успорења помоћног кретања CNC машине. Да би се путање могле упоредити према ефикасности обраде, потребно је израчунати време обраде према моделу који узима у обзир динамичку природу управљачког система. У овом раду примењен је трапезоидни модел [76] за одређивање профила брзине помоћног кретања дуж путање алата, у циљу одређивања силе резања и времена обраде.

Познавање зоне захвата и профила брзине помоћног кретања дуж путање алата, омогућава и одређивање производности обраде. Иако у дисертацији није приказано моделирање производности дуж путање алата, сви потребни елементи су одређени. У будућем раду укључиће се и константна производност као један од критеријума за оцену адекватности путање алата.

ПОГЛАВЉЕ

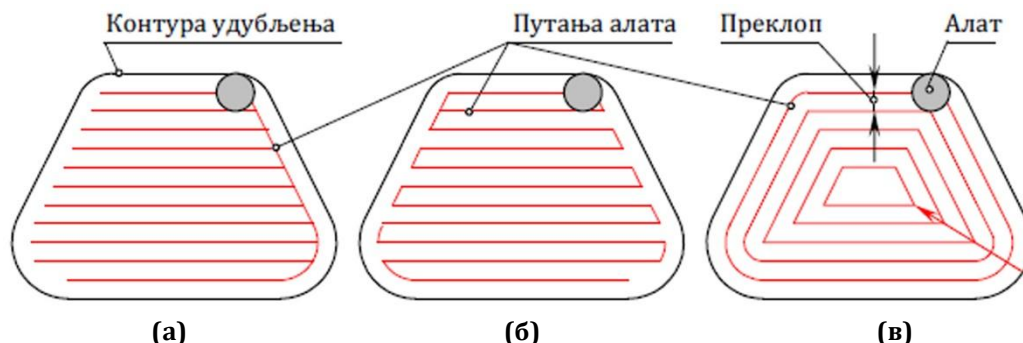
4

НС ПУТАЊА АЛАТА

За израду великог броја обрадака потребна је обрада површина које су паралелне или нормалне на једну раван или су произвољних облика и захтевају двоипоосно глодање. Према томе, обрада џепова (енг. *Pocket Machining*) представља једну од најважнијих операција глодања која, према истраживањима [68], обухвата 80% свих врста обраде глодањем.

Обично се за обраду џепа користи цилиндрично вретенасто глодало чијим се кретањем унутар контуре удубљења добија жељени облик обрађене површине. Алат изводи главно обртно кретање и помоћно праволинијско, кружно или сложено кретање у равни дуж низа линија, лукова или кривих линија од којих се састоји сложена путања алата.

НС путање се могу поделити на две основне групе: линеарне и нелинеарне. Типични примери једноставних линеарних путања су једносмерне и двосмерне путање (слика 4.1). Код једносмерне путање алат је у захвату само при кретању у једном смеру па је према томе дуж целе путање глодање само истосмерно или само супротносмерно. Пошто се алат празним ходом враћа у нови почетни положај на крају сваког сегмента путање, долази до временских губитика услед великих периода празног хода. Такође, на почетку сваког сегмента путање, при заузимању почетног положаја, алат продире вертикално целим обимом у материјал обратка, што се сматра најнеповљивијим захватом глодања у смислу сила резања и хабања алата. При глодању двосмерном путањом, алат је у захвату и при кретању у једном смеру и при повратном кретању. Иако се двосмерним путањама смањују празни ходови, недостатак овакве обраде је управо у томе што се комбинованим глодањем наизменично изводи истосмерно и супротносмерно глодање што може довести до појаве самопобудних вибрација и смањења постојаности алата [77].

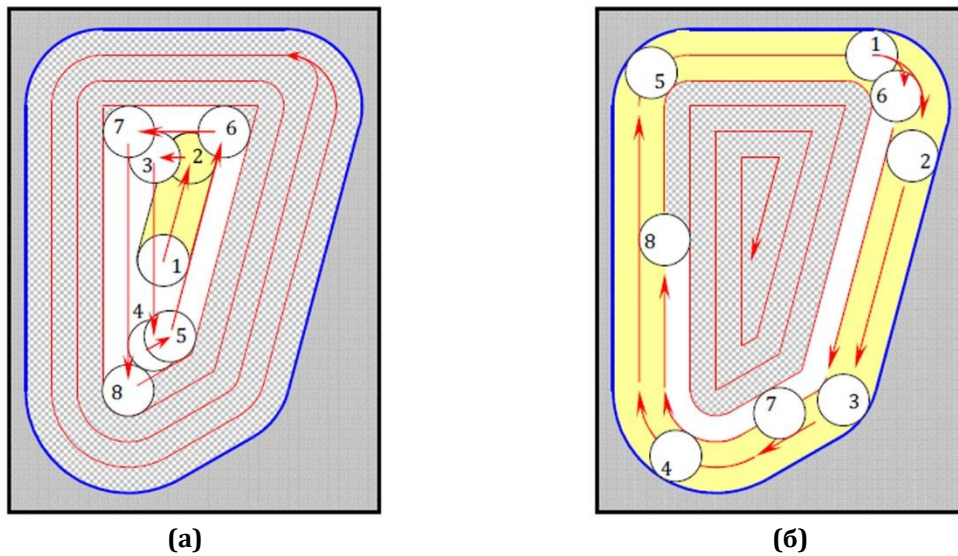


Слика 4.1. Три типичне путање алата: (а) једносмерно, (б) двосмерно и (в) кретање алата паралелно контури

При контурно паралелном глодању (слика 4.1в), путања алата је паралелна контури удубљења који се обрађује. Ова путања је непрекидна код конвексних облика контуре удубљења, јер је алат у захвату дуж целе путање, тако да нема празних ходова. Истовремено се врста глодања, истосмерно или супротносмерно, углавном не мења дуж путање уколико је дубина резања мања од полупречника глодала. Контурно паралелно глодање има све већу примену, посебно у обради удубљења великих површина.

Путање алата паралелне контури састоје се од две врсте паралелног померања контуре удубљења у циљу формирања путање алата. Прво паралелно померање контуре мора да буде једнако полупречнику алата, како би се добила путања за завршни пролаз обраде контуре прилагођена геометријској форми контуре, док сва наредна померања одговарају изабраној дубини резања.

Путање алата паралелне контури се разликују и по избору стартне тачке обраде (слика 4.2).



Слика 4.2 Контурно паралелно глодање: (а) од центра ка периферији и (б) од периферије ка центру

Контурно паралелно глодање „од центра ка периферији“ удубљења (слика 4.2а) почиње из средине удубљења а завршава се контурним глодањем и због минималне дужине глодања целим полуобимом алата (глодање жлеба) најчешће се примењује. Насупрот глодању „од центра ка периферији“, при глодању „од периферије ка центру“ (слика 4.2б) није потребно прво паралелно померање контуре, пошто у првом пролазу глодало прати контуру и центар алата је увек од контуре удаљен за полупречник глодала. Ове путање се обично примењују при обради метала у аутомобилској и авио индустрији где су због танких зидова високи захтеви у погледу крутости обратка.

4.1. Генерисање путање алата

Генерисање путање алата паралелне контури заснива се на операцијама офсетовања унутрашње контуре удубљења и спољашње границе испупчења. Обзиром да је офсетовање контуре класичан проблем компјутерске графике, велики број метода компјутерске графике је примењен на генерисање путања алата паралелних контури.

За дату контуру која се дефинише као проста, затворена крива у равни:

$$C_0(s) = [x(s), y(s)]^T, \quad (4.1)$$

где је s произвољан параметар криве, офсетована крива $C_d(s)$ на константним растојању d дефинише се као:

$$C_d(s) = C_0(s) + N(s, 0)d. \quad (4.2)$$

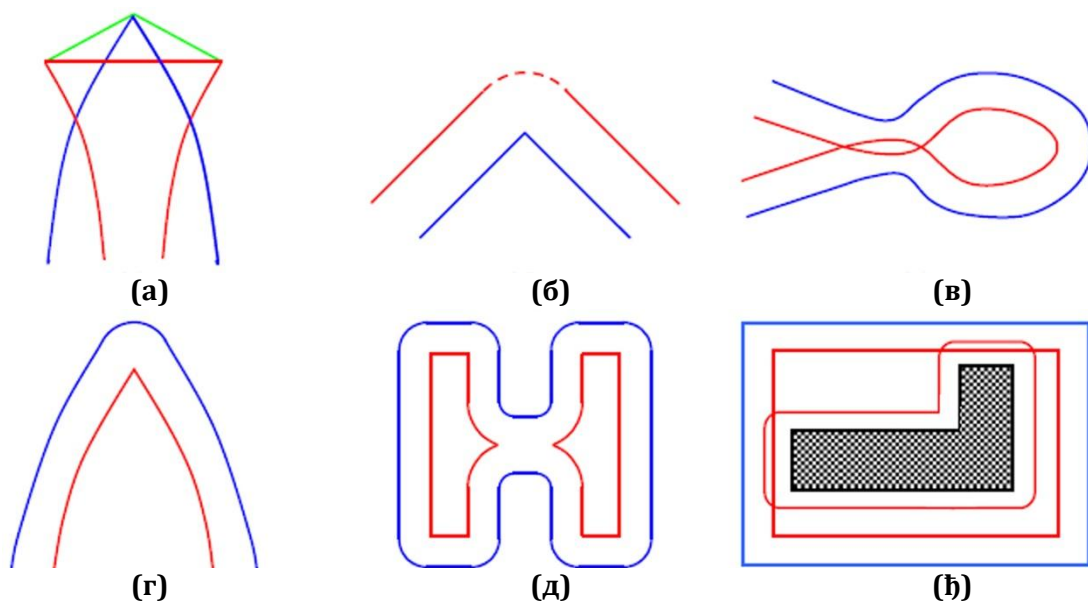
Јединична нормала оригиналне криве у параметарској тачки s , дефинише се као:

$$N(s, 0) = \frac{1}{(x^2(s) + y^2(s))^{1/2}} [-y_s(s), x_s(s)]^T, \quad (4.3)$$

где $x_s(s)$ и $y_s(s)$ представљају парцијалне изводе по дужини лука s .

Овај приступ се може уопштити за проналажење читаве фамилије офсетованих кривих, међутим оваква формулација има и одређене недостатке:

- Ако оригинална крива има тачке на углу где није дефинисан први извод, настаје проблем одређивања пресека умножених линија (слика 4.3а – двозначност у сингуларној тачки доводи до настанка две нормале). У случају да је офсетовање тачке на углу ка споља, потребно је додавање лука (слика 4.3б – испрекидане линије представљају додати лук).
- Геометрија криве може довести до офсетованих кривих које секу саме себе (слика 4.3в – офсет ка унутра доводи до самопресецања настале криве)
- Ако се крива офсетује на растојање d , при чему је максимална локална кривина оригиналне криве $1/k < d$, може доћи до формирања врхова, односно тачака прекида локалне кривине (слика 4.3г).
- Приликом офсетовања може доћи до промене топологије затвореног подручја, односно, подручје ограничено једном кривом се може поделити у више области и обрнуто (слика 4.3д – подручје је подељено у две области).
- Ако у удубљењу постоје испупчења, онда не постоји јединствено решење када се офсет удубљења и испупчења међусобно секу (слика 4.3ђ – за исти офсет контуре удубљења и испупчења добијене криве се могу сећи више пута).



Слика 4.3. Различити проблеми који настају при офсетовању: (а) двозначност, (б) офсетовање тачке на углу, (в) самопресецање, (г) формирање тачке, (д) формирање више подручја и (ђ) међусобни пресек кривих насталих офсетовањем [68]

Методe генерисања путања алата паралелних контури засноване су на три различита приступа:

- паметно упаривање пресека (енг. *pair-wise intersection*),
- Воронојеви дијаграми (енг. *Voronoi diagram*) и

- методе засноване на пикселима (енг. *pixel-based*).

Офсетовање контуре применом паметног упаривања пресека одвија се у две фазе. У првој фази се одређује офсет криве на итеративан начин све док се грешка у офсетовању не смањи испод задате границе. У другој фази се утврђује постојање сингуларитета и сувишних делова и коригују се грешке настале на тај начин.

Примена Вороноијевих дијаграма је један од најстаријих начина генерисања путање паралелне контури. Хелд (*Held*) је успоставио методологију генерисања путања алата [78] чија је примена ограничена на линеарне и кружне сегменте, с обзиром да је примена линеарне и кружне интерполације на CNC машинама најједноставнија. Иако је примена ове методе проширена и на нелинеарне сегменте, остаје чињеница да се за Вороноијеве дијаграме користе захтевне дводимензионалне Булове операције, релативно сложени прорачуни растојања и компликована геометрија.

У циљу прескакања корака детектовања и уклањања елемената путање који сами себе секу, развијен је метод заснован на симулацији пиксела. Применом овог метода путања се генерише узастопним прекривањем површине алатом. Метода је заснована на Z-мапирању (Z-map) те је, према томе, за постизање жељене прецизности у зависности од резолуције Z-мапирања потребна велика меморија рачунарског система и прорачуни су дуготрајни.

У сваком случају, примена било које од наведених метода захтева како препроцесирање, тако и постпроцесирање оригиналног метода како би се остварило ефикасно генерисање путање.

4.2. Путање алата за обраду глодањем великим брзинама

Након појаве високобрзинске обраде у авионској и аутомобилској индустрији за обраду сложених делова од алуминијума и његових легура, обрада великим брзинама је постала популарна као иновативна технологија у свим областима индустријске производње. Глодањем великим брзинама остварује се двоструко већа производност, првенствено захваљујући већем броју обртаја, а затим и повећањем корака. Модерне машине алатке за високобрзинску обраду могу да достигну велику брзину обртања главног вретена и до 50000 о/мин и брзину помоћног кретања до 16000 mm/min [3].

Производност се повећава применом високобрзинске обраде повећањем брзине резања. У циљу смањења отпора резања, смањења вибрација и спречавања деформисања алата при високобрзинској обради смањује се дубина резања како би се смањило оптерећење алата у захвату.

Генерисање путања алата паралелних контури је по природи чисто геометријско што доводи до променљиве дубине резања, поготово у оштрим угловима. Променом дубине резања, мењају се и отпори резања што неповољно утиче на постојаност алата и стање саме машине алатке.

Проблеми који најчешће проистичу из ове променљивости дубине резања су необрађен материјал који остаје у угловима и могућност лома алата. Због тога се у производној пракси бирају режими резања за најнеповољније услове обраде, односно за обраду жљеба када је алат у захвату целим полуобимом. Такође, са појавом технологије обраде великим

брзинама, у жижи истраживања је развој путања алата у облику глатких кривих којима ће се обезбедити квалитет обраде и превазићи проблеми примене ове технологије.

Конвенционалне путање алата паралелне контури, као што су спиралне путање, иако су глатке криве и даље резултирају променљивом дужином резања, што утиче на оптерећење алата и динамичко понашање машине алатке. У општем случају, у литератури се помињу два приступа решавању проблема променљивог оптерећења дуж путање алата: стратегије прилагођавања брзине помоћног кретања и стратегије прилагођавања облика путање алата.

У приступу прилагођавања брзине помоћног кретања, корак се најчешће програмира за случај најнеповољнијег оптерећења у циљу спречавања лома алата. Постоје и приступи са променљивим кораком како би оптерећење остало исто и током праволинијског кретања алата и при уласку алата у угао, када се корак смањује пре промене правца кретања, а повећава након изласка из угла. Методе оптимизације корака захтевају интелигентни технолошки систем. Чак и на најновијим CNC машинама примена адаптивног управљања кораком у циљу контролисања отпора резања, често је неизводљива због ограничења аквизиције сензорских сигнала у управљању променом корака [62]. Овај тип оптимизације зависи од алата који се користи, његовог пречника и броја сечива алата, као и од материјала обратка.

Са друге стране, релативно мало је учињено у правцу прилагођавања саме путање алата у циљу спречавања великих варијација силе резања. Ова метода има предност јер одржавање константне силе не зависи од пречника алата, његове дужине, броја сечива и врсте материјала обратка.

Обрада великим брзинама поставља и неке нове захтеве у погледу облика путање алата. Услед кинематичких и динамичких ограничења саме машине, потребно је да алат успори при уласку у оштар угао или у део путање велике закривљености. То доводи до појаве смањења дебљине струготине (енг. *chip thinning*), при чему температура у тачки контакта тренутно расте са смањењем брзине помоћног кретања. Прегревање материјала алата доводи до оштећења резне ивице алата и смањења квалитета обрађене површине. Према томе, путања алата за високобрзинску обраду мора да буде C^1 непрекидна (непрекидна и диференцијабилна). У неким приступима користе се лукови, петље или неке друге криве да би се избегли оштри углови [77],[4],[3]. Такође, пожељно је да путања буде C^2 непрекидна (непрекидна и двоструко диференцијабилна) како би се ублажили трзаји при кретању алата [4].

При конвенционалном генерисању путање алата разматра се искључиво геометријски аспект, док се остале појаве, као што су силе резања и самопобудне вибрације обично занемарују у фази генерисања путање. Одавно је уочено да је појава самопобудних вибрација најзначајније ограничење повећању производности у обради глодањем. Сложена динамичка интеракција алата, главног вретена машине алатке и обратка, тренутна дебљина струготине и зона захвата су анализарани као фактори који утичу на прелазак из стабилног режима резања у изузетно нестабилно при усвајању режима обраде којима се постиже велика производност. Развијени су бројни модели за спречавање самопобудних вибрација и обраду при оптималним режимима резања [65], [38], [40]. Према

томе, при генерисању путање за високобрзинску обраду морају се узети у обзир сви аспекти процеса резања.

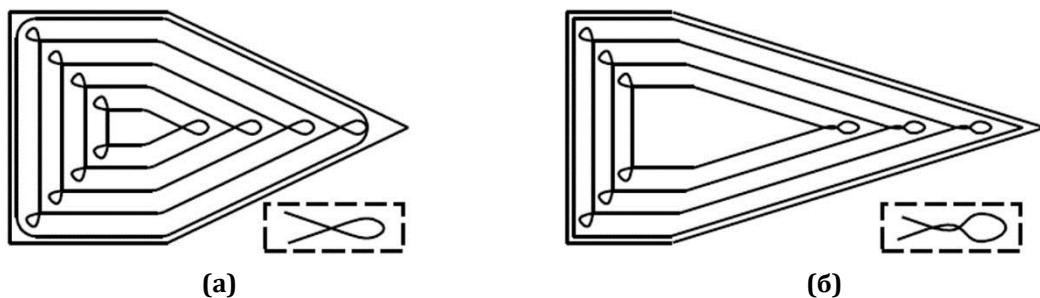
Још један фактор који треба узети у разматрање је и максимално искоришћење погона машине алатке. Познато је да динамичка својства машине алатке, као што је убрзање, имају великог утицаја. При извођењу обрадног процеса, машина за високобрзинску обраду може већину времена потрошити на убрзавање и успоравање. Установљено је да време обраде при високобрзинској обради значајно зависи од карактеристика убрзања машине алатке [76], [4].

Дакле, при пројектовању путање за обраду глодањем великим брзинама, потребно је узети у обзир:

- минимизацију варирања брзине помоћног кретања применом C^1 непрекидних путања,
- могућност примене C^2 непрекидних путања због кинематичко-динамичких карактеристика машина алатки,
- утицај путање алата на силе резања и стабилност процеса обраде и
- максимално искоришћење машине алатке.

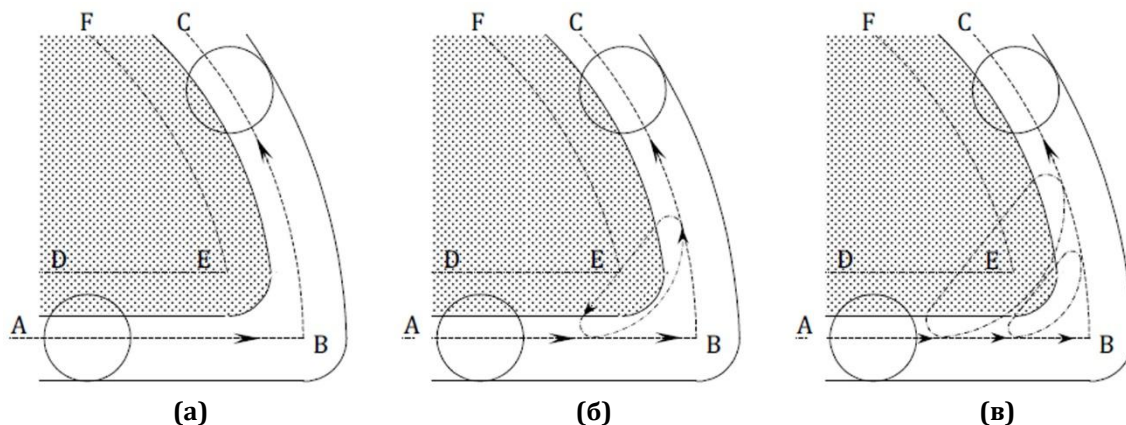
4.2.1. Стратегије обраде углова

Генерисање глатких путања алата доприноси великим уштедама у времену обраде [4]. За обраду заосталог материјала у оштрим угловима обично се препоручује примена кружних петљи. У истраживању [3] предложен је пролазак кроз углове дуплим луковима који секу сами себе, како би се избегло ограничење дубине резања у оштрим угловима (слика 4.4). Алат је ипак преоптерећен у угловима и мора да успори кретање. Такође, правац кретања се мења од проласка алата кроз врх петље до изласка из петље.



Слика 4.4. Два типа кретања алата дуплом петљом: (а) први тип петље (б) други тип петље [3]

Недавна истраживања [77] предлажу примену једноструке и двоструке петље у угловима (слика 4.5).



Слика 4.5. Стратегије обраде угла: (а) конвенционално, (б) једноструком петљом и (в) двоструком петљом [77]

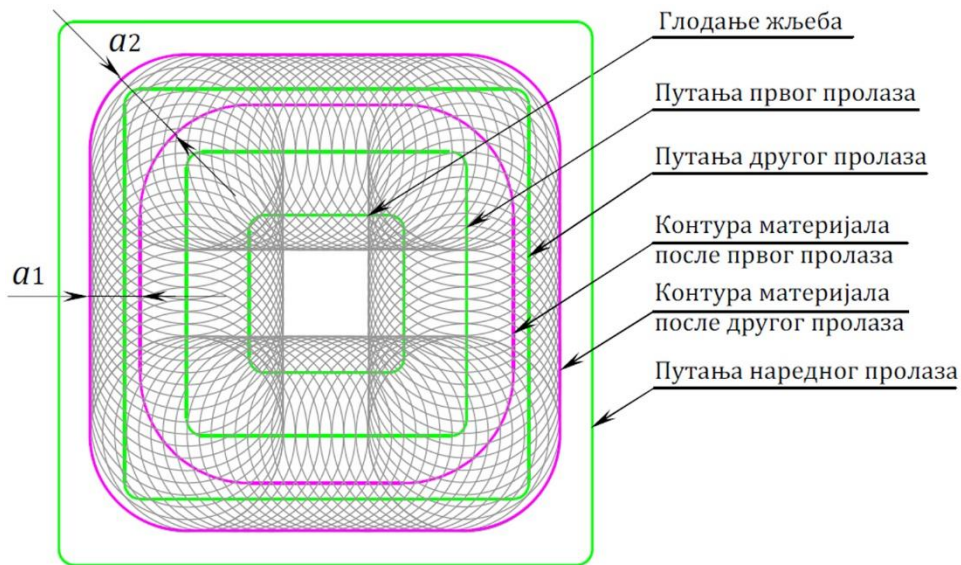
Међутим, овај приступ је ограничен на девет комбинација кружног кретања у смеру казаљке на сату, кружног кретања у смеру супротно кретању казаљке на сату и праволинијског кретања алата у углу. Такође, број лукова потребних за обраду угла може бити већи од два, што у наведеном приступу није адекватно обрађено.

Даље, Пателоуп (*Pateloup*) је проучавао понашање различитих могућих конфигурација путања алата за обраду једноставних правоугаоних удубљења са правим угловима са аспекта динамике процеса обраде [4]. Акцент је стављен на остваривање минималног варирања дубине резања на глатким путањама алата. Међутим, није приказан нити развијен никакав систем аутоматског генерисања путања алата за обраду удубљења сложеније геометрије.

4.2.2. Генеричке путање алата

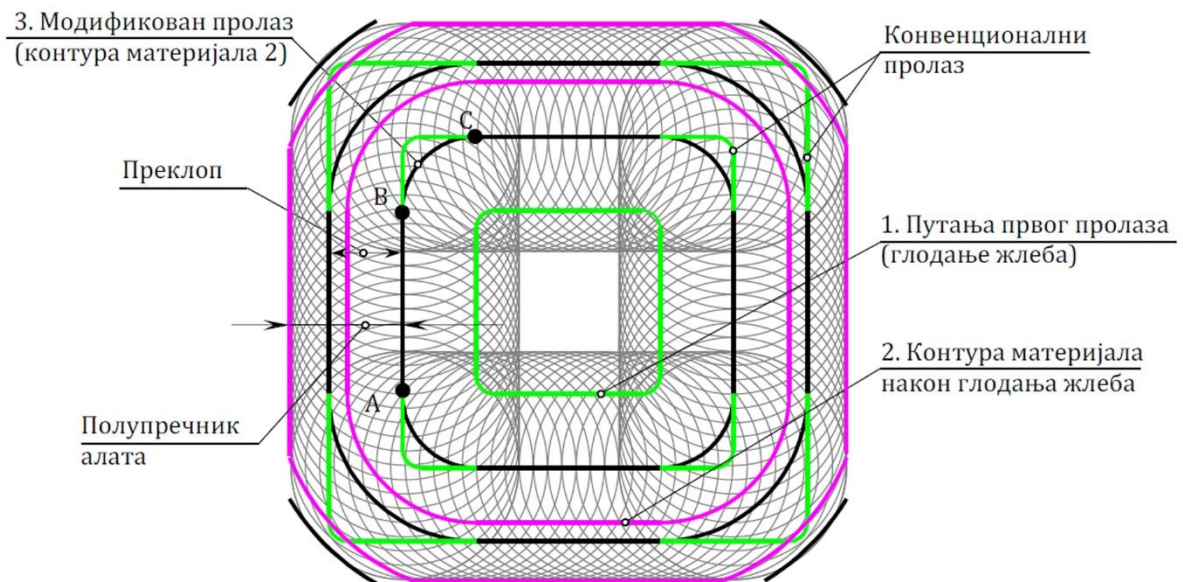
Даник (*Dhanik*) је развио рекурзивни метод идентификовања и одстрањивања заосталог материјала у угловима који не зависи од типа сегмената који формирају угао и по својој природи је генерички [68]. Метод је заснован на примени функције знака растојања (енг. *signed distance function*) за генерисање путање алата паралелне контури која прати контуру обратка и прилагођава обрађивање материјала контури удубљења. Овако генерисане путање су глатке криве по својој природи и погодне за услове високобрзинске обраде. Овом методом се избегава заостали материјал у угловима, минимизира се варирање дубине резања и последично задржавају параметри обраде, задати према траженом квалитету обрађене површине и постојаности алата.

Како би се задржала константна дубина резања, потребно је модификовати путању алата. За задату дубину резања, модификовани пролаз се одређује проналажењем путање која је паралелно померена контура необрађеног материјала ка споља за вредност разлике пречника алата и дубине резања (слика 4.6).

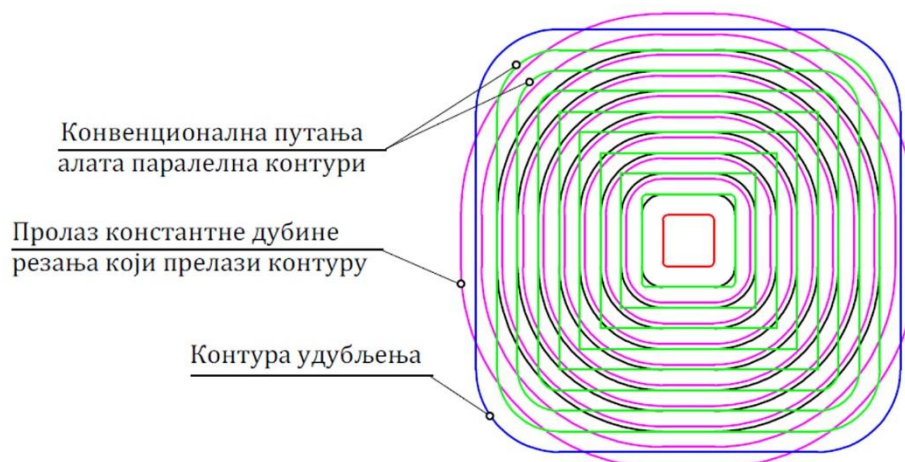


Слика 4.6. Путања првог пролаза алата паралелна контури и варијација дубине резања [68]

Овај концепт је приказан на сликама 4.7 и 4.8. Види се да се модификовани пролаз поклапа са конвенционалним у праволинијском делу путање, али се разликује на нелинеарним сегментима путање (слика 4.7- сегмент BC). Модификована путања алата такође производи нову контуру необрађеног материјала која се добија паралелним померањем путање пролаза ка периферији за вредност полупречника алата. Ако би се наставило на овај начин, дошло би до појаве необрађеног материјала у угловима удубљења. Зато је конципиран аутоматски програм за регистровање заосталог материјала у угловима и његову обраду додатним пролазима.

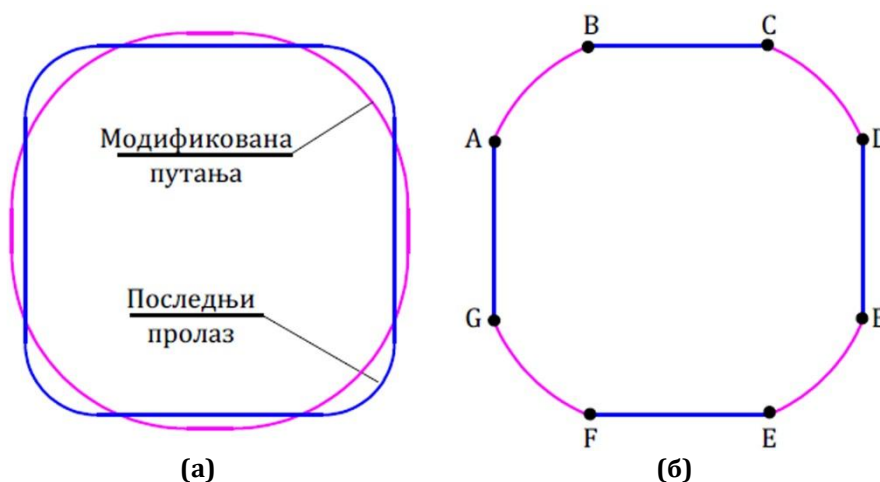


Слика 4.7. Концепција модификације путање алата [68]



Слика 4.8. Путања алата са константном дубином резања [68]

Константна дубина резања је остарена за спиралну путању алата из центра ка периферији и неизбежне петље за обраду углова су конструисане како би се путања алата прилагодила задатом облику удубљења.

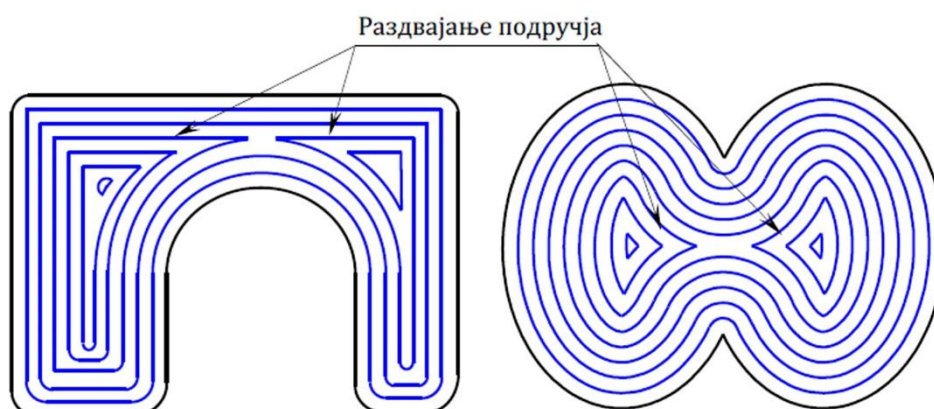


Слика 4.9. Путања завршног пролаза: (а) неприлагођена путања алата, (б) прилагођена путања алата [68]

4.2.3. Путање алата прилагођене граници џепа

За спиралне путање алата од периферије ка центру није потребно прилагођавање контури с обзиром да је обично први пролаз уз саму контуру и представља паралелно померену контуру удубљења ка центру за вредност полупречника глодала. Овакве путање су уобичајене када су контуре удубљења танких зидова па се као први пролаз глодања жлеба изводи уз контуру како би се смањиле промене крутости обратка. У [68] је развијена метода минимизирања варијације зоне захвата од задате вредности уз истовремено минимизирање кривина на путањи за геометријски изводљиве спиралне путање алата од периферије ка центру. Геометрија удубљења је ограничена на једноставне конвексне облике чијим се офсетовањем ка центру сигурно конвергира тачки или низу линија (оса медијана) и где нема раздвајања подручја услед офсетовања.

За уопштене неконвексне облике џепова раздвајање подручја офсетовањем (слика 4.10) доводи до проблема повезивања раздвојених делова подизањем алата, празним ходом и поновним уласком алата у материјал, што умањује ефикасност високобрзинске обраде.

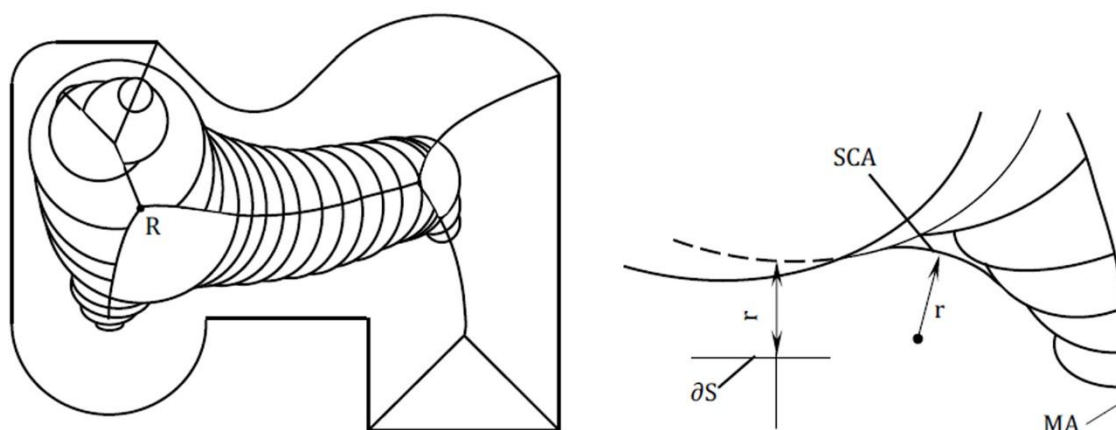


Слика 4.10. Примери раздвајања подручја офсетовањем код неконвексних џепова [68]

Према томе, истраживања у овој области су усмерена на обраду глодањем удубљења произвољних облика без подизања алата.

Хелд и Спилберг (*Spielberger*) су развили глатке спиралне путање за обраду џепова произвољних облика чија се контура састоји од правих линија и кружних лукова, такве да је дубина резања увек већа од нуле и мања или једнака највећој жељеној дубини резања [79]. Кругови одговарајућих пречника су распоређени дуж медијалне осе Воронојевог дијаграма и њихова обвојница је пронађена и изглађена како би се добила путања траженог пролаза обрадног процеса (слика 4.11).

У принципу, путање алата за високобрзинску обраду засноване на Воронојевијем дијаграмима представљају добро решење за високобрзинску обраду глодањем али им је примена ограничена на контуре удубљења састављене од кружних лукова и правих линија.



Слика 4.11. Растући *M*-дискови на медијалној оси и кружни лукови којима се поравнава путања [79]

У својој дисертацији [68], Даник је развио алтернативни метод за остваривање путање алата компатибилне високобрзинском глодању произвољних облика удубљења без

повратних ходова алата, које су затим оптимизирани према дубини резања или углу захвата.

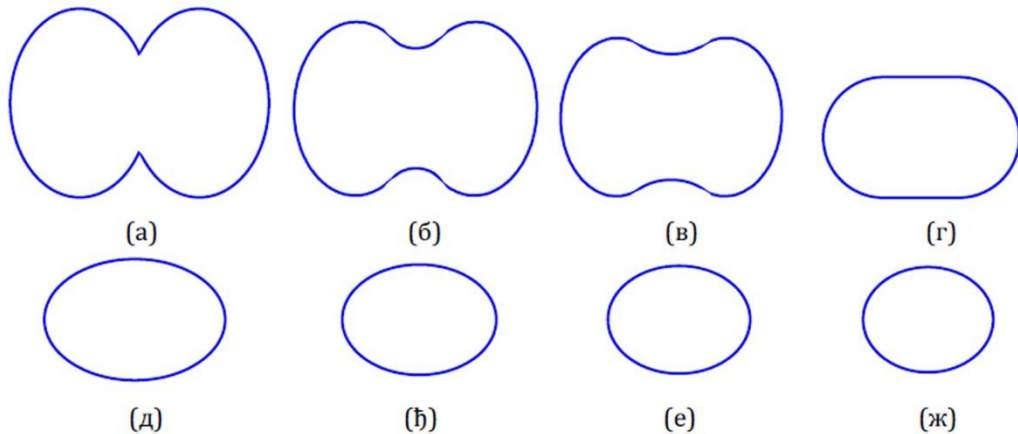
За задату затворену контуру користи се функција знака растојања за иницијализацију контуре удубљења:

$$\phi(X, 0) = \begin{cases} +d(X, X(0)), & X \in \text{унутрашњости } X(0) \\ 0 & X \in X(0) \\ -d(X, X(0)), & X \in \text{спољашњости } X(0) \end{cases}, \quad (4.3)$$

где $d(X, X(0))$ представља растојање тачке X од границе контуре $X(0)$. Затим се примењује закон померања пропорционалног кривини за генерисање путање алата:

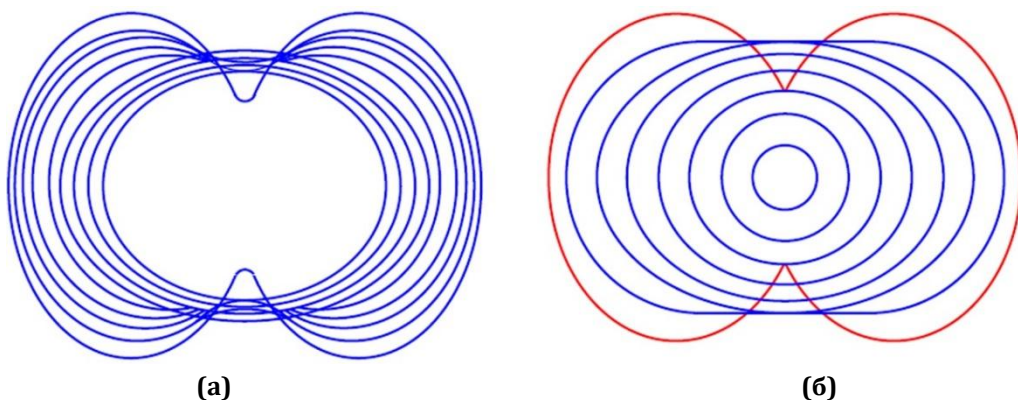
$$F_{curv} = -bk. \quad (4.4)$$

Према овом закону брзина скупљања било које затворене контуре пропорционална је величини кривине у свакој тачки. Топологија затворене криве мења се током еволуције и достиже кружни профил равномерне кривине (слика 4.12).



Слика 4.12. Еволуција неконвексне затворене контуре по закону померања пропорционалног кривини [68]: (а), (б), (в), (г), (д), (ђ), (е) и (ж)- фазе у еволуцији контуре

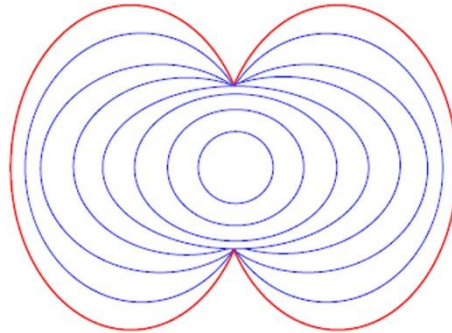
Даље се профили (слика 4.12) суперпонирају један преко другог и добијају глатке контуре за генерисање путање алата (слика 4.13). Примећује се да фазе еволуције криве не поштују контуру удубљења. Ова појава је приметна у свим неконвексним угловима где је кривина мања од нуле.



Слика 4.13. Суперпонирање еволуција криве у различитим тренуцима: (а) са малим временским кораком; (б) са великим временским кораком [68]

То се може исправити применом модификованог закона померања у складу са кривином:

$$\begin{aligned} F_{curv} &= -bk, & k \geq 0, \\ F_{curv} &= -bk, & k < 0. \end{aligned} \tag{4.5}$$



Слика 4.14. Крива нултог реда у различитим фазама еволуције по модификованом закону померања у складу са кривином [68]

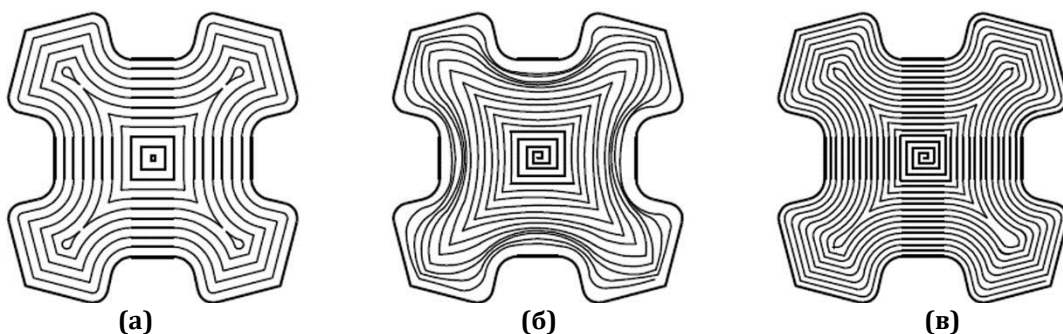
Наведена формулација обезбеђује контуре које се прилагођавају контури удубљења и конвергирају кружници. Међутим дубина резања се мења, креће се од нуле до максималне вредности која зависи од брзине еволуције криве. Даник [68] је развио методологију за ограничење брзине еволуције према максималној дозвољеној дубини резања.

Метода генерисања путања алата које се прилагођавају облику џепа заснована на 2D Лапласовој параметризацији контуре удубљења и редистрибуцији оригиналних Лапласових изопараметарских линија предложен је у [80] за генерисање непрекидних путања алата (слика 4.15).

Алгоритам за генерисање путање алата на овај начин састоји се из следећих корака:

- 1.корак: Конструкција путање завршног пролаза контурног глодања
- 2.корак: Подела границе зазора на четири сегмента применом Лапласове параметризације.
3. корак: Генерисање 2D параметризације за подручје ограничено границом зазора.
4. корак: Репараметризација 2D мреже редистрибуцијом на основу дужине лука.
5. корак: Конструкција коначне непрекидне путање алата за обраду удубљења.

Комплетна обрада удубљења се остварује једном спиралном путањом, нема повратних ходова алата и путања је прилагођена облику удубљења. Метода може да се примени на удубљења произвољног облика са или без унутрашњих испупчења.



Слика 4.15. Упоредни приказ различитих начина генерисања путања алата за обраду џепа [80]: (а) путања паралелна контури, (б) путања по Лапласовој контури и (в)

Битерман (*Bieterman*) је развио методу за генерисање криволинијске путање алата за обраду удубљења спиралним повезивањем контура пажљиво изабраних математичких функција којима је дефинисана контура удубљења [75]. На тај начин путања се трансформише од веома глатке у центру удубљења до путање облика контуре удубљења на периферији удубљења (слика 4.16). Спирална криволинијска путања има малу, скоро константну, кривину у околини центра и постепено поприма облик контуре удубљења како се приближава периферном делу удубљења. Математичка функција која се користи за обликовање криволинијске путање је приближно решење скаларне елиптичне парцијалне диференцијалне једначине другог реда. Проблем је дефинисан на дводимензионалној области удубљења чија је контура померена паралелно ка центру за вредност полупречника глодала. Проблем својствених вредности решен је приближном методом Лапласа:

$$-\nabla^2 u = \lambda u, \quad (4.6)$$

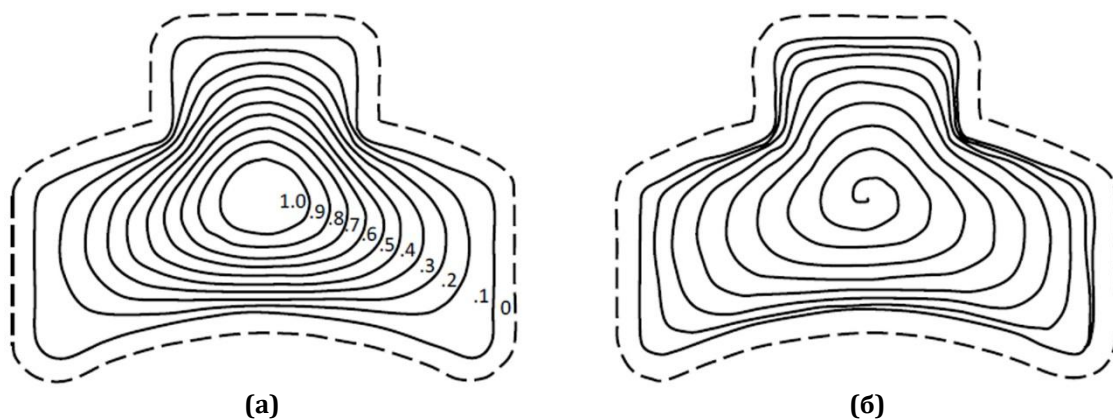
према Дирихлеовим граничним условима $u=0$ и нормализацијом:

$$\max_{(x,y)} u(x,y) = 1, \quad (4.7)$$

за главне својствене функције u (које одговарају најмањим позитивним својственим вредностима $(\{\lambda_j\}_j = 1, \infty)$).

Облик диференцијалне једначине (4.6) је коришћен зато што оваква једначина има особине које су погодне за добијање приближно оптималне криволинијске спиралне путање.

Спирално се повезују путање u на одговарајућем међусобном растојању, па се наставља путању по путању све док се не обради цело удубљење. Растојање између путања је максимални преклоп или дубина разанања које дефинише пројектант технологије. Дискретна путања може се заменити двоструко непрекидном диференцијабилном параметарском кривом која се уклапа у дискретизовану путању.



Слика 4.16. Илустрација методе [75] за генерисање путање: (а) контуре по којима се води криволинијска путања, (б) криволинијска путања алата за обраду удубљења

Промена облика путање елиминисе унутрашње уске углове који се појављују у конвенционалним путањама и даје значајне предности као што је скраћење времена обраде, смањење хабања алата и повећање радног века вретена машине алатке.

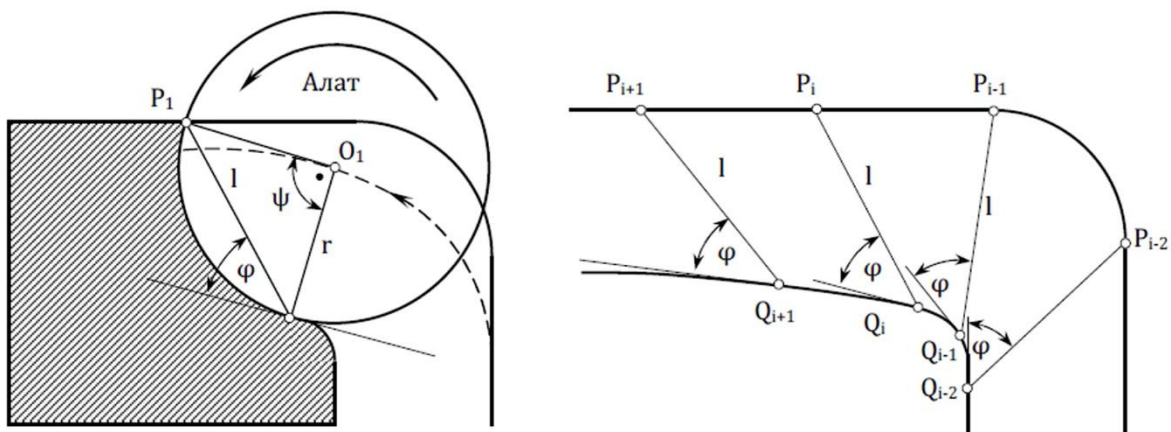
4.2.4. Путање алата са константним углом захвата

Промена угла захвата током процеса обраде доводи до промене оптерећења, што, нарочито код завршне обраде, изазива варирање сила резања и еластичне деформације алата, што доводи до смањења тачности и квалитета обрађене површине. Како је угао захвата код обимног глодања резултат задате путање алата и дубине резања, последице његове варијације се обично компензују варирањем дебљине струготине и корака. У литератури се може наћи свега неколико приступа креирању путање алата са константним углом захвата.

Један оригиналан приступ модификовању путање алата, добијене офсетовањем, тако да зона захвата остаје непроменљива приказан је у [51]. Аутори су разматрали проблем како за задату криву која представља контуру претходно обрађене површине одредити две нове криве: путању центра алата и новонасталу контуру обрађене површине, тако да угао захвата буде константан (слика 4.17).

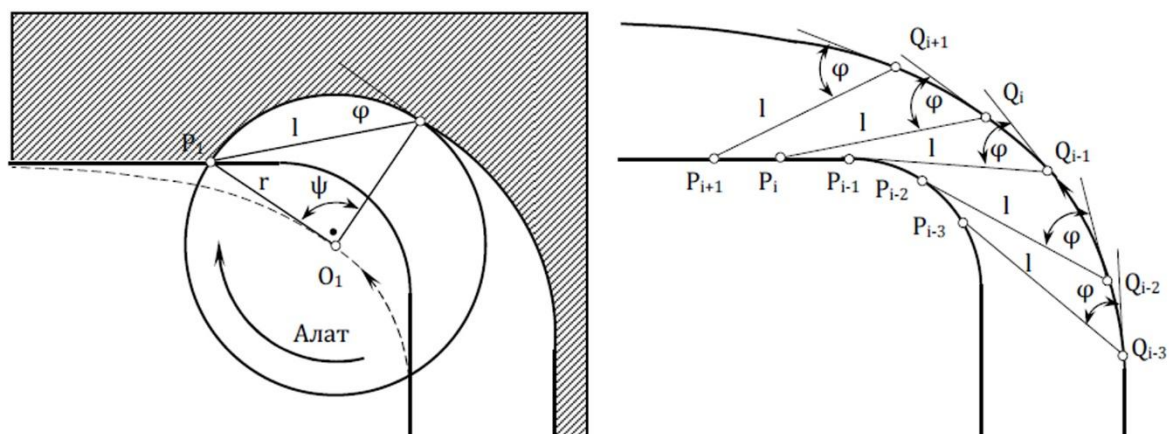
Ако се узме да је тачка O_i је тренутни положај центра алата, тачка Q_i пресек алата са претходно обрађеном површином, а тачка P_i пресек алата са новонасталом обрађеном површином, алат је у захвату по луку POQ . При томе је обрађена површина тангентна на алат у тачки контакта $Q'Q \perp OQ$. Из једнакокраког троугла OPQ произилази да је: $\angle Q'QP = \varphi = \psi/2$. Да би угао захвата био константан, растојање између тачака контакта на претходној и новој обрађеној површини мора да буде константно:

$$PQ = l = \sqrt{2r^2(1 - \cos\psi)} = const. \quad (4.8)$$



Слика 4.17. Услови тангентности за офсетовање ка центру удубљења при константном углу захвата [51]

На слици 4.18 приказане су исте геометријске релације за случај офсетовања контуре од центра ка периферији удубљења.

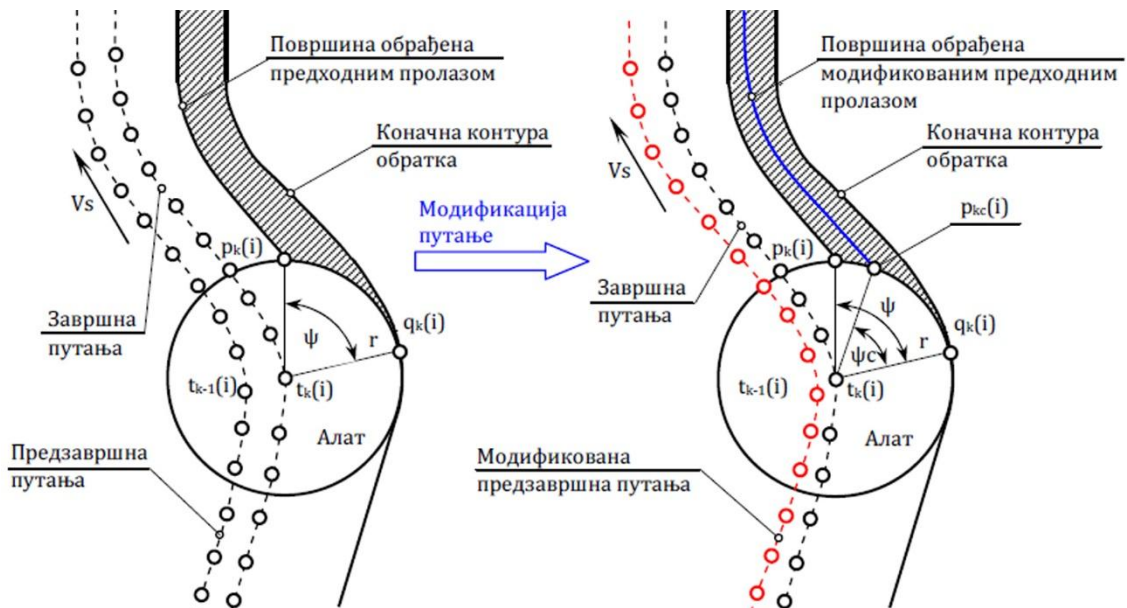


Слика 4.18. Услови тангентности за офсетовање ка периферији удубљења при константном углу захвата [51]

Приказани услови тангентности коришћени су у алгоритму за офсетовање контуре са константним углом захвата, а затим је његова примена проширена на генерисање путање алата за обраду конвексних удубљења. Међутим, примена ове методе је ограничена на конвексне облике џепова и при примени на обраду од центра ка периферији удубљења долази до појаве необрађених делова обратка, што захтева додатну обраду преосталог материјала. Примена методе је оправдана за грубу обраду, где је примарни циљ ефикасност обраде, али је практично неприменљива за захвате завршне обраде.

За разлику од претходно описаног метода, група аутора [62], [81] је предложила приступ у коме се модификује путања предзавршног захвата, тако да угао захвата при завршној обради буде константан, а да се геометрија путање за завршну обраду при томе не мења. Приступ је применљив на све дводимензионалне контуре произвољног облика који садрже конвексне и конкавне сегменте, уколико постоји геометријски могуће решење које испуњава услов константног угла захвата.

За задату раванску криву која представља жељену коначну контуру удубљења и путању алата паралелну контури за завршну обраду, алгоритам прорачунава претходну унутрашњу путању алата предзавршне обраде тако да угао захвата има тражену константну вредност при захвату завршне обраде (слика 4.19).



Слика 4.19. Концепт алгоритма за генерисање путање алата са модификованим углом захвата [62]

Нека је трајекторија центра алата за завршну обраду $t_k(i) \in R^2 (i = 1, \dots, N_k)$. Угао захвата ψ је дефинисан положајем центра алата $t_k(i)$, пресецима обима алата са површином која се обрађује $q_k(i)$ и са претходно обрађеном површином $p_k(i)$. Предложеним алгоритмом се модификује положај пресека алата са претходно обрађеном површином $p_k(i)$ у циљу регулисања угла захвата. Како претходно обрађена површина настаје претходним унутрашњим захватом (предзавршном обрадом), она се модификује померањем трајекторије центра алата за предзавршну обраду.

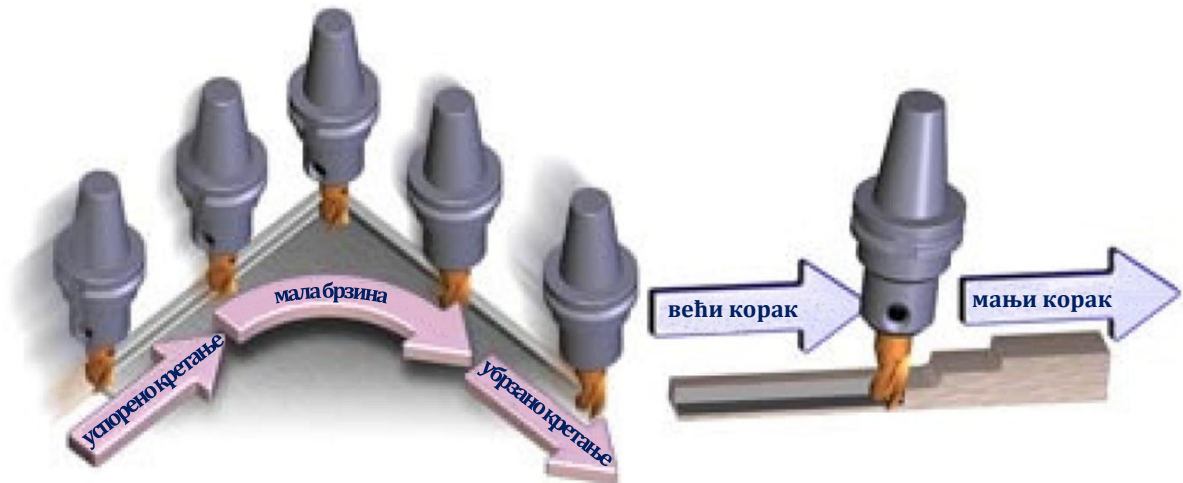
Експериментално је показано да је применом модификоване путање предзавршне обраде значајно смањено варирање сила резања, што је резултирало значајним повећањем тачности обраде у поређењу са путањом паралелном контури при константном кораку.

4.3. Путање алата у САМ системима

У данашњем конкуретном производном окружењу, пројектанти тахнологије глодања суочавају се са честим променама конструкције производа, захтевима за високим квалитетом и високом продуктивношћу. Како би испунили ове захтеве, типична модерна мала предузеће усвајају напредне CAD/CAM системе и CNC центре за високобрзинску обраду. Данашњи САМ системи су веома успешни у конструкцији путања алата којима се постиже жељени облик обратка. Компресија NC програма за обраду глодањем и динамичка оптимизација брзине помоћног кретања су неке од функционалности које се остварују применом савремених САМ система [68].

Неки САМ системи имају функцију великих брзина помоћног кретања (енг. *High Feed Machining function*) која може да оптимизира било коју двоосну или троосну путању на основу количине материјала који се одстрањује и ограничења машине алатке како би се оствариле ефикасне, променљиве вредности брзине помоћног кретања за сваки захват. Ова функција може да:

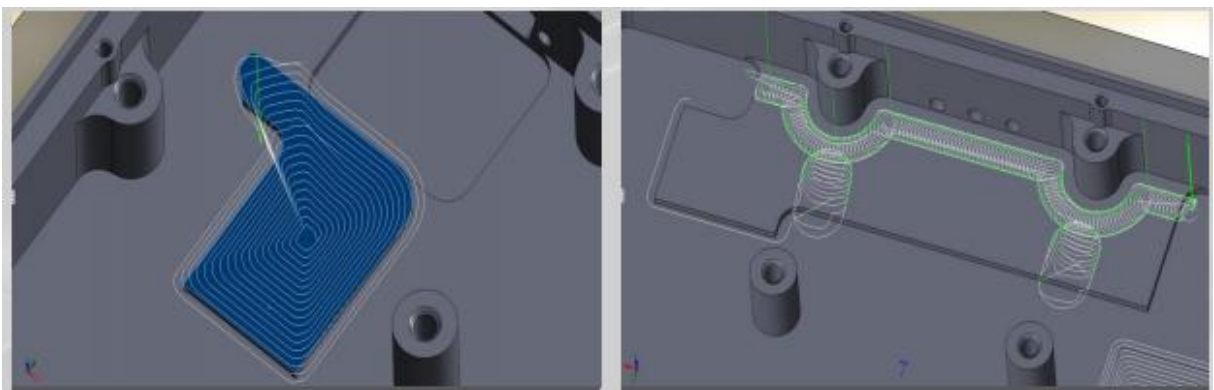
- Аутоматски мења брзину кретања алата на основу запремине која се у том тренутку обрађује. ако се одстрањује већа количана материјала, алат успорава кретање; ако се обрађује мања запремина материјала, алат убрзава кретање.
- Алат аутоматски успорава кретање при уласку у угао и убрзава кретање при изласку из угла (слика 4.20).



Слика 4.20. Напредне функције САМ система [82]

Идеално би било када би цело подручје које треба да се обради могло да буде обрађено спиралном путањом алата. Алгоритам *iMachining Rough Cut* развијен у неким САМ системима омогућује најближе могуће решење идеалном (слика 4.21). Он дели подручје на оптимални број подподручја која се могу обрадити преобликованом спиралном путањом, тако да укупно време обраде целог подручја буде минимално. При томе користи модификоване путање *D* типа за обраду жлебова којима се повезују подподручја. Још једна веома важна предност примене овог алгоритма је у томе, да се у свакој тачки путање алата дебљина струготине, корак и број обртаја поклапају са оптималним вредностима похрањеним у технолошкој бази података (енг. *Technology Wizard*).

Преобликоване спиралне путање алата (енг. *Morphing Spiral Tool Path*) добиле су назив према својој особини да се постепено прилагођавају облику подручја које се обрађује, што значајно скраћује време обраде.



Слика 4.21. Прилагођавајуће спиралне путање и интелигентно раздвајање подручја обраде у *iMachining* [83]

Комерцијални САМ системи ретко узимају у обзир физикалност процеса обраде у смислу преноса топлоте и механичких оптерећења током обраде глодањем, који негативно утичу на квалитет обрађене површине, те су потребне експерименталне пробе за сваку нову конструкцију производа и за сваку комбинацију материјала обратка и алата. САМ системи не могу да упореде различите стратегије путања алата према разним показатељима квалитета процеса обраде. Уобичајено је да се дужина путање користи као показатељ ефикасности процеса обраде, што је у контексту високобрзинске обраде непоуздан показатељ ефикасности процеса глодања.

Могућности процеса високобрзинске обраде нису у индустријској пракси потпуно искоришћене због промена услова обраде током процеса, услед променљиве тренутне геометрије обратка у захвату дуж путање алата. Упркос развоју САМ система и модерних машина алатки, у реалном индустријском окружењу, пројектанти технологије и даље користе следеће кораке како би пројектовали технологију за обраду конкретног производа:

- методу пробе и грешке,
- прописивање конзервативних режима обраде и
- примену додатних захвате обраде како би остварили тражени квалитет.

Очигледно је да је потребан велики број пробних експеримената и калибрације, који нису продуктивни и одузимају време. Даље, при најмањој промени геометријске форме обратка, потребно је поновити комплетну процедуру. На тај начин, нити су у потпуности искоришћене могућности машина алатки за високобрзинску обраду, нити напредне функције САМ система.

4.4. Закључне напомене

При конвенционалном генерисању путање алата заступљен је искључиво геометријски аспект, док се остале појаве, као што су силе резања и самопобудне вибрације обично занемарују у фази генерисања путање [84]. У овом поглављу приказани су различити начини генерисања путање алата при конвенционалном приступу, као и напредне методе за генерисање путање које узимају у обзир захтеве високобрзинске обраде.

Комерцијални САМ системи ретко узимају у обзир физикалност процеса, па је потребна експериментална провера за сваку промену геометријске форме обратка и комбинацију алата и материјала који се обрађује.

Комерцијални САМ системи немају могућност поређења различитих стратегија путања алата на основу различитих индикатора процеса глодања. Дужина путање се обично користи као индикатор ефикасности процеса, што не важи за обраду великим брзинама.

У дисертацији је развијен програмски систем којим се могу поредити различите путање алата генерисане применом САМ система избором различитих стратегија обраде.

**ПРОГРАМСКИ СИСТЕМ ЗА ПРАЋЕЊЕ
ЕЛЕМЕНАТА И ФАКТОРА ОБРАДЕ ДУЖ
ПУТАЊЕ АЛАТА**

У оквиру дисертације развијен је специјални програмски систем (*NCTPPE- NC Tool Path Postprocessor Evaluator*), за израчунавање фактора резања при глодању, на основу података садржаних у NC програмима, који су генерисани комерцијалним САМ системима. У NC програму су садржани основни технолошки подаци (задати број обртаја и корак), кинематски и геометријски подаци (начин кретања алата и координате тачака на путањи алата). Међутим, за прорачуне фактора резања неопходни су елементи процеса резања (угао захвата, дубина и ширина резања) који нису садржани у NC програмима. Неопходни елементи процеса резања могу се израчунати ако су, поред података садржаних у генерисаним NC програмима, дефинисане геометријске карактеристике припремка и геометријске и технолошке карактеристике алата.

Подаци из NC програма се најпре трансформишу у одговарајуће базе података и израчунавају се све вредности потребне за генерисање путање и начина кретања алата. Даје се матрични опис геометрије припремка и алата и на бази трансформисаних података из NC програма креира се кретање алата у односу на припремак.

Као резултат се добија међусобни положај алата и припремка дуж путање, на основу чега се израчунавају елементи процеса резања. На овај начин могуће је пратити промене дубине и ширине резања и угла захвата током процеса обраде. Такође, може се утврдити профил корака и брзине помоћног кретања дуж путање алата. На основу овако добијених елемената процеса резања, даље се израчунавају вредности сила резања и брзине резања током процеса обраде, укупна дужина путање и време обраде, чијом анализом се може оценити адекватност путање алата.

У том циљу, програмски систем треба да изврши:

- детаљан опис параметара путање алата на основу генерисаног NC програма,
- геометријски опис припремка,
- геометријски опис алата,
- израчунавање елемената процеса резања према међусобном положају припремка и алата на путањи и
- ажурирање геометријског описа припремка према положају алата на путањи.

5.1. Структура NC програма

На основу анализе структуре NC програма, програмског блока и података садржаних у NC програмима, одређују се сви параметри потребни за формирање табела базе података. NC програми имају структуру [85] приказану у табели 5.1.

Табела 5.1-Структура NC програма

Назив NC програма Идентификациони број NC програма Идентификациони број палете Редни број стезања	почетак програма
...	
001 Операција Геометрија, Кретање, Интерполације Алат, Режији обраде, Технолошки услови ...	садржај програма
002 Операција	
003 Операција	
...	
END	крај програма

Постпроцесорски излаз из NC програма су: NC код, CL листа (*CL -cutter location*) и PP листа (*PP – post processor*). NC код садржи податке о идентификацији алата, режимима обраде, машинским функцијама и путањама алата, док су у CL листи смештени подаци о укупном времену обраде, броју измена алата и броју индексирања.

Излазни параметри из NC програма (статистички излаз) су: број операција, време трајања сваке операције, број индексирања, број алата, број измена алата, укупно време обраде, укупно време индексирања и укупно време измена алата.

5.1.1. Структура NC програмског блока

Садржај NC програма је састављен од програмских блокова (секвенци) [86]. Сваки програмски блок почиње словом N и састоји се од једне или више програмских речи које почињу словним знаком иза којег је низ нумеричких ознака које чине садржај речи. Сви технолошки, кинематски и геометријски параметри су одређени почетком програмске речи (табела 5.1).

Табела 5.1- Структура NC програмског блока [87]

N	G	X	Y	Z	I	J	K	R	F	S	T	M	
↙													N - ознака почетка новог програмског реда (блока)
	↙												G - начин кретања алата током извршења операције
		↙											X, Y, Z - координате циљне тачке алата
			↙										I, J, K - координате помоћне тачке за кружну интерполацију
				↙									R – референтна раван/полупречник кружне интерполације
					↙								F - брзина помоћног кретања (корак)
						↙							S - брзина главног кретања (број обртаја)
							↙						T- број алата
								↙					M - функција која означава извршне функције машине

Програмска реч дефинисана словом G представља G-функцију (*G-go*) која означава начин кретања алата током извршења операције. G-функције су углавном стандардизоване (табела 5.2), али и зависе од CNC управљачког система.

Табела 5.2 - Најчешће коришћене G-функције

G-функција	Назив
G00	Позиционирање са максималном брзином (брзи ход)
G01	Линеарна интерполација
G02	Циркуларна интерполација у смеру обртања казаљке на (CW)
G03	Циркуларна интерполација у смеру супротном обртању казаљке на сату (CCW)
G17	Избор равни XY
G18	Избор равни ZX
G19	Избор равни YZ
G20	Мере у инчима
G21	Мере у милиметрима
G28	Повратак у референтну тачку
G29	Повратак из референтне тачке
G33	Обрада навоја
G40	Коректура радијуса глодала искључена
G41	Коректура радијуса путање налево
G42	Коректура радијуса путање надесно
G50	Програмирање апсолутне нуле
G80	Искључење циклуса бушења
G81	Циклус бушења
G82	Циклус развртања
G83	Циклус бушења дубоких отвора
G84	Циклус урезивања навоја
G90	Програмирање апсолутних величина
G91	Програмирање релативних величина
G92	Програмирање апсолутне нуле
G94	Корак по минути
G95	Корак по обрту
G98	Повратак на иницијалну раван
G99	Повратак на R раван

Програмска реч дефинисана словом M представља M-функцију (*M-machine*) која дефинише извршне функције обрадног центра. M-функције су углавном стандардизоване (табела 5.3), али и зависе од конфигурације CNC управљачког система.

Табела 5.3 - Најчешће коришћене M-функције

M-функција	Назив
M 00	Заустављање програма
M 01	Условно заустављање програма
M 02	Крај програма
M 03	Обртање вретена у смеру обртања казаљке на сату
M 04	Обртање вретена у смеру супротном обртању казаљке на сату
M 05	Заустављање вретена
M 06	Измена алата
M 08	Хлађење укључено
M 09	Хлађење искључено
M 30	Крај програма

5.1.2. Анализа података у НС програмима

У циљу формирања релационе базе података путања алата за задате НС програме, потребно је да се технолошки, кинематски и геометријски подаци о путањи алата садржани у самим НС програмима трансформишу у табеле базе података.

5.1.2.1. Технолошки подаци

Подаци о алатима који се користе у стегању се одређују на основу НС програмских блокова који садрже програмску реч са почетком Т и функције М06 [88]. Другим речима, алат са бројем a_{obr} почиње да се користи у програмском блоку $b_{i_1}^{NC}$ који садржи функцију М06, а престаје да се користи у програмском блоку $b_{i_0}^{NC}$ непосредно испред блока који садржи следећу функцију М06, односно престаје да се користи у програмском блоку $b_{i_0}^{NC}$ који садржи једну од функција М00, М19 или М30:

$$\begin{aligned} a_{obr} &= f('T'), \quad 'T' \in b_i^{NC}, \quad 'M06' \in b_i^{NC}, \\ i_1 &= i, \quad 'M06' \in b_i^{NC}, \\ i_0 &= i - 1, \quad 'M06' \in b_i^{NC}, \\ i_0 &= i, \quad f(m) \in b_i^{NC}, \quad f(m) = \{M00, M19, M30\}, \end{aligned} \quad (5.1)$$

где је $f('T')$ евалуација ознаке алата.

Вредност брзине главног кретања (броја обртаја) s_{obr} одређује се на основу НС програмских блокова који садрже програмску реч са почетком S:

$$s_{obr} = f('S'), \quad 'S' \in b_i^{NC}, \quad (5.2)$$

где је $f('S')$ евалуација броја обртаја.

Брзина главног кретања (броја обртаја) добија вредност s_{obr} у програмским блоковима који садрже М-функције М03 и М04, а вредност 0 у програмским блоковима који садрже функције М00 и М30 или непосредно иза блока који садржи функцију М05:

$$s = \begin{cases} s_{obr}, & f(m) \in b_i^{NC}, i_1 = i, f(m) = \{M03, M04\} \\ 0, & f(m) \in b_i^{NC}, i_0 = i, f(m) = \{M00, M30\} \\ 0, & f(m) \in b_i^{NC}, i_0 = i + 1, f(m) = \{M05\} \end{cases} \quad (5.3)$$

Смер обртања главног вретена добија (мења) вредност у програмским блоковима који садрже М-функције М03 и М04.

Вредност корака f_{obr} одређује се на основу НС програмских блокова који садрже програмску реч са почетком F:

$$f_{obr} = f('F'), \quad 'F' \in b_i^{NC}, \quad (5.4)$$

где је: $f('F')$ евалуација корака.

Корак мења вредност у програмским блоковима који садрже G-функције:

$$f_g = \begin{cases} f_{obr}, f(g) \exists b_i^{NC}, f(g) = \{G01, G02, G03, G81, G82, G83, G84, \dots\} \\ 0, f(g) \exists b_i^{NC}, f(g) = \{G00, G80\} \end{cases} \quad (5.5)$$

Вредност корака израчунава се у mm/o у зависности од претходно дефинисаних G-функција G20/G21 и G94/ G95, односно да ли се вредност корака у NC програмским блоковима задаје у mm/o (G21) или у inch/o (G20) за G95, или се задаје брзина помоћног кретања у mm/min (G21) или у inch/min (G20) за G94:

$$f = \begin{cases} f_g, f(g) \exists b_i^{NC}, f(g) = \{G21 \wedge G95\} \\ 25.4 \cdot f_g, f(g) \exists b_i^{NC}, f(g) = \{G20 \wedge G95\} \\ \frac{f_g}{n}, f(g) \exists b_i^{NC}, f(g) = \{G21 \wedge G94\} \\ 25.4 \cdot \frac{f_g}{n}, f(g) \exists b_i^{NC}, f(g) = \{G20 \wedge G94\}. \end{cases} \quad (5.6)$$

5.1.2.2. Кинематски и геометријски подаци

Кинематски и геометријски подаци се израчунавају у апсолутним величинама за сваки програмски блок на основу вредности координата наведених у том програмском блоку и вредности координата наведених у претходним блоковима.

У сваком програмском блоку израчунавају се вредности координата у зависности од апсолутног (G90) или релативног (G91) задавања величина:

- x_1, y_1, z_1 - на почетку пута одређеног програмским блоком,
- x_2, y_2, z_2 - на крају пута одређеног програмским блоком,

за функције:

- G00 (табела 5.5),
- G01 (табела 5.5),
- G81, G82, ... G89 (табела 5.6),
- G81, G82, ... G89 (табела 5.7),
- G98 (табела 5.8),
- G98, G99 (табела 5.9).

Вредности координата израчунавају се у зависности од претходно дефинисаних G-функција G20/G21, односно да ли се вредности координата у NC програмским блоковима задају у mm (G21) или у inch (G20):

$$K = \{x_1, y_1, z_1, x_2, y_2, z_2, \},$$

$$K = \begin{cases} K, f(g) \in b_j^{NC} \Big|_{j=1}^{i-1}, f(g) = G21 \\ 25.4 \cdot K, f(g) \in b_j^{NC} \Big|_{j=1}^{i-1}, f(g) = G20. \end{cases} \quad (5.7)$$

Вредности координата x_1, y_1, z_1 одређеног програмског блока су једнаке вредностима координата x_2, y_2, z_2 претходног програмског блока, односно:

$$x_1 = x_2 \in b_{i-1}^{NC}$$

$$y_1 = y_2 \in b_{i-1}^{NC}$$

$$z_1 = z_2 \in b_{i-1}^{NC}$$

(5.8)

Табела 5.5 - Вредности координата за функције G00 и G01

за G90	за G91
$x = \begin{cases} f('X'), 'X' \in b_i^{NC} \\ x_1, 'X' \notin b_i^{NC} \end{cases}$ $y = \begin{cases} f('Y'), 'Y' \in b_i^{NC} \\ y_1, 'Y' \notin b_i^{NC} \end{cases}$ $z = \begin{cases} f('Z'), 'Z' \in b_i^{NC} \\ z_1, 'Z' \notin b_i^{NC} \end{cases}$	$x = \begin{cases} f('X'), 'X' \in b_i^{NC} \\ 0, 'X' \notin b_i^{NC} \end{cases}$ $y = \begin{cases} f('Y'), 'Y' \in b_i^{NC} \\ 0, 'Y' \notin b_i^{NC} \end{cases}$ $z = \begin{cases} f('Z'), 'Z' \in b_i^{NC} \\ 0, 'Z' \notin b_i^{NC} \end{cases}$
$x_2 = x$ $y_2 = y$ $z_2 = z$	$x_2 = x_1 + x$ $y_2 = y_1 + y$ $z_2 = z_1 - z$
<p>где је: x, y, z - вредности координата наведених у i-том програмском блоку, $f('X'), f('Y'), f('Z')$ - евалуација координата према $\{G20, G21\}$. $f(g)$ = $\{G00, G01\}$.</p>	

Табела 5.6 - Вредности координата за функције G81, G82, ... G89

за G90	за G91
$x = \begin{cases} f('X'), 'X' \in b_i^{NC} \\ x_1, 'X' \notin b_i^{NC}, f(g) \in b_i^{NC} \end{cases}$ $y = \begin{cases} f('Y'), 'Y' \in b_i^{NC} \\ y_1, 'Y' \notin b_i^{NC}, f(g) \in b_i^{NC} \end{cases}$ $r = \begin{cases} f('R'), 'R' \in b_i^{NC} \\ r_o, 'R' \notin b_i^{NC}, f(g) \in b_i^{NC} \end{cases}$	$x = \begin{cases} f('X'), 'X' \in b_i^{NC} \\ 0, 'X' \notin b_i^{NC}, f(g) \in b_i^{NC} \end{cases}$ $y = \begin{cases} f('Y'), 'Y' \in b_i^{NC} \\ 0, 'Y' \notin b_i^{NC}, f(g) \in b_i^{NC} \end{cases}$ $r = \begin{cases} f('R'), 'R' \in b_i^{NC} \\ 0, 'R' \notin b_i^{NC}, f(g) \in b_i^{NC} \end{cases}$
$x_2 = x; y_2 = y; z_2 = r$	$x_2 = x_1 + x; y_2 = y_1 + y; z_2 = z_1 - r$
<p>где је:</p> <ul style="list-style-type: none"> r - координата референтне равни, r_o - координата референтне равни наведена пре i-тог програмског блока, $f('R')$ - евалуација координата, $f(g)$ = {G81, G82, ... G89}. 	

Табела 5.7 - Вредности координата за функције G81, G82, ... G89

за G90	за G91
$z = \begin{cases} f('Z'), 'Z' \in b_i^{NC} \\ z_1, 'Z' \notin b_i^{NC} \end{cases}$ $r = \begin{cases} f('R'), 'R' \in b_i^{NC} \\ r_o, 'R' \notin b_i^{NC} \end{cases}$	$z = \begin{cases} f('Z'), 'Z' \in b_i^{NC} \\ 0, 'Z' \notin b_i^{NC} \end{cases}$ $r = \begin{cases} f('R'), 'R' \in b_i^{NC} \\ r_o, 'R' \notin b_i^{NC} \end{cases}$
$z_2 = z$	$z_2 = z_1 - z$

Табела 5.8 - Вредности координата за функције G98

за G90	за G91
$x = \begin{cases} f('X'), 'X' \in b_i^{NC} \\ x_1, 'X' \notin b_i^{NC} \end{cases}$ $y = \begin{cases} f('Y'), 'Y' \in b_i^{NC} \\ y_1, 'Y' \notin b_i^{NC} \end{cases}$ $z_i = \begin{cases} f('Z'), 'Z' \in b_i^{NC}, f(g) \in b_j^{NC} |_{j=1}^{i-1} \\ 0, f(g) \notin b_j^{NC} |_{j=1}^{i-1} \end{cases}$	$x = \begin{cases} f('X'), 'X' \in b_i^{NC} \\ 0, 'X' \notin b_i^{NC} \end{cases}$ $y = \begin{cases} f('Y'), 'Y' \in b_i^{NC} \\ 0, 'Y' \notin b_i^{NC} \end{cases}$ $z_i = \begin{cases} f('Z'), 'Z' \in NCb(j), f(g) \in b_j^{NC} |_{j=1}^{i-1} \\ 0, f(g) \notin b_j^{NC} |_{j=1}^{i-1} \end{cases}$
$x_2 = x; y_2 = y; z_2 = z_i$	$x_2 = x_1 - x; y_2 = y_1 - y; z_2 = z_1 + z_i$
<p>где је: z_i - z координата иницијалне равни дефинисане функцијама G50 или G92, $f(g)$ = {G50, G92}.</p>	

Табела 5.9 - Вредности координата за функције G98 и G99

за G90	за G91
$z = \begin{cases} f('Z'), 'Z' \in b_i^{NC} \\ z_1, 'Z' \notin b_i^{NC} \end{cases}$ $r = \begin{cases} f('R'), 'R' \in b_i^{NC} \\ r_0, 'R' \notin b_i^{NC} \end{cases}$	$z = \begin{cases} f('Z'), 'Z' \in b_i^{NC} \\ 0, 'Z' \notin b_i^{NC} \end{cases}$ $r = \begin{cases} f('R'), 'R' \in b_i^{NC} \\ r_0, 'R' \notin b_i^{NC} \end{cases}$
$z_2 = r$	$z_2 = r$

У сваком програмском блоку израчунавају се вредности координата у зависности од апсолутног (G90) или релативног (G91) задавања величина:

- x_1, y_1, z_1 - на почетку пута одређеног програмским блоком,
- x_2, y_2, z_2 - на крају пута одређеног програмским блоком,

као и вредности:

- x_c, y_c, z_c - координата центра кружне интерполације,
- r - полупречника кружне интерполације,
- α_0 - почетни угао кружне интерполације,
- α - угао кружне интерполације,

за функције: G02 и G03.

Вредности координата израчунавају се у зависности од претходно дефинисаних G-функција G20/G21, односно да ли се вредности координата у NC програмским блоковима задају у mm (G21) или у inch (G20):

$$K = \{ x_1, y_1, z_1, x_2, y_2, z_2, x_c, y_c, z_c, r \},$$

$$K = \begin{cases} K, f(g) \in b_j^{NC} \Big|_{j=1}^{i-1}, f(g) = G21 \\ 25.4 \cdot K, f(g) \in b_j^{NC} \Big|_{j=1}^{i-1}, f(g) = G20. \end{cases} \quad (5.9)$$

Апсолутне вредности координата x_1, y_1, z_1 и x_2, y_2, z_2 израчунавају се по истом поступку као и за G01 (табела 5.5). Вредности координата x_1, y_1, z_1 одређеног програмског блока су једнаке вредностима координата x_2, y_2, z_2 претходног програмског блока, односно:

$$\begin{aligned} x_1 &= x_2 \in b_{i-1}^{NC}, \\ y_1 &= y_2 \in b_{i-1}^{NC}, \\ z_1 &= z_2 \in b_{i-1}^{NC}. \end{aligned} \quad (5.10)$$

Уколико су дефинисане координате центра кружне интерполације x_c, y_c, z_c неопходно је израчунати полупречник r , почетни угао α_0 и угао α кружне интерполације (табела 5.10).

Табела 5.10 - Полупречник r , почетни угао α_0 и угао α кружне интерполације за задате x_0, y_0, z_c

за G02 и G17	за G03 и G17
$i = \begin{cases} f(I), I' \in b_i^{NC} \\ 0, I' \notin b_i^{NC} \end{cases}$ $j = \begin{cases} f(J), J' \in b_i^{NC} \\ 0, J' \notin b_i^{NC} \end{cases}$ $r = \sqrt{i^2 + j^2}$	
$x_c = x_1 + i$ $y_c = y_1 + j$ $\alpha_0 = \left| \arctg \left( \frac{y_1 - y_c}{x_1 - x_c} \right) \right|$ $\alpha_0 = \begin{cases} \alpha_0, y_1 - y_c \geq 0 \wedge x_1 - x_c \geq 0 \\ 180 - \alpha_0, y_1 - y_c \geq 0 \wedge x_1 - x_c < 0 \\ 180 + \alpha_0, y_1 - y_c < 0 \wedge x_1 - x_c < 0 \\ 360 - \alpha_0, y_1 - y_c < 0 \wedge x_1 - x_c \geq 0 \end{cases}$ $\alpha_1 = \left| \arctg \left( \frac{y_2 - y_c}{x_2 - x_c} \right) \right|$ $\alpha_1 = \begin{cases} \alpha_1, y_2 - y_c \geq 0 \wedge x_2 - x_c \geq 0 \\ 180 - \alpha_1, y_2 - y_c \geq 0 \wedge x_2 - x_c < 0 \\ 180 + \alpha_1, y_2 - y_c < 0 \wedge x_2 - x_c < 0 \\ 360 - \alpha_1, y_2 - y_c < 0 \wedge x_2 - x_c \geq 0 \end{cases}$	
за G02 и G18	за G03 и G18
$k = \begin{cases} f(K), K' \in b_i^{NC} \\ 0, K' \notin b_i^{NC} \end{cases}$ $i = \begin{cases} f(I), I' \in b_i^{NC} \\ 0, I' \notin b_i^{NC} \end{cases}$ $r = \sqrt{k^2 + i^2}$	

Табела 5.10- наставак 1

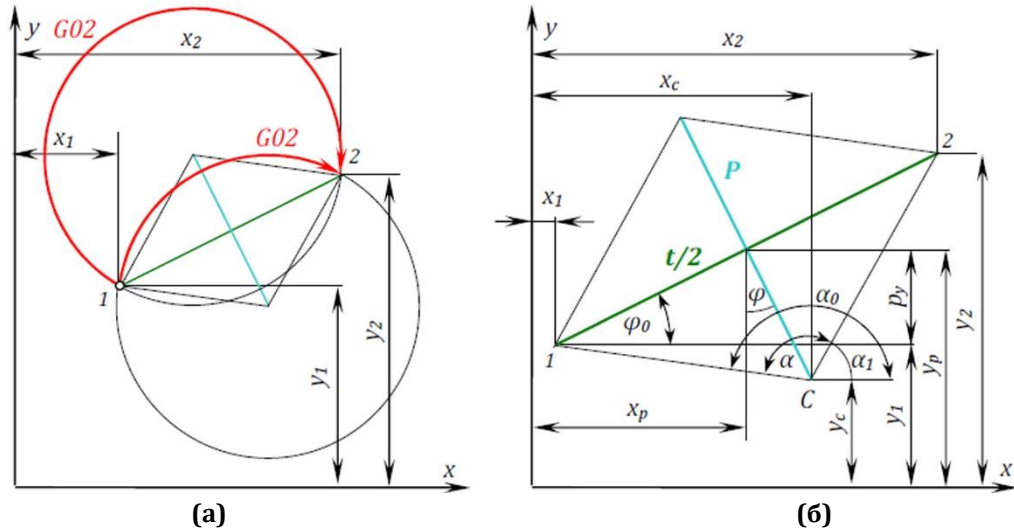
$z_c = z_1 + k$ $x_c = x_1 + i$ $\alpha_0 = \left| \arctg \left( \frac{x_1 - x_c}{z_1 - z_c} \right) \right|$ $\alpha_0 = \begin{cases} \alpha_0, & x_1 - x_c \geq 0 \wedge z_1 - z_c \geq 0 \\ 180 - \alpha_0, & x_1 - x_c \geq 0 \wedge z_1 - z_c < 0 \\ 180 + \alpha_0, & x_1 - x_c < 0 \wedge z_1 - z_c < 0 \\ 360 - \alpha_0, & x_1 - x_c < 0 \wedge z_1 - z_c \geq 0 \end{cases}$ $\alpha_1 = \left| \arctg \left( \frac{x_2 - x_c}{z_2 - z_c} \right) \right|$ $\alpha_1 = \begin{cases} \alpha_1, & x_2 - x_c \geq 0 \wedge z_2 - z_c \geq 0 \\ 180 - \alpha_1, & x_2 - x_c \geq 0 \wedge z_2 - z_c < 0 \\ 180 + \alpha_1, & x_2 - x_c < 0 \wedge z_2 - z_c < 0 \\ 360 - \alpha_1, & x_2 - x_c < 0 \wedge z_2 - z_c \geq 0 \end{cases}$	
<p>за G02 и G19</p>	<p>за G03 и G19</p>
$j = \begin{cases} f(J'), & J' \in b_i^{NC} \\ 0, & J' \notin b_i^{NC} \end{cases}$ $k = \begin{cases} f(K'), & K' \in b_i^{NC} \\ 0, & K' \notin b_i^{NC} \end{cases}$ $r = \sqrt{j^2 + k^2}$	

Табела 5.10- наставак 2

$y_c = y_1 + j$ $z_c = z_1 + k$ $\alpha_0 = \left| \arctg \left( \frac{z_1 - z_c}{y_1 - y_c} \right) \right|$ $\alpha_0 = \begin{cases} \alpha_0, z_1 - z_c \geq 0 \wedge y_1 - y_c \geq 0 \\ 180 - \alpha_0, z_1 - z_c \geq 0 \wedge y_1 - y_c < 0 \\ 180 + \alpha_0, z_1 - z_c < 0 \wedge y_1 - y_c < 0 \\ 360 - \alpha_0, z_1 - z_c < 0 \wedge y_1 - y_c \geq 0 \end{cases}$ $\alpha_1 = \left| \arctg \left( \frac{z_2 - z_c}{y_2 - y_c} \right) \right|$ $\alpha_1 = \begin{cases} \alpha_1, z_2 - z_c \geq 0 \wedge y_2 - y_c \geq 0 \\ 180 - \alpha_1, z_2 - z_c \geq 0 \wedge y_2 - y_c < 0 \\ 180 + \alpha_1, z_2 - z_c < 0 \wedge y_2 - y_c < 0 \\ 360 - \alpha_1, z_2 - z_c < 0 \wedge y_2 - y_c \geq 0 \end{cases}$	
$\alpha = \alpha_0 - \alpha_1$	
<p>где је:</p> <ul style="list-style-type: none"> i, j, k α_0 α $f('I'), f('J'), f('K')$ 	<ul style="list-style-type: none"> - вредности координата центра интерполационог круга, - почетни централни угао кружне интерполације, - централни угао који одговара кружном луку интерполације, - евалуација координата према {G20, G21}.

Уколико је дефинисан полупречник r , неопходно је израчунати координате центра кружне интерполације x_c, y_c, z_c , почетни угао α_0 и угао α кружне интерполације.

У општем случају, задавањем вредности координата x_1, y_1, z_1 и x_2, y_2, z_2 и полупречника r , за исту кружну интерполацију су могуће две путање које одговарају различитим кружним луковима (слика 5.1а) са различитим координатама центра. За израчунавање координата центра кружне интерполације x_c, y_c, z_c посматра се ромб странице r , чија је једна дијагонала тетива t (слика 5.1б).



Слика 5.1. Могуће путање алата и x_c, y_c, z_c за исте $x_1, y_1, z_1, x_2, y_2, z_2, r$ и исту кружну интерполацију (а) иста почетна и крајња тачка за исту врсту кружне интерполације а различите центре интерполације, (б) елементи за одређивање центра кружне интерполације

Координате средине тетиве x_p, y_p се могу приказати изразима:

$$x_p = x_1 + \frac{x_2 - x_1}{2} \text{ и} \quad (5.11)$$

$$y_p = y_1 + \frac{y_2 - y_1}{2}.$$

Дужина тетиве је:

$$t = \sqrt{(x_2 - x_1)^2 + (y_2 - y_1)^2}. \quad (5.12)$$

Угао φ који тетива заклапа са позитивним смером x -осе је:

$$\varphi_0 = \left| \arctg \left(\frac{y_2 - y_1}{x_2 - x_1} \right) \right|,$$

$$\varphi = \begin{cases} \varphi_0, & y_2 - y_1 \geq 0 \wedge x_2 - x_1 \geq 0 \\ 180 - \varphi_0, & y_2 - y_1 \geq 0 \wedge x_2 - x_1 < 0 \\ 180 + \varphi_0, & y_2 - y_1 < 0 \wedge x_2 - x_1 < 0 \\ 360 - \varphi_0, & y_2 - y_1 < 0 \wedge x_2 - x_1 \geq 0. \end{cases} \quad (5.13)$$

Координате центра кружне интерполације x_c, y_c добијају се помоћу дужине p :

$$p = \sqrt{r^2 - \left(\frac{t}{2} \right)^2}, \quad (5.14)$$

$$p_x = p \sin \varphi,$$

$$p_y = p \cos \varphi,$$

$$x_c = x_p + p_x \text{ и} \quad (5.15)$$

$$y_c = y_p - p_y.$$

Почетни угао α_0 и угао α добијају се према:

$$\alpha_0 = \left| \operatorname{arctg} \left(\frac{y_1 - y_c}{x_1 - x_c} \right) \right|,$$

$$\alpha_0 = \begin{cases} \alpha_0, y_1 - y_c \geq 0 \wedge x_1 - x_c \geq 0 \\ 180 - \alpha_0, y_1 - y_c \geq 0 \wedge x_1 - x_c < 0 \\ 180 + \alpha_0, y_1 - y_c < 0 \wedge x_1 - x_c < 0 \\ 360 - \alpha_0, y_1 - y_c < 0 \wedge x_1 - x_c \geq 0, \end{cases} \quad (5.16)$$

$$\alpha = \begin{cases} 2 \cdot \left| \arccos \frac{p}{r} \right|, r > 0 \\ 360 - 2 \cdot \left| \arccos \frac{p}{r} \right|, r < 0. \end{cases}$$

За кружне интерполације G02 и G03 знак полупречника r одређује кружни лук интерполације, а тиме и координате центра кружног лука (табеле 5.11, 5.12 и 5.13). Полупречник кружне интерполације r у NC програму је позитиван ($r > 0$) ако је угао $\alpha \leq 180^\circ$, а негативан ($r < 0$) ако је $180^\circ < \alpha \leq 360^\circ$.

Табела 5.11 - Координате центра кружне интерполације за функцију G17

G17 G02, $r > 0$ G03, $r < 0$	
$0 \leq \varphi \leq 90^\circ$ $y_2 - y_1 \geq 0$ $x_2 - x_1 \geq 0$ $\varphi = \varphi_0$ $x_c = x_p + p_x$ $y_c = y_p - p_y$	$90^\circ < \varphi \leq 180^\circ$ $y_2 - y_1 \geq 0$ $x_2 - x_1 < 0$ $\varphi = 180 - \varphi_0$ $x_c = x_p + p_x$ $y_c = y_p + p_y$

Табела 5.11 - Наставак 1

$180^\circ < \phi \leq 270^\circ$ $y_2 - y_1 < 0$ $x_2 - x_1 \geq 0$ $\phi = 180 + \phi_0$ $x_c = x_p - p_x$ $y_c = y_p + p_y$	$270^\circ < \phi < 360^\circ$ $y_2 - y_1 < 0$ $x_2 - x_1 < 0$ $\phi = 360 - \phi_0$ $x_c = x_p - p_x$ $y_c = y_p - p_y$
<p>G17 G02, r < 0 G03, r > 0</p>	
$0 \leq \phi \leq 90^\circ$ $y_2 - y_1 \geq 0$ $x_2 - x_1 \geq 0$ $\phi = \phi_0$ $x_c = x_p - p_x$ $y_c = y_p + p_y$	$90^\circ < \phi \leq 180^\circ$ $y_2 - y_1 \geq 0$ $x_2 - x_1 < 0$ $\phi = 180 - \phi_0$ $x_c = x_p - p_x$ $y_c = y_p - p_y$

Табела 5.11- Наставак 2

$180^\circ < \varphi \leq 270^\circ$ $y_2 - y_1 < 0$ $x_2 - x_1 \geq 0$ $\varphi = 180 + \varphi_0$ $x_c = x_p + p_x$ $y_c = y_p - p_y$	$270^\circ < \varphi < 360^\circ$ $y_2 - y_1 < 0$ $x_2 - x_1 < 0$ $\varphi = 360 - \varphi_0$ $x_c = x_p + p_x$ $y_c = y_p + p_y$

Табела 5.12 - Координате центра кружне интерполације за функцију G18

G18 G02, $r > 0$ G03, $r < 0$	
$0 \leq \varphi \leq 90^\circ$ $x_2 - x_1 \geq 0$ $z_2 - z_1 \geq 0$ $\varphi = \varphi_0$ $z_c = z_p + p_z$ $x_c = x_p - p_x$	$90^\circ < \varphi \leq 180^\circ$ $x_2 - x_1 \geq 0$ $z_2 - z_1 < 0$ $\varphi = 180 - \varphi_0$ $z_c = z_p + p_z$ $x_c = x_p + p_x$

Табела 5.12- наставак 1

$180^{\circ} < \varphi \leq 270^{\circ}$ $x_2 - x_1 < 0$ $z_2 - z_1 \geq 0$ $\varphi = 180 + \varphi_0$ $z_c = z_p - p_z$ $x_c = x_p + p_x$	$270^{\circ} < \varphi < 360^{\circ}$ $x_2 - x_1 < 0$ $z_2 - z_1 < 0$ $\varphi = 360 - \varphi_0$ $z_c = z_p - p_z$ $x_c = x_p - p_x$
<p>G18 G02, r < 0 G03, r > 0</p>	
$0 \leq \varphi \leq 90^{\circ}$ $x_2 - x_1 \geq 0$ $z_2 - z_1 \geq 0$ $\varphi = \varphi_0$ $z_c = z_p - p_z$ $x_c = x_p + p_x$	$90^{\circ} < \varphi \leq 180^{\circ}$ $x_2 - x_1 \geq 0$ $z_2 - z_1 < 0$ $\varphi = 180 - \varphi_0$ $z_c = z_p - p_z$ $x_c = x_p - p_x$

Табела 5.12 – наставак 2

$180^\circ < \varphi \leq 270^\circ$ $x_2 - x_1 < 0$ $z_2 - z_1 \geq 0$ $\varphi = 180 + \varphi_0$ $z_c = z_p + p_z$ $x_c = x_p - p_x$	$270^\circ < \varphi < 360^\circ$ $x_2 - x_1 < 0$ $z_2 - z_1 < 0$ $\varphi = 360 - \varphi_0$ $z_c = z_p + p_z$ $x_c = x_p + p_x$

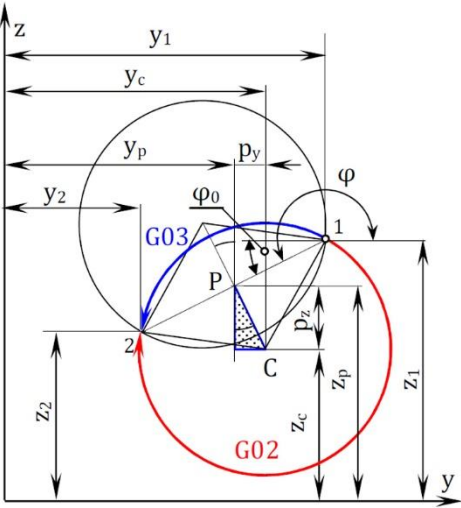
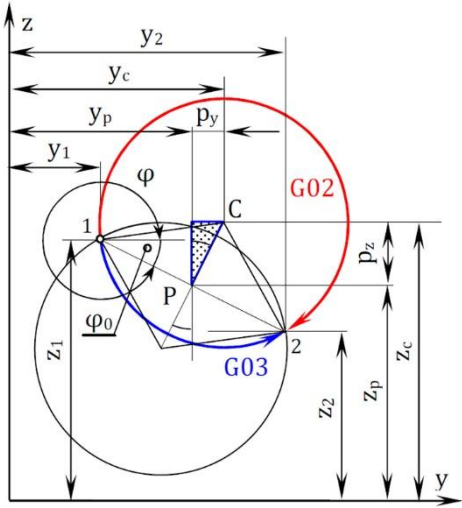
Табела 5.13- Координате центра кружне интерполације за функцију G19

G19 G02, $r > 0$ G03, $r < 0$	
$0 \leq \varphi \leq 90^\circ$ $z_2 - z_1 \geq 0$ $y_2 - y_1 \geq 0$ $\varphi = \varphi_0$ $y_c = y_p + p_y$ $z_c = z_p - p_z$	$90^\circ < \varphi \leq 180^\circ$ $z_2 - z_1 \geq 0$ $y_2 - y_1 < 0$ $\varphi = 180 - \varphi_0$ $y_c = y_p + p_y$ $z_c = z_p + p_z$

Табела 5.13 - наставак 1

$180^\circ < \varphi \leq 270^\circ$ $z_2 - z_1 < 0$ $y_2 - y_1 \geq 0$ $\varphi = 180 + \varphi_0$ $y_c = y_p - p_y$ $z_c = z_p + p_z$	$270^\circ < \varphi < 360^\circ$ $z_2 - z_1 < 0$ $y_2 - y_1 < 0$ $\varphi = 360 - \varphi_0$ $y_c = y_p - p_y$ $z_c = z_p - p_z$
<p>G19 G02, r < 0 G03, r > 0</p>	
$0 \leq \varphi \leq 90^\circ$ $z_2 - z_1 \geq 0$ $y_2 - y_1 \geq 0$ $\varphi = \varphi_0$ $y_c = y_p - p_y$ $z_c = z_p + p_z$	$90^\circ < \varphi \leq 180^\circ$ $z_2 - z_1 \geq 0$ $y_2 - y_1 < 0$ $\varphi = 180 - \varphi_0$ $y_c = y_p - p_y$ $z_c = z_p - p_z$

Табела 5.12– наставкак 2

	
$180^\circ < \varphi \leq 270^\circ$ $z_2 - z_1 < 0$ $y_2 - y_1 \geq 0$ $\varphi = 180 + \varphi_0$ $y_c = y_p + p_y$ $z_c = z_p - p_z$	$270^\circ < \varphi < 360^\circ$ $z_2 - z_1 < 0$ $y_2 - y_1 < 0$ $\varphi = 360 - \varphi_0$ $y_c = y_p + p_y$ $z_c = z_p + p_z$

Увођењем коефицијената:

$$k_g = \begin{cases} 1, \text{ за } G02 \\ -1, \text{ за } G03 \end{cases} \quad (5.17)$$

и

$$k_r = \begin{cases} 1, r > 0 \\ -1, r < 0 \end{cases} \quad (5.18)$$

координате центара кружне интерполације x_c, y_c, z_c израчунавају се:

за G17:

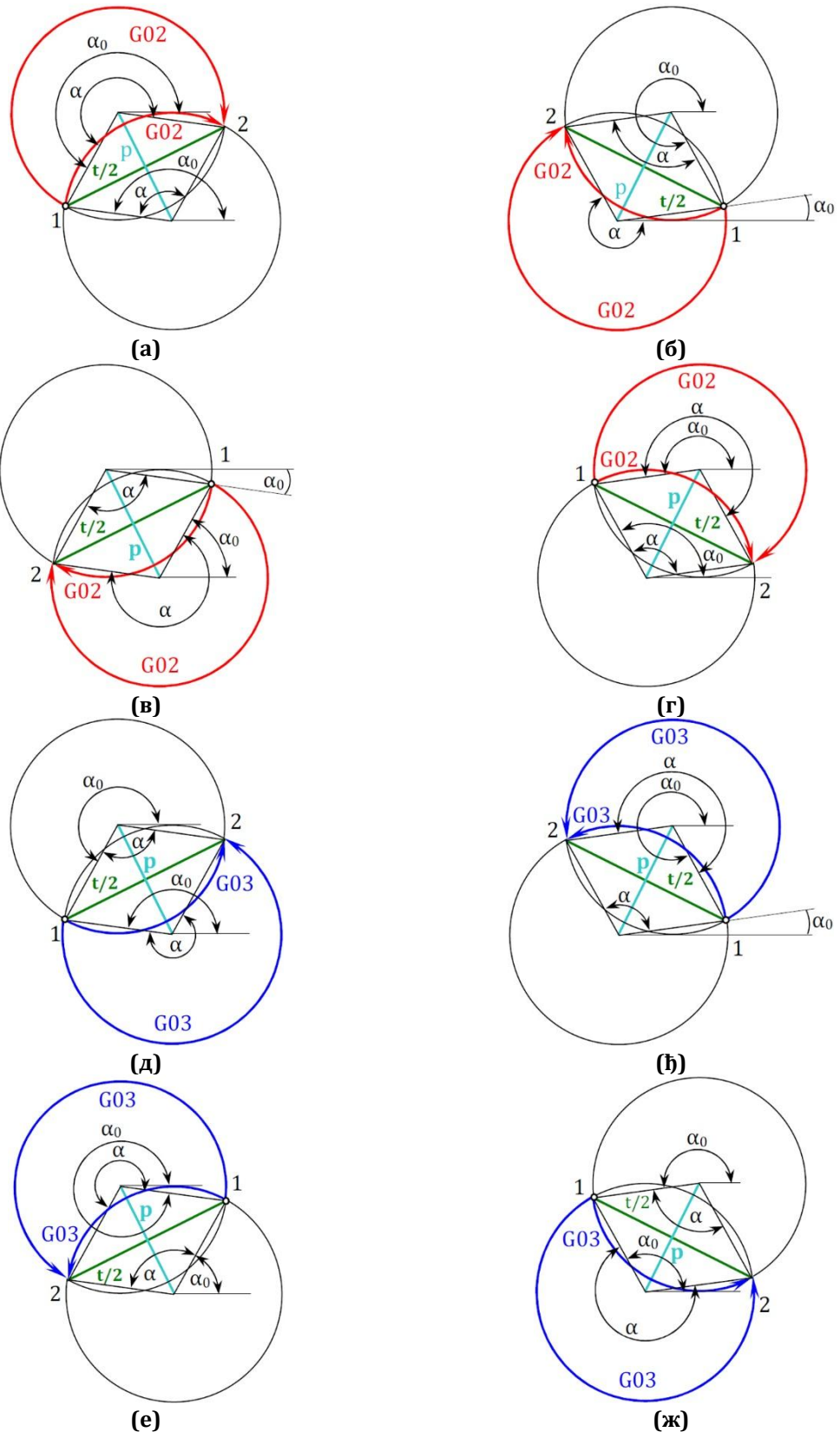
$$\begin{aligned} x_c &= x_p + k_g \cdot k_r \cdot p \cdot \sin \varphi, \\ y_c &= y_p - k_g \cdot k_r \cdot p \cdot \cos \varphi, \end{aligned} \quad (5.19)$$

за G18:

$$\begin{aligned} z_c &= z_p + k_g \cdot k_r \cdot p \cdot \sin \varphi, \\ x_c &= x_p - k_g \cdot k_r \cdot p \cdot \cos \varphi, \end{aligned} \quad (5.20)$$

и за G19:

$$\begin{aligned} y_c &= y_p + k_g \cdot k_r \cdot p \cdot \sin \varphi, \\ z_c &= z_p - k_g \cdot k_r \cdot p \cdot \cos \varphi. \end{aligned} \quad (5.21)$$



Слика 5.2. Почетни угао α_0 за различите врсте кружне интерполације и међусобне положаја почетне и крајње тачке интерполације: (а) G02, $y_2 \geq y_1$ и $x_2 \geq x_1$, (б) G02, $y_2 \geq y_1$ и $x_1 \geq x_2$, (в) G02, $y_1 \geq y_2$ и $x_1 \geq x_2$, (г) G02, $y_1 \geq y_2$ и $x_2 \geq x_1$, (д) G03, $y_2 \geq y_1$ и $x_2 \geq x_1$, (е) G03, $y_2 \geq y_1$ и $x_1 \geq x_2$, (ж) G03, $y_1 \geq y_2$ и $x_2 \geq x_1$, (з) G03, $y_1 \geq y_2$ и $x_1 \geq x_2$

Почетни угао α_0 (слика 5.2) добија се

за G17:

$$\alpha_0 = \left| \arctg \left(\frac{y_1 - y_c}{x_1 - x_c} \right) \right|,$$

$$\alpha_0 = \begin{cases} \alpha_0, y_1 - y_c \geq 0 \wedge x_1 - x_c \geq 0 \\ 180 - \alpha_0, y_1 - y_c \geq 0 \wedge x_1 - x_c < 0 \\ 180 + \alpha_0, y_1 - y_c < 0 \wedge x_1 - x_c < 0 \\ 360 - \alpha_0, y_1 - y_c < 0 \wedge x_1 - x_c \geq 0, \end{cases} \quad (5.22)$$

за G18:

$$\alpha_0 = \left| \arctg \left(\frac{x_1 - x_c}{z_1 - z_c} \right) \right|,$$

$$\alpha_0 = \begin{cases} \alpha_0, x_1 - x_c \geq 0 \wedge z_1 - z_c \geq 0 \\ 180 - \alpha_0, x_1 - x_c \geq 0 \wedge z_1 - z_c < 0 \\ 180 + \alpha_0, x_1 - x_c < 0 \wedge z_1 - z_c < 0 \\ 360 - \alpha_0, x_1 - x_c < 0 \wedge z_1 - z_c \geq 0, \end{cases} \quad (5.23)$$

и за G19:

$$\alpha_0 = \left| \arctg \left(\frac{z_1 - z_c}{y_1 - y_c} \right) \right|,$$

$$\alpha_0 = \begin{cases} \alpha_0, z_1 - z_c \geq 0 \wedge y_1 - y_c \geq 0 \\ 180 - \alpha_0, z_1 - z_c \geq 0 \wedge y_1 - y_c < 0 \\ 180 + \alpha_0, z_1 - z_c < 0 \wedge y_1 - y_c < 0 \\ 360 - \alpha_0, z_1 - z_c < 0 \wedge y_1 - y_c \geq 0. \end{cases} \quad (5.24)$$

Угао α (слика 5.2) добија се:

$$\alpha = \begin{cases} 2 \cdot \left| \arccos \frac{p}{r} \right|, k_r = 1 \\ 360 - 2 \cdot \left| \arccos \frac{p}{r} \right|, k_r = -1. \end{cases} \quad (5.25)$$

5.1.3. Коришћење података из NC програма

Сваки NC програмски блок b_i^{NC} описан табелом (табела 5.14) може се трансформисати у један запис табеле базе података са структуром приказаном у табели 5.15 [86], према поступку приказаном у претходном потпоглављу 5.1.2.

Табела 5.14 - NC програмски блок [86]

N	G	X	Y	Z	I	J	K	R	F	S	T	M
---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---

Табела 5.15 - Запис табеле базе података [86]

NCtabela1(N, G, X, Y, Z, ...)																		
N	G	X	Y	Z	I	J	K	R	F	S	T	M	алат	интер- полација	смер	корак <i>f</i>	број обртаја <i>s</i>	...
																mm/o	o/min	
...				x_1	y_1	z_1	x_2	y_2	z_2	x_c	y_c	z_c	r	α_0	α			
				mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	°	°			

У свакој инстанци табеле $NCtabela1(N, G, X, Y, Z, \dots)$ се на основу поља добијених трансформацијом података из NC програмског блока (G, X, Y, Z, \dots) израчунавају одговарајуће вредности поља (корак, број обртаја, ...). На основу инстанци ове табеле се формирају инстанце у табелама базе података са структуром приказаном у табелама 5.16 и 5.17.

Табела 5.16 -Структура записа “NC програми” у табели базе података

NCprogrami(nazivncprg, ...)					
назив NC програма	број G01	број G02	број G03	број G8x	

Табела 5.17 -Структура записа „алати“ у табели базе података

Alati(nazivncprg, oznalncprg,...)						
назив NC програма	број алата	пречник	број зуба	постојаност	индекс цене	облик
		mm		min		

Сваки запис табеле $NCprogrami(nazivncprg, \dots)$ одговара једном NC програму, а поља која се односе на бројеве интерполација представљају сабране бројеве за цео програм. Записи табеле $Alati(nazivncprg, oznalncprg, \dots)$ одговарају једном алату у једном NC програму.

Сваки од алата који се позивају у NC програмима за атрибуте има пречник алата, број сечива, постојаност алата, индекс цене и облик алата и може се изразити као елемент скупа:

$$A_{j,i} \ni (A_{j,i}^d, A_{j,i}^z, A_{j,i}^T, A_{j,i}^c, A_{j,i}^g), \quad (5.26)$$

где је: $A_{j,i}$ - скуп атрибута i -тог алата у j -том NC програму, $A_{j,i}^d$ - пречник i -тог алата у j -том NC програму, $A_{j,i}^z$ - број зуба i -тог алата у j -том NC програму, $A_{j,i}^T$ - постојаност i -тог алата у j -том NC програму, $A_{j,i}^c$ - индекс цене i -тог алата у j -том NC програму и $A_{j,i}^g$ - облик i -тог алата у j -том NC програму.

5.2. Опис програмског система за праћење елемената и фактора обраде дуж путање алата

5.2.1. Коришћење података из NC програма

NC програми смештени у ASCII датотекама трансформишу се у табеле базе података. Прво се сваки NC програмски блок трансформише у одговарајући запис NC табеле (слика 5.3), а онда се на основу поља добијених трансформацијом података из NC програмског блока (G, X, Y, Z, \dots) израчунавају одговарајућа поља [89] на начин описан изразима (5.1) - (5.6) и табелама 5.5-5.9.

The screenshot shows the FTS software interface with the following data:

NC program data table:

Sif. maš.	Sif. pal.	S. st.	NC program	T	broj. red. G01	broj. red. G02	broj. red. G03	broj. cik. G8x	broj. red. G8x
01	01	1	01011	<input checked="" type="checkbox"/>	3	1	1	1	3
01	02	1	01021	<input checked="" type="checkbox"/>	3	1	1	1	3
01	03	1	01031	<input checked="" type="checkbox"/>	3	1	1	1	3

Tool parameters table:

Sif. maš.	Sif. pal.	S. st.	NC program	alat	Sif. alata	prečnik (mm)	broj. zuba	post. (min)	indeks. cena
01	01	1	01011	T01	102003	20.000	3	15	50.00
01	02	1	01021	T02	202003	20.000	3	16	72.00
01	03	1	01031	T03	302003	20.000	3	15	90.00

Program block data:

N010 G21 G94 G90 M03
 N020 M06 T01
 N030 G00 X-10 Y-10 Z10
 N040 G01 X19.7 Y19.3 F200 S2000
 N050 G02 X39.7 Y-0.7 J-20
 N060 G01 X59.7

Tool parameters table (bottom):

N	G	X	Y	Z	J	K	R	F	S	T	M	alat	f	s	F	S	X1	Y1	
00010.	21 94 90									03		T01	>	0.000	0	0.000	0.000		
00020.										01 06		T01	>	0.000	0	0.000	0.000		
00030.	00	-10.000	-10.000	19.300								T01	-	0.000	0	0.000	0.000		
00040.	01	19.700	19.300				200.0	2000				T01	|	>	0.100	2000	-10.000	-10.000	0.000
00050.	02	39.700	-0.700			-20.000						T01	|	>	0.100	2000	19.700	9.300	
00060.	01	59.700										T01	|	>	0.100	2000	39.700	0.700	
00070.	03	-0.300	59.300			-60.000						T01	|	>	0.100	2000	59.700	0.300	
00080.	01		39.300									T01	-	>	0.100	2000	-0.300	9.300	
00090.	00											T01	-	>	0.000	2000	-0.300	9.300	
00100.		39.700	79.300									T01	-	>	0.000	2000	-0.300	9.300	

Слика 5.3. Приказ преноса програМСких блокова у NC табеле и израчунавање одговарајућих параметара

За сваки NC програм се креира једна NC табела базе података, а затим се редом преносе NC блокови, тако што се сваки програмски блок разлаже на програмске речи. При том разлагању се програмске речи испитују и према првом знаку (слову) у речи одређује вредност одређеног параметра. Прво се преноси ознака програмског блока („Nxxxx“), а затим се испитује да ли програмски блок садржи G-функције [90].

Након G-функција преносе се кинематски параметри (X, Y, Z, I, J, K и R) и технолошки параметри (F и S). Уколико у програмском блоку не постоји реч са наведеним почетним словом, онда се у NC табели уписује вредност „NULL.“ која омогућава касније лакше израчунавање путање алата (слика 5.4).

Након кинематских и технолошких параметара преноси се ознака алата (T) у магацину алата. На крају се испитује да ли програмски блок садржи M-функције. На основу M-функција и ознаке алата (T) сваком запису додељује ознака алата у магацину алата који се користи за обраду у одговарајућем програмском блоку. При томе, M-функција M06 додељује алату вредност наведену ознаком T, док M-функције M00, M19 и M30 „прекидају“ задату вредност алата.

Вредност броја обртаја и смер обртања главног вретена машине алатке у записима добија се на основу M-функција и вредности броја обртаја (S) наведене у том или претходним записима. Број обртаја добија наведену вредност у запису где је M-функција описана са M03 или M04, вредност 0 у запису након оног у коме је наведена M-функција M01, M19 или M05, док вредност 0 добија у истом запису који садржи M-функције M00 или M30 (израз 5.3).

```

IF "X" $ ostat_reda
  poz_1 = AT("X", ostat_reda)
  IF poz_1 > 0
    poz_2 = poz_1
    DO WHILE poz_2 < LEN(ostat_reda)
      poz_2 = poz_2 + 1
      IF .NOT. SUBSTR(ostat_reda, poz_2, 1) $ " 0123456789.+-"
        poz_2 = poz_2 - 1
      EXIT
    ENDIF
  ENDDO
  deo_char = SUBSTR(ostat_reda, poz_1, poz_2 - poz_1 + 1)
  IF .NOT. EMPTY(deo_char) .AND. LEN(deo_char) > 1
    deo_num = VAL(SUBSTR(deo_char, 2))
    ostat_reda = ALLTRIM(STRTRAN(ostat_reda, deo_char, ""))
    REPLACE xnumbncred WITH deo_num
  ENDIF
ENDIF
ELSE
  REPLACE xnumbncred WITH .NULL.
ENDIF

```

Слика 5.4. Пренос кинематских параметара у NC табелу

На вредност корака у записима утичу вредности G-функција и вредности корака (F) наведене у том или претходним записима. Корак добија наведену вредност у запису где је G-функција описана са G01, G02, G03, G81, G82, G83, G84 итд. а добија вредност 0 у истом запису који садржи G-функције G00 или G80 према изразу (3.1).

Затим се на основу поља добијених претходном трансформацијом података из NC програмског блока која се односе на параметре интерполација (G, X, Y, Z, I, J, K, R, ...) израчунавају одговарајућа поља (слика 5.5) према изразима (5.7) - (5.22) и табелама 5.5-5.11.

Све величине у сваком запису израчунавају се у апсолутним величинама, mm и mm/o узимајући у обзир G-функције G90/G91, G20/G21 и G94/G95. Ове величине се израчунавају на основу G-функција и вредности кинематских параметара X, Y, Z и R за брзи ход и линеарну интерполацију, односно X, Y, Z, I, J, K и R за кружну интерполацију.

Приликом израчунавања величина код кружне интерполације (G02 или G03) на основу параметара X, Y, Z, I, J, K и R одређују се и полупречник, центар и угао интерполације. Код трајања функција G00 и G80 израчунава се само брзи ход алата, а функција G01, G02 и G03 само пут алата под кораком, док се код функција које означавају циклусе бушења (G81, G82, G83, G84 итд.) поред пута алата под кораком израчунава и пут позиционирања алата који представља брзи ход алата.

The screenshot displays the FTS software interface for NC programs. It is divided into several sections:

- Top Left Table:** A table with columns for 'Sif. maš.', 'Sif. pal.', 'S. st.', 'NC program', 'T', and 'broj red.' for G01, G02, G03, G0x, and G0x. It lists three programs: 01011, 01021, and 01031.
- Top Right Table:** A table with columns for 'Sif. maš.', 'Sif. pal.', 'S. st.', 'NC program', 'alat', 'Sif. alata', 'prečnik (mm)', 'broj zuba', 'post. (min)', and 'indeks cene'. It lists three tools: T01 (102003), T02 (202003), and T03 (302003).
- Middle Left:** A list of NC program blocks:


```

      N050 G02 X39.7 Y-0.7 J-20
      N060 G01 X59.7
      N070 G03 X-0.3 Y59.3 I-60
      N080 G01 Y79.3
      N090 G00 Z60
      N100 X39.7 Y79.3
      
```
- Middle Right:** A control panel with fields for 'S. m.', 'S. p.', 'S. s.', and 'NC prog.' set to '01', '01', '1', and '01011' respectively.
- Bottom Table:** A detailed table of tool parameters for tool T01. A red box highlights the parameters for tool T01, and a red arrow points from the tool selection area to this box.

N	T	M	alat	F	S	X1	Y1	Z1	X2	Y2	Z2	XI	YJ	ZK	R	apoc	alfa
00010.		03		>	0.000	0	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000						
00020.	01	06	T01	>	0.000	0	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000						
00030.			T01	- >	0.000	0	0.000	0.000	-10.000	-10.000	10.000						
00040.			T01	I >	0.100	2000	-10.000	-10.000	10.000	19.700	19.300						
00050.			T01	J >	0.100	2000	19.700	19.300	10.000	39.700	-0.700	10.000	19.700	-0.700	10.000	20.000	90.000
00060.			T01	I >	0.100	2000	39.700	-0.700	10.000	59.700	-0.700	10.000					
00070.			T01	I >	0.100	2000	59.700	-0.700	10.000	-0.300	59.300	10.000	-0.300	-0.700	10.000	60.000	90.000
00080.			T01	I >	0.100	2000	-0.300	59.300	10.000	-0.300	79.300	10.000					
00090.			T01	- >	0.000	2000	-0.300	79.300	10.000	-0.300	79.300	60.000					
00100.			T01	- >	0.000	2000	-0.300	79.300	60.000	39.700	79.300	60.000					

Слика 5.5. Приказ преноса програмираних блокова у NC табеле и израчунавање одговарајућих параметара

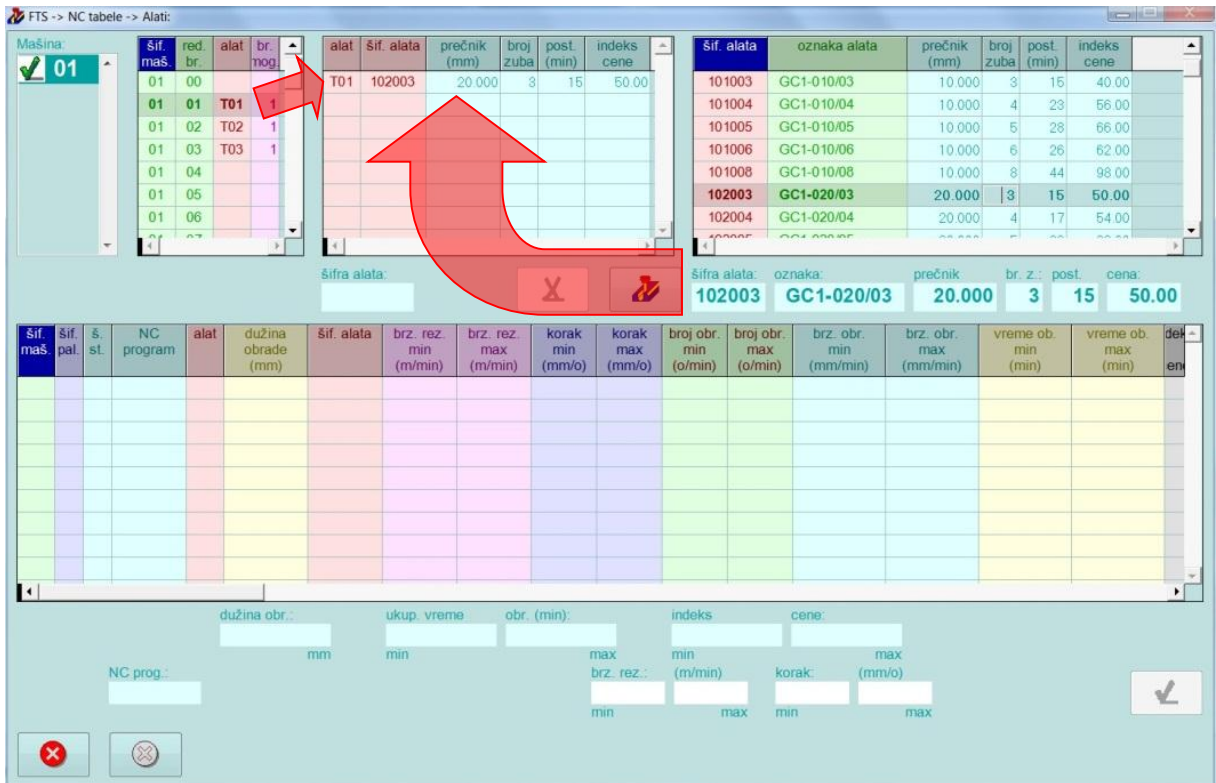
5.2.2. Избор алата

У следећем програмском модулу се сваком месту у магацину алата које се позива из NC програма додељују шифре алата из технолошке базе података (слика 5.6). Свака шифра алата једнозначно одређује атрибуте алата: пречник алата, број сечива, постојаност алата, индекс цене и облик алата према изразу 5.25.

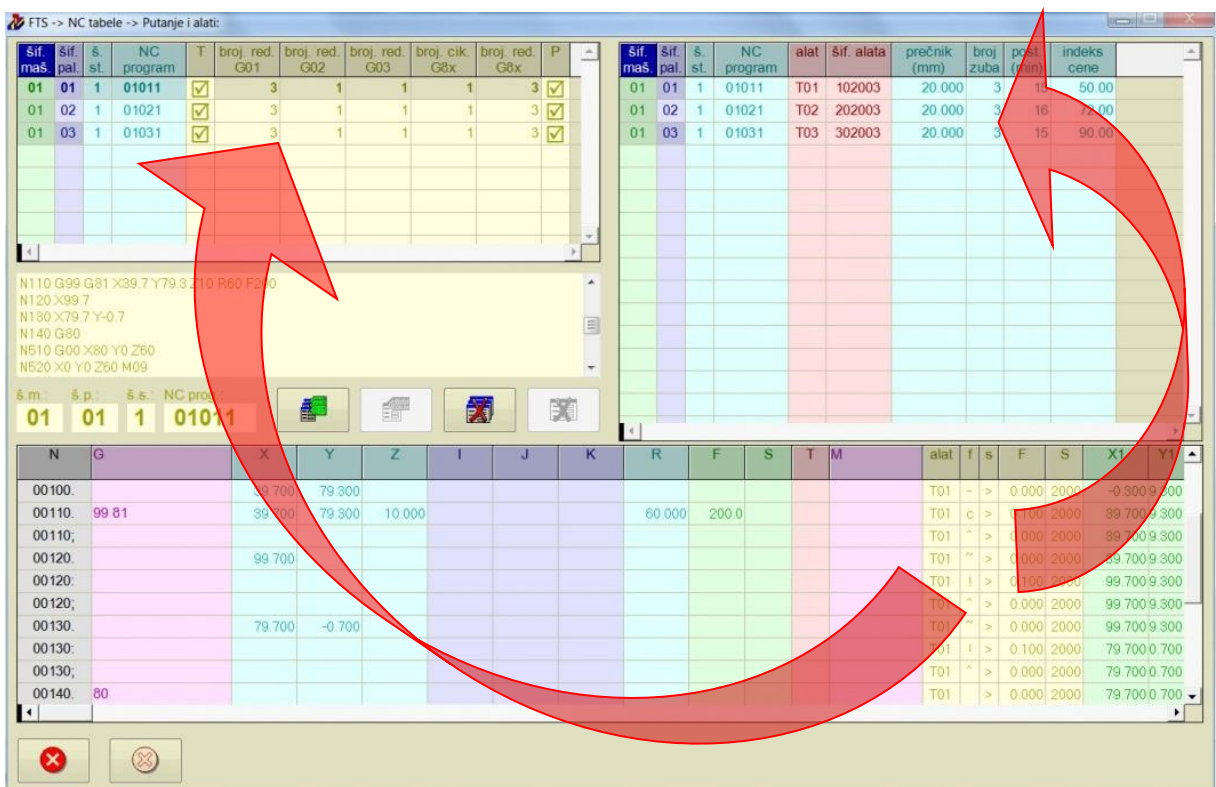
5.2.3. Путања алата

На основу записа NC табеле формира се запис табеле који одговара једном NC програму (слика 5.7). Истовремено се формирају записи табеле који одговарају једном алату у једном NC програму.

NC табела трансформисаног NC програма преноси се у две ASCII датотеке које садрже податке о путањи (слика 5.8) и алату (слика 5.9) неопходне за даљи прорачун еламената процеса резања.



Слика 5.6. Приказ додељивања алата и њихових ајрибуја месјима у мајацину алаја



Слика 5.7. Приказ израчунавања параметра NC програма и параметра алаја из NC табеле

	f	s	x_1	y_1	z_1	x_2	y_2	z_2	x_c	y_c	z_c	r	α_0	α
00010. ??? ? > 0.000	0	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000 ??
00020. T01 ? > 0.000	0	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000 ??
00030. T01 - > 0.000	0	0.000	0.000	0.000	0.000	-10.000	-10.000	10.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000 ??
00040. T01 | > 0.150	2000	-10.000	-10.000	10.000	19.700	19.300	10.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000 ??
00050. T01) > 0.100	1800	19.700	19.300	10.000	39.700	-0.700	10.000	19.700	-0.700	10.000	20.000	90.000	90.000	XY
00060. T01 | > 0.200	2000	39.700	-0.700	10.000	59.700	-0.700	10.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000 ??
00070. T01 (> 0.100	1500	59.700	-0.700	10.000	-0.300	59.300	10.000	-0.300	-0.700	10.000	60.000	0.000	90.000	XY
00080. T01 | > 0.250	2500	-0.300	59.300	10.000	-0.300	79.300	10.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000 ??
00090. T01 - > 0.000	2000	-0.300	79.300	10.000	-0.300	79.300	60.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000 ??
00100. T01 - > 0.000	2000	-0.300	79.300	60.000	39.700	79.300	60.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000 ??
00110. T01 c > 0.100	2000	39.700	79.300	60.000	39.700	79.300	10.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000 ??
00110; T01 ^ > 0.000	2000	39.700	79.300	10.000	39.700	79.300	60.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000 ??
00120. T01 ~ > 0.000	2000	39.700	79.300	60.000	99.700	79.300	60.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000 ??
00120; T01 ! > 0.100	2000	99.700	79.300	60.000	99.700	79.300	10.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000 ??
00120; T01 ^ > 0.000	2000	99.700	79.300	10.000	99.700	79.300	60.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000 ??
00130. T01 ~ > 0.000	2000	99.700	79.300	60.000	79.700	-0.700	60.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000 ??
00130; T01 ! > 0.100	2000	79.700	-0.700	60.000	79.700	-0.700	10.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000 ??
00130; T01 ^ > 0.000	2000	79.700	-0.700	10.000	79.700	-0.700	60.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000 ??
00140. T01 ? > 0.000	2000	79.700	-0.700	60.000	79.700	-0.700	60.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000 ??
00510. T01 - > 0.000	2000	79.700	-0.700	60.000	80.000	0.000	60.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000 ??
00520. T01 - > 0.000	2000	80.000	0.000	60.000	0.000	0.000	60.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000 ??
00530. T01 ? > 0.000	2000	0.000	0.000	60.000	0.000	0.000	60.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000 ??
00540. T01 ? > 0.000	2000	0.000	0.000	60.000	0.000	0.000	60.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000 ??
00550. ??? ? ? 0.000	0	0.000	0.000	60.000	0.000	0.000	60.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000 ??

Слика 5.8. ASCII датотека која садржи податке о путањи

	d	z	T	c	g
T01 102003	20.000	3	15	50.00	C

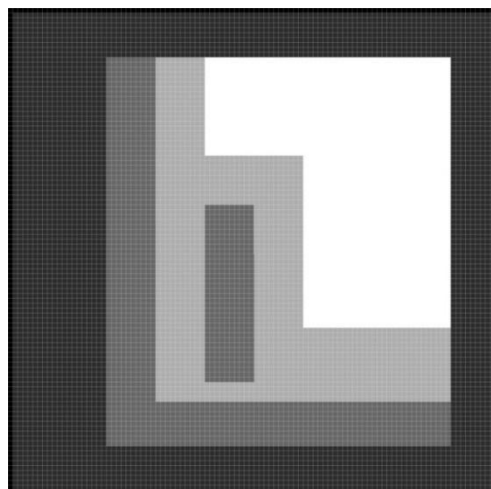
Слика 5.9. ASCII датотека која садржи податке о алату

5.2.4. Геометријски (матрични) опис припремка

Основа за геометријски опис припремка (слика 5.10а – пример могућег изгледа припремка) је растеризована слика припремка [91] у XY равни (слика 5.10б). Вредност боје пиксела одређује висину површине припремка. Боја пиксела може имати вредност нијансе сиве од 0 (црна) до 255 (бела).



(а)

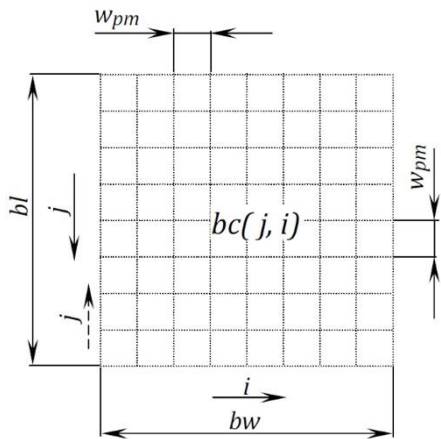


(б)

Слика 5.10. Пример припремка: (а) изглед припремка, (б) растеризована слика припремка у XY равни

Димензије растеризоване основе припремка, координате (положај) и боја сваког пиксела се читају из *bitmap* датотеке (слика 5.11) са разликом у координатним системима (израз 5.27). Матрица Wc садржи боје свих пиксела у координатној равни XY .

$$Wc(b_l + 1 - j, i) = B_c(j, i) \quad j: \begin{array}{l} 1 \\ -1 \\ b_l \end{array} \quad i: \begin{array}{l} b_w \\ 1 \end{array} \quad (5.27)$$



```

bmp_struct = imfinfo(tfil);
bw = getfield(bmp_struct, 'Width');
bl = getfield(bmp_struct, 'Height');
bc = imread(tfil);
for j = bl:-1:1,
    for i = 1:1:bw,
        wc(bl+1-j,i) = bc(j,i);
    end
end

```

Слика 5.11. Принцип читања *bitmap* датотеке

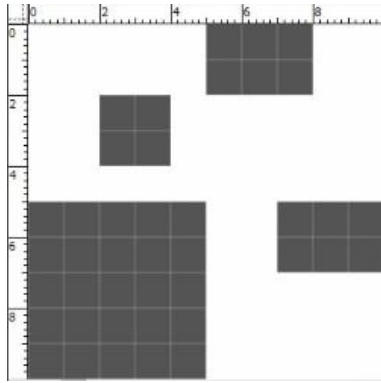
На основу матрице Wc , задате максималне висине припремка w_{zmax} и задате дужине пиксела у милиметрима w_{pm} израчунавају се матрице координата тачака на мрежи припремка на следећи начин:

$$Wz(j, i) = \begin{cases} Wx(j, i) = (i - 1) \cdot w_{pm} \\ Wy(j, i) = (j - 1) \cdot w_{pm} \\ NaN, Wc(j, i) = 0 \\ w_{zmax} \cdot \frac{Wc(j, i)}{255}, 0 < Wc(j, i) \leq 255 \end{cases} \quad j: \begin{array}{l} b_l \\ 1 \end{array} \quad i: \begin{array}{l} b_w \\ 1 \end{array} \quad (5.28)$$

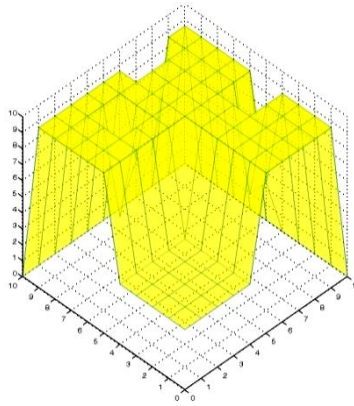
Уколико је боја пиксела једнака 0 (црна), у тој тачки нема површине припремка (отвор), а у супротном висина тачке на мрежи припремка $Wz(j, i)$ сразмерна је вредности боје одговарајућег пиксела.

Број подеока на мрежи припремка по координатама x и y је једнак броју пиксела b_w и b_l , а број тачака на мрежи припремка по истим координатама је b_w+1 , односно b_l+1 . Из тог разлога је неопходно увећање димензија матрица Wx , Wy и Wz за 1 (слика 5.12):

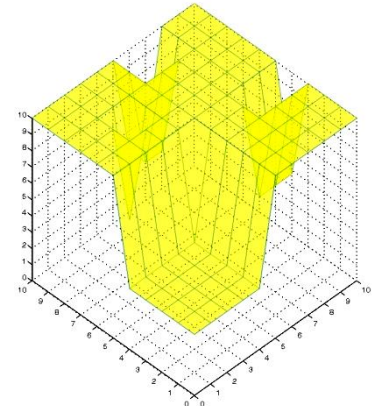
$$\begin{aligned} Wx(j, b_w + 1) &= b_w \cdot w_{pm}, & Wx(b_l + 1, i) &= Wx(b_l, i), \\ Wy(j, b_w + 1) &= Wy(j, b_w), & Wy(b_l + 1, i) &= b_l \cdot w_{pm}, \\ Wz(j, b_w + 1) &= Wz(j, b_w), & Wz(b_l + 1, i) &= Wz(b_l, i). \end{aligned} \quad (5.29)$$



(a)



(б)



(в)

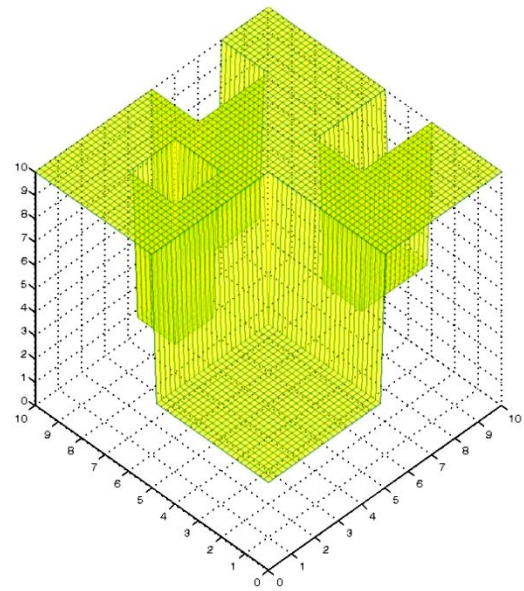
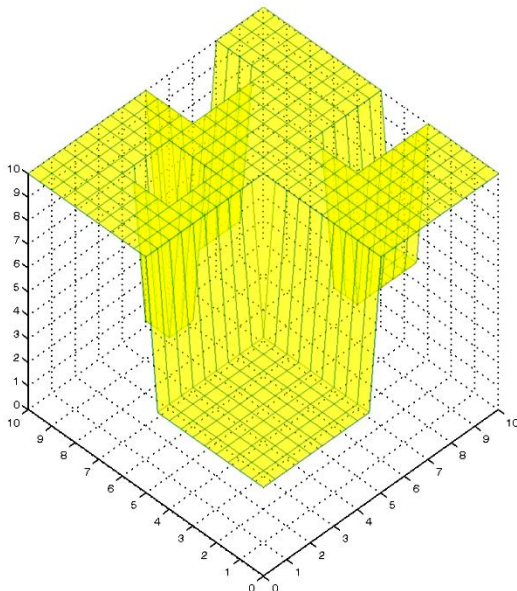
Слика 5.12. Принцип увећања димензија матрица W_x , W_y и W_z : (а) расцртавана слика и припрема у XY равни, (б) припремак пре увећања димензија матрица W_x , W_y и W_z и (в) припремак после увећања димензија матрица W_x , W_y и W_z

Мрежу припремака W описују матрице W_x , W_y и W_z , односно:

$$W = (W_x, W_y, W_z). \quad (5.30)$$

Тачност каснијих прорачуна фактора резања зависи од димензија матрица W_x , W_y и W_z , односно од резолуције мреже припремака. У циљу добијања тачнијих резултата повећава се резолуција мреже припремака W , поред задате дужине пиксела у милиметрима w_{pm} , и задавањем милиметарске поделе мреже w_{mp} (слика 5.13). Тада су димензије матрица W_x , W_y и W_z :

$$\begin{aligned} w_j &= b_l \cdot w_{pm} \cdot w_{mp} + 1 \text{ и} \\ w_i &= b_w \cdot w_{pm} \cdot w_{mp} + 1. \end{aligned} \quad (5.31)$$



Слика 5.13. Различите резолуције мреже припремака W

Производ $w_{pm} \cdot w_{mp}$ мора да буде цео број и он представља број тачака мреже на јединичној дужини пиксела и једнак је вредности j_{pp} , односно i_{pp} . Положај сваке тачке у мрежи (j, i)

израчунава се преко положаја те тачке у одговарајућем пикселу (j_{pp}, i_{pp}) и положаја пиксела (j_p, i_p):

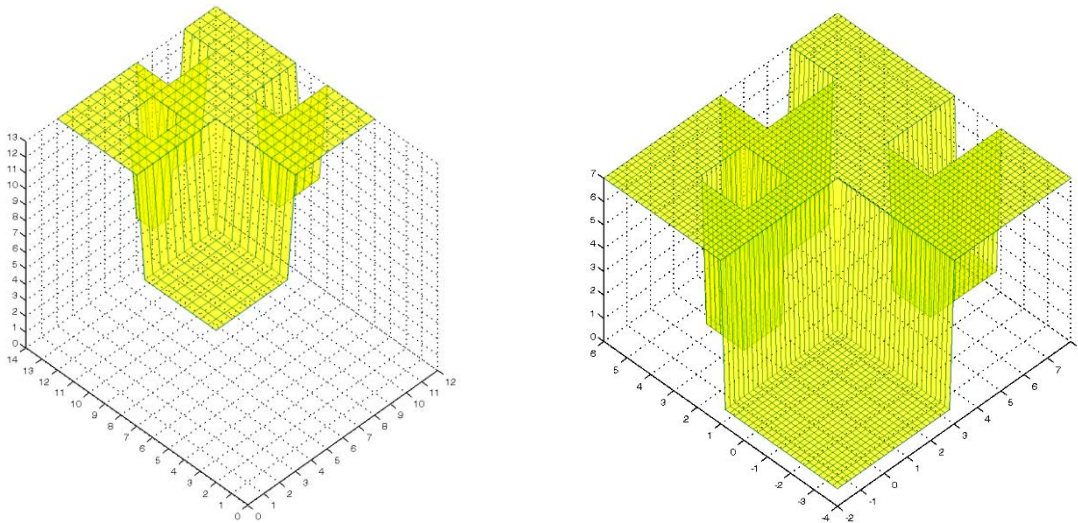
$$\begin{aligned}
 j_{pp} &= \begin{cases} w_{pm} \cdot w_{mp}, & j_p < b_l \\ w_{pm} \cdot w_{mp} + 1, & j_p = b_l \end{cases} \\
 j &= (j_p - 1) \cdot w_{pm} \cdot w_{mp} + p_j \\
 i_{pp} &= \begin{cases} w_{pm} \cdot w_{mp}, & i_p < b_w \\ w_{pm} \cdot w_{mp} + 1, & i_p = b_w \end{cases} \\
 i &= (i_p - 1) \cdot w_{pm} \cdot w_{mp} + p_i
 \end{aligned}
 \quad
 \begin{array}{c}
 \left. \begin{array}{c} b_l \\ j_p: \\ 1 \end{array} \right| \\
 \left. \begin{array}{c} j_{pp} \\ p_j: \\ 1 \end{array} \right| \\
 \left. \begin{array}{c} b_w \\ i_p: \\ 1 \end{array} \right| \\
 \left. \begin{array}{c} i_{pp} \\ p_i: \\ 1 \end{array} \right|
 \end{array}
 \quad (5.32)$$

Одређивањем положаја сваке тачке у мрежи (j, i), уместо израза 5.28 и 5.29 матрице координата тачака W_x, W_y и W_z на мрежи припремка W израчунавају се према:

$$\begin{aligned}
 W_x(j, i) &= \left[(i_p - 1) + \frac{p_i - 1}{w_{pm} \cdot w_{mp}} \right] \cdot w_{pm}, \\
 W_y(j, i) &= \left[(j_p - 1) + \frac{p_j - 1}{w_{pm} \cdot w_{mp}} \right] \cdot w_{pm}, \\
 W_z(j, i) &= \begin{cases} NaN, & W_c(j_p, i_p) = 0 \\ w_{zmax} \cdot \frac{W_c(j_p, i_p)}{255}, & 0 < W_c(j_p, i_p) \leq 255. \end{cases}
 \end{aligned}
 \quad (5.33)$$

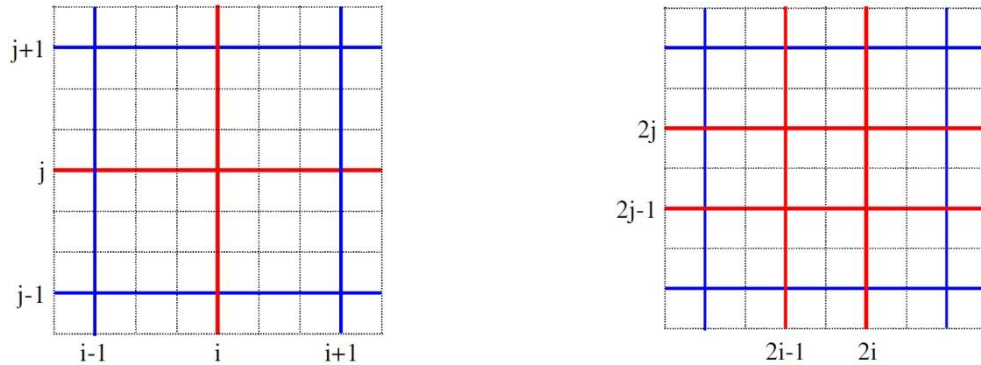
Припремак је могуће померити у усвојеном координатном систему XYZ задавањем координатног почетка припремка w_{x0}, w_{y0}, w_{z0} (слика 5.14), па је:

$$\begin{aligned}
 W_x(j, i) &= w_{x0} + \left[(i_p - 1) + \frac{p_i - 1}{w_{pm} \cdot w_{mp}} \right] \cdot w_{pm} \\
 W_y(j, i) &= w_{y0} + \left[(j_p - 1) + \frac{p_j - 1}{w_{pm} \cdot w_{mp}} \right] \cdot w_{pm} \\
 W_z(j, i) &= \begin{cases} NaN, & W_c(j_p, i_p) = 0 \\ w_{z0} + w_{zmax} \cdot \frac{W_c(j_p, i_p)}{255}, & 0 < W_c(j_p, i_p) \leq 255 \end{cases}
 \end{aligned}
 \quad (5.34)$$



Слика 5.14. Померање припремка у координатном систему

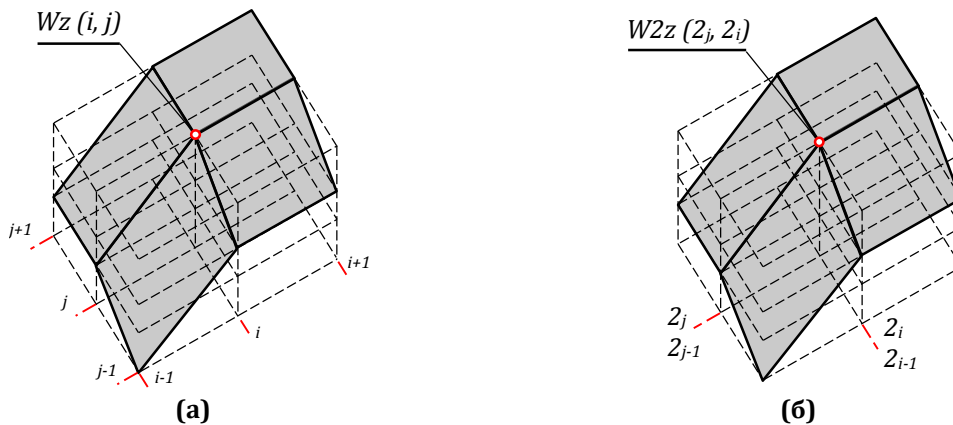
Из израза 5.34 може се закључити да једном пару координата $W_x(j,i)$, $W_y(j,i)$ одговара само једна тачка на мрежи са висином $W_z(j,i)$. У том случају је немогуће дефинисати вертикалне ивице припремка, цилиндричне отворе и рупе итд. Због тога се сваки положај тачке на мрежи j , односно i дуплира и добијају се положаји $2\cdot j-1$ и $2\cdot j$, односно $2\cdot i-1$ и $2\cdot i$ (слика 5.15).



Слика 5.15. Дуплирање положаја тачке i и j на мрежи припремка: (а) мрежа припремка пре дуплирања положаја тачке, (б) мрежа припремка после дуплирања положаја тачке

Координате добијених тачака на мрежи у матрицама $W2x$ и $W2y$ су једнаке координатама $W_x(j,i)$ и $W_y(j,i)$ (слика 5.16), односно:

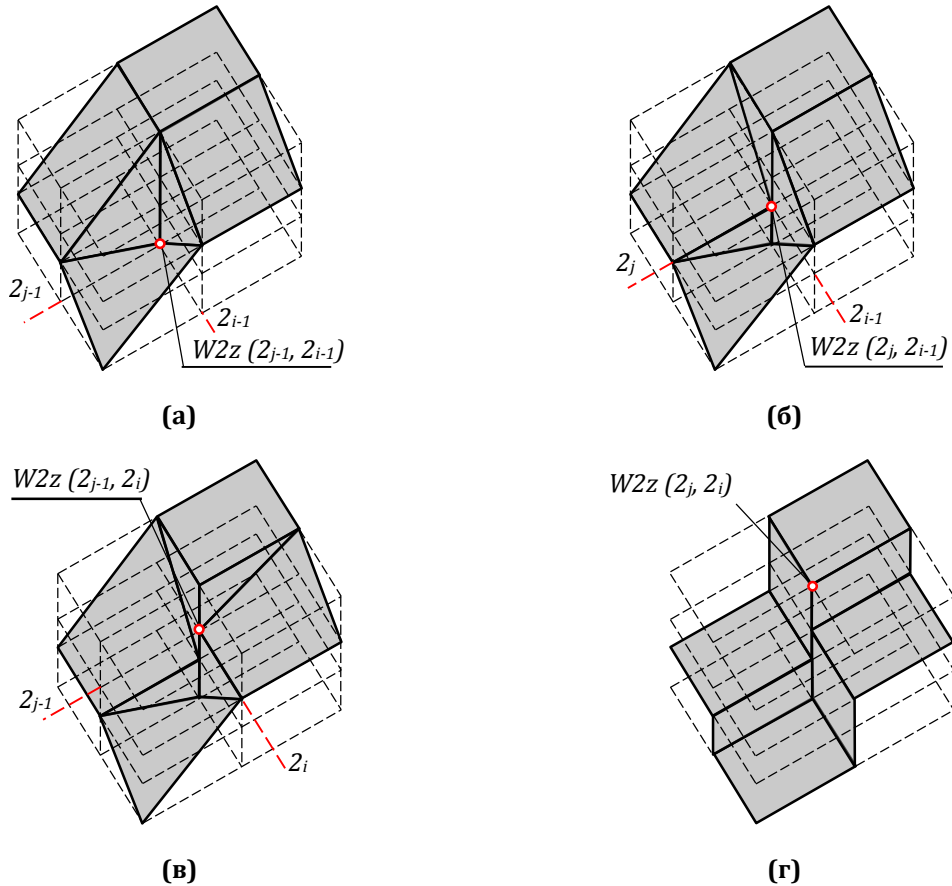
$$\begin{aligned}
 W2x(2\cdot j - 1, 2\cdot i - 1) &= W_x(j, i), & W2y(2\cdot j - 1, 2\cdot i - 1) &= W_y(j, i), \\
 W2x(2\cdot j, 2\cdot i - 1) &= W_x(j, i), & W2y(2\cdot j, 2\cdot i - 1) &= W_y(j, i), \\
 W2x(2\cdot j - 1, 2\cdot i) &= W_x(j, i), & W2y(2\cdot j - 1, 2\cdot i) &= W_y(j, i), \\
 W2x(2\cdot j, 2\cdot i) &= W_x(j, i), & W2y(2\cdot j, 2\cdot i) &= W_y(j, i).
 \end{aligned}
 \tag{5.35}$$



Слика 5.16. Координате тачака на мрежи: (а) у матрици Wz , (б) у матрици $W2z$

Координата $W2z(2\cdot j, 2\cdot i)$ једнака је координати $W_z(j,i)$ (слика 5.16), док су остале координате добијених тачака на мрежи у матрици $W2z$ једнаке координатама у матрици Wz одговарајућих тачака (слика 5.17), односно:

$$\begin{aligned}
W2z(2 \cdot j - 1, 2 \cdot i - 1) &= \begin{cases} Wz(j - 1, i - 1), & j > 1 \wedge i > 1 \\ 0, & j = 1 \vee i = 1 \end{cases} \\
W2z(2 \cdot j, 2 \cdot i - 1) &= \begin{cases} Wz(j, i - 1), & j < w_j \wedge i > 1 \\ 0, & j = w_j \vee i = 1 \end{cases} \\
W2z(2 \cdot j - 1, 2 \cdot i) &= \begin{cases} Wz(j - 1, i), & j > 1 \wedge i < w_i \\ 0, & j = 1 \vee i = w_i \end{cases} \\
W2z(2 \cdot j, 2 \cdot i) &= \begin{cases} Wz(j, i), & j < w_j \wedge i < w_i \\ 0, & j = w_j \vee i = w_i \end{cases}
\end{aligned}
\quad
\begin{matrix} j: \\ \left| \begin{matrix} w_j \\ 1 \end{matrix} \right. \\ i: \\ \left| \begin{matrix} w_i \\ 1 \end{matrix} \right. \end{matrix}
\quad (5.34)$$



Слика 5.17. Трансформација припремка кроз одређивање координате $W2z$ одговарајућих тачака у матрици $W2z$: (а) $W2z(2j-1, 2i-1)$, (б) $W2z(2j, 2i-1)$, (в) $W2z(2j-1, 2i)$, (г) $W2z(2j, 2i)$

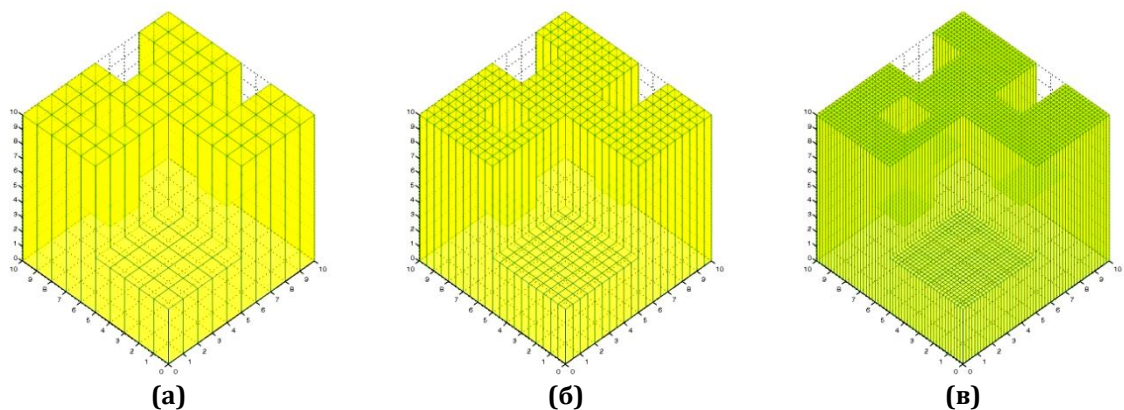
Мрежу припремка $W2$ описују матрице $W2x$, $W2y$ и $W2z$, односно:

$$W2 = (W2x, W2y, W2z). \quad (5.37)$$

Димензије матрица координата тачака $W2x$, $W2y$ и $W2z$ на мрежи припремка $W2$ су за све три матрице једнаке и износе:

$$\begin{aligned}
w2_j &= 2 \cdot w_j, \\
w2_i &= 2 \cdot w_i.
\end{aligned}
\quad (5.38)$$

Трансформацијом мреже припремка W у мрежу $W2$ од облика на слици 5.16а добија се облик на слици 5.17г. На тај начин мреже припремка приказане на сликама 5.12в и 5.13 трансформишу се у мреже приказане на слици 5.18.



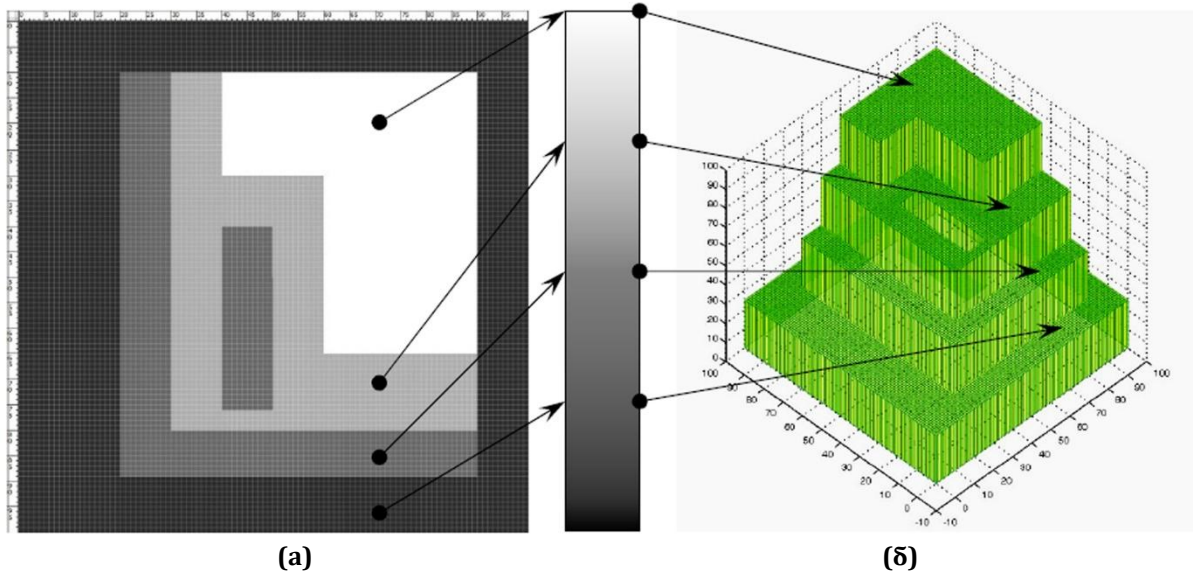
Слика 5.18. Трансформисана мрежа припремка у три различите резолуције припремка:
 (а) 1пиксел=1 mm, (б)1пиксел=0,5 mm (в)1пиксел=0,2mm

Матрице координата тачака W_x , W_y , W_z , W_{2x} , W_{2y} и W_{2z} уписују се у ASCII датотеке (слика 5.19- пример за мрежу приказану на слици 5.18), као и остали подаци о припремку.

W_x	0.000 1.000 2.000 3.000 4.000 5.000 6.000 7.000 8.000 9.000 10.000
	0.000 1.000 2.000 3.000 4.000 5.000 6.000 7.000 8.000 9.000 10.000
	...
W_y	0.000 0.000 0.000 0.000 0.000 0.000 0.000 0.000 0.000 0.000 0.000
	1.000 1.000 1.000 1.000 1.000 1.000 1.000 1.000 1.000 1.000 1.000
	...
W_z	3.750 3.750 3.750 3.750 3.750 10.000 10.000 10.000 10.000 10.000 10.000
	3.750 3.750 3.750 3.750 3.750 10.000 10.000 10.000 10.000 10.000 10.000
	...
W_{2x}	0.000 0.000 1.000 1.000 2.000 2.000 3.000 3.000 ... 8.000 8.000 9.000 9.000 10.000 10.000
	0.000 0.000 1.000 1.000 2.000 2.000 3.000 3.000 ... 8.000 8.000 9.000 9.000 10.000 10.000
	...
W_{2y}	0.000 0.000 0.000 0.000 0.000 0.000 0.000 0.000 ... 0.000 0.000 0.000 0.000 0.000 0.000
	0.000 0.000 0.000 0.000 0.000 0.000 0.000 0.000 ... 0.000 0.000 0.000 0.000 0.000 0.000
	...
W_{2z}	0.000 0.000 0.000 0.000 0.000 0.000 0.000 0.000 ... 0.000 0.000 0.000 0.000 0.000 0.000
	0.000 3.750 3.750 3.750 3.750 3.750 3.750 3.750 ... 10.000 10.000 10.000 10.000 10.000 0.000
	...

Слика 5.19. Пример ASCII датотеке за мрежу приказану на слици 5.18а

Описаним поступком од растеризоване основе припремка у равни XY смештене у *bitmap* датотеку (слика 5.20а) добија се мрежа припремка W , односно $W2$ (слика 5.20б).



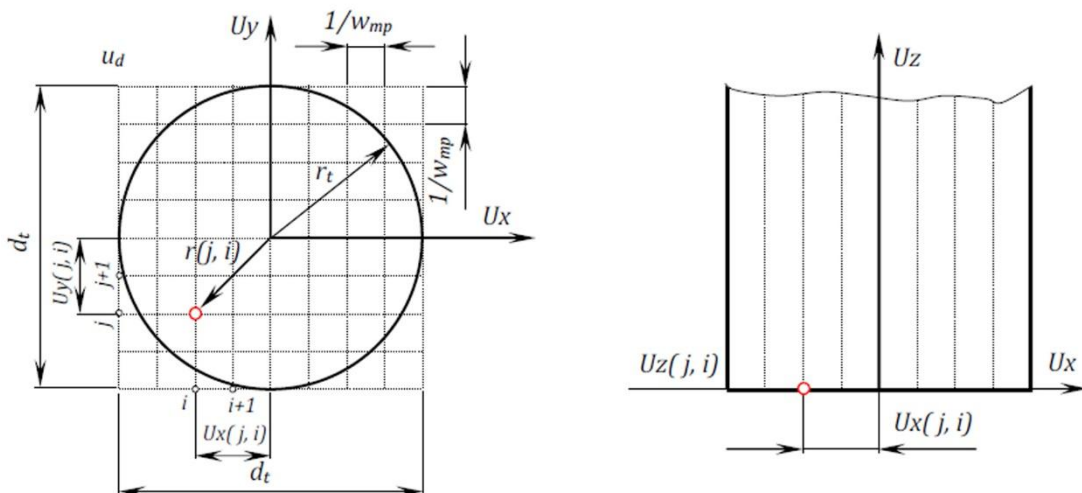
Слика 5.20. Трансформација bitmap датотеке у мрежу припремка: (а) bitmap датотека, (б) мрежа припремка

5.2.5. Геометријски (матрични) опис алата

Основа за геометријски опис алата је ASCII датотека у коју су уписани пречник алата и облик алата (слика 5.9). На основу пречника алата d_t , односно полупречника алата r_t , као и милиметарске поделе мреже w_{mp} израчунавају се матрице координата тачака на мрежи цилиндричног алата (слика 5.21):

$$u_d = d_t \cdot w_{mp} + 1, \quad (5.39)$$

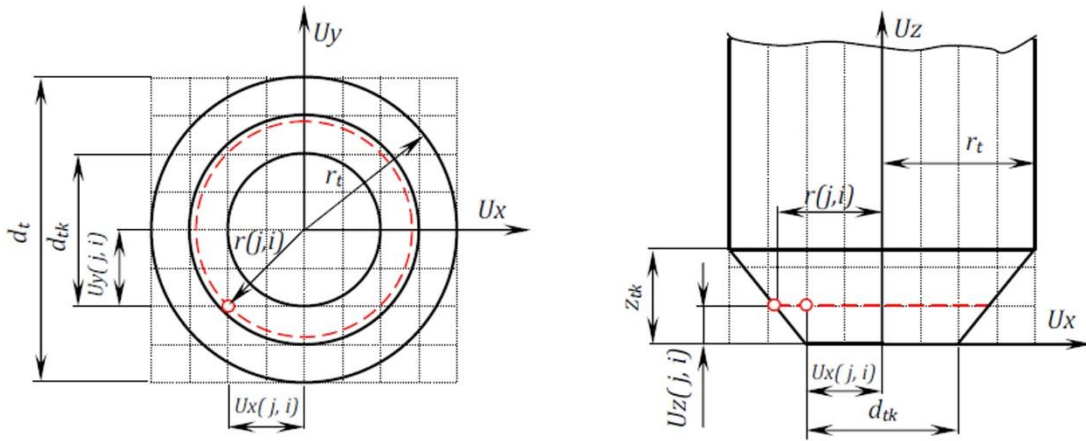
$$\begin{aligned}
 U_x(j, i) &= -r_t + (i - 1) \cdot \frac{1}{w_{mp}} \\
 U_y(j, i) &= -r_t + (j - 1) \cdot \frac{1}{w_{mp}} \\
 U_z(j, i) &= \begin{cases} NaN, & \sqrt{[U_x(j, i)]^2 + [U_y(j, i)]^2} > r_t \\ 0, & \sqrt{[U_x(j, i)]^2 + [U_y(j, i)]^2} \leq r_t \end{cases}
 \end{aligned}
 \quad j: \begin{matrix} u_d \\ \vdots \\ 1 \end{matrix} \quad i: \begin{matrix} u_d \\ \vdots \\ 1 \end{matrix}. \quad (5.40)$$



Слика 5.21. Координате тачака на мрежи цилиндричног алата

На основу пречника алата d_t / d_{tk} , односно полупречника алата r_t / r_{tk} висине конуса z_{tk} , као и милиметарске поделе мреже w_{mp} израчунавају се матрице координата тачака на мрежи алата конусног глодала (слика 5.22):

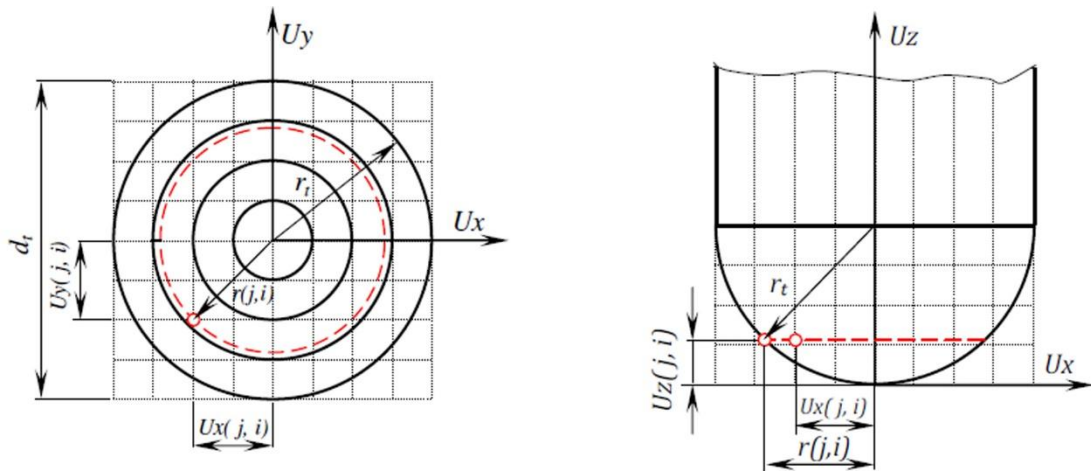
$$\begin{aligned}
 Ux(j, i) &= -r_t + (i - 1) \cdot \frac{1}{w_{mp}} \\
 Uy(j, i) &= -r_t + (j - 1) \cdot \frac{1}{w_{mp}} \\
 r(j, i) &= \sqrt{[Ux(j, i)]^2 + [Uy(j, i)]^2} \\
 Uz(j, i) &= \begin{cases} 0, & r(j, i) \leq r_{tk} \\ \frac{z_{tk}}{r_t - r_{tk}} \cdot [r(j, i) - r_{tk}], & r_{tk} < r(j, i) \leq r_t \\ NaN, & r(j, i) > r_t \end{cases}
 \end{aligned}
 \quad
 \begin{matrix}
 j: \\
 \left. \begin{array}{l} u_d \\ 1 \end{array} \right\} \\
 i: \left. \begin{array}{l} u_d \\ 1 \end{array} \right\}
 \end{matrix}
 \quad (5.41)$$



Слика 5.22. Координате тачака на мрежи конусног алата

На основу пречника алата d_t , односно полупречника алата r_t , као и милиметарске поделе мреже w_{mp} израчунавају се матрице координата тачака на мрежи алата сферног глодала (слика 5.23):

$$\begin{aligned}
 Ux(j, i) &= -r_t + (i - 1) \cdot \frac{1}{w_{mp}} \\
 Uy(j, i) &= -r_t + (j - 1) \cdot \frac{1}{w_{mp}} \\
 r(j, i) &= \sqrt{[Ux(j, i)]^2 + [Uy(j, i)]^2} \\
 Uz(j, i) &= \begin{cases} r_t - \sqrt{r_t^2 - [r(j, i)]^2}, & r(j, i) \leq r_t \\ NaN, & r(j, i) > r_t \end{cases}
 \end{aligned}
 \quad
 \begin{matrix}
 j: \\
 \left. \begin{array}{l} u_d \\ 1 \end{array} \right\} \\
 i: \left. \begin{array}{l} u_d \\ 1 \end{array} \right\}
 \end{matrix}
 \quad (5.42)$$



Слика 5.23. Координате тачака на мрежи сферног алата

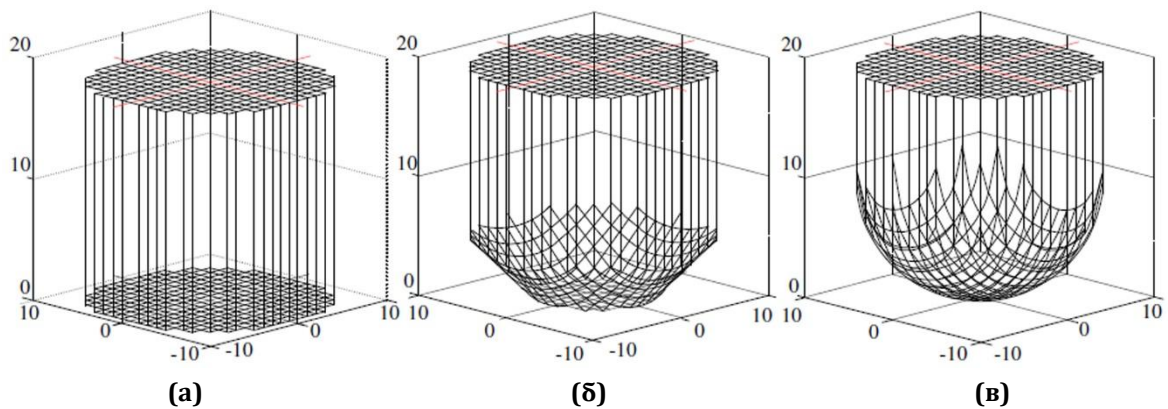
Мрежу алата U описују матрице U_x , U_y и U_z , односно:

$$U = (U_x, U_y, U_x), \quad (5.43)$$

а димензије матрица U_x , U_y и U_z :

$$\begin{aligned} u_j &= u_d, \\ u_i &= u_d. \end{aligned} \quad (5.44)$$

Мреже алата цилиндричног, конусног и сферног глодала приказане су на слици 5.24.



Слика 5.24 Мреже три различита алата: (а) цилиндрично глодало (б), конусно глодало и (в) и сферно глодало

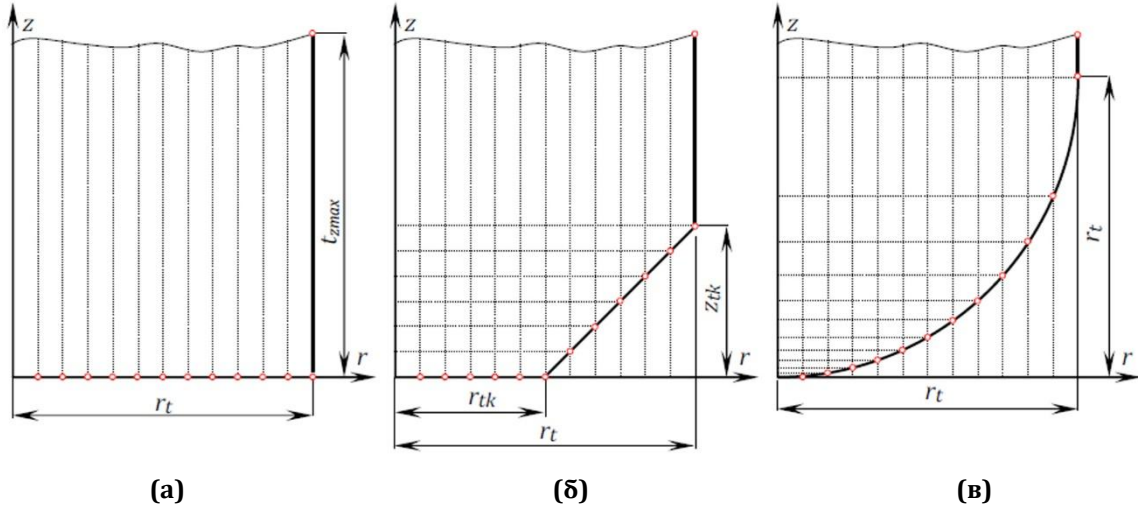
Матрице координата тачака U_x , U_y и U_z уписују се у ASCII датотеке (слика 5.25 пример за мрежу приказану на слици 5.24в), као и остали подаци о алату.

Ux	-10.000	-9.000	-8.000	...	-3.000	-2.000	-1.000	0.000	1.000	2.000	3.000	...	8.000	9.000	10.000
	-10.000	-9.000	-8.000	...	-3.000	-2.000	-1.000	0.000	1.000	2.000	3.000	...	8.000	9.000	10.000
	-10.000	-9.000	-8.000	...	-3.000	-2.000	-1.000	0.000	1.000	2.000	3.000	...	8.000	9.000	10.000
	-10.000	-9.000	-8.000	...	-3.000	-2.000	-1.000	0.000	1.000	2.000	3.000	...	8.000	9.000	10.000
	...														
	-10.000	-9.000	-8.000	...	-3.000	-2.000	-1.000	0.000	1.000	2.000	3.000	...	8.000	9.000	10.000
	-10.000	-9.000	-8.000	...	-3.000	-2.000	-1.000	0.000	1.000	2.000	3.000	...	8.000	9.000	10.000
	-10.000	-9.000	-8.000	...	-3.000	-2.000	-1.000	0.000	1.000	2.000	3.000	...	8.000	9.000	10.000
	-10.000	-9.000	-8.000	...	-3.000	-2.000	-1.000	0.000	1.000	2.000	3.000	...	8.000	9.000	10.000
	...														
	-10.000	-9.000	-8.000	...	-3.000	-2.000	-1.000	0.000	1.000	2.000	3.000	...	8.000	9.000	10.000
	-10.000	-9.000	-8.000	...	-3.000	-2.000	-1.000	0.000	1.000	2.000	3.000	...	8.000	9.000	10.000
	-10.000	-9.000	-8.000	...	-3.000	-2.000	-1.000	0.000	1.000	2.000	3.000	...	8.000	9.000	10.000
	-10.000	-9.000	-8.000	...	-3.000	-2.000	-1.000	0.000	1.000	2.000	3.000	...	8.000	9.000	10.000
	Uy	-10.000	-10.000	-10.000	...	-10.000	-10.000	-10.000	-10.000	-10.000	-10.000	-10.000	...	-10.000	-10.000	-10.000
-9.000		-9.000	-9.000	...	-9.000	-9.000	-9.000	-9.000	-9.000	-9.000	-9.000	...	-9.000	-9.000	-9.000
-8.000		-8.000	-8.000	...	-8.000	-8.000	-8.000	-8.000	-8.000	-8.000	-8.000	...	-8.000	-8.000	-8.000
-7.000		-7.000	-7.000	...	-7.000	-7.000	-7.000	-7.000	-7.000	-7.000	-7.000	...	-7.000	-7.000	-7.000
...															
-2.000		-2.000	-2.000	...	-2.000	-2.000	-2.000	-2.000	-2.000	-2.000	-2.000	...	-2.000	-2.000	-2.000
-1.000		-1.000	-1.000	...	-1.000	-1.000	-1.000	-1.000	-1.000	-1.000	-1.000	...	-1.000	-1.000	-1.000
0.000		0.000	0.000	...	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	...	0.000	0.000	0.000
1.000		1.000	1.000	...	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	...	1.000	1.000	1.000
2.000		2.000	2.000	...	2.000	2.000	2.000	2.000	2.000	2.000	2.000	...	2.000	2.000	2.000
...															
7.000		7.000	7.000	...	7.000	7.000	7.000	7.000	7.000	7.000	7.000	...	7.000	7.000	7.000
8.000		8.000	8.000	...	8.000	8.000	8.000	8.000	8.000	8.000	8.000	...	8.000	8.000	8.000
9.000		9.000	9.000	...	9.000	9.000	9.000	9.000	9.000	9.000	9.000	...	9.000	9.000	9.000
10.000		10.000	10.000	...	10.000	10.000	10.000	10.000	10.000	10.000	10.000	...	10.000	10.000	10.000
Uz	NaN	NaN	NaN	...	NaN	NaN	NaN	10.000	NaN	NaN	NaN	...	NaN	NaN	NaN
	NaN	NaN	NaN	...	6.838	6.127	5.757	5.641	5.757	6.127	6.838	...	NaN	NaN	NaN
	NaN	NaN	NaN	...	4.804	4.343	4.084	4.000	4.084	4.343	4.804	...	NaN	NaN	NaN
	NaN	NaN	NaN	...	3.519	3.144	2.929	2.859	2.929	3.144	3.519	...	NaN	NaN	NaN
	...														
	NaN	6.127	4.343	...	0.673	0.408	0.253	0.202	0.253	0.408	0.673	...	4.343	6.127	NaN
	NaN	5.757	4.084	...	0.513	0.253	0.101	0.050	0.101	0.253	0.513	...	4.084	5.757	NaN
	10.000	5.641	4.000	...	0.461	0.202	0.050	0.000	0.050	0.202	0.461	...	4.000	5.641	10.000
	NaN	5.757	4.084	...	0.513	0.253	0.101	0.050	0.101	0.253	0.513	...	4.084	5.757	NaN
	NaN	6.127	4.343	...	0.673	0.408	0.253	0.202	0.253	0.408	0.673	...	4.343	6.127	NaN
	...														
	NaN	NaN	NaN	...	3.519	3.144	2.929	2.859	2.929	3.144	3.519	...	NaN	NaN	NaN
	NaN	NaN	NaN	...	4.804	4.343	4.084	4.000	4.084	4.343	4.804	...	NaN	NaN	NaN
	NaN	NaN	NaN	...	6.838	6.127	5.757	5.641	5.757	6.127	6.838	...	NaN	NaN	NaN
	NaN	NaN	NaN	...	NaN	NaN	NaN	10.000	NaN	NaN	NaN	...	NaN	NaN	NaN

Слика 5.25. ASCII датотека - пример за мрежу приказану на слици 5.24в

Поред мреже алата U , на основу пречника алата d_t , односно полупречника алата r_t , максималне висине алата t_{zmax} , као и милиметарске поделе мреже w_{mp} израчунавају се матрице координата тачака на изводници алата (слика 5.26а.):

$$\begin{aligned}
 j &= r \cdot w_{mp} + 1 \\
 Urz(j, 1) &= r \\
 Urz(j, 2) &= 0 \\
 j &= r_t \cdot w_{mp} + 2, \\
 Urz(j, 1) &= r_t, \\
 Urz(j, 2) &= t_{zmax}.
 \end{aligned}
 \tag{5.45}$$



Слика 5.26. Матрице координата тачака на изводници алата: (а) цилиндричног глодала, (б) конусног глодала и (в) сферног глодала

На основу пречника алата d_t / d_{tk} , односно полупречника алата r_t / r_{tk} , максималне висине алата t_{zmax} , висине конуса z_{tk} , као и милиметарске поделе мреже w_{mp} израчунавају се матрице координата тачака на изводници конусног глодала (слика 5.26б.):

$$\begin{aligned}
 j &= r \cdot w_{mp} + 1 \\
 Urz(j, 1) &= r \\
 Urz(j, 2) &= \begin{cases} 0, & r \leq r_{tk} \\ \frac{z_{tk}}{r_t - r_{tk}} \cdot [r(j, i) - r_{tk}], & r_{tk} < r \leq r_t \end{cases} \quad r: \begin{cases} r_t \\ w_{mp}, \\ 0 \end{cases} \\
 j &= r_t \cdot w_{mp} + 2, \\
 Urz(j, 1) &= r_t, \\
 Urz(j, 2) &= t_{zmax}.
 \end{aligned} \tag{5.46}$$

На основу пречника алата d_t , односно полупречника алата r_t , максималне висине алата t_{zmax} , као и милиметарске поделе мреже w_{mp} израчунавају се матрице координата тачака на изводници сферног глодала (слика 5.26в.):

$$\begin{aligned}
 j &= r \cdot w_{mp} + 1 \\
 Urz(j, 1) &= r \\
 Urz(j, 2) &= r_t - \sqrt{r_t^2 - r^2} \quad r: \begin{cases} r_t \\ w_{mp}, \\ 0 \end{cases} \\
 j &= r_t \cdot w_{mp} + 2, \\
 Urz(j, 1) &= r_t, \\
 Urz(j, 2) &= t_{zmax}.
 \end{aligned} \tag{5.47}$$

На слици 5.27 приказан је пример добијених парова координата тачака на изводницама цилиндричног, конусног и сферног глодала.

0.000 0.000	0.000 0.000	0.000 0.000
1.000 0.000	1.000 0.000	1.000 0.050
2.000 0.000	2.000 0.000	2.000 0.202
3.000 0.000	3.000 0.000	3.000 0.461
4.000 0.000	4.000 0.000	4.000 0.835
5.000 0.000	5.000 0.000	5.000 1.340
6.000 0.000	6.000 1.000	6.000 2.000
7.000 0.000	7.000 2.000	7.000 2.859
8.000 0.000	8.000 3.000	8.000 4.000
9.000 0.000	9.000 4.000	9.000 5.641
10.000 0.000	10.000 5.000	10.000 10.000
10.000 60.000	10.000 60.000	10.000 60.000

(a)

(б)

(в)

Слика 5.27. Парови координата тачака на изводницама алата: (а) цилиндричног глодала, (б) конусног глодала и (в) сферног глодала

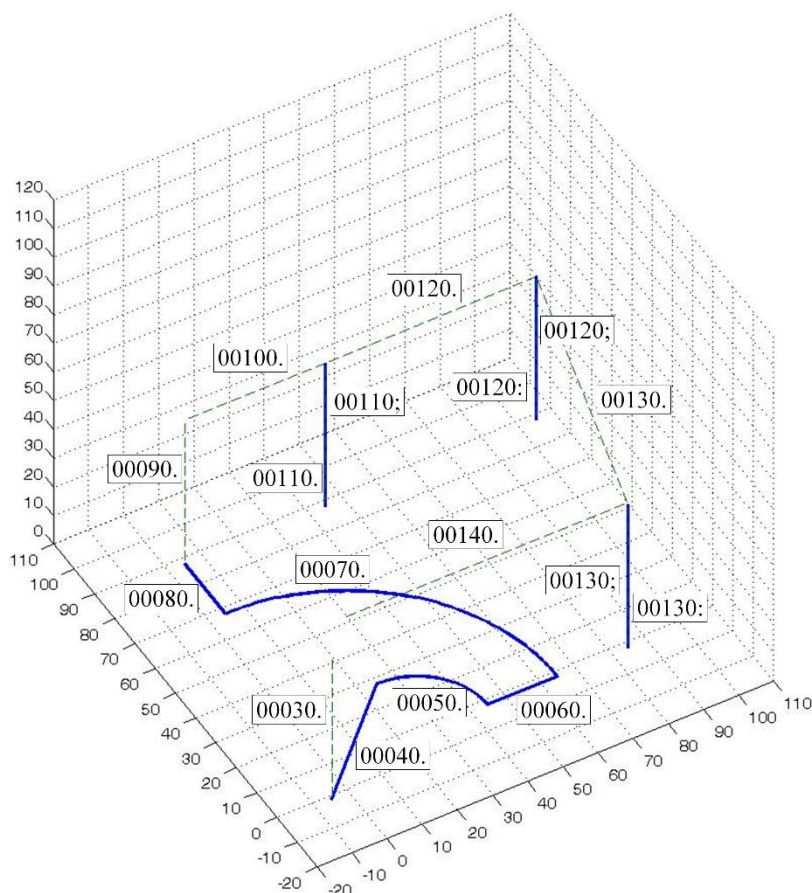
Димензије матрице U_{rz} разликују се у зависности од геометрије глодала и обележавају се са $(u_r, 2)$.

5.2.6. Геометријски опис путање алата

Геометријски опис путање алата добија се на основу трансформисаног NC програма и садржан је у ASCII датотеци описаној у потпоглављу 5.2.3 (слика 5.28). Према подацима у тој датотеци за сваки ред приказује се елементарни део путање (слика 5.29).

	s	n	x_1	y_1	z_1	x_2	y_2	z_2	x_c	y_c	z_c	r	α_0	α
...														
00030. T01 - > 0.000	0	-10.000	-10.000	60.000	-10.000	-10.000	10.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000 ??
00040. T01 | > 0.150	2000	-10.000	-10.000	10.000	19.700	19.300	10.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000 ??
00050. T01) > 0.100	1800	19.700	19.300	10.000	39.700	-0.700	10.000	19.700	-0.700	10.000	20.000	90.000	90.000 XY	
00060. T01 | > 0.200	2000	39.700	-0.700	10.000	59.700	-0.700	10.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000 ??
00070. T01 (> 0.100	1500	59.700	-0.700	10.000	-0.300	59.300	10.000	-0.300	-0.700	10.000	60.000	0.000	90.000 XY	
00080. T01 | > 0.250	2500	-0.300	59.300	10.000	-0.300	79.300	10.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000 ??
00090. T01 - > 0.000	2000	-0.300	79.300	10.000	-0.300	79.300	60.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000 ??
00100. T01 - > 0.000	2000	-0.300	79.300	60.000	39.700	79.300	60.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000 ??
00110. T01 c > 0.100	2000	39.700	79.300	60.000	39.700	79.300	10.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000 ??
00110; T01 ^ > 0.000	2000	39.700	79.300	10.000	39.700	79.300	60.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000 ??
00120. T01 ~ > 0.000	2000	39.700	79.300	60.000	99.700	79.300	60.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000 ??
00120; T01 ! > 0.100	2000	99.700	79.300	60.000	99.700	79.300	10.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000 ??
00120; T01 ^ > 0.000	2000	99.700	79.300	10.000	99.700	79.300	60.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000 ??
00130. T01 ~ > 0.000	2000	99.700	79.300	60.000	79.700	-0.700	60.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000 ??
00130; T01 ! > 0.100	2000	79.700	-0.700	60.000	79.700	-0.700	10.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000 ??
00130; T01 ^ > 0.000	2000	79.700	-0.700	10.000	79.700	-0.700	60.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000 ??
00140. T01 ? > 0.000	2000	79.700	-0.700	60.000	79.700	-0.700	60.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000 ??
...														

Слика 5.28. Пример трансформисаној NC програма у ASCII датотеци

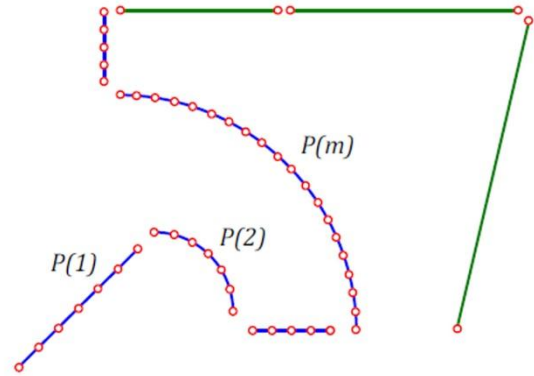
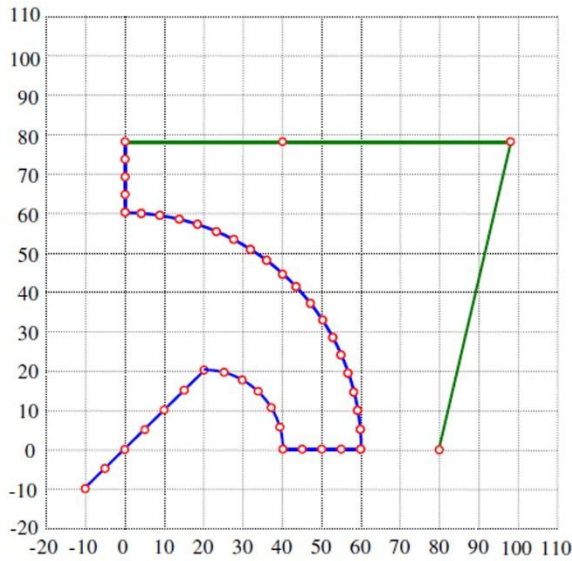


Слика 5.29. Сегменти путање према ASCII датотеци са слике 5.28

Елементарни делови путање који се односе на радни ход алата у захвату са материјалом приказани су пуном линијом, а делови путање који се односе на позиционирање и брзи ход алата приказани су испрекиданом линијом.

Путања алата дефинисана ASCII датотеком (слика 5.28) декомпонује се на елементарне делове путање $P(m)$ којима одговара по један ред података (слика 5.30). Свакој елементарној путањи алата $P(m)$ одговарају:

- тип интерполације - $Pg(m)$,
- корак - $Pf(m) = f$,
- број обртаја - $Ps(m) = s$,
- координате почетне тачке - x_1, y_1, z_1 ,
- координате крајње тачке - x_2, y_2, z_2 ,
- координате центра кружне интерполације - x_c, y_c, z_c ,
- полупречник кружне интерполације - r и
- почетни угао кружне интерполације - α_0 .
- угао кружне интерполације - α



Слика 5.30. Декомпоновање путање на елементарне делове

За елементарне путање алата које се односе на позиционирање и брзи ход алата, тј. $Pg(m) = 'G00'$, на основу координата почетне тачке x_1, y_1, z_1 и координата крајње тачке x_2, y_2, z_2 израчунавају се дужина елементарне путање алата $Pl(m)$, матрице координата тачака на путањи $Px(n), Py(n), Pz(n)$ и углови путање у тим тачкама $Pu(n)$:

$$Pl(m) = \sqrt{(x_2 - x_1)^2 + (y_2 - y_1)^2 + (z_2 - z_1)^2}, \quad (5.48)$$

$$\begin{aligned} Px(n) &= \begin{cases} x_1, & n = 1 \\ x_2, & n = 2 \end{cases} \\ Py(n) &= \begin{cases} y_1, & n = 1 \\ y_2, & n = 2 \end{cases} \\ Pz(n) &= \begin{cases} z_1, & n = 1 \\ z_2, & n = 2 \end{cases} \\ Pu(n) &= \operatorname{arctg} \frac{y_2 - y_1}{x_2 - x_1} \end{aligned} \quad n: \begin{array}{l} 2 \\ \cdot \\ 1 \end{array}. \quad (5.49)$$

Израчунавање $Pu(n)$ према изразу 5.49 користи се ако је наведена функција G17 (избор равни XY).

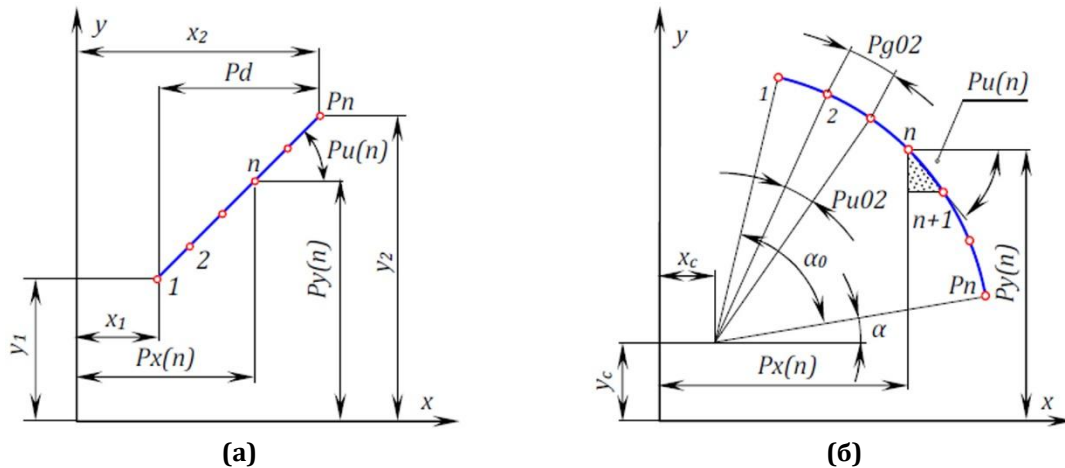
За елементарне путање алата које се односе на линеарну интерполацију, тј. $Pg(m) = 'G01'$, на основу координата почетне тачке x_1, y_1, z_1 и крајње тачке x_2, y_2, z_2 и задатог инкремента p_{g01} израчунавају се дужина елементарне путање алата $Pl(m)$, максимална димензија елементарне путање алата p_d , број тачака на елементарној путањи алата p_n , матрице координата тачака на путањи $Px(n), Py(n), Pz(n)$ и углови путање у тим тачкама $Pu(n)$ (слика 5.31a):

$$\begin{aligned} Pl(m) &= \sqrt{(x_2 - x_1)^2 + (y_2 - y_1)^2 + (z_2 - z_1)^2}, \\ p_d &= \max(|x_2 - x_1|, |y_2 - y_1|, |z_2 - z_1|), \end{aligned} \quad (5.50)$$

$$p_n = \begin{cases} \frac{p_d}{p_{g01}} + 1, & \text{mod}\left(\frac{p_d}{p_{g01}}\right) = 0 \\ \frac{p_d}{p_{g01}} + 2, & \text{mod}\left(\frac{p_d}{p_{g01}}\right) > 0 \end{cases},$$

$$\begin{aligned} Px(n) &= \begin{cases} x_1, & n = 1 \\ Px(n-1) + p_{g01} \cdot \frac{x_2 - x_1}{p_d}, & 1 < n < p_n \\ x_2, & n = p_n \end{cases} \\ Py(n) &= \begin{cases} y_1, & n = 1 \\ Py(n-1) + p_{g01} \cdot \frac{y_2 - y_1}{p_d}, & 1 < n < p_n \\ y_2, & n = p_n \end{cases} \\ Pz(n) &= \begin{cases} z_1, & n = 1 \\ Pz(n-1) + p_{g01} \cdot \frac{z_2 - z_1}{p_d}, & 1 < n < p_n \\ z_2, & n = p_n \end{cases} \\ Pu(n) &= \text{arctg} \frac{y_2 - y_1}{x_2 - x_1} \end{aligned} \quad n: \begin{matrix} p_n \\ 1 \end{matrix} \quad (5.51)$$

Израчунавање $Pu(n)$ према изразу 5.51 користи се ако је наведена функција G17 (избор равни XY).



Слика 5.31. Координате тачака на елементарној путањи и углови: (а) за $Pg(m) = 'G01'$; (б) за $Pg(m) = 'G02'$

За елементарне путање алата које се односе на кружну интерполацију, тј. $Pg(m) = 'G02'$, на основу координата почетне тачке x_1, y_1, z_1 и крајње тачке x_2, y_2, z_2 , координата центра кружне интерполације x_c, y_c, z_c , полупречника кружне интерполације r , почетног угла кружне интерполације α_0 , централног угла кружне интерполације α и задатог инкремента p_{g02} израчунавају се дужина елементарне путање алата $Pl(m)$, угаони инкремент p_{u02} , број тачака на елементарној путањи алата p_n , матрице координата тачака на путањи $Px(n), Py(n), Pz(n)$ и углови путање у тим тачкама $Pu(n)$ (слика 5.31б.):

$$\begin{aligned} Pl(m) &= \frac{2 \cdot \pi \cdot r \cdot \alpha}{360}, \\ p_{u02} &= \frac{p_{g02}}{2 \cdot \pi \cdot r} \cdot 360, \end{aligned} \quad (5.52)$$

$$p_n = \begin{cases} \frac{\alpha}{p_{u02}} + 1, & \text{mod}\left(\frac{\alpha}{p_{u02}}\right) = 0 \\ \frac{\alpha}{p_{u02}} + 2, & \text{mod}\left(\frac{\alpha}{p_{u02}}\right) > 0 \end{cases},$$

$$\begin{aligned} Px(n) &= \begin{cases} x_1, & n = 1 \\ x_c + r \cdot \cos[\alpha_0 - (n-1) \cdot p_{u02}], & 1 < n < p_n \\ x_2, & n = p_n \end{cases} \\ Py(n) &= \begin{cases} y_1, & n = 1 \\ y_c + r \cdot \sin[\alpha_0 - (n-1) \cdot p_{u02}], & 1 < n < p_n \\ y_2, & n = p_n \end{cases} \\ Pz(n) &= \begin{cases} z_1, & n = 1 \\ z_1 + (z_2 - z_1) \cdot \frac{(n-1) \cdot p_{u02}}{\alpha}, & 1 < n < p_n \\ z_2, & n = p_n \end{cases} \quad n: \begin{matrix} p_n \\ 1 \end{matrix} \\ Pu(n) &= \begin{cases} \arctg \frac{Py(n+1) - Py(n)}{Px(n+1) - Px(n)}, & n < p_n \\ \arctg \frac{Py(n) - Py(n-1)}{Px(n) - Px(n-1)}, & n = p_n \end{cases} \end{aligned} \quad (5.53)$$

Изрази 5.53 користе се ако је наведена функција G17 (избор равни XY).

За елементарне путање алата које се односе на кружну интерполацију, тј. $Pg(m) = 'G03'$, на основу координата почетне тачке x_1, y_1, z_1 и крајње тачке x_2, y_2, z_2 , координата центра кружне интерполације x_c, y_c, z_c , полупречника кружне интерполације r , почетног угла кружне интерполације α_0 , централног угла кружне интерполације α и задатог инкремента p_{g03} израчунавају се дужина елементарне путање алата $Pl(m)$, угаони инкремент p_{u03} , број тачака на елементарној путањи алата p_n , матрице координата тачака на путањи $Px(n), Py(n), Pz(n)$ и углови путање у тим тачкама $Pu(n)$ (слика 5.32a)

$$Pl(m) = \frac{2 \cdot \pi \cdot r \cdot \alpha}{360},$$

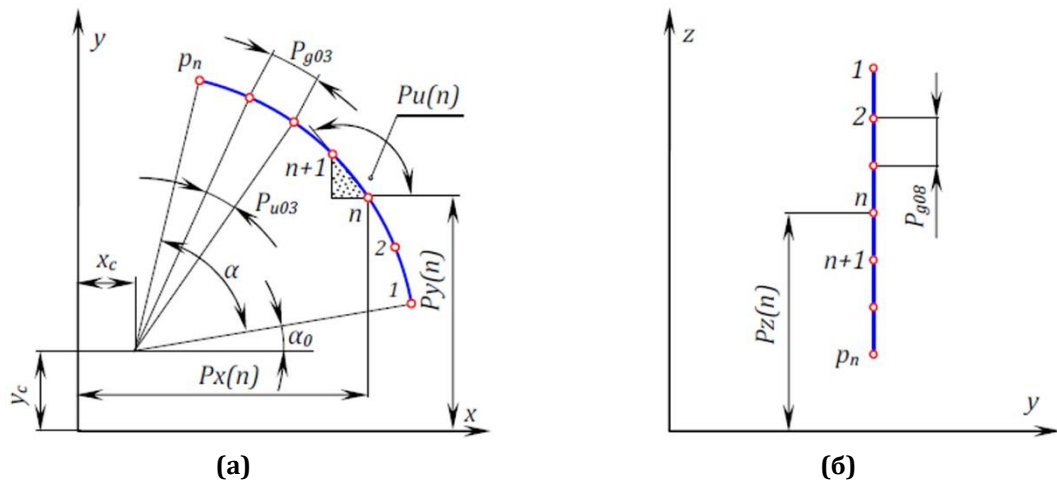
$$p_{u03} = \frac{p_{g03}}{2 \cdot \pi \cdot r} \cdot 360,$$

$$p_n = \begin{cases} \frac{\alpha}{p_{u03}} + 1, & \text{mod}\left(\frac{\alpha}{p_{u03}}\right) = 0 \\ \frac{\alpha}{p_{u03}} + 2, & \text{mod}\left(\frac{\alpha}{p_{u03}}\right) > 0 \end{cases},$$

(5.54)

$$\begin{aligned}
Px(n) &= \begin{cases} x_1, & n = 1 \\ x_c + r \cdot \cos[\alpha_0 + (n-1) \cdot p_{u03}], & 1 < n < p_n \\ x_2, & n = p_n \end{cases} \\
Py(n) &= \begin{cases} y_1, & n = 1 \\ y_c + r \cdot \sin[\alpha_0 + (n-1) \cdot p_{u03}], & 1 < n < p_n \\ y_2, & n = p_n \end{cases} \\
Pz(n) &= \begin{cases} z_1, & n = 1 \\ z_1 + (z_2 - z_1) \cdot \frac{(n-1) \cdot p_{u03}}{\alpha}, & 1 < n < p_n \\ z_2, & n = p_n \end{cases} \\
Pu(n) &= \begin{cases} \arctg \frac{Py(n+1) - Py(n)}{Px(n+1) - Px(n)}, & n < p_n \\ \arctg \frac{Py(n) - Py(n-1)}{Px(n) - Px(n-1)}, & n = p_n \end{cases}
\end{aligned} \quad n: \begin{matrix} p_n \\ 1 \end{matrix} \quad (5.55)$$

Изрази 5.55 користе се ако је наведена функција G17 (избор равни XY).



Слика 5.32. Координате тачака на елементарној путањи и углови: (а) за $Pg(m) = 'G03'$; (б) за $Pg(m) = \{'G81', 'G82', \dots\}$

За елементарне путање алата које се односе на циклусе, тј. $Pg(m) = \{'G81', 'G82', \dots\}$, на основу координата почетне тачке x_1, y_1, z_1 и крајње тачке x_2, y_2, z_2 и задатог инкремента p_{g08} израчунавају се дужина елементарне путање алата $Pl(m)$, максимална димензија елементарне путање алата p_d , број тачака на елементарној путањи алата p_n , матрице координата тачака на путањи $Px(n), Py(n), Pz(n)$ и углови путање у тим тачкама $Pu(n)$ (слика 5.32б. за G17):

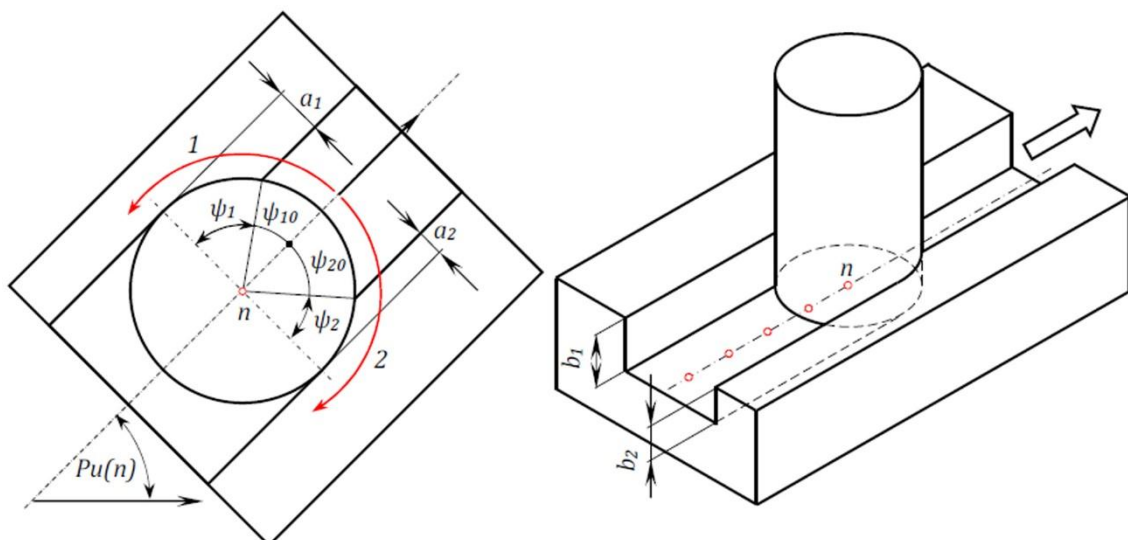
$$\begin{aligned}
Pl(m) &= \sqrt{(x_2 - x_1)^2 + (y_2 - y_1)^2 + (z_2 - z_1)^2}, \\
p_d &= \max(|x_2 - x_1|, |y_2 - y_1|, |z_2 - z_1|), \\
p_n &= \begin{cases} \frac{p_d}{p_{g08}} + 1, & \text{mod} \left(\frac{p_d}{p_{g08}} \right) = 0 \\ \frac{p_d}{p_{g08}} + 2, & \text{mod} \left(\frac{p_d}{p_{g08}} \right) > 0 \end{cases} \quad (5.56)
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 Px(n) &= \begin{cases} x_1, & n = 1 \\ Px(n-1) + p_{g08} \cdot \frac{x_2 - x_1}{p_d}, & 1 < n < p_n \\ x_2, & n = p_n \end{cases} \\
 Py(n) &= \begin{cases} y_1, & n = 1 \\ Py(n-1) + p_{g08} \cdot \frac{y_2 - y_1}{p_d}, & 1 < n < p_n \\ y_2, & n = p_n \end{cases} \\
 Pz(n) &= \begin{cases} z_1, & n = 1 \\ Pz(n-1) + p_{g08} \cdot \frac{z_2 - z_1}{p_d}, & 1 < n < p_n \\ z_2, & n = p_n \\ Pu(n) = 0 \end{cases}
 \end{aligned}
 \quad n: \begin{cases} p_n \\ 1 \end{cases}
 \quad (5.57)$$

Сваку елементарну путању алата $P(m)$ описују матрице Px , Py , Pz и Pu , а димензије матрица Px , Py , Pz и Pu зависе од броја тачака и обележавају се са (p_n) .

5.2.7. Израчунавање елемената процеса резања према међусобном положају припремка и алата на путањи

Израчунавање елемената процеса резања извршава се у свакој тачки елементарне путање алата према међусобном положају припремка и алата, а израчунавају се дубина резања a , ширина резања b (максимална и средња), почетни угао захвата ψ_0 и угао захвата ψ . У циљу дефинисања разлике између истосмерног и супротносмерног глодања, попречни пресек алата се раздваја на половине са обе стране пречника који се поклапа са правцем кретања алата (слика 5.33). Са леве стране у односу на смер кретања алата израчунавају се дубина резања a_1 , ширина резања b_1 (максимална и средња), почетни угао захвата ψ_{10} и угао захвата ψ_1 , а са десне стране у односу на смер кретања алата израчунавају се дубина резања a_2 , ширина резања b_2 (максимална и средња), почетни угао захвата ψ_{20} и угао захвата ψ_2 .



Слика 5.33. Дубина и ширина резања и угао захвата

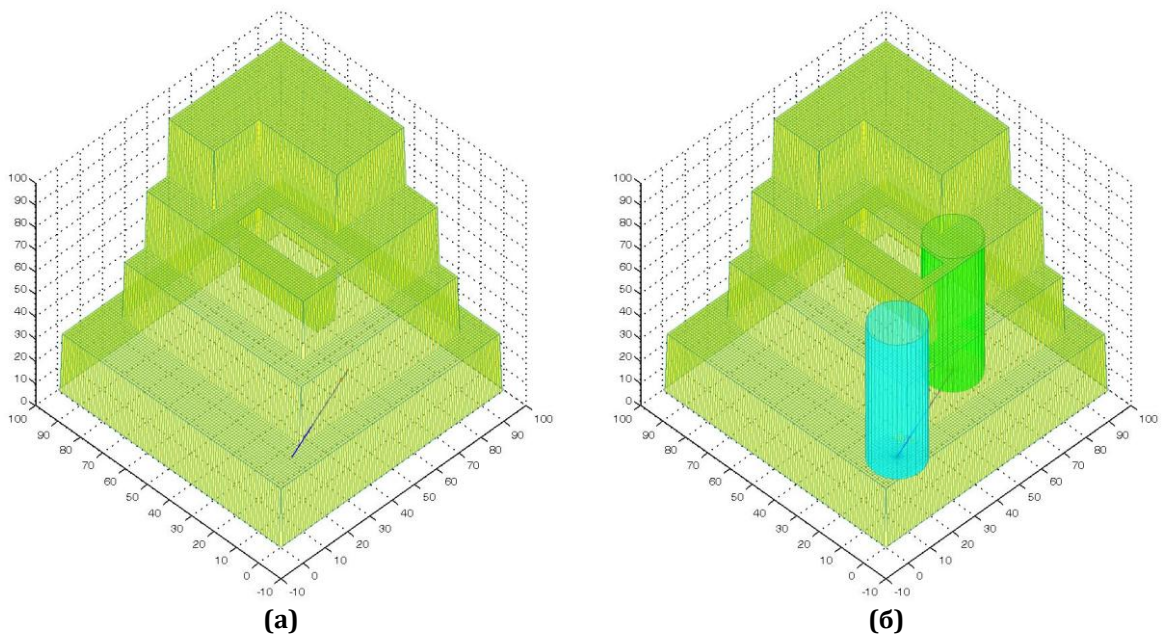
У свакој тачки елементарне путање алата према међусобном положају припремка и алата поступак се одвија у следећим корацима:

- израчунавање координата пресечних тачака мреже припремка и обима алата,
- израчунавање координата контактних тачака мреже припремка и обима алата,
- израчунавање дубине резања, ширине резања и угла резања,
- промена матрица координата тачака на мрежи припремка.

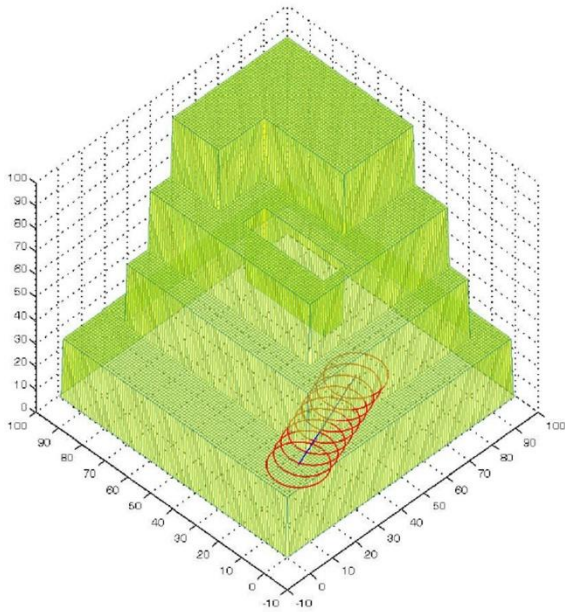
Кораци у поступку се разликују у зависности од геометријског облика алата. У дисертацији су кораци поступка одређивања елемената резања приказани на примеру цилиндричног глодала.

5.2.7.1 Израчунавање координата пресечних тачака мреже припремка и обима алата

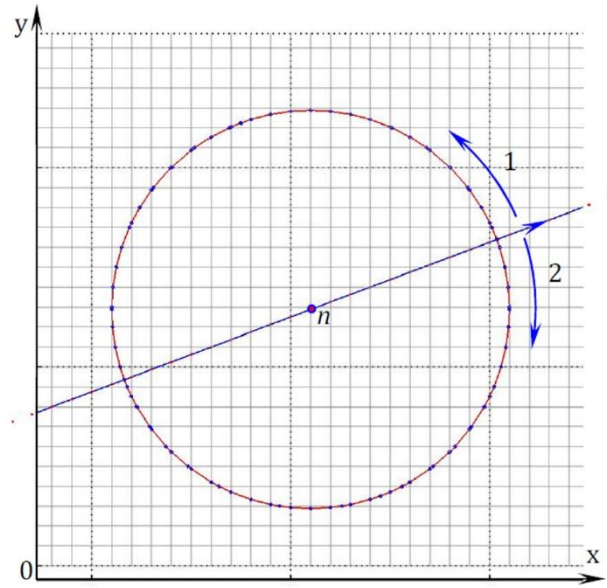
При кретању алата по елементарној путањи (слика 5.34) у свакој тачки путање обим алата пресеца мрежу обратка у равни XU (слика 5.35).



Слика 5.34. Кретање алата по елементарној путањи: (а) сегмент путање алата, (б) положај алата у почетној и крајњој тачки сегмента



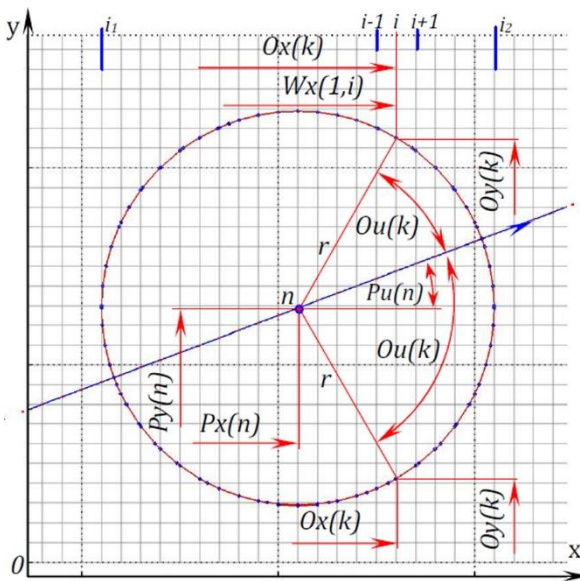
(а)



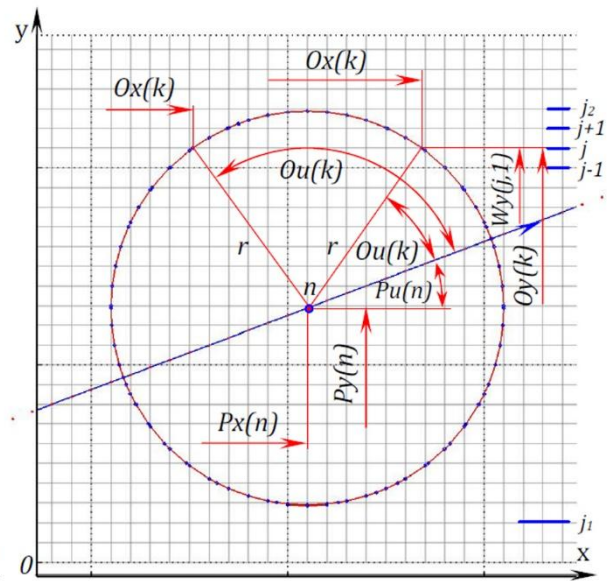
(б)

Слика 5.35. Пресек обима алата и мреже обратка: (а) положај алата у свакој тачки елементарне путање, (б) положај алата у једној тачки елементарне путање

Са леве стране и десне стране у односу на смер кретања алата израчунавају се координате тачака у којима обим алата пресеца мрежу обратка (слика 5.36).



(а)



(б)

Слика 5.36. Координате тачака у којима обим алата пресеца мрежу обратка: (а) пресек са вертикалним линијама и (б) пресек са хоризонталним линијама мреже обратка

На основу мреже припремка W (израз 5.30) матрице координата тачака на изводници алата U_{rz} (израз 5.45), матрице координата тачака на путањи $P_x(n)$, $P_y(n)$, $P_z(n)$ и углова путање у тим тачкама P_u израчунавају се:

1. Матрице координата O_x , O_y , O_z и централних углова O_u тачака у којима обим алата пресеца мрежу обратка по вертикалним линијама (слика 5.36а):

$$r = U_{rz}(u_r - 1, 1), \tag{5.58}$$

$$z = Urz(u_r - 1, 2),$$

$$k = 0,$$

$$\begin{array}{l}
 k = k + 1 \\
 Ox(k) = Wx(1, i) \\
 Oy(k) = Py(n) + \sqrt{r^2 - (Wx(1, i) - Px(n))^2} \\
 Oz(k) = Pz(n) + z \\
 Ou(k) = \arctg \frac{Oy(k) - Py(n)}{Ox(k) - Px(n)} - Pu(n) \\
 k = k + 1 \\
 Ox(k) = Wx(1, i) \\
 Oy(k) = Py(n) - \sqrt{r^2 - (Wx(1, i) - Px(n))^2} \\
 Oz(k) = Pz(n) + z \\
 Ou(k) = \arctg \frac{Oy(k) - Py(n)}{Ox(k) - Px(n)} - Pu(n)
 \end{array}
 \left. \vphantom{\begin{array}{l} k = k + 1 \\ Ox(k) = Wx(1, i) \\ Oy(k) = Py(n) + \sqrt{r^2 - (Wx(1, i) - Px(n))^2} \\ Oz(k) = Pz(n) + z \\ Ou(k) = \arctg \frac{Oy(k) - Py(n)}{Ox(k) - Px(n)} - Pu(n) \\ k = k + 1 \\ Ox(k) = Wx(1, i) \\ Oy(k) = Py(n) - \sqrt{r^2 - (Wx(1, i) - Px(n))^2} \\ Oz(k) = Pz(n) + z \\ Ou(k) = \arctg \frac{Oy(k) - Py(n)}{Ox(k) - Px(n)} - Pu(n) \end{array}} \right|_{i: \begin{array}{l} i_2 \\ \cdot \\ i_1 \end{array}} \quad (5.59)$$

Израз 5.59 може си приказати и алгоритмом (алгоритам 1). Објашњење израза алгоритмима који садрже псеудокод ће се користити у наставку рада.

Алгоритам 1 - приказ израза 5.59 псеудокодом

-
- 1: Израчунавање почетне и крајње координате i_1 и i_2 на мрежи обратка
 - 2: **for** $i = i_1:i_2$
 - 3: $k = k + 1$
 - 4: $Ox(k) = Wx(1, i)$
 - 5: $Oy(k) = Py(n) + \sqrt{r^2 - (Wx(1, i) - Px(n))^2}$
 - 6: $Oz(k) = Pz(n) + z$
 - 7: $Ou(k) = \arctg \frac{Oy(k) - Py(n)}{Ox(k) - Px(n)} - Pu(n)$
 - 8: $k = k + 1$
 - 9: $Ox(k) = Wx(1, i)$
 - 10: $Oy(k) = Py(n) - \sqrt{r^2 - (Wx(1, i) - Px(n))^2}$
 - 11: $Oz(k) = Pz(n) + z$
 - 12: $Ou(k) = \arctg \frac{Oy(k) - Py(n)}{Ox(k) - Px(n)} - Pu(n)$
 - 13: **end for**
-

2. Матрице координата Ox , Oy , Oz и централних углова Ou тачака у којима обим алата пресеца мрежу обратка по хоризонталним линијама (слика 5.36б):

$$\begin{array}{l}
 k = k + 1 \\
 Oy(k) = Wy(j, 1) \\
 Ox(k) = Px(n) + \sqrt{r^2 - (Wy(j, 1) - Py(n))^2} \\
 Oz(k) = Pz(n) + z \\
 Ou(k) = \arctg \frac{Oy(k) - Py(n)}{Ox(k) - Px(n)} - Pu(n) \\
 k = k + 1 \\
 Oy(k) = Wy(j, 1) \\
 Ox(k) = Px(n) - \sqrt{r^2 - (Wy(j, 1) - Py(n))^2} \\
 Oz(k) = Pz(n) + z \\
 Ou(k) = \arctg \frac{Oy(k) - Py(n)}{Ox(k) - Px(n)} - Pu(n)
 \end{array}
 \left. \vphantom{\begin{array}{l} k = k + 1 \\ Oy(k) = Wy(j, 1) \\ Ox(k) = Px(n) + \sqrt{r^2 - (Wy(j, 1) - Py(n))^2} \\ Oz(k) = Pz(n) + z \\ Ou(k) = \arctg \frac{Oy(k) - Py(n)}{Ox(k) - Px(n)} - Pu(n) \\ k = k + 1 \\ Oy(k) = Wy(j, 1) \\ Ox(k) = Px(n) - \sqrt{r^2 - (Wy(j, 1) - Py(n))^2} \\ Oz(k) = Pz(n) + z \\ Ou(k) = \arctg \frac{Oy(k) - Py(n)}{Ox(k) - Px(n)} - Pu(n) \end{array}} \right|_{j: \begin{array}{l} j_2 \\ , \\ j_1 \end{array}} \quad (5.60)$$

Алгоритам 2- приказ израза 5.60 псеудокодом

```

1:   Израчунавање почетне и крајње координате  $j_1$  и  $j_2$  на мрежи обратка
2:   for  $j = j_1:j_2$ 
3:        $k = k + 1$ 
4:        $Oy(k) = Wy(j, 1)$ 
5:        $Ox(k) = Px(n) + \sqrt{r^2 - (Wy(j, 1) - Py(n))^2}$ 
6:        $Oz(k) = Pz(n) + z$ 
7:        $Ou(k) = \arctg \frac{Oy(k) - Py(n)}{Ox(k) - Px(n)} - Pu(n)$ 
8:        $k = k + 1$ 
9:        $Oy(k) = Wy(j, 1)$ 
10:       $Ox(k) = Px(n) - \sqrt{r^2 - (Wy(j, 1) - Py(n))^2}$ 
11:       $Oz(k) = Pz(n) + z$ 
12:       $Ou(k) = \arctg \frac{Oy(k) - Py(n)}{Ox(k) - Px(n)} - Pu(n)$ 
13:   end for

```

Вредности централних углова $Oa(k)$ тачака су од 0° до 180° са леве стране и од 0° до -180° са десне стране у односу на смер кретања алата. Матрицама Ox , Oy , Oz и Ou додају се још по 5 вредности ($k=k+5$) које одговарају централним угловима 0° , 90° , 180° , -90° и -180° . Матрице Ox , Oy , Oz и Ou се сортирају према централном углу и из њих избацују поновљене вредности парова $Ox(k)$, $Oy(k)$. Након тога формирају се матрице координата $O1x$, $O1y$, $O1z$ и централних углова $O1u$ тачака у којима обим алата пресеца мрежу обратка са леве стране у односу на смер кретања алата и матрице координата $O2x$, $O2y$, $O2z$ и централних углова $O2u$ тачака у којима обим алата пресеца мрежу обратка са десне стране у односу на смер кретања алата (слика 5.37а):

$$\left. \begin{array}{l} k_1 = 0, \\ k_1 = k_1 + 1 \\ O1x(k_1) = Ox(k) \\ O1y(k_1) = Oy(k) \\ O1z(k_1) = Oz(k) \\ O1u(k_1) = Ou(k) \end{array} \right\} , 0^\circ \leq Ou(k) \leq 180^\circ \left\| \left\| \begin{array}{l} k: \\ k_o \\ 1 \end{array} \right. \right.$$

$$\left. \begin{array}{l} k_2 = 0, \\ k_2 = k_2 + 1 \\ O2x(k_2) = Ox(k) \\ O2y(k_2) = Oy(k) \\ O2z(k_2) = Oz(k) \\ O2u(k_2) = |Ou(k)| \end{array} \right\} , -180^\circ \leq Ou(k) \leq 0^\circ \left\| \left\| \begin{array}{l} k: \\ k_o \\ 1 \end{array} \right. \right.$$

(5.61)

Алгоритам 3 – приказ израза 5.61 псеудокодом

```

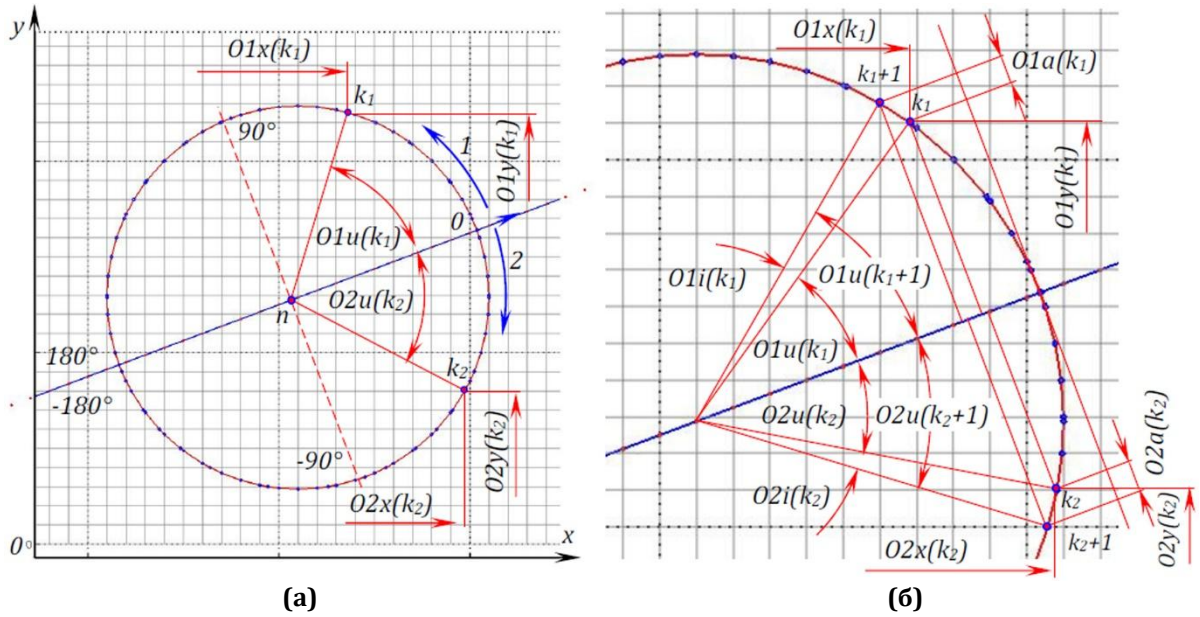
1:   Дефинисање димензије  $k_o$  матрице  $Ox$  (или  $Oy$ ,  $Oz$ ,  $Ou$ )
2:    $k_1 = 0$ 
3:   for  $k = 1: k_o$ 
4:       if  $0^\circ \leq Ou(k) \leq 180^\circ$ 
5:            $k_1 = k_1 + 1$ 
6:            $O1x(k_1) = Ox(k)$ 
7:            $O1y(k_1) = Oy(k)$ 
8:            $O1z(k_1) = Oz(k)$ 
9:            $O1u(k_1) = Ou(k)$ 
10:  end if

```

```

11:   end for
12:    $k_2 = 0$ 
13:   for  $k = 1: k_0$ 
14:       if  $-180^\circ \leq Ou(k) \leq 0^\circ$ 
15:            $k_2 = k_2 + 1$ 
16:            $O2x(k_2) = Ox(k)$ 
17:            $O2y(k_2) = Oy(k)$ 
18:            $O2z(k_2) = Oz(k)$ 
19:            $O2u(k_2) = |Ou(k)|$ 
20:       end if
21:   end for

```



Слика 5.37. Координате тачака у којима алат пресеца мрежу обратка: (а) одговарајући централни углови и (б) елементарни углови између суседних тачака пресека

Димензије матрица $O1x$, $O1y$, $O1z$ и $O1a$ обележавају се са k_{1o} , а матрица $O2x$, $O2y$, $O2z$ и $O2a$ са k_{2o} . Вредности k_{1o} и k_{2o} могу бити једнаке или различите.

На крају се израчунавају матрице разлика углова $O1i$ и растојања између тачака (слика 5.37б) пројектована на правац нормалан на правац путање алата $O1a$, односно $O2i$ и $O2a$:

$$\begin{aligned}
 O1i(k) &= O1u(k+1) - O1u(k) \\
 O1a(k) &= |r \cdot \sin(O1u(k+1)) - r \cdot \sin(O1u(k))| \parallel k: \begin{pmatrix} k_{1o} - 1 \\ 1 \end{pmatrix}, \\
 O1i(k_{1o}) &= 0, \\
 O1a(k_{1o}) &= 0, \\
 O2i(k) &= O2u(k+1) - O2u(k) \\
 O2a(k) &= |r \cdot \sin(O2u(k+1)) - r \cdot \sin(O2u(k))| \parallel k: \begin{pmatrix} k_{2o} - 1 \\ 1 \end{pmatrix}, \\
 O2i(k_{2o}) &= 0, \\
 O2a(k_{2o}) &= 0.
 \end{aligned} \tag{5.62}$$

Алгоритам 4 – приказ израза 5.62 псеудокодом

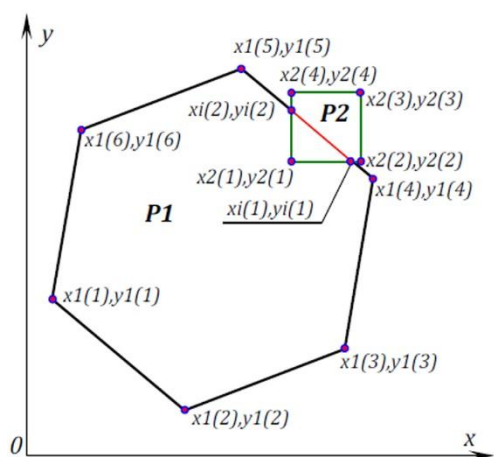
```

1:   for k = 1: k1o-1
2:       O1i(k) = O1u(k + 1) – O1u(k)
3:       O1a(k) = |r · sin(O1u(k + 1)) – r · sin(O1u(k))|
4:   end for
5:   O1i(k1o) = 0
6:   O1a(k1o) = 0
7:   for k = 1: k2o-1
8:       O2i(k) = O2u(k + 1) – O2u(k)
9:       O2a(k) = |r · sin(O2u(k + 1)) – r · sin(O2u(k))|
10:  end for
11:  O2i(k2o) = 0
12:  O2a(k2o) = 0

```

Димензије матрица $O1i$ и $O1a$ су k_{1o} , а матрица $O2i$ и $O2a$ су k_{2o} . Ове матрице касније се користе за израчунавање дубине резања a , почетног угла захвата ψ_0 и угла захвата ψ .

Поступак израчунавања матрица координата Ox , Oy , Oz и централних углова $Ou(k)$ описан изразима (5.57) и (5.58) може се заменити поступком израчунавања истих матрица у коме се користи пресек полигона (слика 5.38).



```

px1 = [x1(1) x1(2) x1(3) x1(4) x1(5) x1(6) x1(1)];
py1 = [y1(1) y1(2) y1(3) y1(4) y1(5) y1(6) y1(1)];

px2 = [x2(1) x2(2) x2(3) x2(4) x2(1)];
py2 = [y2(1) y2(2) y2(3) y2(4) y2(1)];

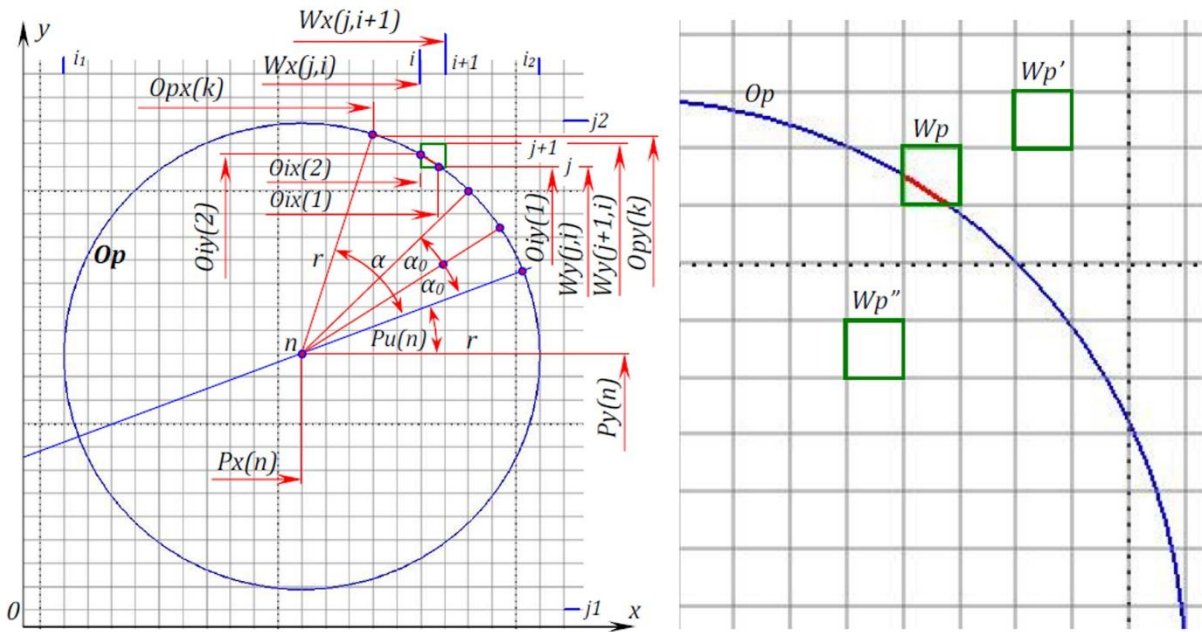
[pxi, pyi] = polyxpoly(px1, py1, px2, py2);

```

Слика 5.38. Пресек два полигона

Полигони $P1$ и $P2$ дефинишу се матрицама координата темена у равни XU , односно $P1 = (px1, py1)$ и $P2 = (px2, py2)$. Резултат пресека полигона $Pi = P1 \cap P2$ су матрице координата пресечних тачака полигона, односно $Pi = (pxi, pyi)$. Димензије матрица pxi и pyi су једнаке и одређују број пресечних тачака линија полигона.

Користећи пресек полигона могуће је одредити координате тачака у којима обим алата пресеца мрежу обратка ако се обим алата и јединични део мреже обратка дефинишу као полигони у равни XU (слика 5.39а.).



(а) **(б)**
Слика 5.39. Пресек обима алата и обратка као пресек два полигона: (а) координате одговарајућих тачака, (б) увеличани приказ

Обим алата дефинише се као полигон O_p израчунавањем матрица координата тачака O_{px} и O_{py} са задатим угаоним кораком α_0 :

$$r = Urz(u_r - 1, 1), \quad (5.63)$$

$$k = 0,$$

$$\left. \begin{array}{l} k = k + 1 \\ O_{px}(k) = Px(n) + r \cdot \cos(Pu(n) + \alpha) \\ O_{py}(k) = Py(n) + r \cdot \sin(Pu(n) + \alpha) \end{array} \right\| \alpha: \begin{array}{l} 360 \\ \alpha_0 \\ 0 \end{array} \quad (5.64)$$

Алгоритам 5 - приказ израза 5.64 псеудокодом

-
- 1: Дефинисање угаоног корака α_0
 - 2: **for** $\alpha = 0:\alpha_0:360$
 - 3: $k = k + 1$
 - 4: $O_{px}(k) = Px(n) + r \cdot \cos(Pu(n) + \alpha)$
 - 5: $O_{py}(k) = Py(n) + r \cdot \sin(Pu(n) + \alpha)$
 - 6: **end for**
-

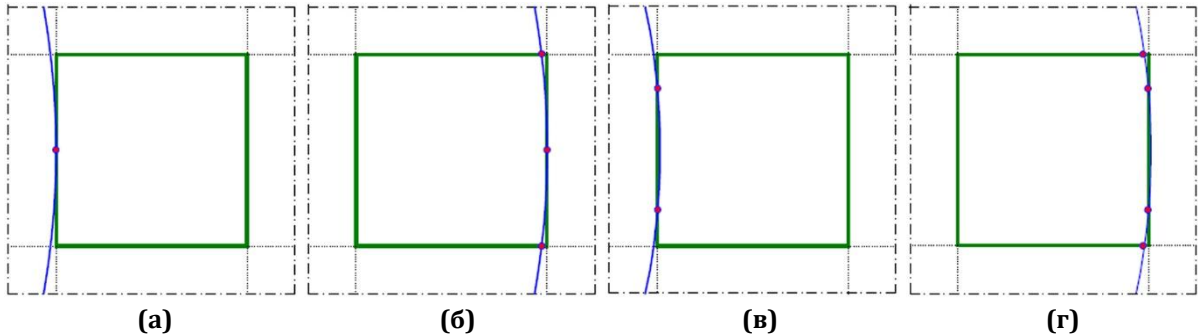
Јединични део мреже обратка дефинише се као полигон W_p одређивањем матрица координата тачака W_{px} и W_{py} према матрицама координата тачака W_x и W_y на мрежи припремка W :

$$\begin{aligned} W_{px} &= [W_x(j, i) \quad W_x(j, i + 1) \quad W_x(j + 1, i + 1) \quad W_x(j + 1, i) \quad W_x(j, i)], \\ W_{py} &= [W_y(j, i) \quad W_y(j, i + 1) \quad W_y(j + 1, i + 1) \quad W_y(j + 1, i) \quad W_y(j, i)]. \end{aligned} \quad (5.65)$$

Координате пресечних тачака O_{ix} и O_{iy} полигона O_p и W_p добијају се као:

$$[O_{ix} \quad O_{iy}] = O_p \cap W_p. \quad (5.66)$$

Димензије матрица Oix и Oiy су једнаке (означавају се са k_{io}) и зависе од броја пресечних тачака полигона Op и Wp , а једнаке су 0 уколико нема пресечних тачака полигона (полигони Op и Wp' и Op и Wp'' , Слика 5.39.б.). На слици 5.40 приказани су карактеристични случајеви пресека полигона Op и Wp .



Слика 5.40. Карактеристични случајеви пресека полигона алата и обратка: (а) пресек у једној тачки, (б) пресек у три тачке, (в) пресек у две тачке, (г) пресек у четири тачке

Формирањем полигона Wp за сваки јединични део мреже обратка (слика 5.39) који припада делу мреже припремка W у границама $j1 \leq j < j2$ и $i1 \leq i < i2$ (слика 5.41а) и одређивањем координата пресечних тачака Oix и Oiy полигона Op и свих полигона Wp добијају се матрице координата $Ox(k)$ и $Oy(k)$ тачака у којима обим алата пресеца мрежу обратка:

$k = 0,$

$$\begin{matrix} [Oix & Oiy] = Op \cap Wp \\ k = k + 1 \\ Ox(k) = Oix(k_i) \\ Oy(k) = Oiy(k_i) \end{matrix} \parallel \begin{matrix} k_i: \\ k_{io} \\ 1 \end{matrix} \parallel \begin{matrix} j: \\ j_2 - 1 \\ j_1 \end{matrix} \quad \begin{matrix} i: \\ i_2 - 1 \\ i_1 \end{matrix} . \quad (5.67)$$

Алгоритам 6 – приказ израза 5.67 псеудокодом

```

1:   k = 0
2:   for j = j1:j2-1
3:     for i = i1:i2-1
4:       Дефинисање полигона Wp
5:       [Oix Oiy] = Op ∩ Wp
6:       Дефинисање димензије kio матрице Oix (или Oiy)
7:       if kio > 0
8:         for ki = 1:kio
9:           k = k + 1
10:          Ox(k) = Oix(ki)
11:          Oy(k) = Oiy(ki)
12:        end for
13:      end if
14:    end for
15:  end for

```

Односно:

$Ox = []$,

$Oy = []$,

$$[Oix \quad Oiy] = Op \cap Wp \parallel \begin{matrix} j: & \left| \begin{matrix} j_2 - 1 \\ \\ \\ j_1 \end{matrix} \right. & i: & \left| \begin{matrix} i_2 - 1 \\ \\ i_1 \end{matrix} \right. \end{matrix} \quad (5.68)$$

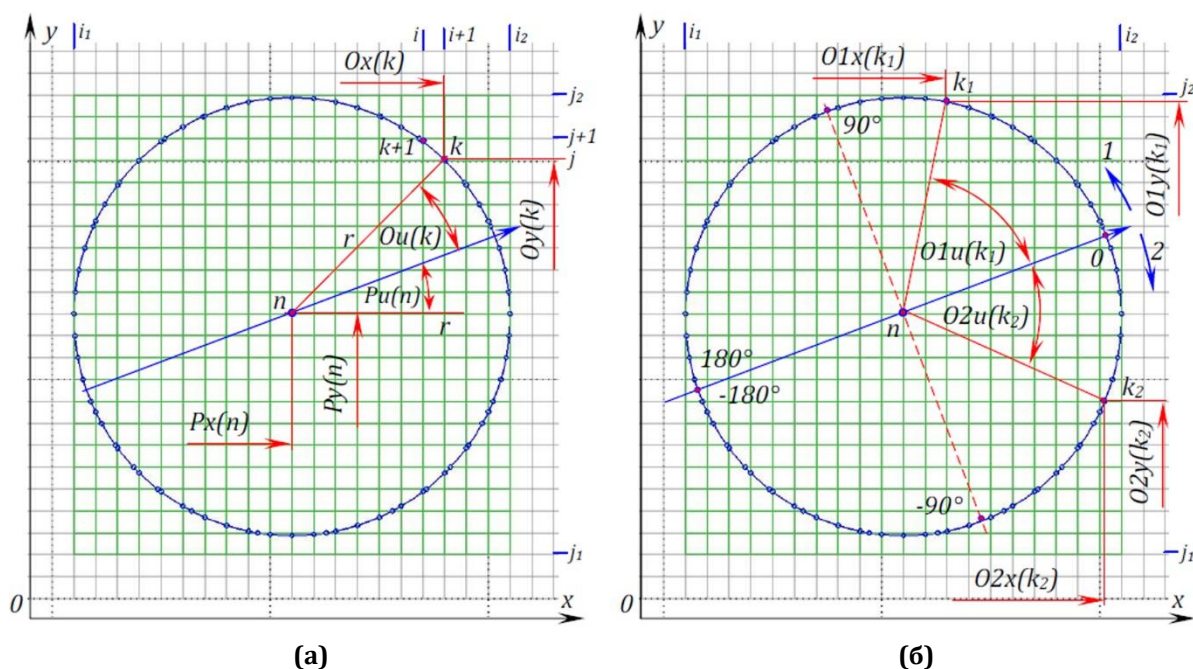
Алгоритам 7 – приказ израза 5.68 псеудокодом

```

1:   Ox = [ ]
2:   Oy = [ ]
3:   for j = j1:j2-1
4:       for i = i1:i2-1
5:           Дефинисање полигона Wp
6:           [Oix  Oiy] = Op ∩ Wp
7:           Ox = Ox ∪ Oix
8:           Oy = Oy ∪ Oiy
9:       end for
10:  end for

```

Димензије матрица Ox и Oy обележавају се са k_o .



Слика 5.41. Пресечне тачке Oix и Oiy полигона Op и свих полигона Wp : (а) произвољна тачка пресека, (б) крајње тачке пресека

Након дефинисања матрица координата Ox и Oy , израчунавају се матрице координата Oz и централних углова Ou тачака у којима обим алата пресеца мрежу обратка:

$$z = Urz(u_r - 1, 2), \quad (5.69)$$

$$Ou(k) = \arctg \frac{Oy(k) - Py(n)}{Ox(k) - Px(n)} - Pu(n) \quad \left\| \begin{array}{l} k: \\ 1 \end{array} \right. \begin{array}{l} k_o \\ 1 \end{array} \quad (5.70)$$

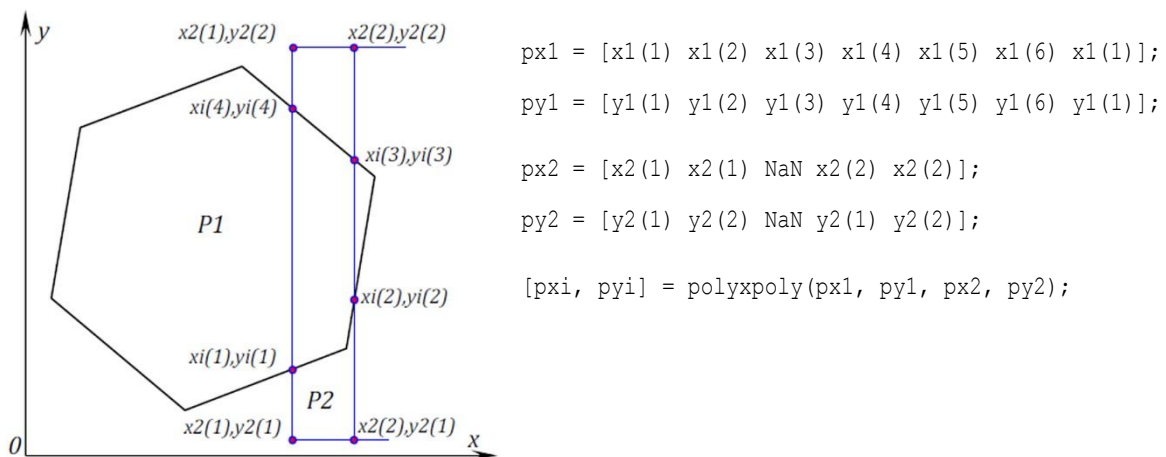
Алгоритам 8 – приказ израза 5.70 псеудокодом

-
- 1: Дефинисање димензије k_o матрице Ox (или Oy, Oz, Ou)
 - 2: **for** $k = 1: k_o$
 - 3: $Oz(k) = Pz(n) + z$
 - 4: $Ou(k) = \arctg \frac{Oy(k) - Py(n)}{Ox(k) - Px(n)} - Pu(n)$
 - 5: **end for**
-

Даљи поступак додавања пресечних тачака које одговарају централним угловима $0^\circ, 90^\circ, 180^\circ, -90^\circ$ и -180° , сортирања матрица Ox, Oy, Oz и Ou према централном углу и избацивања поновљених вредности парова Ox, Oy је већ описан. Формирање матрица координата $O1x, O1y, O1z$ и централних углова $O1u$ тачака у којима обим алата пресеца мрежу обратка са леве стране у односу на смер кретања алата и матрица координата $O2x, O2y, O2z$ и централних углова $O2u$ тачака у којима обим алата пресеца мрежу обратка са десне стране у односу на смер кретања алата (слика 5.41б) описано је изразима 5.59.

Израчунавања матрице разлика углова $O1i$ и растојања између тачака пројектована на правац нормалан на правац путање алата $O1a$, односно $O2i$ и $O2a$ описана су изразима 5.62. Као што је већ наведено, димензије матрица $O1x, O1y, O1z, O1u, O1i$ и $O1a$ обележавају се са k_{1o} , а матрица $O2x, O2y, O2z, O2u, O2i$ и $O2a$ са k_{2o} . Вредности k_{1o} и k_{2o} могу бити једнаке или различите.

Дефинисање полигона Wp као јединичног дела мреже припремка W (описано на слици 5.38 и 5.39 и изразима 5.63) могуће је заменити дефинисањем линије Wp коју чине паралелне дужи на делу мреже припремка W (слика 5.42а.).



Слика 5.42. Дефинисање полигона Wp као линије коју чине паралелне дужи

Полигон $P1$ дефинише се матрицама координата темена у равни XU , односно $P1 = (px1, py1)$. Линија $P2$ дефинише се матрицама координата крајева дужи у равни XU које садрже и чланове NaN (*Not A Number*), односно $P2 = (px2, py2)$. Чланови NaN који се наводе након сваке две координате деле линију $P2$ на раздвојене сегменте. Резултат пресека полигона и линије $Pi = P1 \cap P2$ су матрице координата пресечних тачака полигона, односно $Pi = (pxi, pyi)$.

Димензије матрица pxi и pyi су једнаке и одређују број пресечних тачака линија полигона и линије.

Обим алата дефинише се као полигон у равни XY (описано на слици 5.39а и изразима (5.61) и (5.62)). Део мреже обратка дефинише се као линија састављена од паралелних сегмената у равни XY .

Линија састављена од паралелних хоризонталних сегмената Wp (Слика 5.43а.), као и линија састављена од паралелних вертикалних сегмената Wp (Слика 5.43б.) дефинише се одређивањем матрица координата тачака Wpx и Wpy према матрицама координата тачака Wx и Wy на мрежи припремка W :

$$\begin{array}{l}
 k = 0, \\
 \quad k = k + 1 \\
 Wpx(k) = Wx(j, i_1) \\
 Wpy(k) = Wy(j, i_1) \\
 \quad k = k + 1 \\
 Wpx(k) = Wx(j, i_2) \\
 Wpy(k) = Wy(j, i_2) \\
 \quad k = k + 1 \\
 Wpx(k) = NaN \\
 Wpy(k) = NaN \\
 \left. \begin{array}{l} \\ \\ \\ \\ \\ \\ \\ \\ \\ \\ \end{array} \right\} j: \begin{array}{l} j_2 \\ \\ \\ j_1 \end{array}
 \end{array} \quad (5.71)$$

$$\begin{array}{l}
 \quad k = k + 1 \\
 Wpx(k) = Wx(j_1, i) \\
 Wpy(k) = Wy(j_1, i) \\
 \quad k = k + 1 \\
 Wpx(k) = Wx(j_2, i) \\
 Wpy(k) = Wy(j_2, i) \\
 \quad k = k + 1 \\
 Wpx(k) = NaN \\
 Wpy(k) = NaN \\
 \left. \begin{array}{l} \\ \\ \\ \\ \\ \\ \\ \\ \end{array} \right\} i: \begin{array}{l} i_2 \\ \\ \\ i_1 \end{array}
 \end{array} \quad (5.72)$$

Алгоритам 9 – приказ израза 5.71 псеудокодом

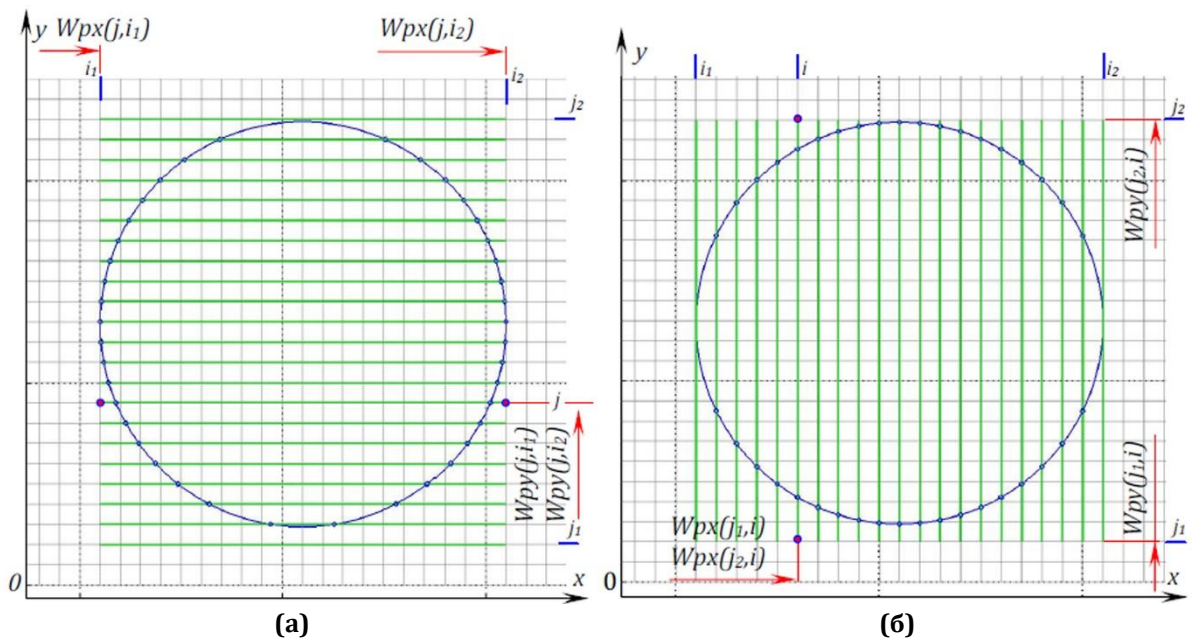
- 1: Израчунавање почетне и крајње координате j_1 и j_2 на мрежи обратка
 - 2: Израчунавање почетне и крајње координате i_1 и i_2 на мрежи обратка
 - 3: $k = 0$
 - 4: **for** $j = j_1:j_2$
 - 5: $k = k + 1$
 - 6: $Wpx(k) = Wx(j, i_1)$
 - 7: $Wpy(k) = Wy(j, i_1)$
 - 8: $k = k + 1$
 - 9: $Wpx(k) = Wx(j, i_2)$
 - 10: $Wpy(k) = Wy(j, i_2)$
 - 11: $k = k + 1$
 - 12: $Wpx(k) = NaN$
 - 13: $Wpy(k) = NaN$
 - 14: **end for**
-

Алгоритам 10 - приказ израза 5.72 псеудокодом

```

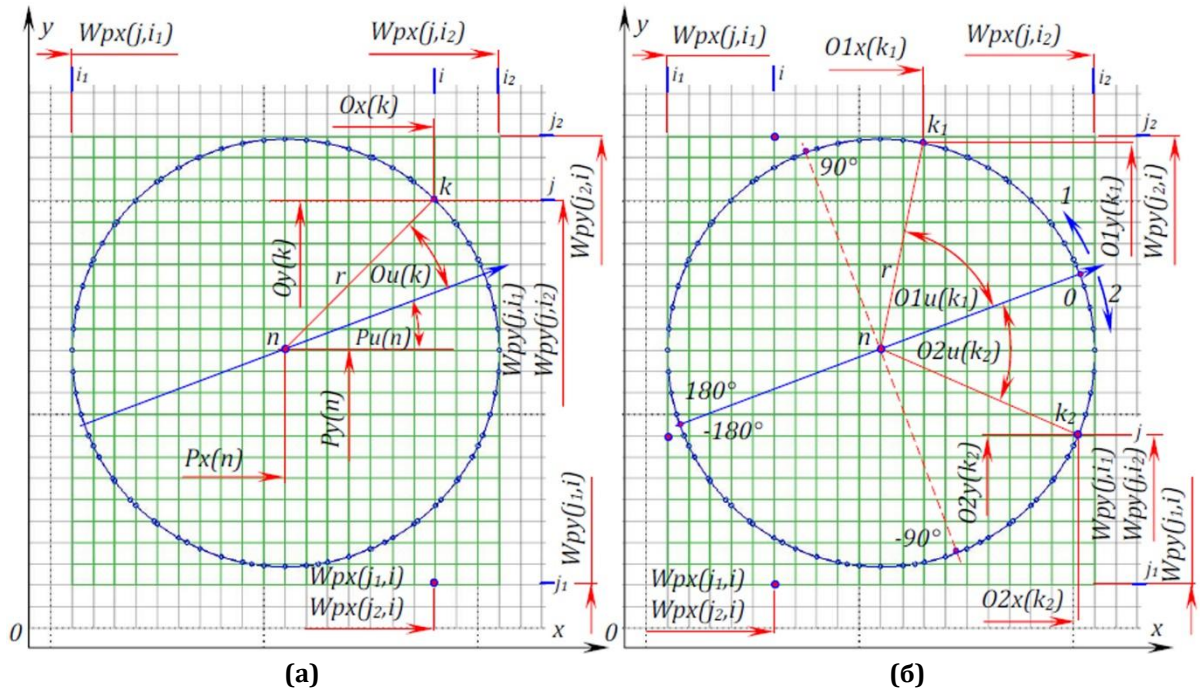
1:   for  $i = i_1:i_2$ 
2:        $k = k + 1$ 
3:        $W_{px}(k) = W_x(j_1, i)$ 
4:        $W_{py}(k) = W_y(j_1, i)$ 
5:        $k = k + 1$ 
6:        $W_{px}(k) = W_x(j_2, i)$ 
7:        $W_{py}(k) = W_y(j_2, i)$ 
8:        $k = k + 1$ 
9:        $W_{px}(k) = NaN$ 
10:       $W_{py}(k) = NaN$ 
11:   end for

```



Слика 5.43. Линије састављене од сегмента W_p : (а) паралелних хоризонталних и (б) паралелних вертикалних сегмента W_p

Спајањем линија састављених од паралелних хоризонталних и вертикалних сегмента (слика 5.44а.) коришћењем израза 5.71 и 5.72 добија се линија W_p састављена од паралелних сегмента одређена матрицама координата тачака W_{px} и W_{py} на делу мреже припремка W .



Слика 5.44. Линија W_p састављена од паралелних сегмената одређена матрицама координата тачака W_{px} и W_{py} : (а) пресек са обимом алата у произвољној тачки, (б) крајње тачке пресека са обимом алата

За разлику од израза 5.66 према коме се добијају координате пресечних тачака O_{ix} и O_{iy} полигона O_p и W_p , па тек касније матрице координата $O_x(k)$ и $O_y(k)$, пресеком полигона O_p и линије W_p се одмах добијају матрице координата $O_x(k)$ и $O_y(k)$:

$$[O_x \quad O_y] = O_p \cap W_p. \quad (5.73)$$

Након дефинисања матрица координата $O_x(k)$ и $O_y(k)$, израчунавају се матрице координата $O_z(k)$ и централних углова $O_a(k)$ тачака у којима обим алата пресеца мрежу обратка према изразима 5.74 и 5.75.

Даљи поступак додавања пресечних тачака које одговарају централним угловима 0° , 90° , 180° , -90° и -180° , сортирања матрица $O_x(k)$, $O_y(k)$, $O_z(k)$ и $O_a(k)$ према централном углу и избацивања поновљених вредности парова $O_x(k)$, $O_y(k)$ је већ описан. Формирање матрица координата $O_{1x}(k_1)$, $O_{1y}(k_1)$, $O_{1z}(k_1)$ и централних углова $O_{1u}(k_1)$ тачака у којима обим алата пресеца мрежу обратка са леве стране у односу на смер кретања алата и матрица координата $O_{2x}(k_2)$, $O_{2y}(k_2)$, $O_{2z}(k_2)$ и централних углова $O_{2u}(k_2)$ тачака у којима обим алата пресеца мрежу обратка са десне стране у односу на смер кретања алата (слика 5.44б.) описано је изразима 5.61.

Израчунавања матрице разлика углова $O_{1i}(k_1)$ и растојања између тачака пројектована на правац нормалан на правац путање алата $O_{1a}(k_1)$, односно $O_{2i}(k_2)$ и $O_{2a}(k_2)$ описана су изразима 5.65. Као што је већ наведено, димензије матрица O_{1x} , O_{1y} , O_{1z} , O_{1a} , O_{1u} и O_{1r} обележавају се са k_{1o} , а матрица O_{2x} , O_{2y} , O_{2z} , O_{2u} , O_{2i} и O_{2a} са k_{2o} . Вредности k_{1o} и k_{2o} могу бити једнаке или различите.

Одређивање линије састављене од паралелних сегмената W_p за део мреже припремка W (изрази 5.71 и 5.72) је једноставније урадити за целу мрежу припремка W (слика 5.45):

$$\begin{array}{l}
k = 0, \\
\left. \begin{array}{l}
k = k + 1 \\
Wpx(k) = Wx(j, 1) \\
Wpy(k) = Wy(j, 1) \\
k = k + 1 \\
Wpx(k) = Wx(j, w_j) \\
Wpy(k) = Wy(j, w_j) \\
k = k + 1 \\
Wpx(k) = NaN \\
Wpy(k) = NaN
\end{array} \right\| \begin{array}{l}
j: \left. \begin{array}{l}
w_j \\
1
\end{array} \right\} , \\
\end{array} \quad (5.74)
\end{array}$$

$$\begin{array}{l}
\left. \begin{array}{l}
k = k + 1 \\
Wpx(k) = Wx(1, i) \\
Wpy(k) = Wy(1, i) \\
k = k + 1 \\
Wpx(k) = Wx(w_j, i) \\
Wpy(k) = Wy(w_j, i) \\
k = k + 1 \\
Wpx(k) = NaN \\
Wpy(k) = NaN
\end{array} \right\| \begin{array}{l}
i: \left. \begin{array}{l}
w_i \\
i_1
\end{array} \right\} . \\
\end{array} \quad (5.75)
\end{array}$$

Алгоритам 11- приказ израза 5.74 псеудокодом

```

1: Дефинисање димензија мреже обратка  $w_j$  и  $w_i$ 
3:  $k = 0$ 
4: for  $j = 1:w_j$ 
5:      $k = k + 1$ 
6:      $Wpx(k) = Wx(j, 1)$ 
7:      $Wpy(k) = Wy(j, 1)$ 
8:      $k = k + 1$ 
9:      $Wpx(k) = Wx(j, w_j)$ 
10:     $Wpy(k) = Wy(j, w_j)$ 
11:     $k = k + 1$ 
12:     $Wpx(k) = NaN$ 
13:     $Wpy(k) = NaN$ 
14: end for

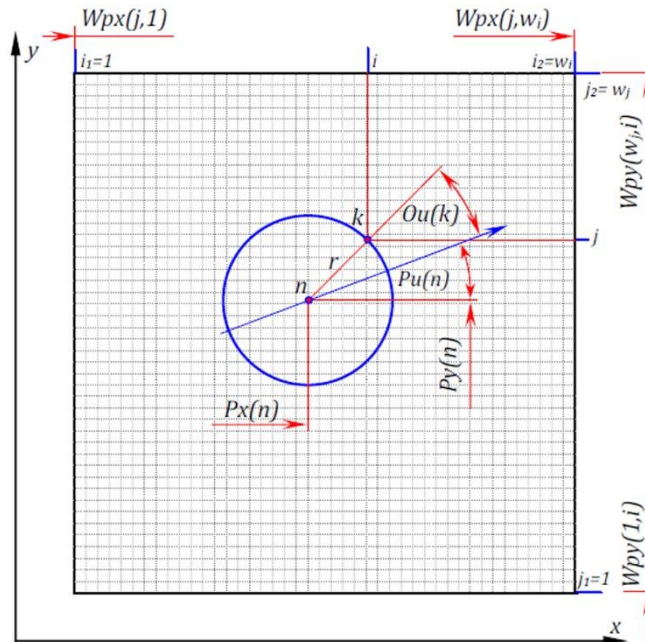
```

Алгоритам 12 – приказ израза 5.75 псеудокодом

```

1: for  $i = 1:w_i$ 
2:      $k = k + 1$ 
3:      $Wpx(k) = Wx(1, i)$ 
4:      $Wpy(k) = Wy(1, i)$ 
5:      $k = k + 1$ 
6:      $Wpx(k) = Wx(w_j, i)$ 
7:      $Wpy(k) = Wy(w_j, i)$ 
8:      $k = k + 1$ 
9:      $Wpx(k) = NaN$ 
10:     $Wpy(k) = NaN$ 
11: end for

```



Слика 5.45. Линија састављена од паралелних сегмената за целу мрежу припремка W

5.2.7.2. Израчунавање координата контактних тачака мреже припремка и обима алата

Координате контактних тачака припремка и обима алата израчунавају се на основу матрица координата на мрежи припремка W_x , W_y и W_z (израз 5.30) матрица координата на мрежи припремка W_{2x} , W_{2y} и W_{2z} (израз 5.37) и матрица координата тачака у којима обим алата пресеца мрежу обратка O_{1x} , O_{1y} , O_{1z} , O_{2x} , O_{2y} , O_{2z} (израз 5.61). За сваке две суседне пресечне тачке на обиму алата (слика 5.46а) са координатама $O_{1x}(k)$, $O_{1y}(k)$ и $O_{1x}(k+1)$, $O_{1y}(k+1)$ одређује се јединични део мреже обратка који обим алата пресеца. Тај јединични део мреже обратка одређен је координатама $W_x(j,i)$ и $W_y(j,i)$ и положајем тачке (j, i) у матрицама координата W_x , W_y и W_z :

$$\begin{aligned}
 & \left. \begin{aligned} i_1 = i, W_x(1, i) \leq O_{1x}(k) < W_x(1, i) + w_{pm} \\ i_2 = i, W_x(1, i) \leq O_{1x}(k+1) < W_x(1, i) + w_{pm} \end{aligned} \right\| \begin{aligned} i: & \left\| \begin{array}{c} W_i \\ 1 \end{array} \right\| \\ & k: \left\| \begin{array}{c} k_{10} - 1 \\ 1 \end{array} \right\| \end{aligned} \\
 & \qquad \qquad \qquad i = \min(i_1, i_2) \\
 & \left. \begin{aligned} j_1 = j, W_y(j, 1) \leq O_{1y}(k) < W_y(j, 1) + w_{pm} \\ j_2 = j, W_y(j, 1) \leq O_{1y}(k+1) < W_y(j, 1) + w_{pm} \end{aligned} \right\| \begin{aligned} j: & \left\| \begin{array}{c} W_j \\ 1 \end{array} \right\| \\ & k: \left\| \begin{array}{c} k_{10} - 1 \\ 1 \end{array} \right\| \end{aligned} \\
 & \qquad \qquad \qquad j = \min(j_1, j_2)
 \end{aligned} \tag{5.76}$$

Алгоритам 13 – приказ израза 5.67 псеудокодом

```

1:   for  $k = 1:k_{10}-1$ 
2:     for  $i = 1:w_i$ 
3:       if  $W_x(1, i) \leq O_{1x}(k) < W_x(1, i) + w_{pm}$ 
4:          $i_1 = i$ 
5:       end if
6:       if  $W_x(1, i) \leq O_{1x}(k+1) < W_x(1, i) + w_{pm}$ 
7:          $i_2 = i$ 
8:       end if
9:     end for
10:     $i = \min(i_1, i_2)$ 
11:    for  $j = 1:w_j$ 

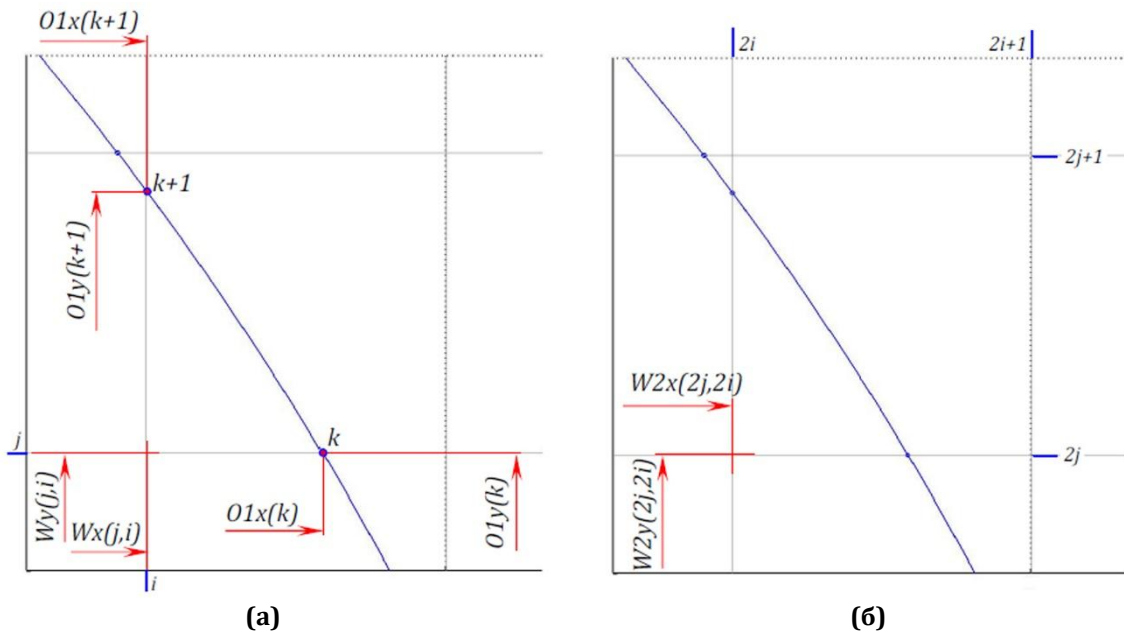
```



```

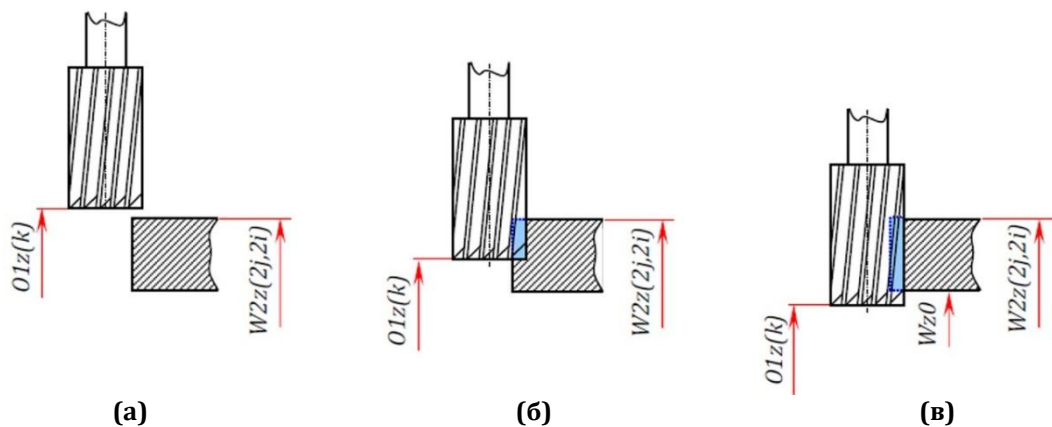
12:           if  $Wy(j, 1) \leq O1y(k) < Wy(j, 1) + w_{pm}$ 
13:                  $j_1 = j$ 
14:           end if
15:           if  $Wy(j, 1) \leq O1y(k + 1) < Wy(j, 1) + w_{pm}$ 
16:                  $j_2 = j$ 
17:           end if
18:           end for
19:            $j = \min(j_1, j_2)$ 
20:   end for

```



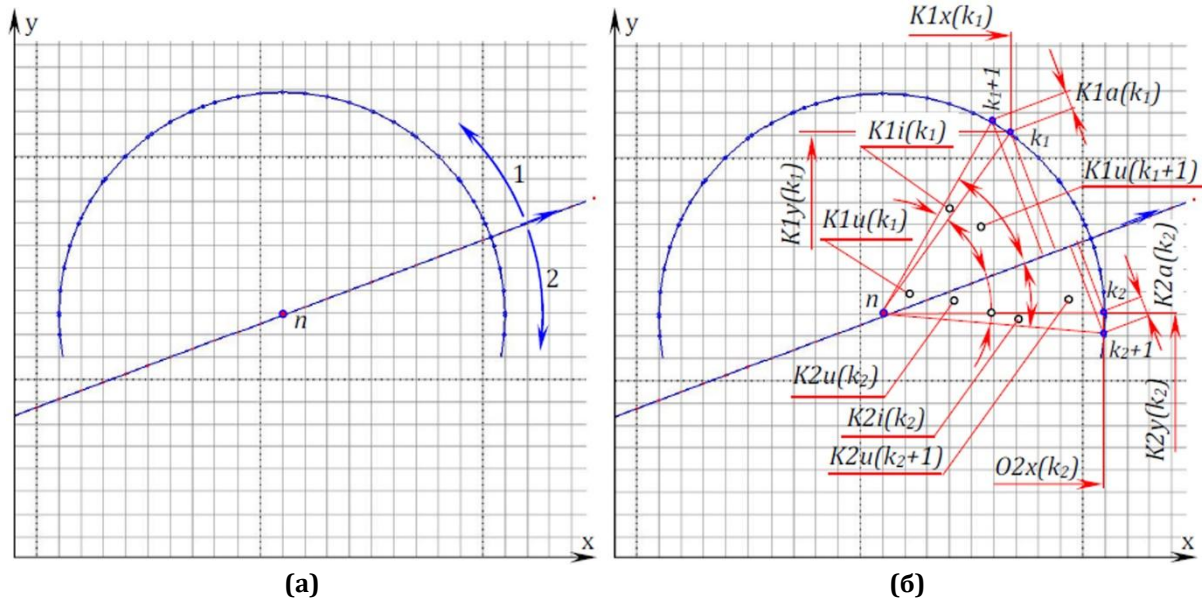
Слика 5.46. Две суседне пресечне тачке на обиму алата: (а) координате пресечних тачака, (б) координате јединичног пресечног дела мреже

Координате $Wx(j, i)$ и $Wy(j, i)$ тачке (j, i) једнаке су координатама $W2x(2 \cdot j, 2 \cdot i)$ и $W2y(2 \cdot j, 2 \cdot i)$ дефинисаних матрицама $W2x$ и $W2y$ (слика 5.46б и израз 5.35), док су координате које одговарају јединичном делу мреже обратка $W2z(2 \cdot j, 2 \cdot i)$, $W2z(2 \cdot j, 2 \cdot i + 1)$, $W2z(2 \cdot j + 1, 2 \cdot i)$ и $W2z(2 \cdot j + 1, 2 \cdot i + 1)$ једнаке (слике 5.16 и 5.17 и израз 5.36). Однос координата $W2z(2 \cdot j, 2 \cdot i)$ и $O1z(k)$ дефинише да ли је пресечна тачка на обиму алата у контакту са припремком (слика 5.47).



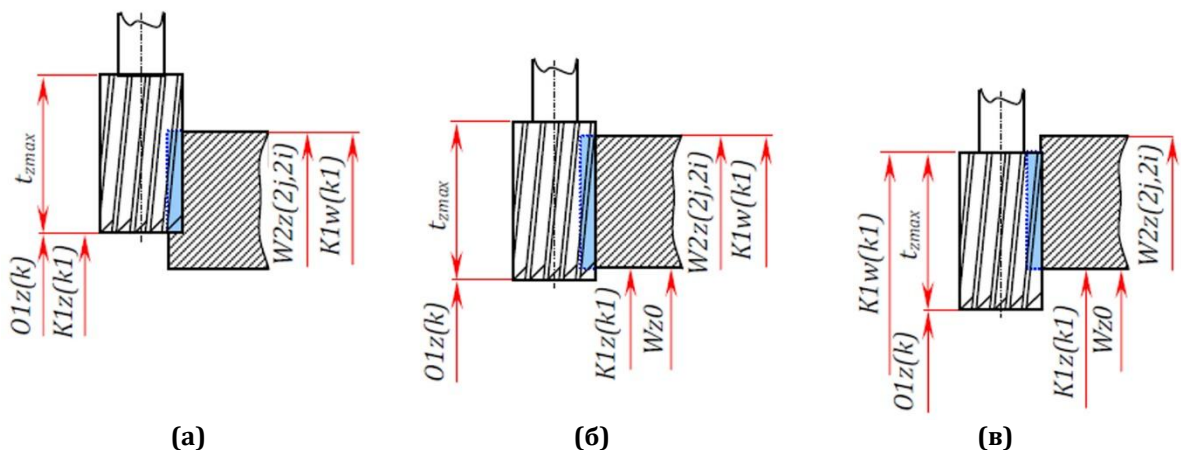
Слика 5.47. Провера контакта пресечне тачке на обиму алата са припремком: (а) $O1z(k) \geq W2z(2 \cdot j, 2 \cdot i)$, (б) $O1z(k) < W2z(2 \cdot j, 2 \cdot i)$, (в) $O1z(k) < W2z(2 \cdot j, 2 \cdot i)$ и $O1z(k) < w_{z0}$

За пресечне тачке мреже припремка и обима алата формиране су матрице (слика 5.376, изрази 5.61 и 5.62) координата $O1x, O1y, O1z, O2x, O2y, O2z$, централних углова $O1u, O2u$, разлика углова $O1i, O2i$ и растојања између тачака пројектована на правац нормалан на правац путање алата $O1a, O2a$. За контактне тачке мреже припремка и обима алата формирају су матрице (слика 5.48) координата $K1x, K1y, K1z, K2x, K2y, K2z$, централних углова $K1u, K2u$, разлика углова $K1i, K2i$ и растојања између тачака пројектованих на правац нормалан на правац путање алата $K1a, K2a$.



Слика 5.48. Пресек обима алата и припремка: (а) линија контакта алата и припремка, (б) контактне тачака са обе стране правца кретања и одговарајући геометријски елементи

Поред координата $K1z, K2z$ израчунавају се и њима одговарајуће координате горњих контактних тачака $K1w, K2w$ које зависе од дефинисане максималне висине алата t_{zmax} (слика 5.49). На основу координата $K1z, K2z$ и $K1w, K2w$ израчунавају се ширине глодања $K1b$ и $K2b$ у свакој контактної тачки обима алата.



Слика 5.49 Координате горњих контактних тачака $K1w, K2w$: (а) $O1z(k) < W2z(2 \cdot j, 2 \cdot i)$ и $O1z(k) + t_{zmax} \geq W2z(2 \cdot j, 2 \cdot i)$, (б) $O1z(k) < W2z(2 \cdot j, 2 \cdot i)$, $O1z(k) < w_{z0}$ и $O1z(k) + t_{zmax} \geq W2z(2 \cdot j, 2 \cdot i)$, (в) $O1z(k) < W2z(2 \cdot j, 2 \cdot i)$, $O1z(k) < w_{z0}$ и $O1z(k) + t_{zmax} < W2z(2 \cdot j, 2 \cdot i)$

Матрице контактних тачака мреже припремка и обима алата формирају се према изразу 5.77:

$$\begin{array}{l}
k_1 = 0, \\
i_1 = i, Wx(1, i) \leq O1x(k) < Wx(1, i) + w_{pm} \\
i_2 = i, Wx(1, i) \leq O1x(k+1) < Wx(1, i) + w_{pm} \\
i = \min(i_1, i_2) \\
j_1 = j, Wy(j, 1) \leq O1y(k) < Wy(j, 1) + w_{pm} \\
j_2 = j, Wy(j, 1) \leq O1y(k+1) < Wy(j, 1) + w_{pm} \\
j = \min(j_1, j_2) \\
w_h = W2z(2 \cdot j, 2 \cdot i) \\
t_h = O1z(k) + t_{zmax} \\
k_1 = k_1 + 1 \\
K1x(k_1) = O1x(k) \\
K1y(k_1) = O1y(k) \\
K1z(k_1) = \begin{cases} O1z(k), & O1z(k) \geq w_{z0} \\ w_{z0}, & O1z(k) < w_{z0} \end{cases} \\
K1w(k_1) = \begin{cases} w_h, & t_h \geq w_h \\ t_h, & t_h < w_h \end{cases} \\
K1u(k_1) = O1u(k) \\
K1i(k_1) = O1i(k) \\
K1a(k_1) = O1a(k) \\
K1b(k) = K1w(k_1) - K1z(k_1)
\end{array} \left. \vphantom{\begin{array}{l} k_1 = 0, \\ i_1 = i, Wx(1, i) \leq O1x(k) < Wx(1, i) + w_{pm} \\ i_2 = i, Wx(1, i) \leq O1x(k+1) < Wx(1, i) + w_{pm} \\ i = \min(i_1, i_2) \\ j_1 = j, Wy(j, 1) \leq O1y(k) < Wy(j, 1) + w_{pm} \\ j_2 = j, Wy(j, 1) \leq O1y(k+1) < Wy(j, 1) + w_{pm} \\ j = \min(j_1, j_2) \\ w_h = W2z(2 \cdot j, 2 \cdot i) \\ t_h = O1z(k) + t_{zmax} \\ k_1 = k_1 + 1 \\ K1x(k_1) = O1x(k) \\ K1y(k_1) = O1y(k) \\ K1z(k_1) = \begin{cases} O1z(k), & O1z(k) \geq w_{z0} \\ w_{z0}, & O1z(k) < w_{z0} \end{cases} \\ K1w(k_1) = \begin{cases} w_h, & t_h \geq w_h \\ t_h, & t_h < w_h \end{cases} \\ K1u(k_1) = O1u(k) \\ K1i(k_1) = O1i(k) \\ K1a(k_1) = O1a(k) \\ K1b(k) = K1w(k_1) - K1z(k_1) \end{array}} \right\} , O1z(k) < w_h
\end{array} \left. \vphantom{\begin{array}{l} i: \\ j: \\ k: \end{array}} \right\} \begin{array}{l} W_i \\ 1 \\ W_j \\ 1 \\ k: \begin{array}{l} k_{1o} - 1 \\ 1 \end{array} \end{array}$$

(5.77)

$$\begin{array}{l}
k_2 = 0, \\
i_1 = i, Wx(1, i) \leq O2x(k) < Wx(1, i) + w_{pm} \\
i_2 = i, Wx(1, i) \leq O2x(k+1) < Wx(1, i) + w_{pm} \\
i = \min(i_1, i_2) \\
j_1 = j, Wy(j, 1) \leq O2y(k) < Wy(j, 1) + w_{pm} \\
j_2 = j, Wy(j, 1) \leq O2y(k+1) < Wy(j, 1) + w_{pm} \\
j = \min(j_1, j_2) \\
w_h = W2z(2 \cdot j, 2 \cdot i) \\
t_h = O2z(k) + t_{zmax} \\
k_2 = k_2 + 1 \\
K2x(k_2) = O2x(k) \\
K2y(k_2) = O2y(k) \\
K2z(k_2) = \begin{cases} O2z(k), & O2z(k) \geq w_{z0} \\ w_{z0}, & O2z(k) < w_{z0} \end{cases} \\
K2w(k_2) = \begin{cases} w_h, & t_h \geq w_h \\ t_h, & t_h < w_h \end{cases} \\
K2u(k_2) = O2u(k) \\
K2i(k_2) = O2i(k) \\
K2a(k_2) = O2a(k) \\
K2b(k_2) = K2w(k_2) - K2z(k_2)
\end{array} \left. \vphantom{\begin{array}{l} k_2 = 0, \\ i_1 = i, Wx(1, i) \leq O2x(k) < Wx(1, i) + w_{pm} \\ i_2 = i, Wx(1, i) \leq O2x(k+1) < Wx(1, i) + w_{pm} \\ i = \min(i_1, i_2) \\ j_1 = j, Wy(j, 1) \leq O2y(k) < Wy(j, 1) + w_{pm} \\ j_2 = j, Wy(j, 1) \leq O2y(k+1) < Wy(j, 1) + w_{pm} \\ j = \min(j_1, j_2) \\ w_h = W2z(2 \cdot j, 2 \cdot i) \\ t_h = O2z(k) + t_{zmax} \\ k_2 = k_2 + 1 \\ K2x(k_2) = O2x(k) \\ K2y(k_2) = O2y(k) \\ K2z(k_2) = \begin{cases} O2z(k), & O2z(k) \geq w_{z0} \\ w_{z0}, & O2z(k) < w_{z0} \end{cases} \\ K2w(k_2) = \begin{cases} w_h, & t_h \geq w_h \\ t_h, & t_h < w_h \end{cases} \\ K2u(k_2) = O2u(k) \\ K2i(k_2) = O2i(k) \\ K2a(k_2) = O2a(k) \\ K2b(k_2) = K2w(k_2) - K2z(k_2) \end{array}} \right\} , O2z(k) < w_h
\end{array} \left. \vphantom{\begin{array}{l} i: \\ j: \\ k: \end{array}} \right\} \begin{array}{l} W_i \\ 1 \\ W_j \\ 1 \\ k: \begin{array}{l} k_{2o} - 1 \\ 1 \end{array} \end{array}$$

Алгоритам 14 – приказ израза 5.77 псеудокодом

```
1:    $k_1 = 0$ 
2:   for  $k = 1:k_{1o}-1$ 
3:       for  $i = 1:w_i$ 
4:           if  $Wx(1, i) \leq O1x(k) < Wx(1, i) + w_{pm}$ 
5:                $i_1 = i$ 
6:           end if
7:           if  $Wx(1, i) \leq O1x(k + 1) < Wx(1, i) + w_{pm}$ 
8:                $i_2 = i$ 
9:           end if
10:        end for
11:         $i = \min(i_1, i_2)$ 
12:        for  $j = 1:w_j$ 
13:            if  $Wy(j, 1) \leq O1y(k) < Wy(j, 1) + w_{pm}$ 
14:                 $j_1 = j$ 
15:            end if
16:            if  $Wy(j, 1) \leq O1y(k + 1) < Wy(j, 1) + w_{pm}$ 
17:                 $j_2 = j$ 
18:            end if
19:        end for
20:         $j = \min(j_1, j_2)$ 
21:        if  $O1z(k) < W2z(2 \cdot j, 2 \cdot i)$ 
22:             $k_1 = k_1 + 1$ 
23:             $K1x(k_1) = O1x(k)$ 
24:             $K1y(k_1) = O1y(k)$ 
25:            if  $O1z(k) \geq w_{z0}$ 
26:                 $K1z(k_1) = O1z(k)$ 
27:            else
28:                 $K1z(k_1) = w_{z0}$ 
29:            end if
30:            if  $O1z(k) + t_{zmax} \geq W2z(2 \cdot j, 2 \cdot i)$ 
31:                 $K1w(k_1) = W2z(2 \cdot j, 2 \cdot i)$ 
32:            else
33:                 $K1w(k_1) = O1z(k) + t_{zmax}$ 
34:            end if
35:             $K1u(k_1) = O1u(k)$ 
36:             $K1i(k_1) = O1i(k)$ 
37:             $K1a(k_1) = O1a(k)$ 
38:             $K1b(k_1) = K1w(k_1) - K1z(k_1)$ 
39:        end if
40:    end for
41:     $k_2 = 0$ 
42:    for  $k = 1:k_{2o}-1$ 
43:        for  $i = 1:w_i$ 
44:            if  $Wx(1, i) \leq O2x(k) < Wx(1, i) + w_{pm}$ 
45:                 $i_1 = i$ 
46:            end if
47:            if  $Wx(1, i) \leq O2x(k + 1) < Wx(1, i) + w_{pm}$ 
48:                 $i_2 = i$ 
49:            end if
50:        end for
```

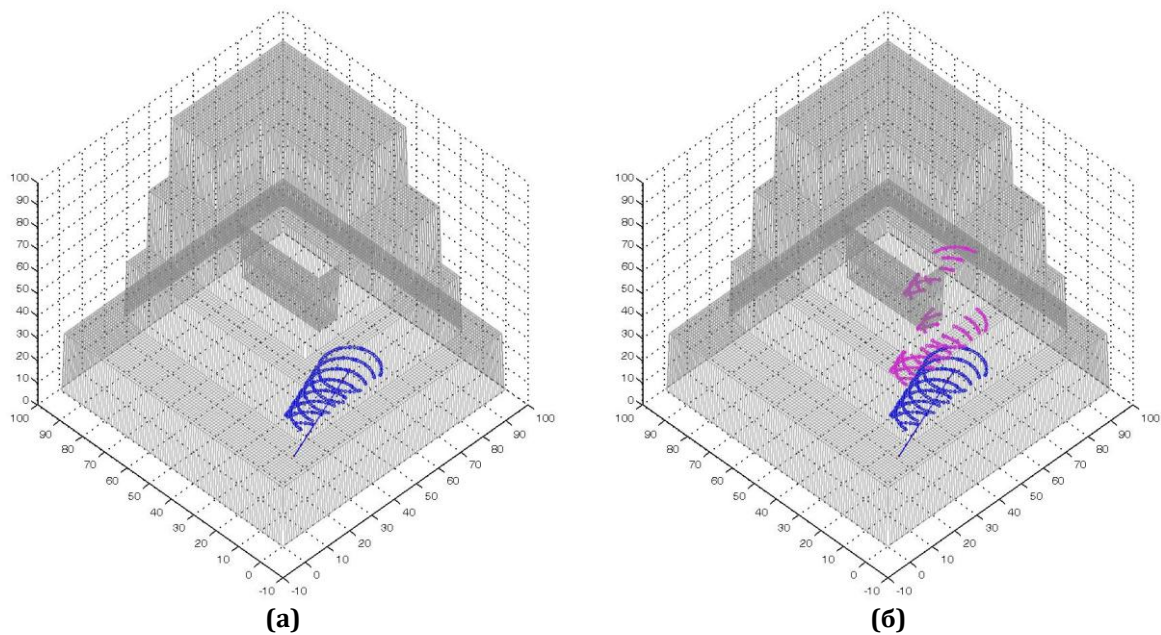
```

51:       $i = \min(i_1, i_2)$ 
52:      for  $j = 1:w_j$ 
53:          if  $W_y(j, 1) \leq O2y(k) < W_y(j, 1) + w_{pm}$ 
54:               $j_1 = j$ 
55:          end if
56:          if  $W_y(j, 1) \leq O2y(k + 1) < W_y(j, 1) + w_{pm}$ 
57:               $j_2 = j$ 
58:          end if
59:      end for
60:       $j = \min(j_1, j_2)$ 
61:      if  $O2z(k) < W2z(2 \cdot j, 2 \cdot i)$ 
62:           $k_2 = k_2 + 1$ 
63:           $K2x(k_2) = O2x(k)$ 
64:           $K2y(k_2) = O2y(k)$ 
65:          if  $O2z(k) \geq w_{z0}$ 
66:               $K2z(k_2) = O2z(k)$ 
67:          else
68:               $K2z(k_2) = w_{z0}$ 
69:          end if
70:          if  $O2z(k) + t_{zmax} \geq W2z(2 \cdot j, 2 \cdot i)$ 
71:               $K2w(k_2) = W2z(2 \cdot j, 2 \cdot i)$ 
72:          else
73:               $K2w(k_2) = O2z(k) + t_{zmax}$ 
74:          end if
75:           $K2u(k_2) = O2u(k)$ 
76:           $K2i(k_2) = O2i(k)$ 
77:           $K2a(k_2) = O2a(k)$ 
78:           $K2b(k_2) = K2w(k_2) - K2z(k_2)$ 
79:      end if
80:  end for

```

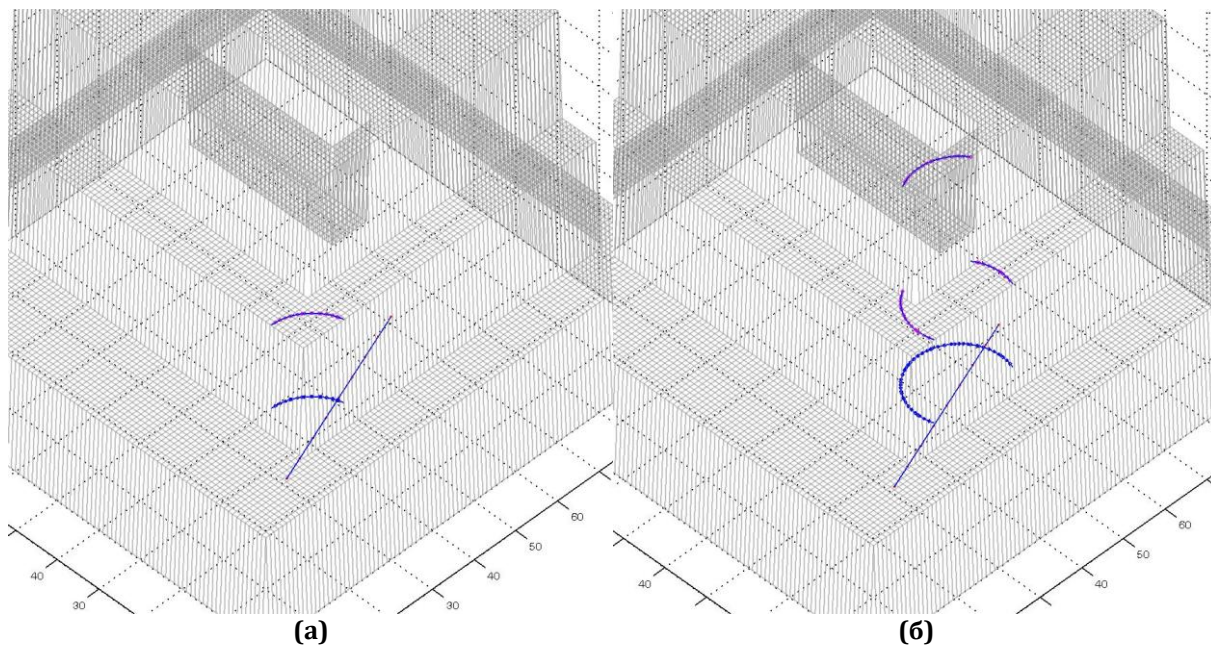
Димензије матрица $K1x$, $K1y$, $K1z$, $K1w$, $K1u$, $K1i$, $K1a$, и $K1b$ обележавају се са $k1k$, а матрица $K2x$, $K2y$, $K2z$, $K2w$, $K2u$, $K2i$, $K2a$, и $K2b$ са $k2k$. Вредности $k1k$ и $k2k$ могу бити једнаке или различите.

На слици 5.35а приказане су пресечне тачке обима алата и мреже припремка, у сваком положају алата на елементарној путањи, на основу којих се добијају контактне тачке $K1z$ и $K2z$ (слика 5.50а), а затим и контактне тачке $K1w$ и $K2w$ (слика 5.50б).



Слика 5.50. Контактне тачке на елементарној путањи алата: (а) координате доњих контактних тачака $K1z$ и $K2z$ и (б) координате горњих контактних тачака $K1w$ и $K2w$

На слици 5.51 приказане су контактне тачке у различитим тачкама исте елементарне путање.



Слика 5.51. Контактне тачке у различитим тачкама исте елементарне путање: (а) једна ширина глодања, (б) две различите ширине глодања при једном обртају алата

5.2.7.3. Израчунавање дубине резања, ширине резања и угла резања

Дубина резања, ширина резања и угао захвата у тачки n елементарне путање (слика 5.33) описане координатама тачака $P_x(n)$, $P_y(n)$, $P_z(n)$ и углом путање $P_u(n)$ израчунавају се на основу матрица централних углова $K1u$, $K2u$, разлика углова $K1i$, $K2i$, растојања између тачака пројектованих на правац нормалан на правац путање алата $K1a$, $K2a$ и ширине глодања $K1b$ и $K2b$, у свакој контактної тачки обима алата (слика 5.52). При томе је:

дубина резања

$$a_1 = \sum_{k=1}^{k=k_{1k}} K1a(k),$$

$$a_2 = \sum_{k=1}^{k=k_{2k}} K2a(k),$$

почетни угао захвата

$$\psi_{10} = K1u(1),$$

$$\psi_{20} = K2u(1),$$

угао захвата

$$\psi_1 = \sum_{k=1}^{k=k_{1k}} K1i(k),$$

$$\psi_2 = \sum_{k=1}^{k=k_{2k}} K2i(k),$$
(5.78)

ширина резања (максимална)

$$b_1 = \max_{1 \leq k \leq k_{1k}} K1b(k),$$

$$b_2 = \max_{1 \leq k \leq k_{2k}} K2b(k),$$

ширина резања (просечна):

$$b_{1p} = \frac{\sum_{k=1}^{k=k_{1k}} K1b(k)}{k_{1k}},$$

$$b_{2p} = \frac{\sum_{k=1}^{k=k_{2k}} K2b(k)}{k_{2k}}.$$

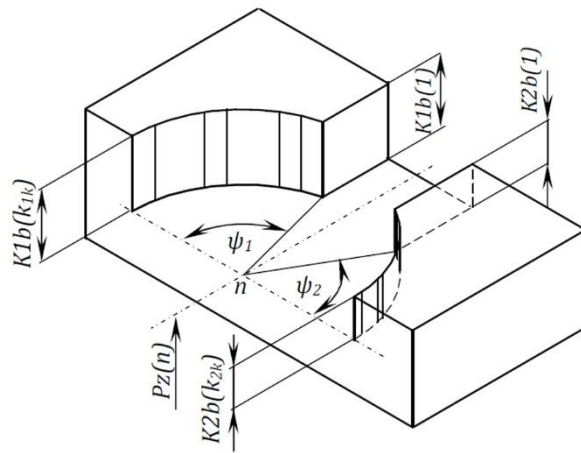
Алгоритам 15 – приказ израза 5.78 псеудокодом

```

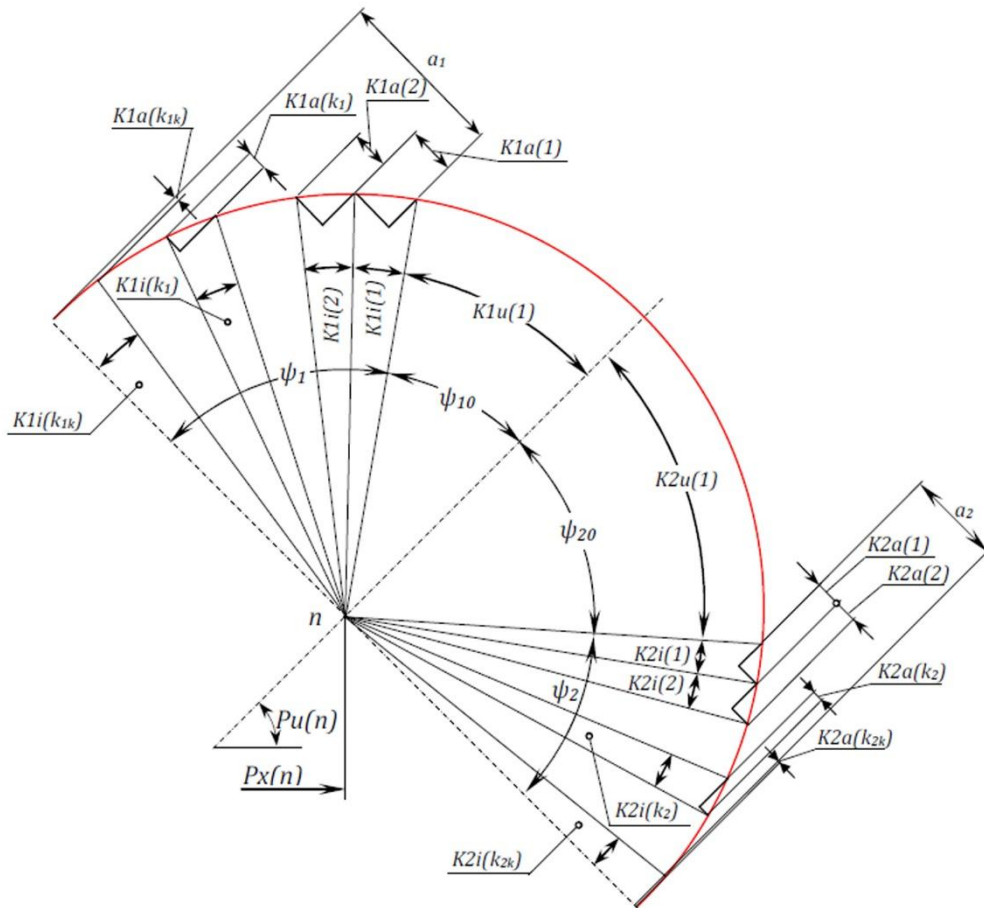
1:   Додељивање вредности 0 променљивама  $a_1$ ,  $a_2$ ,  $\psi_{10}$ ,  $\psi_{20}$ ,  $\psi_1$ ,  $\psi_2$ ,  $b_1$ ,  $b_2$ ,  $b_{1u}$  и  $b_{2u}$ 
2:   for  $k = 1:k_{1k}$ 
3:        $a_1 = a_1 + K1a(k)$ 
4:        $\psi_1 = \psi_1 + K1i(k)$ 
5:        $b_1 = \max(b_1, K1b(k))$ 
6:        $b_{1u} = b_{1u} + K1b(k)$ 
7:   end for
8:    $\psi_{10} = K1u(1)$ 
9:    $b_{1p} = \frac{b_{1u}}{k_{1k}}$ 
10:  for  $k = 1:k_{2k}$ 
11:       $a_2 = a_2 + K2a(k)$ 
12:       $\psi_2 = \psi_2 + K2i(k)$ 
13:       $b_2 = \max(b_2, K2b(k))$ 
14:       $b_{2u} = b_{2u} + K2b(k)$ 

```

15: **end for**
 16: $\psi_{20} = K2u(1)$
 17: $b_{2p} = \frac{b_{2u}}{k_{2k}}$



(a)



(b)

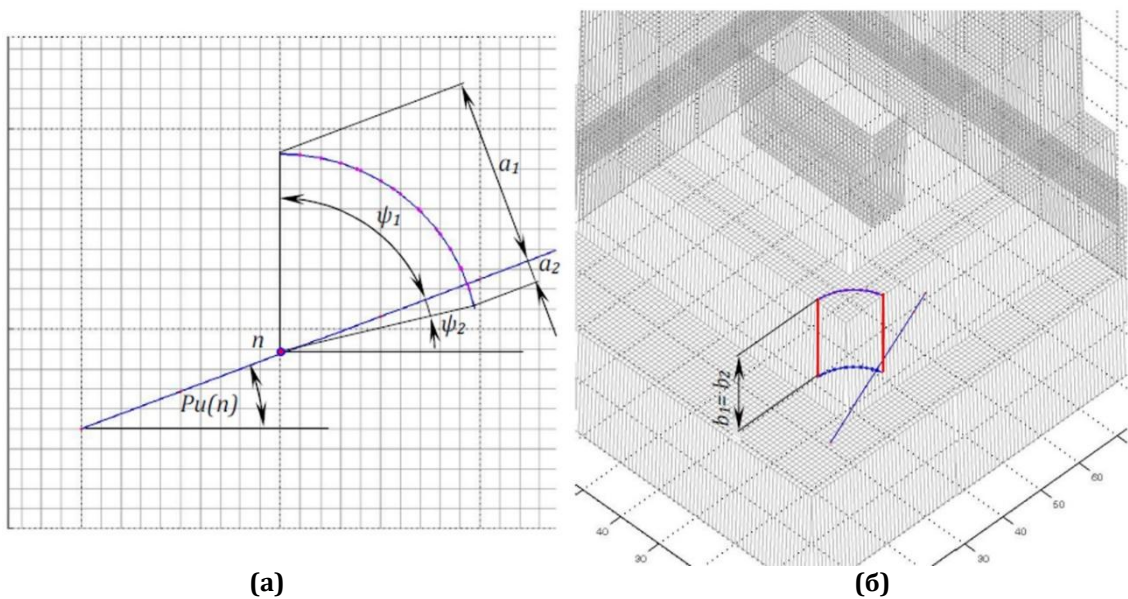
Слика 5.52. Геометријски елементи за одређивање дубине резања, ширине резања и угла захвата у тачки n : (а) изометријски приказ, (б) приказ у равни XY

На пример, за две тачке елементарне путање (слика 5.51) добијају се елементи резања прву и другу тачку (слике 5.53 и 5.54) приказани у табели 5.18.

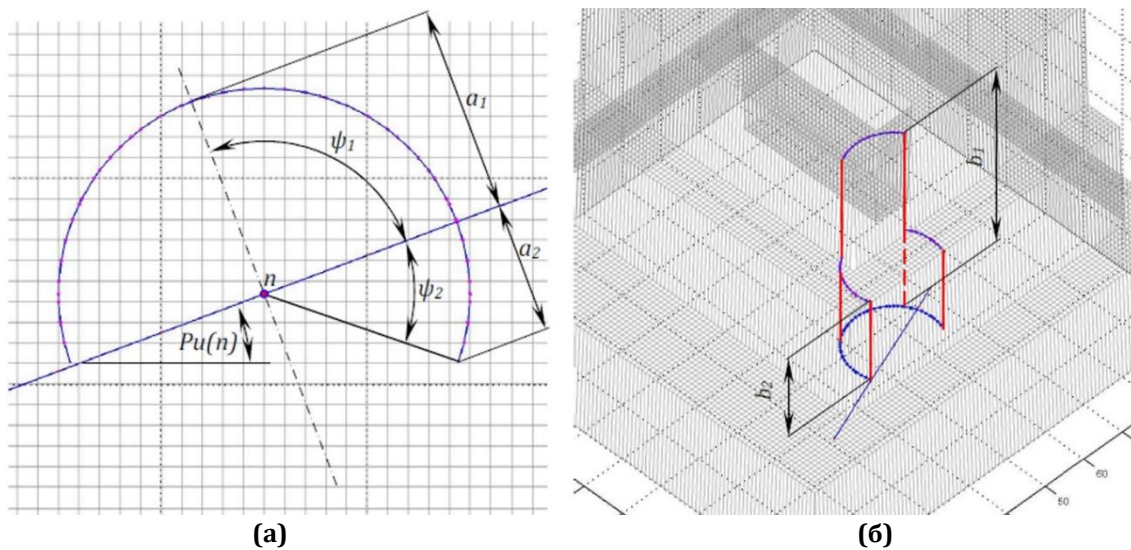
Табела 5.18- Елементи процеса резања у две тачке (слика 5.51)

Тачка 3	$n = 000003$	$Px(n) = 20.000$ $Py(n) = 8.750$ $Pz(n) = 30.000$ $Pu(n) = 20.556$ $d_t = 20.000$	$a_1 = 9.363$ $b_1 = 20.000$ $b_{1p} = 20.000$ $\psi_{10} = 0.000$ $\psi_1 = 69.444$	$a_2 = 1.314$ $b_2 = 20.000$ $b_{2p} = 20.000$ $\psi_{20} = 0.000$ $\psi_2 = 7.553$
Тачка 6	$n = 000006$	$Px(n) = 35.000$ $Py(n) = 14.375$ $Pz(n) = 30.000$ $Pu(n) = 20.556$ $d = 20.000$	$a_1 = 19.855$ $b_1 = 45.000$ $b_{1p} = 31.905$ $\psi_{10} = 0.000$ $\psi_1 = 179.169$	$a_2 = 6.465$ $b_2 = 20.000$ $b_{2p} = 20.000$ $\psi_{20} = 0.000$ $\psi_2 = 40.281$

Дубина резања a_1 и угао резања ψ_1 у тачки $n = 6$ не одговарају стварном примеру, већ само тренутном положају (слика 5.54) без промене матрица координата тачака на мрежи припремка.



Слика 5.53. Елементи резања за прву тачку елементарне путање: (а) приказ у равни XU , (б) изометријски приказ



Слика 5.54. Елементи резања за крајњу тачку елементарне путање: (а) приказ у равни XU , (б) изометријски приказ

5.2.7.4 Промена матрица координата тачака на мрежи припремка

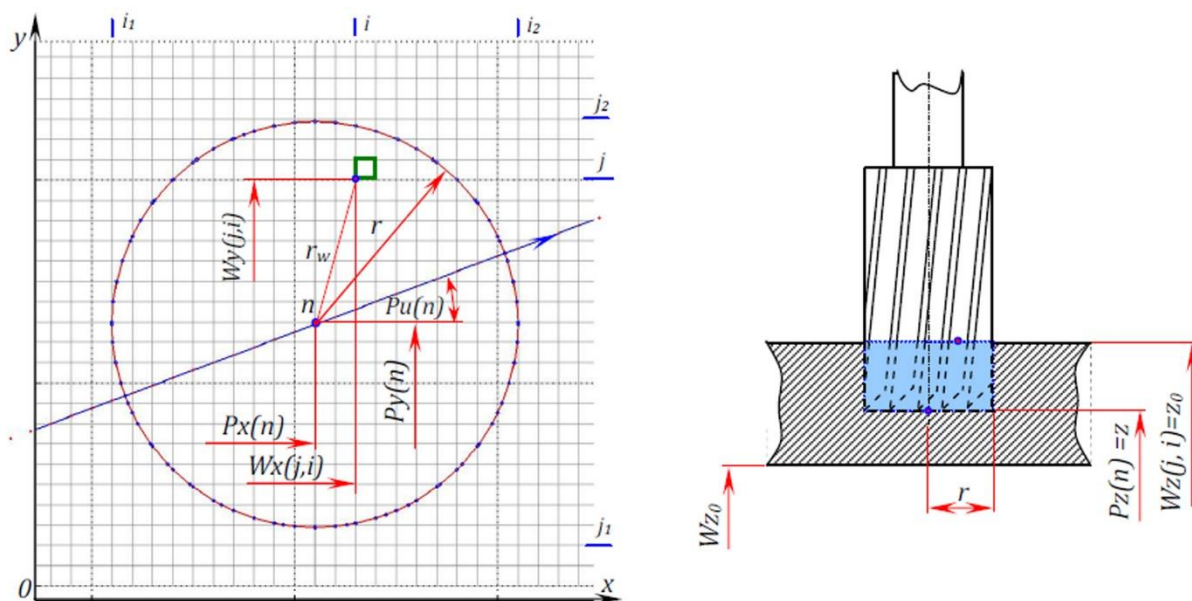
Након израчунавања дубина резања a_1 и a_2 , ширина резања b_1, b_2, b_{1p} и b_{2p} и углова резања $\psi_{10}, \psi_{20}, \psi_1$ и ψ_2 у тачки n елементарне путање описане координатама тачака $Px(n), Py(n), Pz(n)$ и углом путање $Pu(n)$, врши се измена мреже припремка W тако што матрице координата Wx и Wy остају непромењене, док се матрица координата Wz мења на основу матрице координата тачака на изводници алата Urz (изрази 5.45, 5.46, 5.47 и слика 5.26). На овај начин се одузима обрађен материјал (пресек запремине алата и припремка дуж путање алата) од матрице припремка и добија се ажурирана матрица обратка

На основу мреже припремка W (израз 5.30), матрице координата тачака на изводници алата Urz (израз 5.45) матрице координата тачака на путањи Px, Py, Pz и углова путање у тим тачкама Pu одређује се положај тачака на мрежи обратка у односу на обим алата у тачки n елементарне путање. Обим алата одређен је полупречником алата и z координатом тачке n :

$$\begin{aligned} r &= Urz(u_r - 1, 1), \\ z &= Pz(n) + Urz(u_r - 1, 2). \end{aligned} \quad (5.79)$$

Положај тачке на мрежи обратка одређен је растојањем те тачке од тачке n и висином $Wz(j, i)$, односно величинама r_w и z_w (слика 5.55):

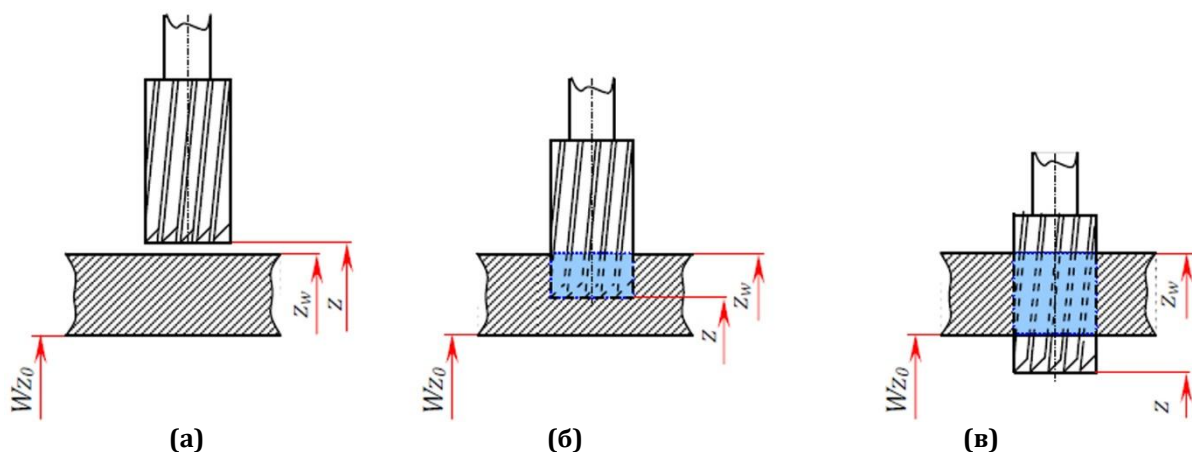
$$\begin{aligned} r_w &= \sqrt{(Wx(j, i) - Px(n))^2 + (Wy(j, i) - Py(n))^2}, \\ z_w &= Wz(j, i). \end{aligned} \quad (5.80)$$



Слика 5.55. Положај тачке на мрежи обратка $Wz(j, i)$

За све тачке на мрежи обратка које се налазе унутар обима алата ($r_w \leq r$) израчунавају се чланови матрице Wz (слика 5.56):

$$Wz(j, i) = \begin{cases} Wz(j, i), & z > z_w \\ z, & w_{z0} < z \leq z_w \\ NaN, & z \leq w_{z0} \end{cases} \quad (5.81)$$



Слика 5.56. Одређивање z координате тачака унутар обима алата за случај када је $r_w \leq r$ у: (а) $z > z_w$, (б) $w_{z0} < z \leq z_w$ и (в) $z \leq w_{z0}$

На основу овога слике 5.56, одређују се чланови матрице Wz :

$$\begin{aligned}
 r &= Urz(u_r - 1, 1), \\
 z &= Pz(n) + Urz(u_r - 1, 2), \\
 r_w &= \sqrt{(Wx(j, i) - Px(n))^2 + (Wy(j, i) - Py(n))^2} \\
 z_w &= Wz(j, i) \\
 Wz(j, i) &= \begin{cases} Wz(j, i), & r_w \leq r \wedge z > z_w \\ z, & r_w \leq r \wedge w_{z0} < z \leq z_w \\ NaN, & r_w \leq r \wedge z \leq w_{z0} \end{cases} \quad \left\| \begin{array}{l} j_2 - 1 \\ j_1 \end{array} \right. \quad \left\| \begin{array}{l} i_2 - 1 \\ i_1 \end{array} \right. \quad (5.82)
 \end{aligned}$$

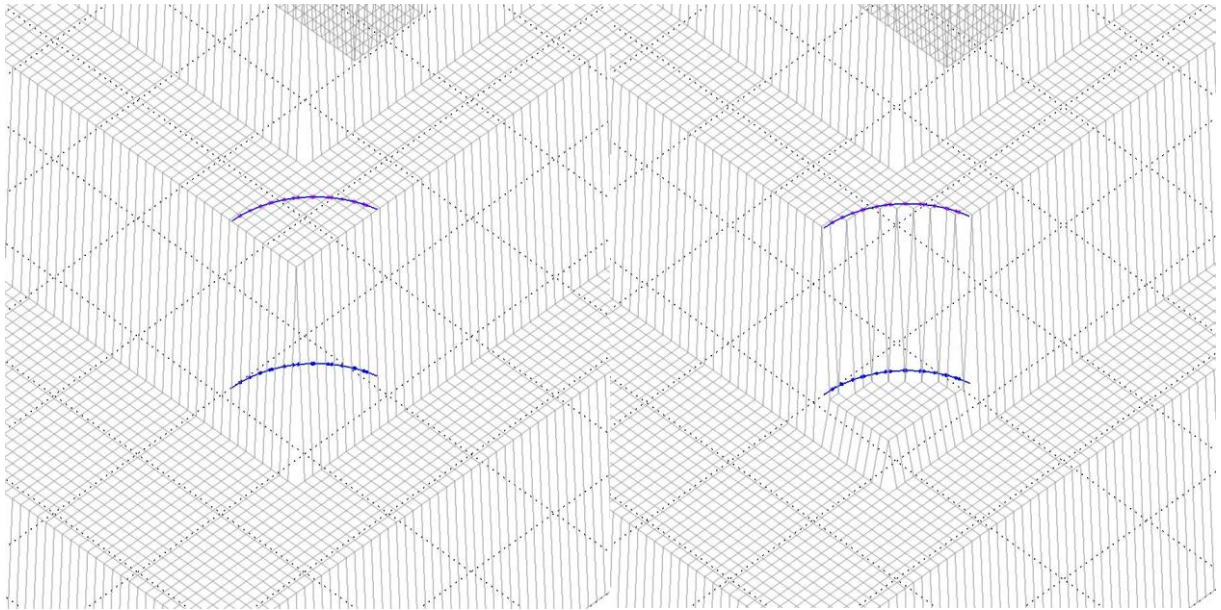
Алгоритам 16 – приказ израза 5.82 псеудокодом

```

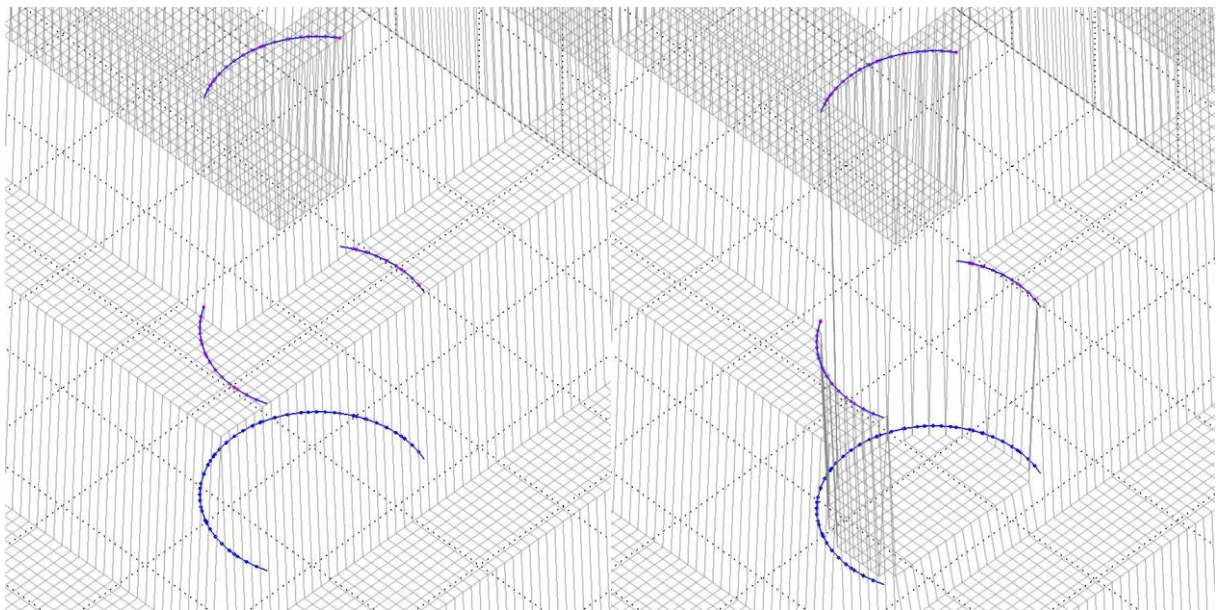
1:    $r = Urz(u_r - 1, 1)$ 
2:    $z = Pz(n) + Urz(u_r - 1, 2)$ 
3:   for  $j = j_1:j_2-1$ 
4:     for  $i = i_1:i_2-1$ 
5:        $r_w = \sqrt{(Wx(j, i) - Px(n))^2 + (Wy(j, i) - Py(n))^2}$ 
6:        $z_w = Wz(j, i)$ 
7:       if  $r_w \leq r$ 
8:         if  $z \leq w_{z0}$ 
9:            $Wz(j, i) = NaN$ 
10:        else
11:          if  $z \leq z_w$ 
12:             $Wz(j, i) = z$ 
13:          end if
14:        end if
15:      end if
16:    end for
17:  end for

```

Промена матрица координата тачака на мрежи обратка у појединим тачкама елементарне путање (за примере са слике 5.53 и 5.54) приказана је на сликама 5.57 и 5.58.

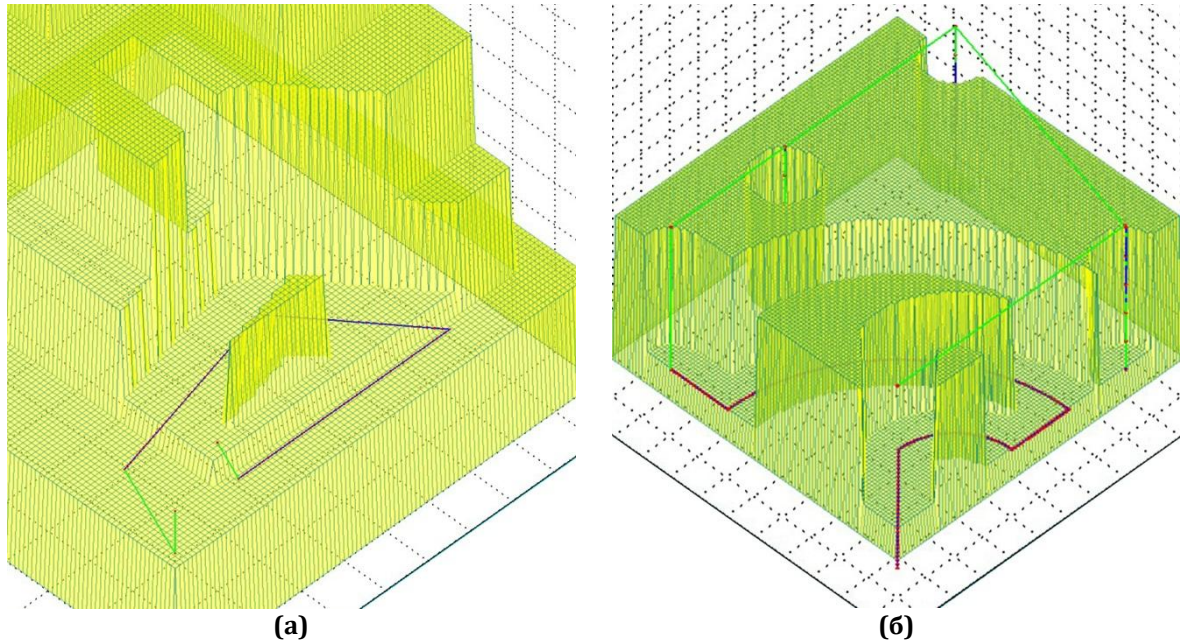


Слика 5.57. Промена матрица координата тачака на мрежи обратка за пример са слике 5.53



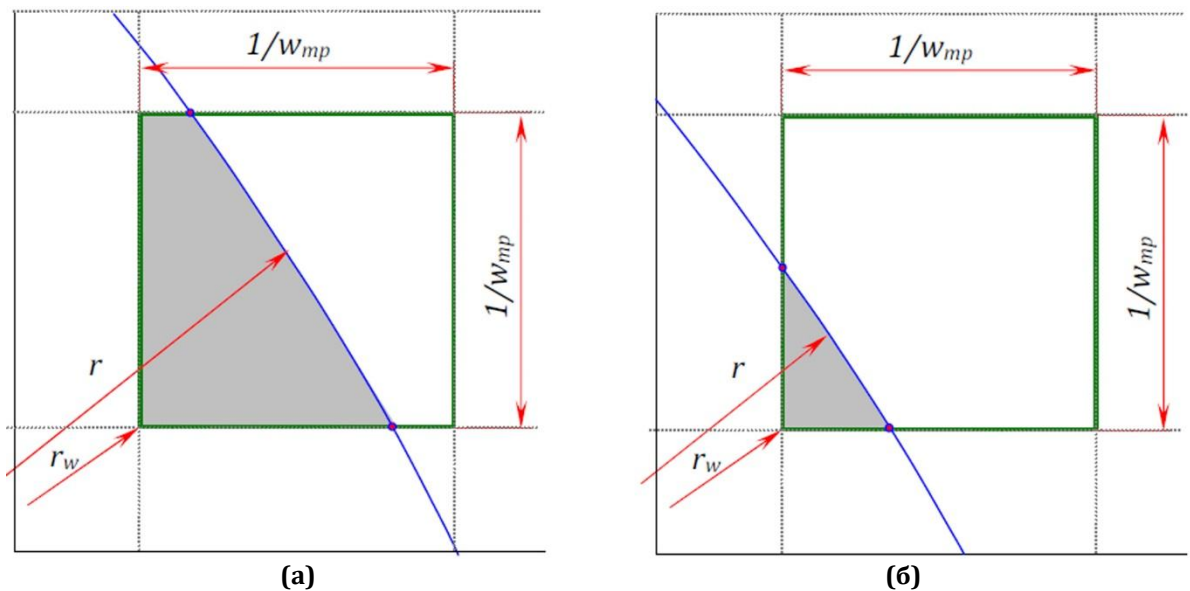
Слика 5.58. Промена матрица координата тачака на мрежи обратка за пример са слике 5.54

У свакој тачки сваке елементарне путање на путањи алата врши се измена мреже обратка W и добија се „траг“ алата на припремку, односно обрадак након проласка алата (слика 5.59), што омогућава тачно израчунавање дубина резања, ширина резања и углова резања у следећим тачкама на путањи алата.



Слика 5.59. Измена мреже обраџка: (а) за њример са слике 5.35 и (б) за њример са слике 5.29

У наведеном приступу, измена мреже обратка се изводи за све тачке на мрежи обратка које се налазе унутар обима алата ($r_w \leq r$), на пример, за случај на слици 5.61, измена ће обухватити поља А и С, а неће В. Међутим, мењањем (смањивањем) z координате за сваку тачку чији је положај r_w унутар обима алата, а поље које дефинише сече обим алата, може се направити грешка површине обратка до величине поља мреже обратка. Ако се посматрају два различита случаја положаја пресека алата и јединичног поља мреже обратка (слика 5.60), уочава се да се већа грешка прави мењањем z координате тачке која дефинише поље чији је већи део површине изван обима алата (слика 5.60б).



Слика 5.60. Положај пресека обима алата и јединичног поља мреже обратка: (а) приближно пола површине пресечног поља мреже обратка унутар обима алата, (б) већи део површине пресечног поља ван обима алата

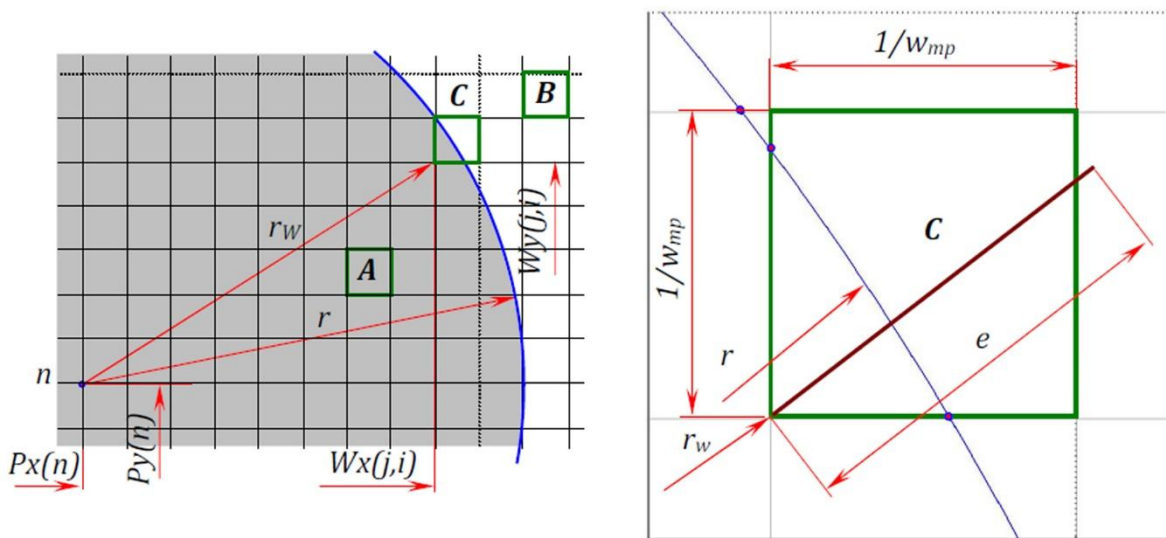
Као критеријум за одлучивање у којим случајевима ће се мењати z координата тачке уводи се величина одступања Δ . Мењаће се координате тачака за које важи:

$$\Delta \leq r - r_w,$$

$$\Delta = e \cdot (1 - t),$$

$$e = \frac{|Wx(j, i) - Px(n)| + |Wy(j, i) - Py(n)|}{w_{mp} \cdot r_w}. \quad (5.83)$$

Функција e је збир синуса и косинуса угла који вектор положаја r_w заклапа са x осом помножен са јединичном величином поља на мрежи, и њена вредност се креће од $1/w_{mp}$ за угао 0° , и расте до $\sqrt{2}/w_{mp}$ за угао 45° , а затим се смањује до $1/w_{mp}$ за угао 90° . Ова функција је изабрана јер најприближније одређује величину која је меродавна за поређење са разликом величина r и r_w , у зависности од положаја тачке на мрежи у односу на центар алата (слика 5.61). Тако ће за тачке чија је у координата једнака у координати тачке n меродавна бити страница, а за тачке чији вектор положаја заклапа угао 45° са x осом дијагонала јединичног квадрата мреже.



Слика 5.61. Одлучивање о одузимању z координате јединичног поља мреже обрадка на основу положаја пресека са обимом алата и функције e

Параметар t се може бирати у опсегу од 0 до 1, при чему за $t=1$, $\Delta=0$, што значи да ће се мењати координата мреже за сваку тачку унутар обима алата ($r_w \leq r$), а за $t=0$, $\Delta = r - r_w$, па ће се мењати координате само оних тачака чије се јединично поље мреже у потпуности налази унутар обима алата. За даљи рад усвојена је вредност $t=0,5$.

Грешка у одређивању тренутног изгледа обратка зависи од полупречника алата и поделе мреже обратка. Што је већи полупречник алата и мање јединично поље мреже, линија обима алата у јединичном пољу ближа је правој линији. Уз апроксимацију дела обима алата правом линијом у јединичном пољу мреже и уз усвојену вредност параметра $t=0,5$, максимална грешка у тренутној матрици обратка једнака је половини површине јединичног поља мреже.

5.2.7.5. Уписивање израчунатих елемената процеса резања у датотеке

Уписивање израчунатих елемената процеса резања извршава се на основу података који се налазе у ASCII датотеци описаној у поглављу 5.2.6 (слика 5.28). Сваки ред ове датотеке

садржи податке о једној елементарној путањи $P(m)$. Назив датотеке је „ $nnnnn_put$ “, где је „ $nnnnn$ “ ознака NC програма (слика 5.3), а њена структура дата је у табели 5.19.

Табела 5.19- Структура датотеке елемената процеса резања („ $nnnnn_put$ “)

број NC реда	$Pn(m)$	
ознака алата	$Pt(m)$	
тип интерполације	$Pg(m)$	<ul style="list-style-type: none"> - G00, G80 | G01) G02 (G03 c G81, G82, ... обрада почетне координата циклуса ^ G81, G82, ... повратни ход ~ G81, G82, ... остале коорд. позиционирање ! G81, G82, ... обрада осталих координата циклуса
смер обртања вретена	$Pm(m)$	<ul style="list-style-type: none"> > M03 < M04
корак	$Pf(m) = f$	
број обртаја	$Ps(m) = s$	
координате почетне тачке		x_1 y_1 z_1
координате крајње тачке		x_2 y_2 z_2
координате центра кружне интерполације		x_c y_c z_c
полупречник кружне интерполације		r
почетни угао кружне интерполације		α_0
угао кружне интерполације		α
раван кружне интерполације	$Pp(m)$	<ul style="list-style-type: none"> XY G17 ZX G18 YZ G19

Део ове датотеке за пример приказан на слици 5.59а дат је у табели 5.20, а за пример приказан на слици 5.59б у табели 5.21.

Табела 5.20- Део датотеке елемената процеса обраде за пример приказан на слици 5.59а (01011_put)

Pn	Pt	Pg	Pm	s	n	x_1	y_1	z_1	x_2	y_2	z_2	x_c	y_c	z_c	r	α_0	α	Pp
...																		
00030.	T01	-	>	0.000	0	0.000	0.000	40.000	10.000	5.000	40.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	??
00040.	T01	-	>	0.100	2000	10.000	5.000	40.000	10.000	5.000	30.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	??
00050.	T01	|	>	0.100	2000	10.000	5.000	30.000	50.000	20.000	30.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	??
00060.	T01	|	>	0.100	2000	50.000	20.000	30.000	70.000	5.000	30.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	??
00070.	T01	|	>	0.100	2000	70.000	5.000	30.000	20.000	5.000	30.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	??
00520.	T01	-	>	0.000	2000	20.000	5.000	30.000	20.000	10.000	35.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	??
...																		

Нова ASCII датотека садржи део података из датотеке „ $nnnnn_put$ “ за један алат и израчунате дубине резања a_1 и a_2 , ширине резања b_1 , b_2 , b_{1p} и b_{2p} и углове захвата, ψ_{10} , ψ_{20} , ψ_1 и ψ_2 (израз 5.78) за тај алат.

Табела 5.21- Део датотеке елемената процеса обраде за пример са слике 5.596 (01021_put)

P_n	P_t	P_g	P_m	s	n	x_1	y_1	z_1	x_2	y_2	z_2	x_c	y_c	z_c	r	α_0	α	P_p	
...																			
00030.	T01	-	>	0.000	0	0.000	0.000	0.000	-10.000	-10.000	10.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	??	
00040.	T01	|	>	0.150	2000	-10.000	-10.000	10.000	19.700	19.300	10.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	??	
00050.	T01	)	>	0.100	1800	19.700	19.300	10.000	39.700	-0.700	10.000	19.700	-0.700	10.000	20.000	90.000	90.000	XY
00060.	T01	|	>	0.200	2000	39.700	-0.700	10.000	59.700	-0.700	10.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	??	
00070.	T01	(	>	0.100	1500	59.700	-0.700	10.000	-0.300	59.300	10.000	-0.300	-0.700	10.000	60.000	0.000	90.000	XY
00080.	T01	|	>	0.250	2500	-0.300	59.300	10.000	-0.300	79.300	10.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	??	
00090.	T01	-	>	0.000	2000	-0.300	79.300	10.000	-0.300	79.300	60.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	??	
00100.	T01	-	>	0.000	2000	-0.300	79.300	60.000	39.700	79.300	60.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	??	
00110.	T01	c	>	0.100	2000	39.700	79.300	60.000	39.700	79.300	10.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	??	
00110;	T01	^	>	0.000	2000	39.700	79.300	10.000	39.700	79.300	60.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	??	
00120.	T01	~	>	0.000	2000	39.700	79.300	60.000	99.700	79.300	60.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	??	
00120;	T01	!	>	0.100	2000	99.700	79.300	60.000	99.700	79.300	10.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	??	
00120;	T01	^	>	0.000	2000	99.700	79.300	10.000	99.700	79.300	60.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	??	
00130.	T01	~	>	0.000	2000	99.700	79.300	60.000	79.700	-0.700	60.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	??	
00130;	T01	!	>	0.100	2000	79.700	-0.700	60.000	79.700	-0.700	10.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	??	
00130;	T01	^	>	0.000	2000	79.700	-0.700	10.000	79.700	-0.700	60.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	??	
00140.	T01	?	>	0.000	2000	79.700	-0.700	60.000	79.700	-0.700	60.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	??	
00510.	T01	-	>	0.000	2000	79.700	-0.700	60.000	80.000	0.000	60.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	??	
00520.	T01	-	>	0.000	2000	80.000	0.000	60.000	0.000	0.000	60.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	??	
...																			

Сваки ред ове датотеке садржи податке о једној тачки n елементарне путање $P(m)$. Назив датотеке је „nnnnn_put_rr_Ttt“, где је „nnnnn“ ознака NC програма (слика 5.3), „rr“ редни број и „Ttt“ ознака алата $P_t(m)$ у NC програму, а њена структура дата је у табели 5.22.

Табела 5.22- Структура датотеке („nnnnn_put_rr_Ttt“) са подацима о свакој тачки путање

број NC реда	$P_n(m)$	
координате тачке n	$P_x(n) = x_n$ $P_y(n) = y_n$ $P_z(n) = z_n$	
ознака алата	$P_t(m)$	
тип интерполације	$P_g(m)$	
смер обртања вретена	$P_m(m)$	
корак	$P_f(m) = s$	
број обртаја	$P_s(m) = n$	
тип обраде	$P_o(m)$	-- без обраде oo обимно глодање c| чеоно глодање
ред. бр. тачке n на елементарној путањи	n	
угао елементарне путање	$P_u(m)$	
пређени пут алата у NC програму	s_p	
контактни пречник алата	d	
дубина резања	a_1	
ширина резања	b_1	
просечна ширина резања	b_{1p}	
почетни угао захвата	ψ_{10}	
угао захвата	ψ_1	
дубина резања	a_2	
ширина резања	b_2	
просечна ширина резања	b_{2p}	
почетни угао захвата	ψ_{20}	
угао захвата	ψ_2	

Део ове датотеке за пример приказан на слици 5.59а дат је табели 5.23, а за пример са слике 5.59.б у табели 5.24.

Табела 5.23- Структура датотеке 01011_put_01_T01 за пример са слике 5.59а

Pn	x _n	y _n	z _n	Pt	Pg	Pm	s	n	Po	n	Pu	s _p	d	a ₁	b ₁	b _{1p}	ψ ₁₀	ψ ₁	a ₂	b ₂	b _{2p}	ψ ₂₀	ψ ₂
...																							
00030.	0.000	0.000	40.000	T01	-	>	0.000	0	-	000001	26.565	0.000	20.000										
00030.	10.000	5.000	40.000	T01	-	>	0.000	0	-	000002	26.565	11.180	20.000										
00040.	10.000	5.000	40.000	T01	-	>	0.100	2000	-	000001	90.000	11.180	20.000										
00040.	10.000	5.000	30.000	T01	-	>	0.100	2000	-	000002	90.000	21.180	20.000										
00050.	10.000	5.000	30.000	T01	|	>	0.100	2000	∞	000001	20.556	21.180	20.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
00050.	15.000	6.875	30.000	T01	|	>	0.100	2000	∞	000002	20.556	26.520	20.000	5.689	20.000	20.000	3.806	35.638	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
00050.	20.000	8.750	30.000	T01	|	>	0.100	2000	∞	000003	20.556	31.860	20.000	9.363	20.000	20.000	0.000	69.444	1.314	20.000	20.000	0.000	7.553
00050.	25.000	10.625	30.000	T01	|	>	0.100	2000	∞	000004	20.556	37.200	20.000	10.000	20.000	20.000	0.000	90.000	3.158	20.000	20.000	0.000	18.407
00050.	30.000	12.500	30.000	T01	|	>	0.100	2000	∞	000005	20.556	42.540	20.000	10.000	45.000	30.714	0.000	90.000	4.876	20.000	20.000	0.000	29.183
00050.	35.000	14.375	30.000	T01	|	>	0.100	2000	∞	000006	20.556	47.880	20.000	10.000	45.000	40.455	0.000	90.000	6.465	20.000	20.000	0.000	40.281
00050.	40.000	16.250	30.000	T01	|	>	0.100	2000	∞	000007	20.556	53.220	20.000	10.000	45.000	33.636	0.000	90.000	7.904	20.000	20.000	0.000	52.224
00050.	45.000	18.125	30.000	T01	|	>	0.100	2000	∞	000008	20.556	58.560	20.000	10.000	45.000	31.364	0.000	90.000	9.135	45.000	23.571	0.000	65.995
00050.	50.000	20.000	30.000	T01	|	>	0.100	2000	∞	000009	20.556	63.900	20.000	10.000	45.000	39.444	0.000	90.000	9.957	45.000	26.250	0.000	84.714
00060.	55.000	16.250	30.000	T01	|	>	0.100	2000	∞	000001	-36.870	70.150	20.000	9.093	45.000	30.526	5.202	84.798	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
00060.	60.000	12.500	30.000	T01	|	>	0.100	2000	∞	000002	-36.870	76.400	20.000	5.268	45.000	21.786	28.243	61.757	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
00060.	65.000	8.750	30.000	T01	|	>	0.100	2000	∞	000003	-36.870	82.650	20.000	2.354	20.000	20.000	49.873	40.127	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
00060.	70.000	5.000	30.000	T01	|	>	0.100	2000	∞	000004	-36.870	88.900	20.000	0.400	20.000	20.000	73.740	16.260	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
...																							
00520.	20.000	5.000	30.000	T01	-	>	0.000	2000	-	000001	90.000	138.900	20.000										
00520.	20.000	10.000	35.000	T01	-	>	0.000	2000	-	000002	90.000	145.971	20.000										
00520.	20.000	10.000	35.000	T01	-	>	0.000	2000	-	000002	90.000	145.971	20.000										
...																							

Табела 5.24- Структура датотеке 01021_put_01_T01 за пример са слике 5.59б

Pn	x _n	y _n	z _n	Pt	Pg	Pm	s	n	Po	n	Pu	s _p	d	a ₁	b ₁	b _{1p}	ψ ₁₀	ψ ₁	a ₂	b ₂	b _{2p}	ψ ₂₀	ψ ₂
...																							
00030.	0.000	0.000	0.000	T01	-	>	0.000	0	-	000001	-135.000	0.000	20.000										
00030.	-10.000	-10.000	10.000	T01	-	>	0.000	0	-	000002	-135.000	17.321	20.000										
00040.	-10.000	-10.000	10.000	T01	|	>	0.150	2000	∞	000001	44.612	17.321	20.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
00040.	-5.000	-5.067	10.000	T01	|	>	0.150	2000	∞	000002	44.612	24.344	20.000	2.654	40.000	40.000	0.000	15.388	2.447	40.000	40.000	0.000	14.165
00040.	0.000	-0.135	10.000	T01	|	>	0.150	2000	∞	000003	44.612	31.368	20.000	7.119	40.000	40.000	0.000	45.388	6.926	40.000	40.000	0.000	43.840
00040.	5.000	4.798	10.000	T01	|	>	0.150	2000	∞	000004	44.612	38.391	20.000	9.677	40.000	40.000	0.000	75.388	9.577	40.000	40.000	0.000	73.284
00040.	10.000	9.731	10.000	T01	|	>	0.150	2000	∞	000005	44.612	45.415	20.000	10.000	40.000	40.000	0.000	90.000	10.000	40.000	40.000	0.000	90.000
00040.	15.000	14.663	10.000	T01	|	>	0.150	2000	∞	000006	44.612	52.439	20.000	10.000	40.000	40.000	0.000	90.000	10.000	40.000	40.000	0.000	90.000
00040.	19.700	19.300	10.000	T01	|	>	0.150	2000	∞	000007	44.612	59.041	20.000	10.000	40.000	40.000	0.000	90.000	10.000	40.000	40.000	0.000	90.000
00050.	24.648	18.678	10.000	T01	|	>	0.100	1800	∞	000001	-21.486	64.028	20.000	10.000	40.000	40.000	0.000	90.000	9.943	40.000	40.000	0.000	83.870
00050.	29.289	16.852	10.000	T01	|	>	0.100	1800	∞	000002	-35.810	69.015	20.000	10.000	40.000	40.000	0.000	90.000	10.000	40.000	40.000	0.000	90.000
00050.	33.333	13.934	10.000	T01	|	>	0.100	1800	∞	000003	-50.134	74.002	20.000	10.000	40.000	40.000	0.000	90.000	10.000	40.000	40.000	0.000	90.000
00050.	36.529	10.106	10.000	T01	|	>	0.100	1800	∞	000004	-64.458	78.989	20.000	10.000	40.000	40.000	0.000	90.000	10.000	40.000	40.000	0.000	90.000
00050.	38.680	5.606	10.000	T01	|	>	0.100	1800	∞	000005	-78.782	83.976	20.000	2.968	40.000	40.000	44.681	45.319	0.787	40.000	40.000	67.118	22.882
00050.	39.650	0.715	10.000	T01	|	>	0.100	1800	∞	000006	-87.972	88.963	20.000	0.057	40.000	40.000	83.873	6.127	0.007	40.000	40.000	87.929	2.071
00050.	39.700	-0.700	10.000	T01	|	>	0.100	1800	∞	000007	-87.972	90.378	20.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
00060.	44.700	-0.700	10.000	T01	|	>	0.200	2000	∞	000001	0.000	95.378	20.000	8.740	40.000	40.000	4.014	66.717	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
00060.	49.700	-0.700	10.000	T01	|	>	0.200	2000	∞	000002	0.000	100.378	20.000	9.300	40.000	40.000	4.014	85.986	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
00060.	54.700	-0.700	10.000	T01	|	>	0.200	2000	∞	000003	0.000	105.378	20.000	9.300	40.000	40.000	4.014	85.986	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
00060.	59.700	-0.700	10.000	T01	|	>	0.200	2000	∞	000004	0.000	110.378	20.000	9.300	40.000	40.000	4.014	85.986	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
00070.	59.492	4.294	10.000	T01	(	>	0.100	1500	∞	000001	97.162	115.377	20.000	8.754	40.000	40.000	0.000	61.087	10.000	40.000	40.000	0.000	90.000
00070.	58.869	9.254	10.000	T01	(	>	0.100	1500	∞	000002	101.937	120.375	20.000	9.833	40.000	40.000	0.000	79.518	10.000	40.000	40.000	0.000	90.000
00070.	57.835	14.144	10.000	T01	(	>	0.100	1500	∞	000003	106.711	125.374	20.000	10.000	40.000	40.000	0.000	90.000	10.000	40.000	40.000	0.000	90.000
00070.	56.397	18.932	10.000	T01	(	>	0.100	1500	∞	000004	111.486	130.373	20.000	10.000	40.000	40.000	0.000	90.000	10.000	40.000	40.000	0.000	90.000
...																							

Табела 5.25- Структура датотеке контаката „nnnnn_put_rr_Ttt_1“

структура	број NC реда	$Pn(m)$
1	координате тачке n	$Px(n) = x_n$ $Py(n) = y_n$ $Pz(n) = z_n$
	ознака алата	$Pt(m)$
	тип интерполације	$Pg(m)$
	смер обртања вретена	$Pm(m)$
	корак	$Pf(m) = s$
	број обртаја	$Ps(m) = n$
	тип обраде	$Po(m)$
	ред. бр. тачке n на елементарној путањи	n
	угао елементарне путање	$Pu(m)$
	пређени пут алата у NC програму	s_p
	контактни пречник алата	d
	број елемената матрице K1a	k_{1k}
	број елемената матрице K2a	k_{2k}
	2	редни број контактне тачке	$k_1$
дубина резања		$K1a$
ширина резања		$K1b$
почетни угао резања		$K1u$
угао резања		$K1i$
2	редни број контактне тачке	k_2
	дубина резања	$K2a$
	ширина резања	$K2b$
	почетни угао резања	$K2u$
	угао резања	$K2i$

Део ове датотеке за пример приказан на слици 5.59а дат је у табели 5.26 и за пример са слике 5.59б у табели 5.27.

Табела 5.26- Датотека расподеле контаката 01011_put_01_T01_1 за пример приказан на слици 5.29а

...															
Pn	x_n	y_n	z_n	Pt	Pg	Pm	s	n	Po	n	Pu	s_p	d	k_{1k}	k_{2k}
00050.	20.000	8.750	30.000	T01	|	>	0.100	2000	∞	000003	20.556	31.860	20.000	000016	000002
k_1	$K1a(k_1)$	$K1b(k_1)$	$K1u(k_1)$	$K1i(k_1)$											
000001	0.80105	20.00000	0.000	4.595											
000002	0.12020	20.00000	4.595	0.691											
000003	1.00606	20.00000	5.286	5.826											
000004	0.88168	20.00000	11.112	5.202											
000005	0.30211	20.00000	16.314	1.812											
000006	1.11776	20.00000	18.126	6.891											
000007	0.14116	20.00000	25.017	0.896											
000008	1.01387	20.00000	25.913	6.661											
000009	0.35651	20.00000	32.574	2.458											
000010	0.61283	20.00000	35.032	4.412											
000011	0.82387	20.00000	39.444	6.422											
000012	0.14979	20.00000	45.866	1.247											
000013	0.55175	20.00000	47.112	4.874											
000014	0.59323	20.00000	51.986	5.921											
000015	0.49337	20.00000	57.907	5.798											
000016	0.39806	20.00000	63.705	5.739											
k_2	$K2a(k_2)$	$K2b(k_2)$	$K2u(k_2)$	$K2i(k_2)$											
000001	0.27755	20.00000	0.000	1.590											
000002	1.03691	20.00000	1.590	5.963											

Табела 5.26- наставак

P_n	x_n	y_n	z_n	P_t	P_g	P_m	s	n	P_o	n	P_u	s_p	d	k_{1k}	k_{2k}
00050.	25.000	10.625	30.000	T01	|	>	0.100	2000	∞	000004	20.556	37.200	20.000	000021	000004
k_1	$K1a(k_1)$	$K1b(k_1)$	$K1u(k_1)$	$K1i(k_1)$											
000001	0.92125	20.00000	0.000	5.286											
000002	0.01782	20.00000	5.286	0.103											
000003	1.13280	20.00000	5.388	6.569											
000004	0.73711	20.00000	11.958	4.356											
000005	0.45488	20.00000	16.314	2.736											
000006	0.96500	20.00000	19.050	5.967											
000007	0.30526	20.00000	25.017	1.946											
000008	0.84977	20.00000	26.963	5.611											
000009	0.53919	20.00000	32.574	3.747											
000010	0.43014	20.00000	36.321	3.123											
000011	0.82387	20.00000	39.444	6.422											
000012	0.37912	20.00000	45.866	3.214											
000013	0.32241	20.00000	49.080	2.907											
000014	0.59323	20.00000	51.986	5.921											
000015	0.49337	20.00000	57.907	5.798											
000016	0.39806	20.00000	63.705	5.739											
000017	0.30419	20.00000	69.444	5.739											
000018	0.20888	20.00000	75.183	5.798											
000019	0.10902	20.00000	80.981	5.921											
000020	0.01456	20.00000	86.902	2.907											
000021	0.00006	20.00000	89.808	0.192											
k_2	$K2a(k_2)$	$K2b(k_2)$	$K2u(k_2)$	$K2i(k_2)$											
000001	0.14510	20.00000	0.000	0.831											
000002	1.04188	20.00000	0.831	5.986											
000003	1.00344	20.00000	6.817	5.836											
000004	0.96721	20.00000	12.653	5.754											
...															

Табела 5.27- Датотека расподеле контаката 01021_put_01_T01_1 за пример приказан на слици 5.29б

P_n	x_n	y_n	z_n	P_t	P_g	P_m	s	n	P_o	n	P_u	s_p	d	k_{1k}	k_{2k}
00040.	19.700	19.300	10.000	T01	|	>	0.150	2000	∞	000007	44.612	59.041	20.000	000021	000021
k_1	$K1a(k_1)$	$K1b(k_1)$	$K1u(k_1)$	$K1i(k_1)$											
000001	1.00055	40.00000	0.000	5.742											
000002	0.10344	40.00000	5.742	0.596											
000003	1.21060	40.00000	6.338	7.045											
000004	0.41612	40.00000	13.383	2.464											
000005	0.67651	40.00000	15.847	4.074											
000006	0.99525	40.00000	19.921	6.199											
000007	0.79549	40.00000	26.120	5.199											
000008	0.11475	40.00000	31.319	0.773											
000009	0.83274	40.00000	32.091	5.827											
000010	0.75950	40.00000	37.919	5.750											
000011	0.68804	40.00000	43.669	5.733											
000012	0.61614	40.00000	49.402	5.774											
000013	0.40347	40.00000	55.176	4.282											
000014	0.13806	40.00000	59.458	1.594											
000015	0.46148	40.00000	61.053	6.051											
000016	0.37223	40.00000	67.104	6.319											
000017	0.07172	40.00000	73.423	1.507											
000018	0.19617	40.00000	74.930	5.209											
000019	0.11022	40.00000	80.139	4.896											
000020	0.02767	40.00000	85.035	2.421											
000021	0.00986	40.00000	87.456	2.544											

Табела 5.27 – наставак 1

k_2	$K2a(k_2)$	$K2b(k_2)$	$K2u(k_2)$	$K2i(k_2)$											
000001	0.26141	40.00000	0.000	1.498											
000002	0.18254	40.00000	1.498	1.047											
000003	1.26869	40.00000	2.545	7.317											
000004	0.14579	40.00000	9.861	0.849											
000005	0.99465	40.00000	10.710	5.867											
000006	1.03751	40.00000	16.577	6.319											
000007	0.02417	40.00000	22.896	0.150											
000008	0.92529	40.00000	23.046	5.901											
000009	0.87049	40.00000	28.947	5.876											
000010	0.79688	40.00000	34.824	5.774											
000011	0.72595	40.00000	40.598	5.733											
000012	0.65545	40.00000	46.331	5.750											
000013	0.58320	40.00000	52.081	5.827											
000014	0.50675	40.00000	57.909	5.972											
000015	0.16919	40.00000	63.880	2.296											
000016	0.25368	40.00000	66.177	3.902											
000017	0.32681	40.00000	70.079	6.538											
000018	0.07125	40.00000	76.617	1.896											
000019	0.13918	40.00000	78.513	5.149											
000020	0.05325	40.00000	83.662	4.063											
000021	0.00788	40.00000	87.725	2.275											
P_n	x_n	y_n	z_n	P_t	P_g	P_m	s	n	P_o	n	P_u	S_p	d	k_{1k}	k_{2k}
00050.	24.648	18.678	10.000	T01	)	>	0.100	1800	∞	000001	-21.486	64.028	20.000	000020	000020
k_1	$K1a(k_1)$	$K1b(k_1)$	$K1u(k_1)$	$K1i(k_1)$											
000001	0.13004	40.00000	0.000	0.745											
000002	0.90674	40.00000	0.745	5.206											
000003	1.01237	40.00000	5.951	5.874											
000004	0.97402	40.00000	11.825	5.772											
000005	0.93705	40.00000	17.597	5.733											
000006	0.90027	40.00000	23.330	5.751											
000007	0.86256	40.00000	29.081	5.830											
000008	0.82262	40.00000	34.911	5.976											
000009	0.17500	40.00000	40.887	1.340											
000010	0.60377	40.00000	42.227	4.865											
000011	0.72849	40.00000	47.092	6.547											
000012	0.12356	40.00000	53.638	1.212											
000013	0.54393	40.00000	54.850	5.847											
000014	0.27992	40.00000	60.697	3.466											
000015	0.30735	40.00000	64.162	4.392											
000016	0.20566	40.00000	68.555	3.497											
000017	0.26113	40.00000	72.052	5.757											
000018	0.04606	40.00000	77.809	1.320											
000019	0.15116	40.00000	79.129	6.559											
000020	0.02830	40.00000	85.688	4.312											
k_2	$K2a(k_2)$	$K2b(k_2)$	$K2u(k_2)$	$K2i(k_2)$											
000001	0.01669	40.00000	0.000	0.096											
000002	1.09926	40.00000	0.096	6.312											
000003	0.94237	40.00000	6.407	5.471											
000004	0.21036	40.00000	11.878	1.235											
000005	1.21924	40.00000	13.113	7.301											
000006	0.12679	40.00000	20.413	0.777											
000007	1.18339	40.00000	21.191	7.482											
000008	0.06217	40.00000	28.673	0.407											
000009	1.03974	40.00000	29.080	7.077											
000010	0.35526	40.00000	36.157	2.564											
000011	0.52844	40.00000	38.721	3.996											
000012	0.75534	40.00000	42.717	6.213											

Табела 5.27 – наставак 2

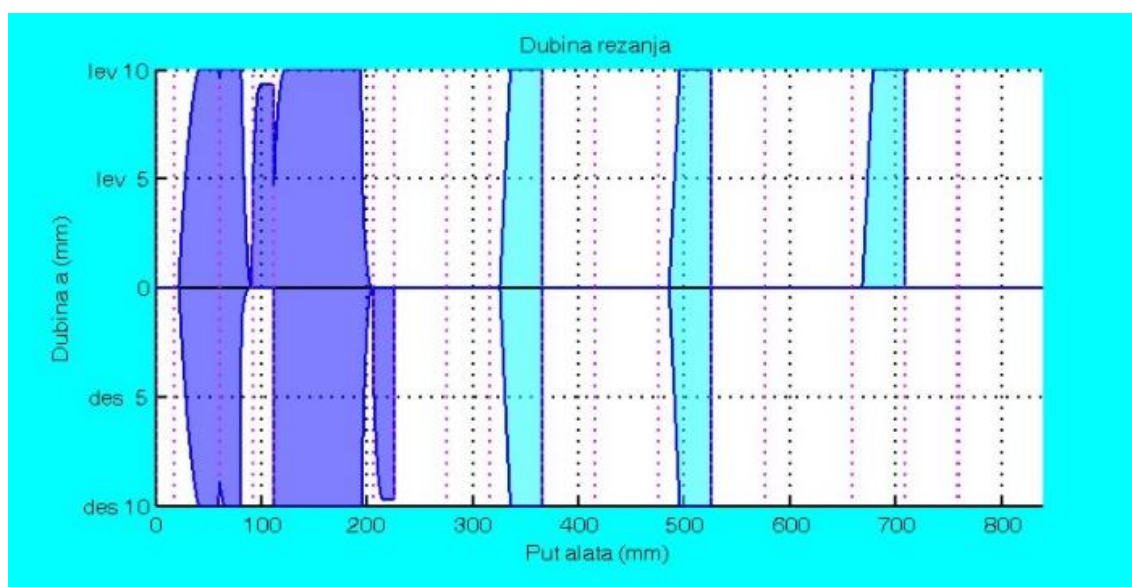
000013	0.54499	40.00000	48.930	5.011													
000014	0.09856	40.00000	53.940	0.971													
000015	0.54186	40.00000	54.911	5.833													
000016	0.44593	40.00000	60.744	5.753													
000017	0.35247	40.00000	66.497	5.733													
000018	0.25859	40.00000	72.230	5.770													
000019	0.14583	40.00000	78.000	5.088													
000020	0.01550	40.00000	83.088	0.782													

5.2.7.6. Дијаграми израчунатих елемената процеса резања

На основу израчунатих елемената процеса резања у n тачака путање алата, из ASCII датотеке се цртају дијаграми промене елемената резања дуж путање алата. На сликама 5.62 и 5.67 приказани су дијаграми који се добијају из ASCII датотека које имају структуру приказану у табелама 5.22 и 5.25. Дијаграми су добијени за пример дат на сликама 5.28, 5.29 и 5.59б, односно према подацима из табела 5.24 и 5.27.

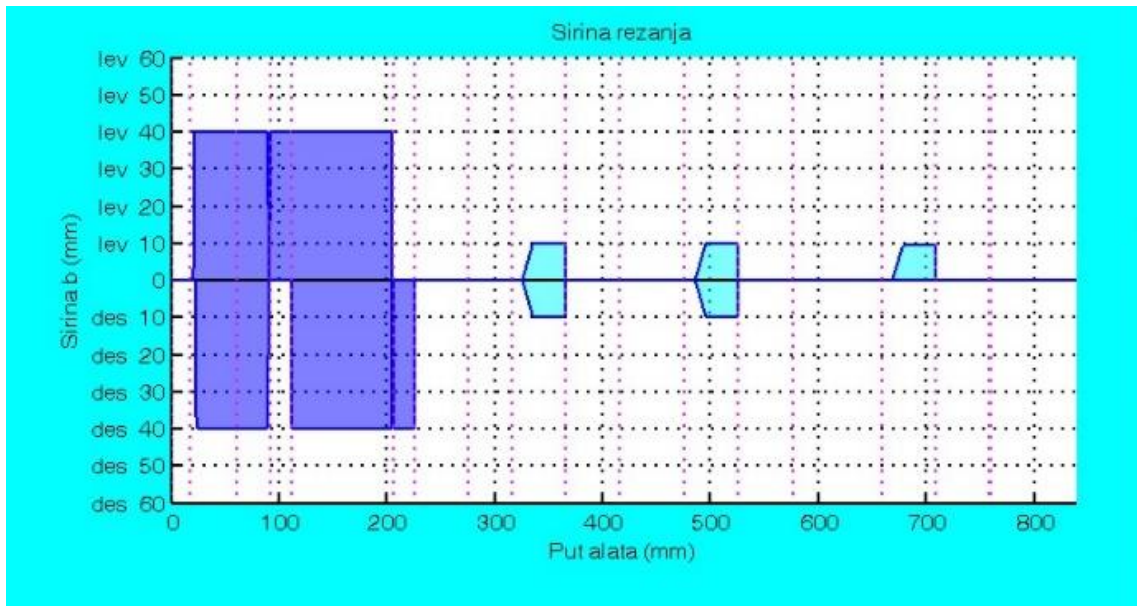
Дијаграми промене дубине и ширине резања, угла захвата и почетног и укупног угла захвата дати су са леве и десне стране у односу на правац кретања алата.

На слици 5.62 приказана је промена дубине резања дуж путање алата, која се добија уписивањем вредности колона a_1 и a_2 из табеле 5.22. Вредности a_1 се уписују изнад (на слици означено са „lev“) а a_2 испод (на слици означено са „des“) апцисе и одговарају дубинама резања са леве и десне стране у односу на правац кретања алата.



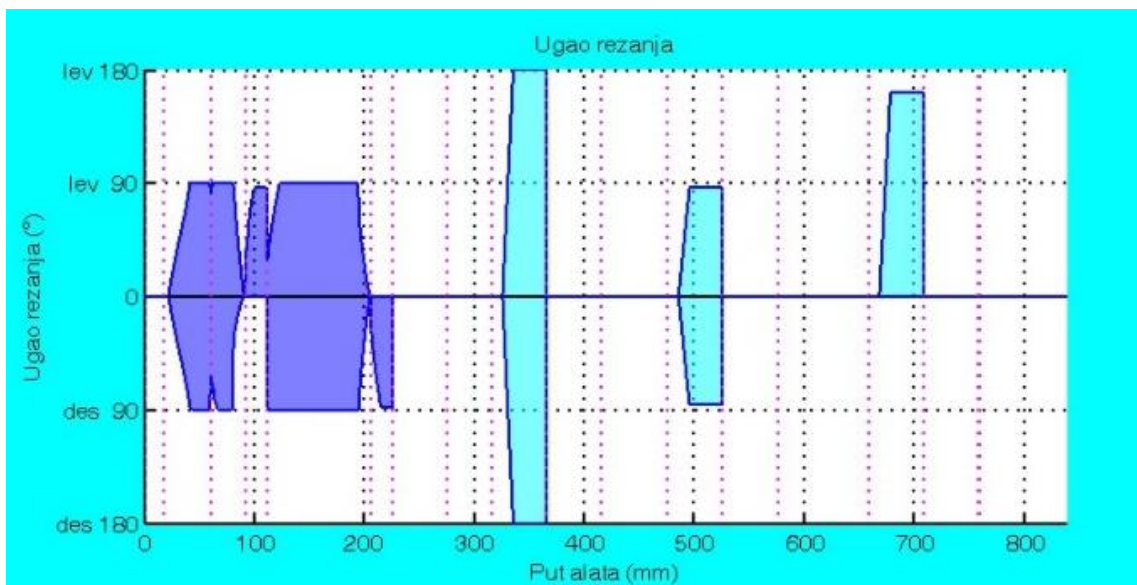
Слика 5.62. Дијаграм промене дубине резања са леве и десне стране за пример са слике 5.29

На слици 5.63 приказана је промена максималне ширине резања дуж путање алата, која се добија уписивањем вредности колона b_1 и b_2 из табеле 5.22. Вредности b_1 се уписују изнад (на слици означено са „lev“) а b_2 испод (на слици означено са „des“) апцисе и одговарају максималним ширинама резања са леве и десне стране у односу на правац кретања алата.



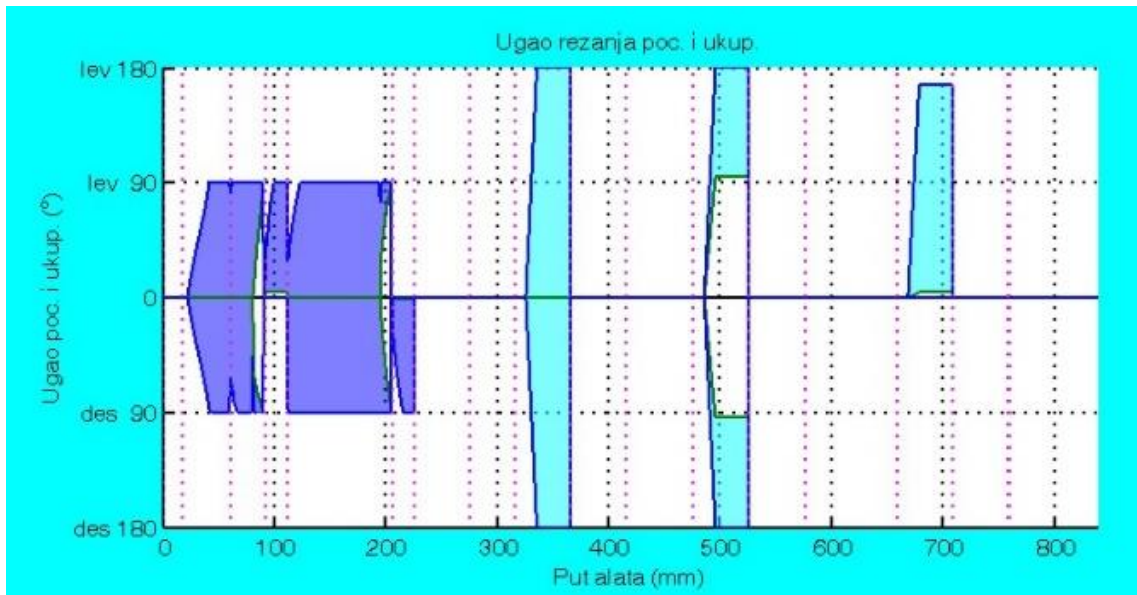
Слика 5.63. Дијаграм промене ширине резања са леве и десне стране за пример са слике 5.29

На слици 5.64 приказана је промена угла захвата дуж путање алата, која се добија уписивањем вредности колона ψ_1 и ψ_2 из табеле 5.22. Вредности ψ_1 се уписују изнад (на слици означено са „lev“) а ψ_2 испод (на слици означено са „des“) апцисе и одговарају угловима захвата са леве и десне стране у односу на правац кретања алата.



Слика 5.64. Дијаграм промене угла захвата са леве и десне стране за пример са слике 5.29

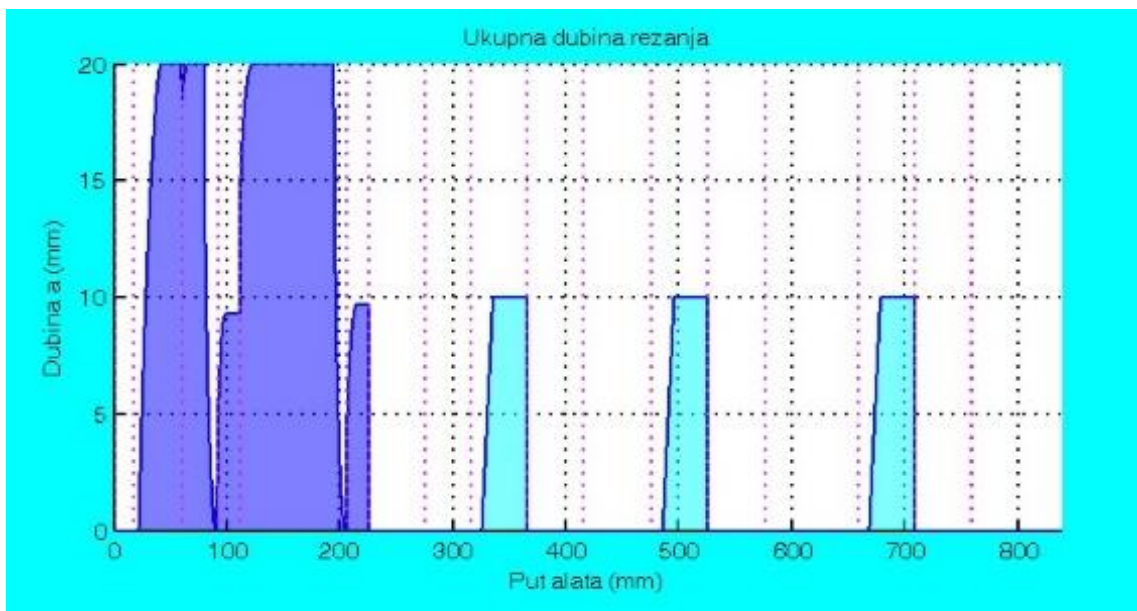
На слици 5.65 приказане су промене угла захвата и почетног угла захвата дуж путање алата, које се добијају уписивањем вредности колона ψ_1 и ψ_2 , односно ψ_{10} и ψ_{20} из табеле 5.22. Вредности ψ_1 и ψ_{10} се уписују изнад (на слици означено са „lev“) а ψ_2 и ψ_{20} испод (на слици означено са „des“) апцисе и одговарају угловима захвата са леве и десне стране у односу на правац кретања алата.



Слика 5.65. Дијаграм промене угла захвата и почетног угла захвата са леве и десне стране за пример са слике 5.29

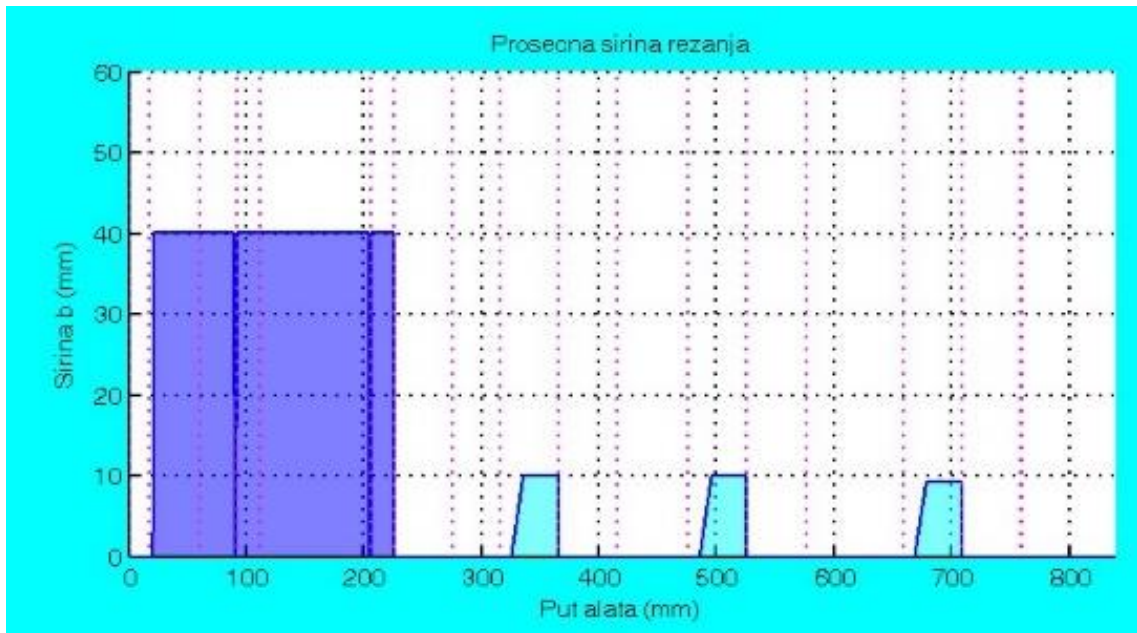
Даље се одређују дијаграми промене укупне дубине резања, просечне ширине резања, укупног угла захвата и расподеле контаката дуж путање алата.

На слици 5.66 приказана је промена укупне дубине резања (са леве и са десне стране у односу на правац кретања алата) дуж путање алата, која се добија уписивањем збира вредности колона a_1 и a_2 из табеле 5.22.



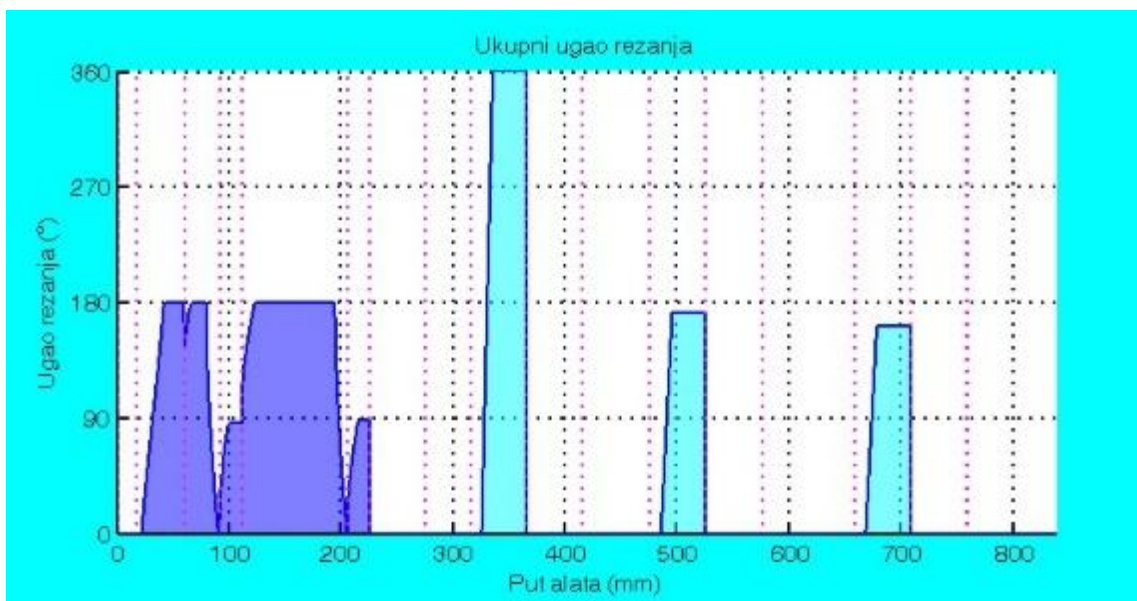
Слика 5.66. Дијаграм промене укупне дубине резања за пример са слике 5.29

На слици 5.67 приказана је промена укупне просечне ширине резања (са леве и са десне стране у односу на правац кретања алата) дуж путање алата, која се добија уписивањем збира вредности колона b_{1p} и b_{2p} из табеле 5.22.



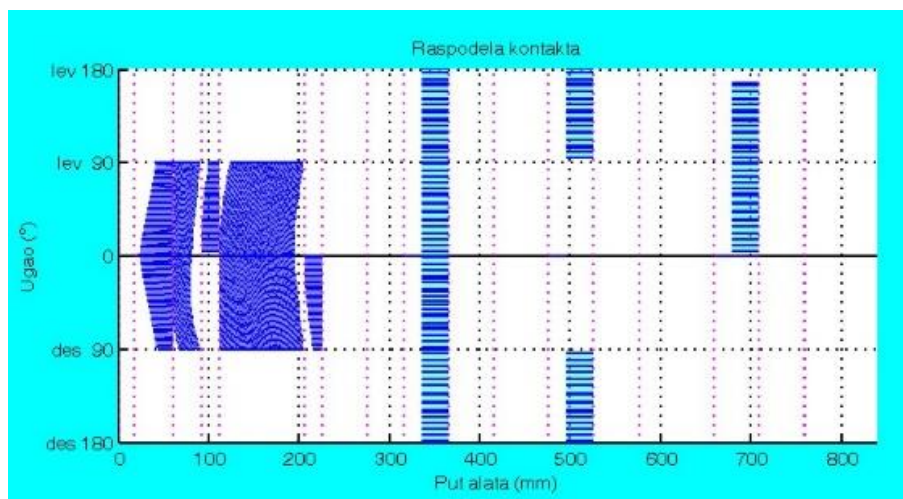
Слика 5.67. Дијаграм промене просечне ширине резања за пример са слике 5.29

На слици 5.68 приказана је промена укупног угла захвата (са леве и са десне стране у односу на правац кретања алата) дуж путање алата, која се добија уписивањем збира вредности колона ψ_1 и ψ_2 из табеле 5.22.



Слика 5.68. Дијаграм промене угла захвата за пример са слике 5.29

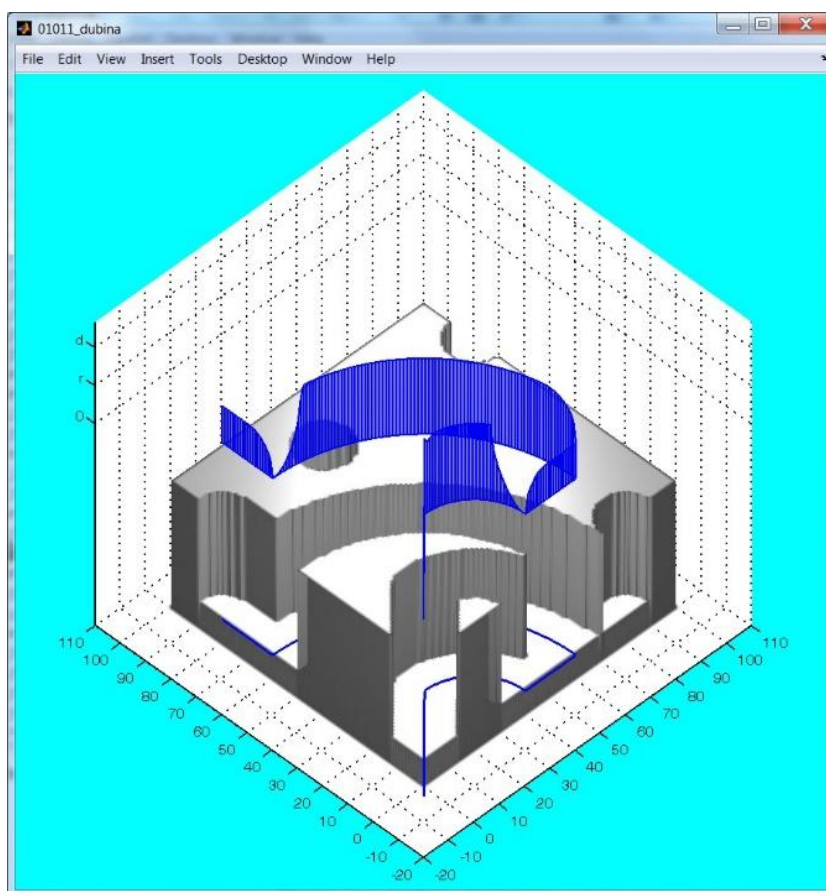
На слици 5.69 приказана је расподела контаката са леве и десне стране у односу на правац кретања алата дуж путање алата, која се добија уписивањем свих вредности $K1i(k_1)$ и $K2i(k_2)$ из табеле 5.25 за сваку тачку на путањи. Вредности $K1i(k_1)$ уписују се изнад (на слици означено са „lev“) а $K2i(k_2)$ испод (на слици означено са „des“) апцисе и одговарају угловима контакта са леве и десне стране у односу на правац кретања алата.



Слика 5.69. Дијаграм расподеле контаката за пример са слике 5.29

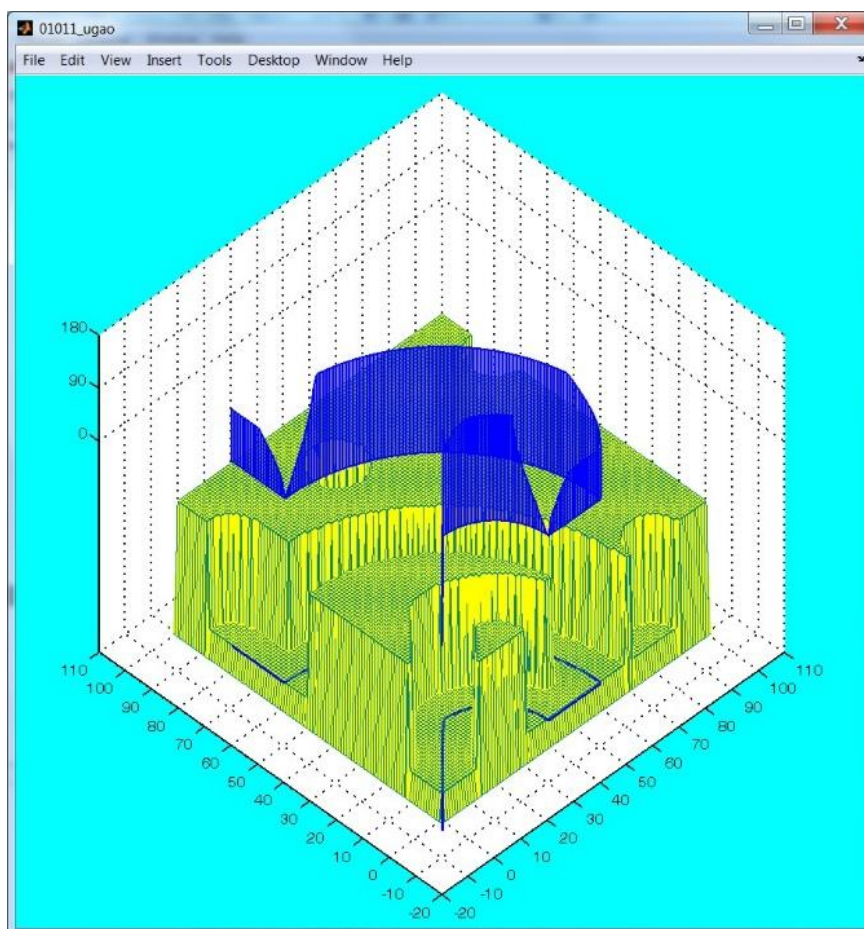
На свим дијаграмима на апцису се уноси одговарајућа вредност пређеног пута, односно вредности s_p из табеле 5.22. Светло плавом бојом су оначени елементи процеса резања који одговарају циклусним функцијама.

Промена елемената процеса резања дуж путање алата може се илустровати и тродимензионалним приказом дијаграма изнад путање алата. На слици 5.70 приказана је промена дубине резања дуж путање која одговара делу дијаграма са слике 5.62 (без циклусних функција).



Слика 5.70. Тродимензионални проказ дијаграма промене дубине резања за пример са слике 5.29

На слици 5.71 приказана је промена угла захвата дуж путање која одговара делу дијаграма са слике 5.64 (без циклусних функција).



Слика 5.71. Тродимензионални проказ дијаграма промене угла захвата за пример са слике 5.29

5.2.8. Одређивање профила брзине помоћног кретања дуж путање алата

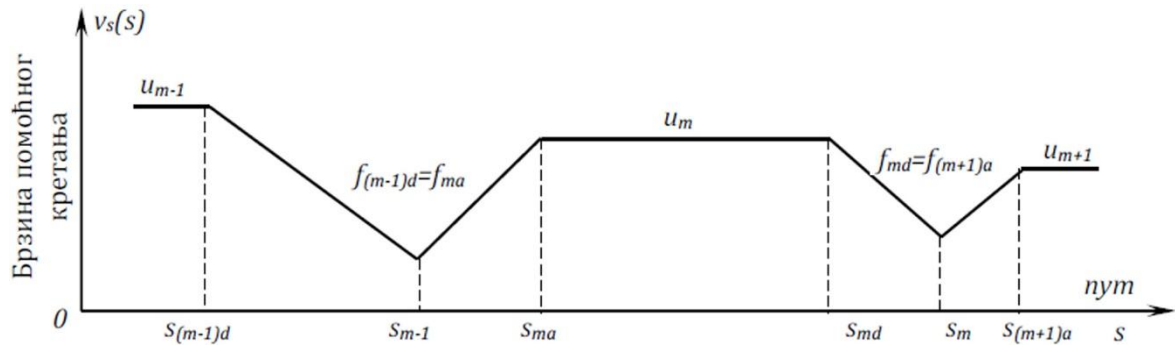
Брзина помоћног кретања дуж путање одређује се према моделу описаном у поглављу 3. За сваки сегмент путање $P(m)$ најпре се из табеле 5.22 учитавају вредности брзине помоћног кретања задате NC програмом и то: за тај сегмент u_m , претходни u_{m-1} и наредни u_{m+1} (као производ броја обртаја и корака $u_m = Pf(m) \cdot Ps(m) = f_m \cdot s_m$) и пређени пут алата до почетка сегмента s_{m-1} и до краја сегмента s_m (као збир свих претходних путева $s_m = \sum_0^{m-1} s_{pm}$).

Затим се рачунају брзине помоћног кретања потребне за безбедно скретање алата између два сегмента (слика 5.72) према формули 3.5:

$$f_{ma} = \min[u_{m-1}, u_m] \cdot \left(1 - \frac{|\varphi_m|}{\pi}\right),$$

$$f_{md} = \min[u_m, u_{m+1}] \cdot \left(1 - \frac{|\varphi_{m+1}|}{\pi}\right).$$
(5.82)

Угао између два суседна сегмента путање φ_m одређује се као разлика углова које тај сегмент путање заклапа са претходним: $\varphi_m = Pu(m) - Pu(m - 1)$.



Слика 5.72. Трапезоидни профил брзине помоћног кретања за $s_{md} > s_{ma}$

Даље се одређују положаји на путањи где се завршава убрзано кретање s_{ma} и где почиње успорено кретање s_{md} на сегменту путање. Ови положаји се одређују према трапезоидном профилу брзине помоћног кретања (слика 5.72) чији нагиб одређује карактеристика машине алатке c , која представља убрзање помоћног кретања машине алатке:

$$s_{ma} = \frac{u_m^2 - f_{ma}^2}{2c} + s_{m-1},$$

$$s_{md} = s_m - \frac{u_m^2 - f_{md}^2}{2c}. \quad (5.85)$$

Уколико је испуњен услов: $s_{md} \geq s_{ma}$, односно уколико је дужина сегмента довољна да се постигне задата брзина помоћног кретања, профил брзине помоћног кретања ће одговарати илустрацији на слици 5.72 и брзина помоћног кретања дуж сегмента путање одређује се према:

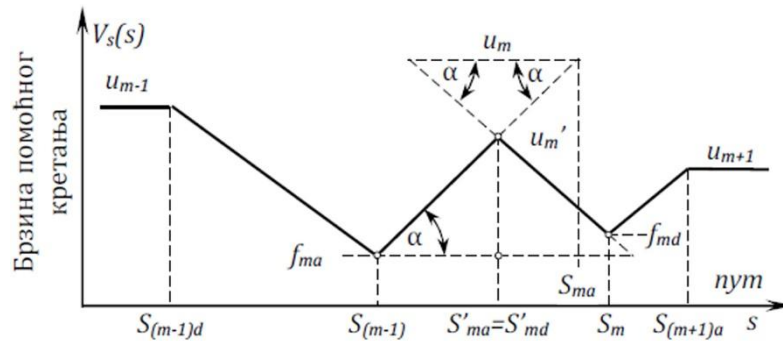
$$v_{sm}(s) = \begin{cases} \sqrt{f_{ma}^2 + 2c(s - s_{m-1})}; & s_{m-1} < s \leq s_{ma} \\ u_m; & s_{ma} < s \leq s_{md} \\ \sqrt{u_m^2 - 2c(s - s_{md})}; & s > s_{md} \end{cases} \quad (5.86)$$

Уколико није испуњен услов: $s_{md} \geq s_{ma}$, односно уколико дужина сегмента није довољна да се постигне задата брзина помоћног кретања, профил брзине помоћног кретања ће одговарати илустрацији на слици 5.73. У овом случају потребно је одредити нови положај завршетка убрзаног кретања s'_{ma} и нову брзину помоћног кретања у тој тачки. На основу слике следи:

$$\tan \alpha = \frac{u_m - f_{ma}}{s_{ma} - s_{m-1}},$$

$$s'_{ma} = \left(\frac{f_{md} - f_{ma}}{\tan \alpha} + s_m + s_{m-1} \right) / 2,$$

$$u'_m = (s'_{ma} - s_{m-1}) \tan \alpha + f_{ma}. \quad (5.87)$$



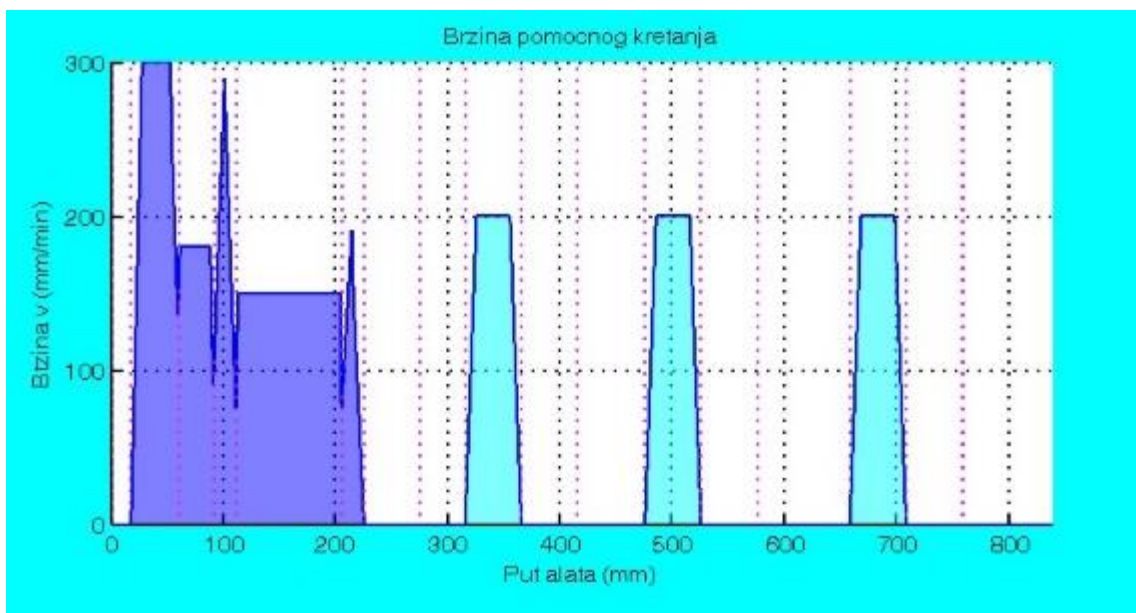
Слика 5.73. Трапезоидни профил брзине помоћног кретања за $s_{md} < s_{ma}$

Па се брзина помоћног кретања дуж овог сегмента путање одређује према:

$$v_{sm}(s) = \begin{cases} \sqrt{f_{ma}^2 + 2c(s - s_{m-1})}; & s_{m-1} < s < s'_{ma} \\ u'_m; & s = s'_{ma} \\ \sqrt{(u'_m)^2 - 2c(s - s_{ma})}; & s > s'_{ma} \end{cases} \quad (5.88)$$

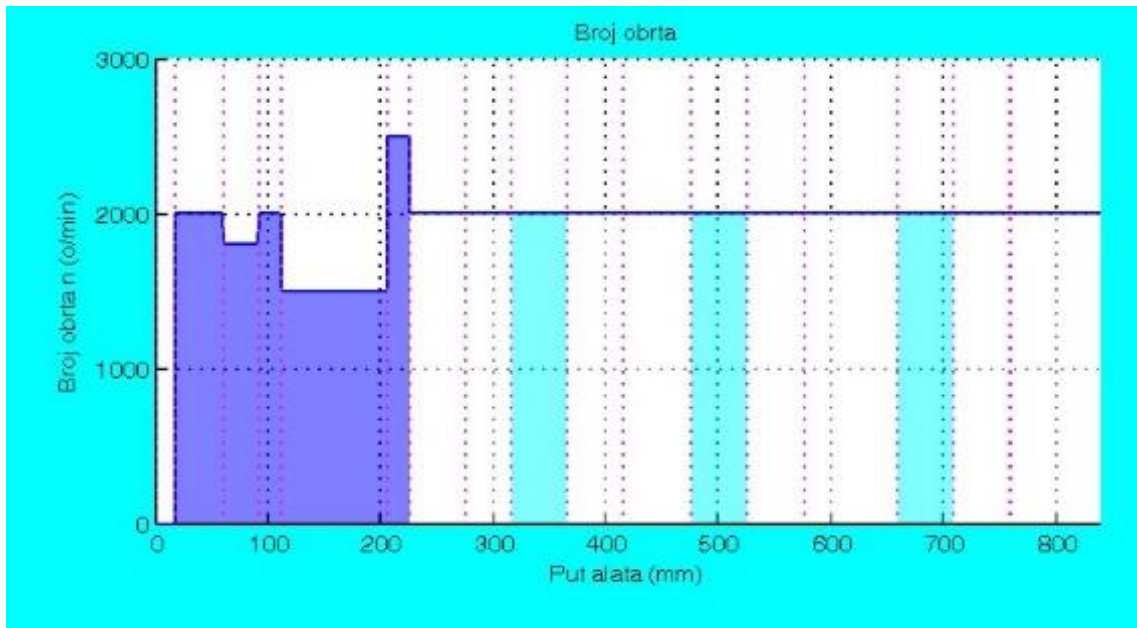
Израчунате вредности се уписују у одговарајуће таблице на основи којих се цртају дијаграми брзине помоћног кретања, броја обртаја, корака и времена обраде.

Дијаграм промене брзине помоћног кретања (слика 5.74) добија се према изразима 5.86 и 5.88.



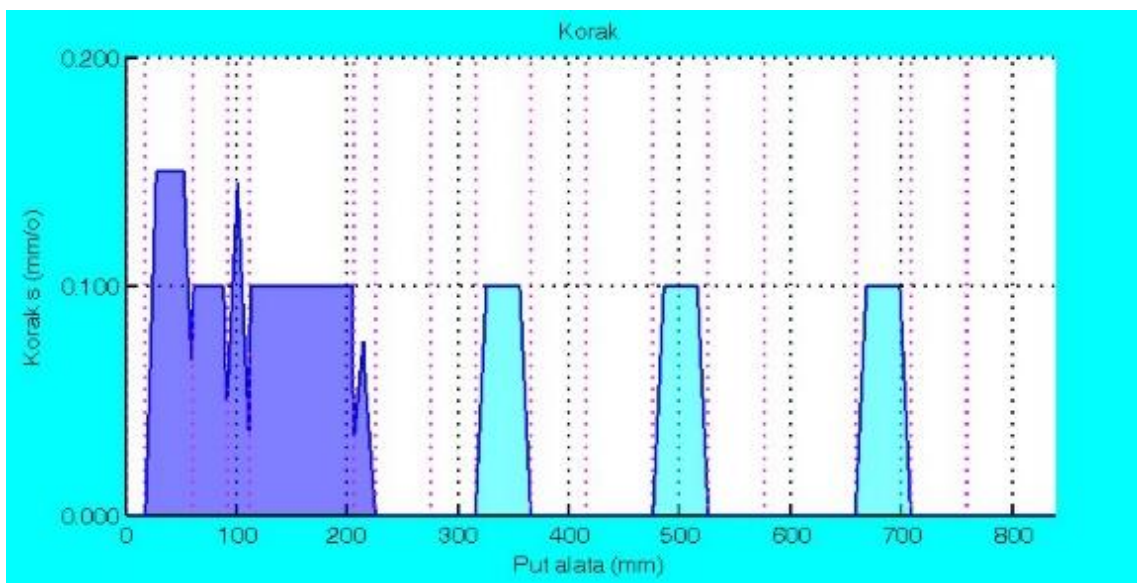
Слика 5.74. Дијаграм промене брзине помоћног кретања за пример са слике 5.29

Дијаграм промене броја обртаја (слика 5.75) добија се директно из таблице 5.22 уписивањем вредности $P_s(m)$. Сматра се да се број обртаја тренутно мења.



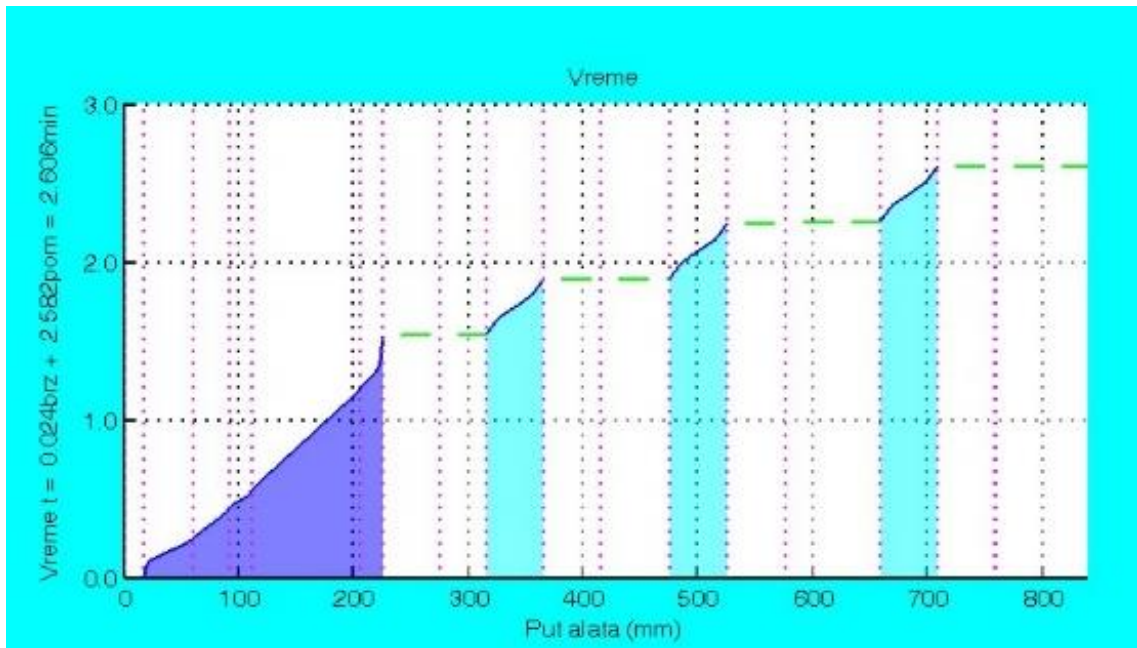
Слика 5.75. Дијаграм промене броја обртаја за пример са слике 5.29

Дијаграм промене корака (слика 5.76) добија се дељењем брзине помоћног кретања и броја обртаја.



Слика 5.76. Дијаграм промене корака за пример са слике 5.29

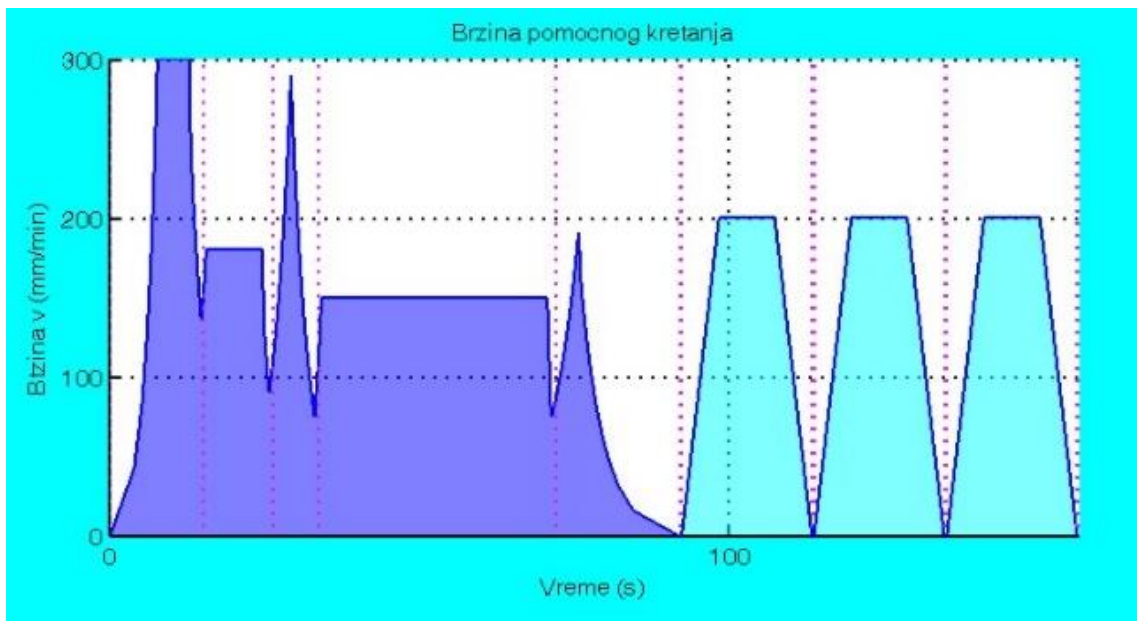
Дијаграм времена обраде (слика 5.77) добија се као кумулативна функција времена потребних за обраду сваког сегмента. Време обраде за сваки сегмент рачуна се као: (а) количник промене брзине помоћног кретања и убрзања за делове убрзаног и успореног помоћног кретања, (б) количник пређеног пута и брзине помоћног кретања за делове равномерног помоћног кретања.



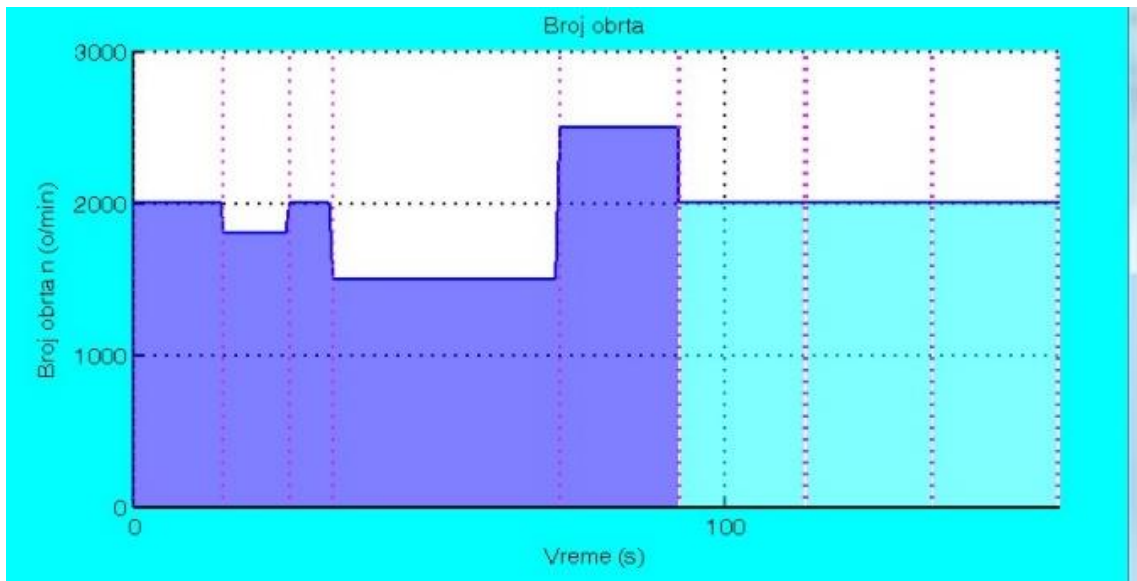
Слика 5.77. Дијаграм времена обраде за пример са слике 5.29

Испрекиданом линијом су обележени периоди брзог хода. С обзиром на то да се експерименталним путем вредности брзине помоћног кретања, корака и броја обртаја читавају током времена, за проверу модела и поређење са експерименталним резултатима потребно је превести претходне дијаграме у временски домен (слике 5.78-5.81).

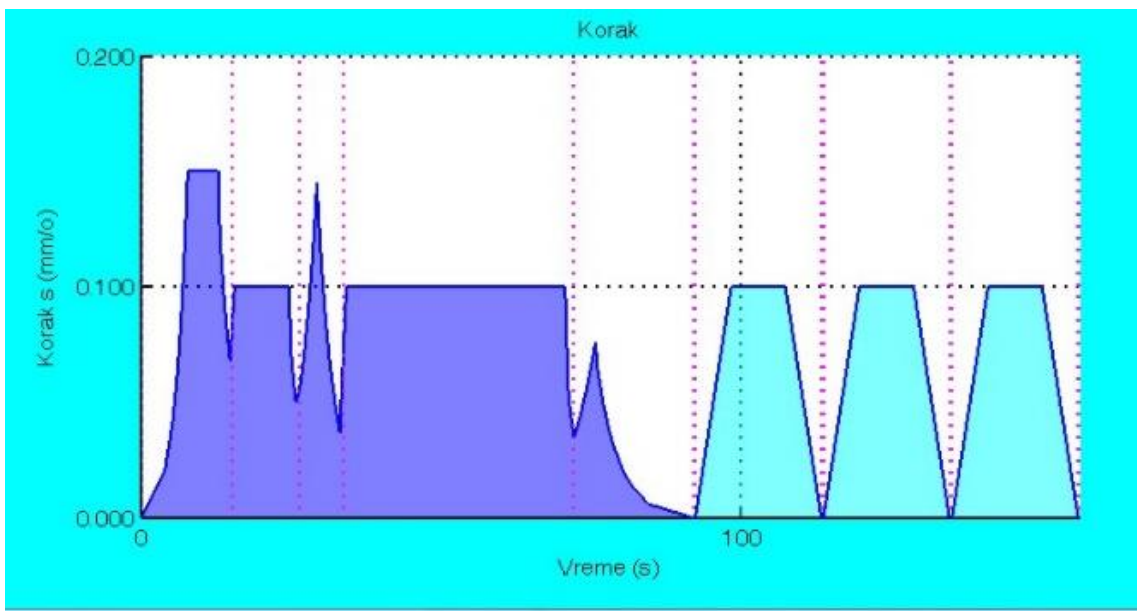
Дијаграми промене током времена добијени су дељењем вредности на апциси са одговарајућом брзином у тој тачки.



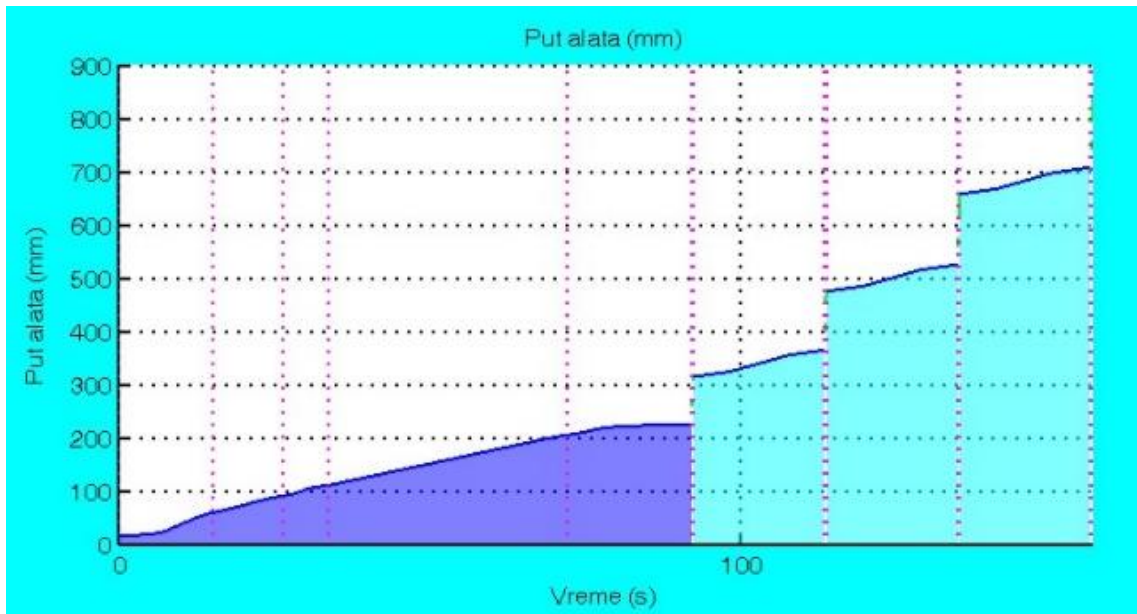
Слика 5.78. Дијаграм промене брзине помоћног кретања током времена за пример са слике 5.29



Слика 5.79. Дијаграм промене обртаја током времена за пример са слике 5.29

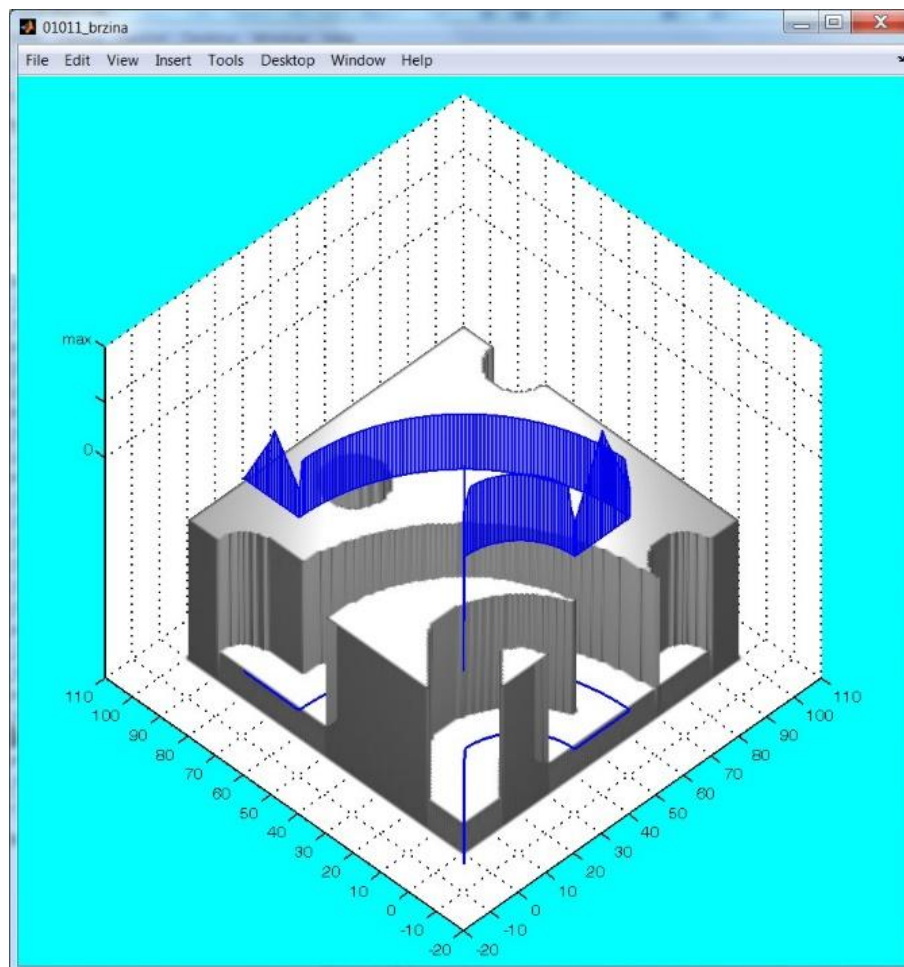


Слика 5.80. Дијаграм промене корака током времена за пример са слике 5.29



Слика 5.81. Дијаграм промене дужине пута током времена за пример са слике 5.29

Промена брзине помоћног кретања и корака може се представити и тродимензионалним приказом изнад путање алата (слика 5.82).



Слика 5.82. Тродимензионални приказ дијаграма промене брзине помоћног кретања за пример са слике 5.29

5.2.9. Одређивање сила резања дуж путање алата

У раду је коришћен модел силе са линеарном зависношћу (табела 2.1) детаљно описан у поглављу 2, при чему је у обзир узета само статичка компонента дебљине струготине [92].

Елементарна тангенцијална, радијална и аксијална сила резања (слика 2.8) које делују на j -и зуб глодала су дате изразима:

$$\begin{aligned} dF_{ij}(\phi, z) &= [K_{te} + K_{tc}h_j(\phi_j(z))] dz, \\ dF_{rj}(\phi, z) &= [K_{re} + K_{rc}h_j(\phi_j(z))] dz, \\ dF_{aj}(\phi, z) &= [K_{ae} + K_{ac}h_j(\phi_j(z))] dz. \end{aligned} \quad (5.89)$$

Пројектовањем елементарних сила на x , y и z осу, добијају се изрази за елементарне силе у x , y и z правцу, при чему је x правац кретања, y је нормала на правац кретања, а z је нормала на раван кретања :

$$\begin{aligned} dF_{xj}(\phi_j(z)) &= -dF_{ij}(\phi, z) \cos \phi_j(z) - dF_{rj}(\phi, z) \sin \phi_j(z), \\ dF_{yj}(\phi_j(z)) &= dF_{ij}(\phi, z) \sin \phi_j(z) - dF_{rj}(\phi, z) \cos \phi_j(z), \\ dF_{zj}(\phi_j(z)) &= dF_{aj}(\phi, z). \end{aligned} \quad (5.90)$$

Заменом тангенцијалне, радијалне и аксијалне силе према изразу 5.89 и дебљине струготине (израз 2.6) у израз за $dF_{xj}(\phi_j(z))$, добија се:

$$\begin{aligned} dF_{xj}(\phi_j(z)) &= -[K_{te} + K_{tc}f_z \sin \phi_j(z)] dz \cos \phi_j(z) - [K_{re} + K_{rc}f_z \sin \phi_j(z)] dz \sin \phi_j(z) = \\ &= [-K_{te} \cos \phi_j(z) - K_{tc}f_z \sin \phi_j(z) \cos \phi_j(z) - K_{re} \sin \phi_j(z) - K_{rc}f_z \sin \phi_j(z) \sin \phi_j(z)] dz = \\ &= \left[-K_{te} \cos \phi_j(z) - K_{tc} \frac{f_z}{2} \sin 2\phi_j(z) - K_{re} \sin \phi_j(z) - K_{rc} \frac{f_z}{2} (1 - \cos 2\phi_j(z)) \right] dz. \end{aligned} \quad (5.91)$$

За цилиндрично глодало и константан угао завојнице β , диференцирањем израза 2.4 добија се да је $dz = Dd\psi / (2\text{tg } \beta)$, а диференцирањем израза 2.3 добија се да је $d\phi_j(z) = -d\psi$, па се заменом вредности за $dz = Dd\phi_j(z) / (2\text{tg } \beta)$ у израз 5.89 добија:

$$\begin{aligned} dF_{xj}(\phi_j(z)) &= \\ &= \frac{D}{2\text{tg } \beta} \left[K_{te} \cos \phi_j(z) + K_{re} \sin \phi_j(z) + \frac{f_z}{2} (K_{rc} - K_{rc} \cos 2\phi_j(z) + K_{tc} \sin 2\phi_j(z)) \right] d\phi_j(z). \end{aligned} \quad (5.92)$$

Интеграљењем израза 5.90 у границама од улазног угла ϕ_{st} до излазног угла ϕ_{ex} сечива j добија се:

$$\begin{aligned}
F_{xj} &= \int_{\phi_{st}}^{\phi_{ex}} dF_{xj}(\phi_j) = \frac{D}{2tg\beta} \int_{\phi_{st}}^{\phi_{ex}} \left[K_{te} \cos \phi_j + K_{re} \sin \phi_j + \frac{f_z}{2} (K_{rc} - K_{rc} \cos 2\phi_j + K_{tc} \sin 2\phi_j) \right] d\phi_j = \\
&= \frac{D}{2tg\beta} \left[K_{te} \sin \phi_j - K_{re} \cos \phi_j + \frac{f_z}{2} \left(K_{rc} \phi_j - \frac{K_{rc}}{2} \sin 2\phi_j - \frac{K_{tc}}{2} \cos 2\phi_j \right) \right]_{\phi_{st}}^{\phi_{ex}} = \\
&= \frac{D}{2tg\beta} \left[K_{te} \sin \phi_j - K_{re} \cos \phi_j + \frac{f_z}{4} (K_{rc} (2\phi_j - \sin 2\phi_j) - K_{tc} \cos 2\phi_j) \right]_{\phi_{st}}^{\phi_{ex}}.
\end{aligned} \tag{5.91}$$

Укупна сила у правцу x за један обртај алата једнака је збиру сила на свим сечивима глодала (N -број сечива глодала):

$$F_x = \sum_{j=1}^N F_{xj}. \tag{5.92}$$

Просечна сила у правцу x за један обртај добија се заменом израза за тангенс угла завојнице $tg\beta = l/b$, где је l део обима глодала између два суседна зуба $l = D\pi/N$, а b ширина резања:

$$\overline{F}_x = \frac{bN}{2\pi} \left[K_{te} \sin \phi_j - K_{re} \cos \phi_j + \frac{f_z}{4} (K_{rc} (2\phi_j - \sin 2\phi_j) - K_{tc} \cos 2\phi_j) \right]_{\phi_{st}}^{\phi_{ex}}. \tag{5.93}$$

Увођењем смена:

$$\begin{aligned}
S &= \left[\sin \phi_j \right]_{\phi_{st}}^{\phi_{ex}}, & T &= \left[\cos \phi_j \right]_{\phi_{st}}^{\phi_{ex}}, \\
P &= \left[\cos 2\phi_j \right]_{\phi_{st}}^{\phi_{ex}}, & Q &= \left[2\phi_j - \sin 2\phi_j \right]_{\phi_{st}}^{\phi_{ex}},
\end{aligned} \tag{5.94}$$

добија се коначан израз за просечну силу у правцу x :

$$\overline{F}_x = \frac{bN}{2\pi} \left[-K_{te} S + K_{re} T - \frac{f_z}{4} (K_{rc} Q - K_{tc} P) \right]. \tag{5.95}$$

На исти начин добијају се и изрази за силе у осталим правцима:

$$\begin{aligned}
\overline{F}_y &= \frac{bN}{2\pi} \left[-K_{te} T - K_{re} S + \frac{f_z}{4} (K_{rc} P + K_{tc} Q) \right], \\
\overline{F}_z &= -\frac{bN}{2\pi} \left[K_{ae} [\phi]_{\phi_{st}}^{\phi_{ex}} - f_z K_{ac} T \right].
\end{aligned} \tag{5.96}$$

Према изразима 5.95 и 5.96 рачунају се силе резања. \overline{F}_x је сила у правцу кретања алата, а \overline{F}_y у правцу нормале на правац кретања у равни кретања. Ширина резања b се чита из табеле 5.22. Број зуба глодала N се чита из табеле 5.17. Корак по сечиву се добија читањем са дијаграма промене корака (слика 5.78) и дељењем са бројем сечива глодала. Почетни угао захвата и излазни угао захвата Φ_{st} и Φ_{ex} се читају из табеле 5.22, при чему је $\Phi_{st} = \pi/2 - \psi_{10}$, односно $\Phi_{st} = \pi/2 + \psi_{20}$, а $\Phi_{ex} = \psi_{10} + \psi_{11}$, односно $\Phi_{ex} = \psi_{20} + \psi_{21}$. Коефицијенти K се уносе за дату комбинацију алата и материјала обрадка и претходно се експериментално одређују.

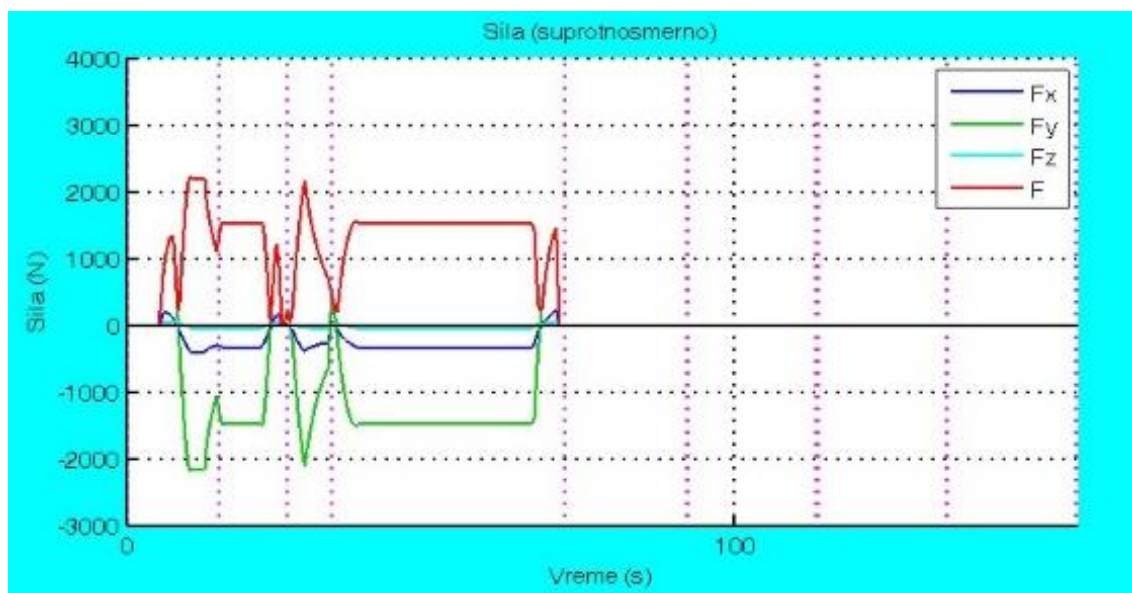
Дијаграми сила резања (слике 5.83, 5.84 и 5.85) за пример дат на сликама 5.29 и 5.596, добијени су применом коефицијената чије су вредности одређене експериментално у [66] за алат пречника 20 mm, са 3 сечива (табела 5.28).

Табела 5.28- Специфичне силе резања

Специфичне силе резања	T05, Ø20
K_{tc} [MPa]	674,535
K_{rc} [MPa]	15,738
K_{ac} [MPa]	78,799
K_{te} [N/mm]	11,942
K_{re} [N/mm]	6,653
K_{ae} [N/mm]	1,650

На дијаграмима су представљени посебно дијаграми промене сила за супротносмерно и за истосмерно глодање, затим укупна сила и брзина резања.

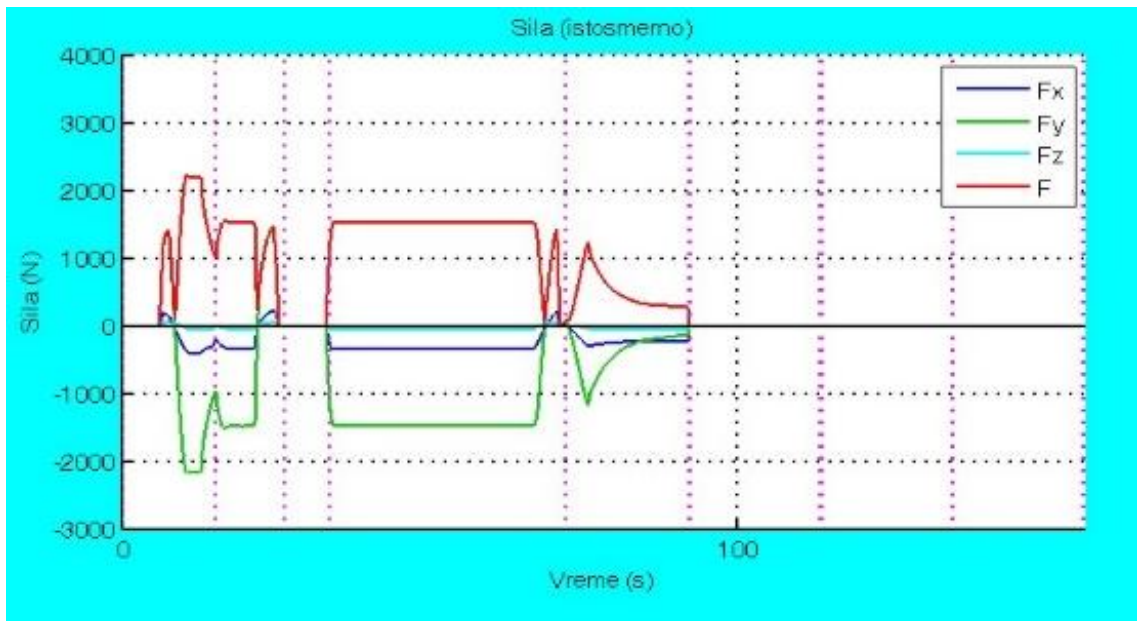
На слици 5.83 приказане се промене силе у три координатна правца и промене укупне силе који одговарају супротносмерном глодању. Силе супротносмерног глодања се одређују тако што се за део путање где је окретање главног вретена у смеру казаљке на сату (M03 у табели 5.19) у изразима 5.95 и 5.96 рачунају само почетни угао и угао захвата са десне стране у односу на правац кретања ($\Phi_{st} = \psi_{20}$ и $\Phi_{ex} = \psi_{20} + \psi_2$), а за део путање где је окретање главног вретена у смеру супротном смеру казаљке на сату (M04 у табели 5.19) рачунају се само почетни угао и угао захвата са леве стране у односу на правац кретања ($\Phi_{st} = \psi_{10}$ и $\Phi_{ex} = \psi_{10} + \psi_1$).



Слика 5.83. Сила при супротносмерном глодању пројектована на три координатна правца за пример са слике 5.29

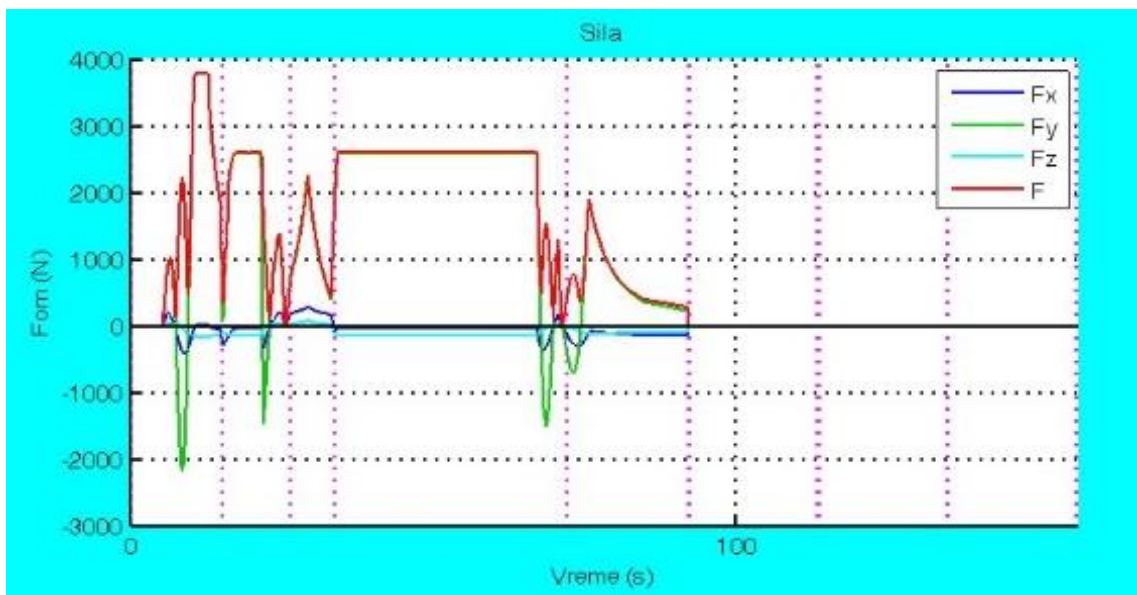
На слици 5.84 приказане се промене сила у три координатна правца и промене укупне силе који одговарају истосмерном глодању. Силе истосмерног глодања се одређују тако што се за део путање где је окретање главног вретена у смеру казаљке на сату (M03 у табели 5.19) у изразима 5.95 и 5.96 рачунају само почетни угао и угао захвата са леве стране у односу на правац кретања алата ($\Phi_{st} = \psi_{10}$ и $\Phi_{ex} = \psi_{10} + \psi_1$), а за део путање где је окретање главног

вретена у смеру супротном смеру казаљке на сату (M04 у табели 5.19) рачунају се само почетни угао и угао захвата са десне стране у односу на правац кретања ($\Phi_{st} = \psi_{20}$ и $\Phi_{ex} = \psi_{20} + \psi_2$).



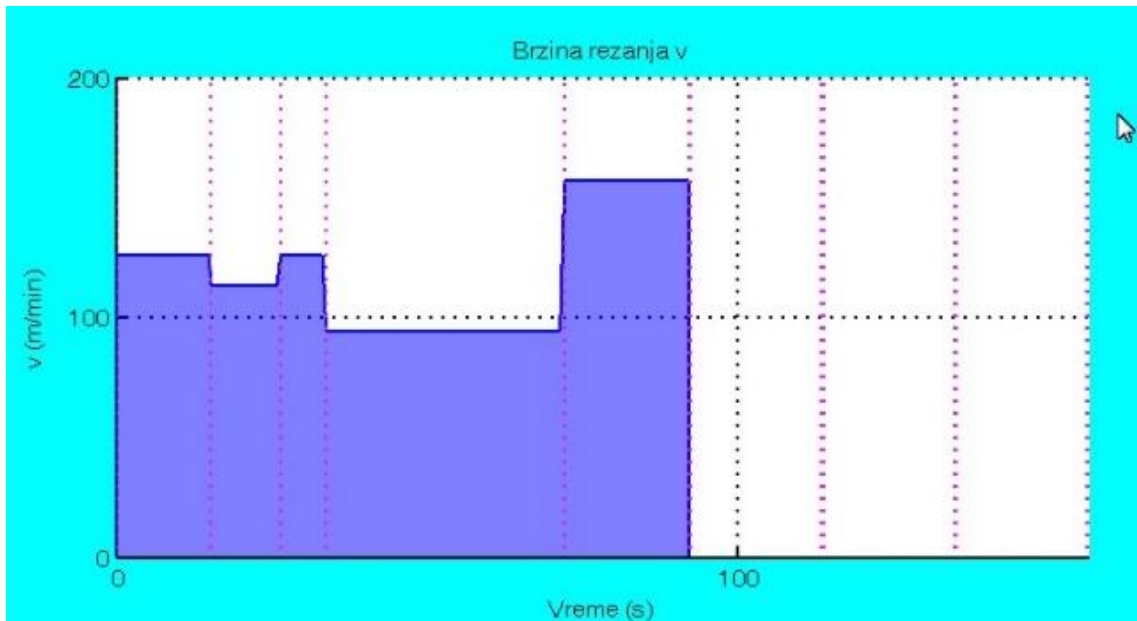
Слика 5.84. Сила при истосмерном глодању пројектована на три координатна правца за пример са слике 5.29

Укупне силе резања добијају се сабирањем сила истосмерног и супротносмерног глодања (слика 5.85) у једном истом захвату алата и обратка.



Слика 5.85. Укупна сила резања пројектована на три координатна правца за пример са слике 5.29

Брзина резања (слика 5.86) добија се као $v = \pi D n / 1000$, при чему се вредности пречника глодала (у mm) и броја обртаја читају из табеле 5.20.



Слика 5.86. Промена брзине резања за пример са слике 5.29

У раду је примењен још један модел сила глодања општеприхваћен у домаћој литератури. Према Калајџићу [8], при глодању, у општем случају, учествује више сечива глодала истовремено у процесу резања. Због тога се резултујућа сила резања добија слагањем сила по сечиву глодала. Силе по сечиву глодала су различите по правцу и интензитету, зависно од положаја сечива у захвату и тренутне дебљине струготине. С друге стране, због периодичног уласка сечива у материјал, сила глодања је неравномерна.

На слици 5.87 приказана је схема сила при обимном, истосмерном и супротносмерном глодању са ваљкастим цилиндричним вишесечним глодалима са правим сечивима. На овој слици [8] су дати и основни геометријски односи, који се тичу облика струготине, броја и положаја сечива у захвату.

С обзиром да се у овом случају ради о ортогоналном резању, то се резултујући отпор по i -том зубу глодала у захвату, разлаже на две компоненте, и то:

- $F_1(i)$, главни отпор резања i -тог зуба који је колинеаран са брзином резања, и
- $F_2(i)$, отпор продирања i -тог зуба који има радијалан правац у односу на глодало.

Проширени израз за главни отпор резања по зубу, може се дати као:

$$F_{1(i)} = C_F b a_i^{1-x_1} \quad (5.99)$$

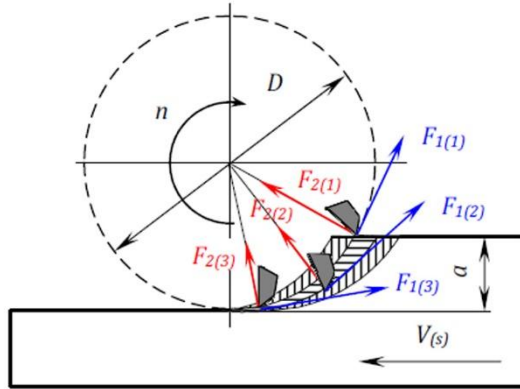
где су C_F - константа, b - ширина глодања, a_i - дебљина струготине i -тог сечива у захвату и x_1 - параметар обрадљивости. Дебљина струготине i -тог сечива добија се као:

$$a_i = s_z \cdot \sin \psi_i \quad (5.100)$$

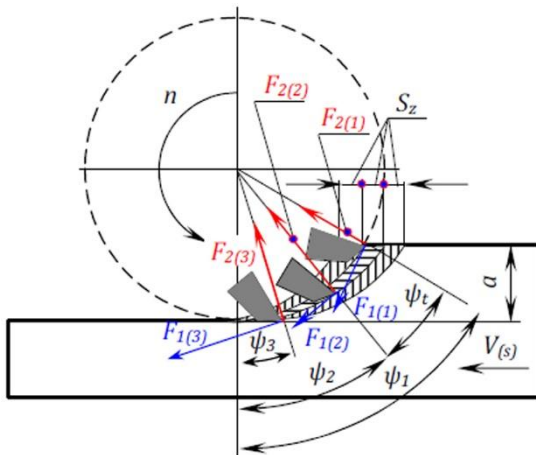
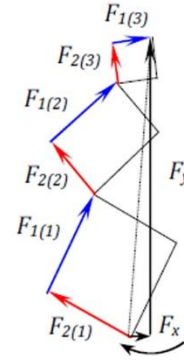
Отпор продирања се при обимном глодању може добити из односа:

$$\varepsilon = \frac{F_{2(i)}}{F_{1(i)}}, \quad (5.101)$$

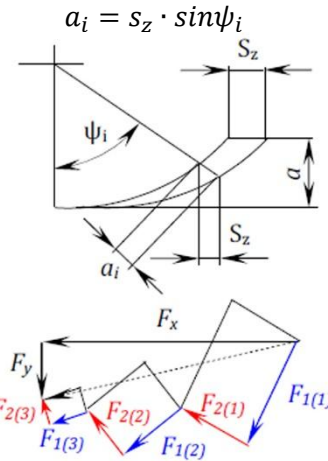
где је приближно $\varepsilon = (0,3 - 0,35)$ [8].



истосмерно глодање



супротносмерно глодање



1. D – пречник глодала
2. z – број зуба глодала
3. $\psi_t = \frac{360^\circ}{z}$ – угаони корак зуба
4. $\psi = \arcsin \left[2 \sqrt{\frac{a}{D} - \frac{a^2}{D^2}} \right]$ – угао захвата
5. $i_z = \frac{\psi}{\psi_t}$ – број зуба у захвату
6. $\psi_1 = \psi$; $\psi_2 = \psi - \psi_t$; $\psi_i = \psi - (i - 1)\psi_t$
7. $\varepsilon = \frac{F_{2(i)}}{F_{1(i)}}$

Слика 5.87. Силе резања при обимном глодању [8]

Укупна резултујућа сила глодања може се разложити у две компоненте, хоризонталну F_x и вертикалну F_y . Користећи план сила (слика 5.87), који обухвата три сечива у захвату, добија се израз за хоризонталну компоненту отпора резања, за општи случај:

$$F_x = F_{1(1)} \cdot \cos \psi_1 + F_{1(2)} \cdot \cos \psi_2 + \dots \\ \dots + F_{1(i_z)} \cdot \cos \psi_{i_z} \pm (F_{2(1)} \cdot \sin \psi_1 + F_{2(2)} \cdot \sin \psi_2 + \dots + F_{2(i_z)} \cdot \sin \psi_{i_z}). \quad (5.102)$$

Односно:

$$F_x = \sum_{i=1}^{i_z} F_{1(i)} \cdot \cos \psi_i \pm \sum_{i=1}^{i_z} F_{2(i)} \cdot \sin \psi_i, \quad (5.103)$$

где се знак „+“ односи на супротносмерно, а знак „-“ на истосмерно глодање.

На потпуно исти начин, добија се за вертикалну компоненту отпора резања:

$$F_y = F_{1(1)} \cdot \sin \psi_1 + F_{1(2)} \cdot \sin \psi_2 + \dots \\ \dots + F_{1(i_z)} \cdot \sin \psi_{i_z} \pm (F_{2(1)} \cdot \cos \psi_1 + F_{2(2)} \cdot \cos \psi_2 + \dots + F_{2(i_z)} \cdot \cos \psi_{i_z}). \quad (5.104)$$

Односно:

$$F_y = \sum_{i=1}^{i_z} F_{1(i)} \cdot \sin \psi_i \pm \sum_{i=1}^{i_z} F_{2(i)} \cdot \cos \psi_i, \quad (5.105)$$

где се овде знак „-“ односи на супротносмерно, а знак „+“ на истосмерно глодање.

Ако се у изразе 5.104 и 5.105 уврсте смене из израза 5.99, 5.100 и 5.101 добија се после сређивања:

$$F_x = C_F b s_z^{1-x_1} (q_1 \pm \varepsilon q_2), \\ F_y = C_F b s_z^{1-x_1} (q_2 \mp \varepsilon q_1), \quad (5.106)$$

где су q_1 и q_2 функције које описују положај сечива у захвату:

$$q_1 = \sum_{i=1}^{i_z} \sin^{1-x_1} \psi_i \cos \psi_i, \\ q_2 = \sum_{i=1}^{i_z} \sin^{2-x_1} \psi_i. \quad (5.107)$$

Резултујући отпор резања који оптерећује вратило глодала, добија се из:

$$F = \sqrt{F_x^2 + F_y^2} = C_F b s_z^{1-x_1} \sqrt{(q_1^2 + q_2^2)(1 + \varepsilon^2)}. \quad (5.108)$$

За обимно глодање се за средњу обимну силу даје и посебна функција обрадљивости, као:

$$F_{om} = \frac{C_p a^{x_o} s_z^{y_o} b^{q_o} z}{D^{i_o}} k_F, \quad (5.109)$$

где су: C_p - константа, a - дубина резања, z - број сечива глодала, x_o , y_o , q_o , i_o - параметри обрадљивости и k_F - поправни коефицијент који је производ поправног коефицијента брзине резања и поправног коефицијента грудног угла.

Други главни фактор обраде глодања је технолошка брзина резања, која се даје преко:

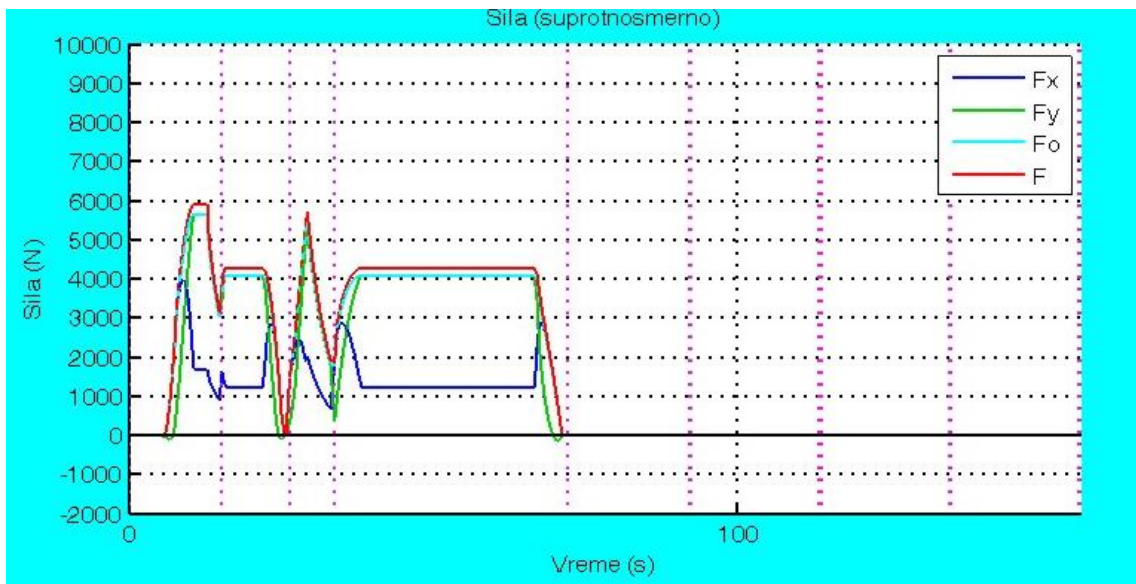
$$V = \frac{C_o}{s_z^{v_o}} k_v, \quad (5.110)$$

$$C_o = \frac{C_v D^i}{T^m a^x b^q z^u}.$$

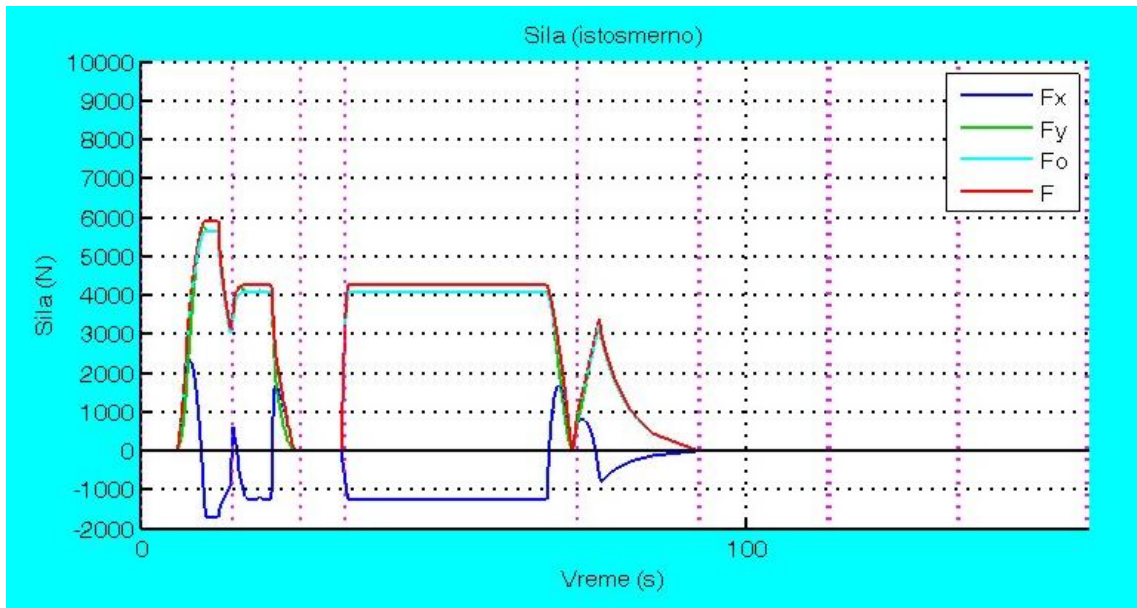
где су s_z - корак по сечиву, C_v - константа, D - пречник глодала, T - период постојаности, a - дубина резања, b - ширина глодања, z - број сечива глодала, x, y, m, q, u, i - параметри обрадљивости и k_v - поправни коефицијент брзине резања који узима у обзир материјал алата и материјал обратка.

На сликама 5.88-5.91 су приказани резултати добијени применом овог модела сила, при чему су сви коефицијенти изабрани из [93] за материјал обратка угљенични челик затезне јачине приближно 750 N/mm^2 и ваљкасто глодало од брзорезног челика, пречника 20 mm са 6 сечива. У литератури [93] нису били доступни подаци за исту комбинацију алата и материјала обратка као за први модел силе примењен у овом раду, па је изабран произвољан пример ради илустрације. Ширина резања b се чита из табеле 5.22. Број зуба глодала z се чита из табеле 5.17. Корак по сечиву се добија читањем са дијаграма промене корака (слика 5.78) и дељењем са бројем сечива глодала. Углови захвата ψ_1 и ψ_2 се читају из табеле 5.22.

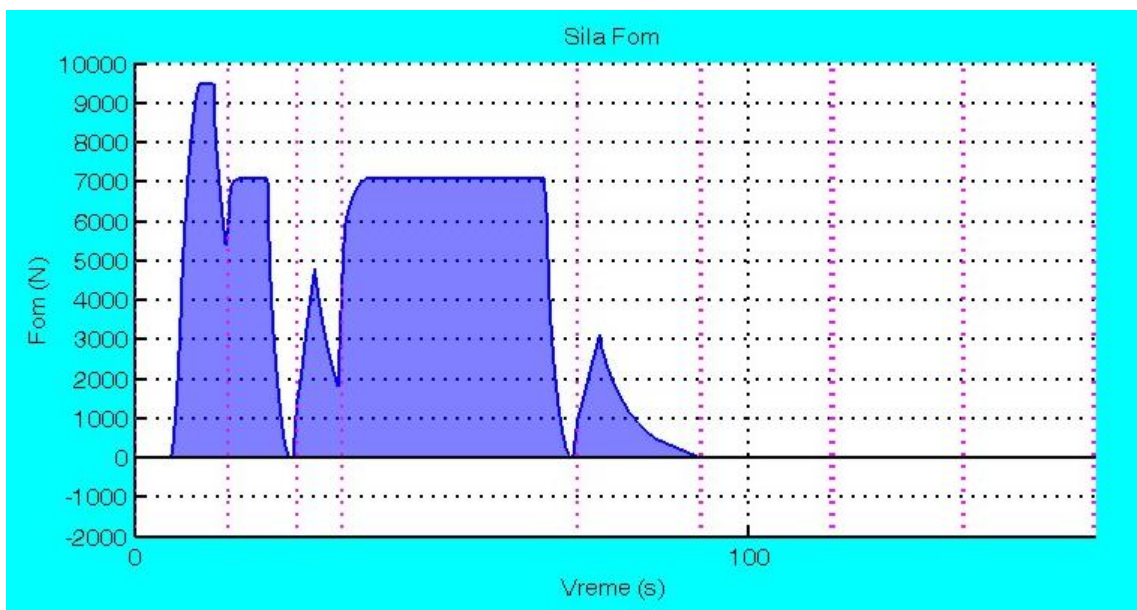
На слици 5.88 дат је дијаграм сила резања при супротносмерном глодању а на слици 5.89 при истосмерном глодању. На слици 5.90 дат је дијаграм средње обимне силе одређене према изразу 5.109 и на слици 5.91 приказана је технолошка брзина резања одређена према изразу 5.110.



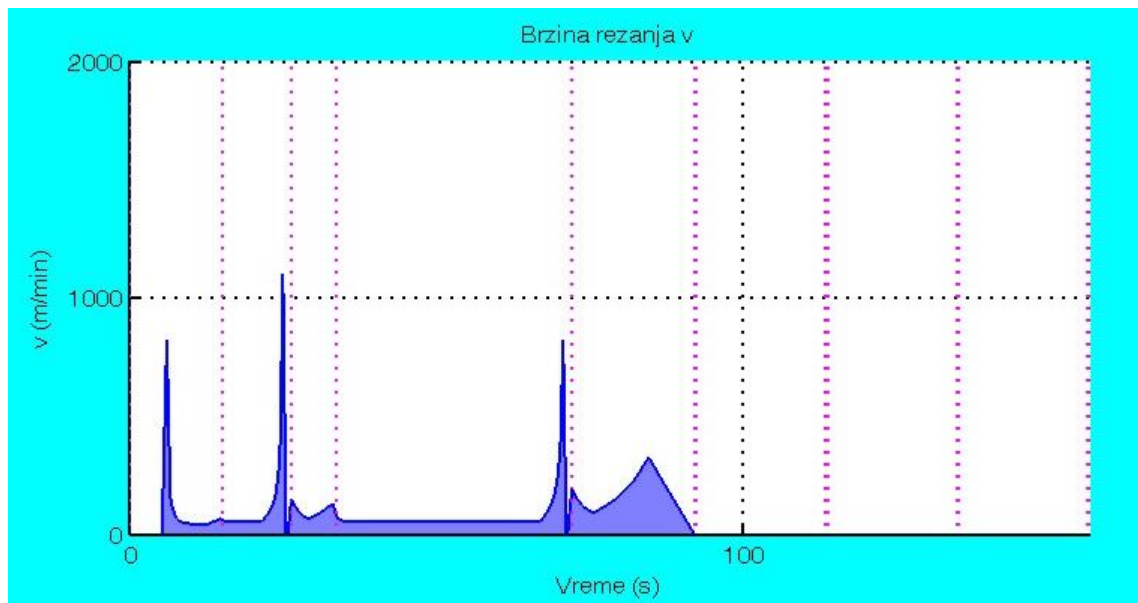
Слика 5.88. Дијаграми сила резања при супротносмерном глодању према [8] за пример са слике 5.29



Слика 5.89. Дијаграми сила резања при истосмерном глодању према [8] за пример са слике 5.29



Слика 5.90. Дијаграм средње обимне силе резања према [8] за пример са слике 5.29



Слика 5.91. Дијаграм технолошке брзине према [8] за пример са слике 5.29

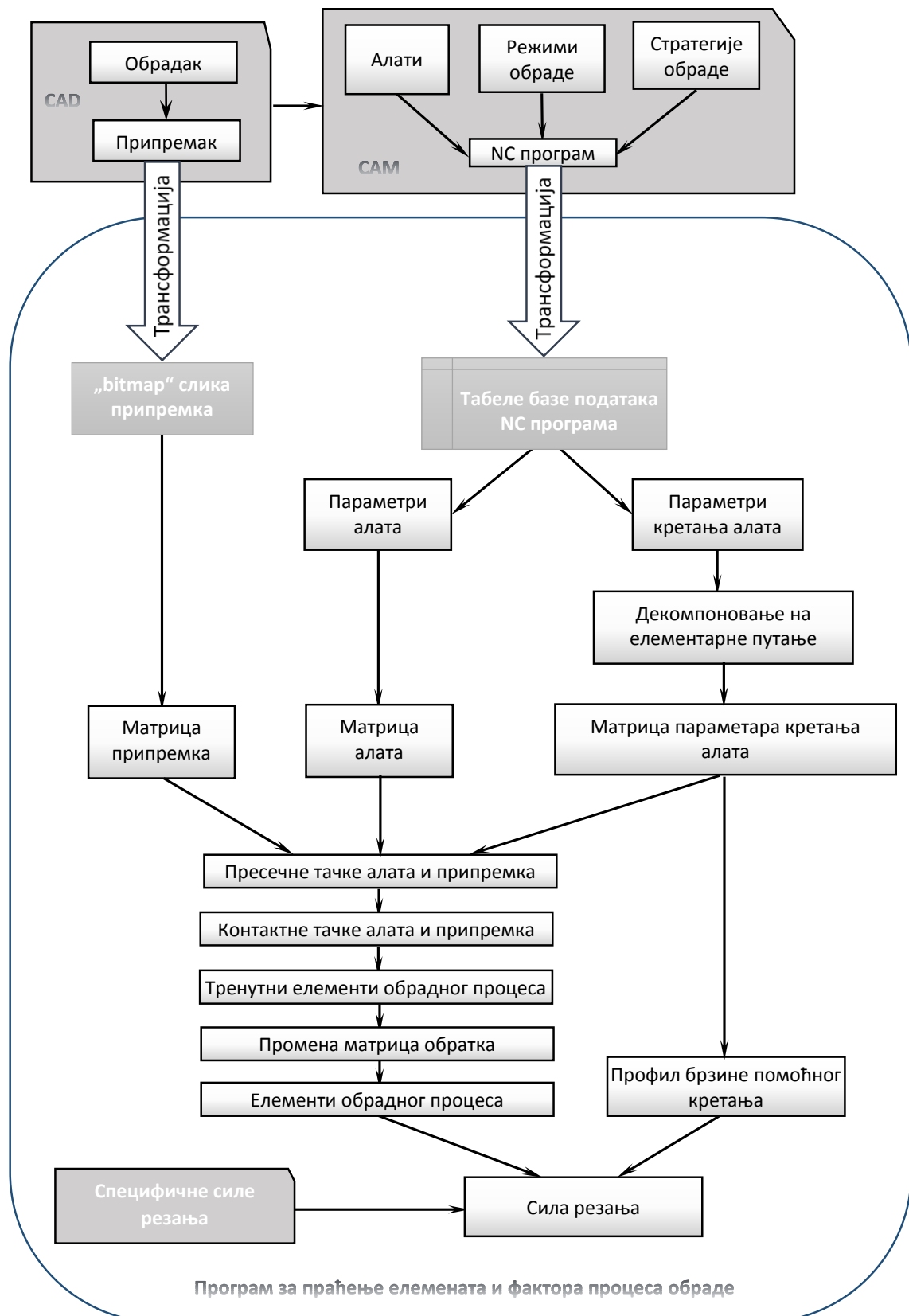
Дијаграми укупне силе резања за истосмерно и супротносмерно глодање добијени према [8] по облику одговарају дијаграмима добијеним претходним моделом према [7], разликују се само по интензитету сила што је последица примењених различитих комбинација алата и материјала обратка.

5.3. Закључне напомене

У оквиру дисертације, развијен је оригинални програмски систем за праћење елемената и фактора обраде дуж путање алата (слика 5.92). Детаљно је објашњена логичка структура развијеног програмског система, на процедуралан начин. Из NC програма генерисаног било којим којим комерцијалним софтвером, сви подаци се најпре трансформишу и уписују у одговарајућу базу података. Даље се израчунавају се све параметри кретања алата који су потребни за генерисање путање и начина кретања алата током процеса обраде. Геометрија припремка се задаје у облику *bitmap* слике на основу које се припремак матрично описује. Према подацима из NC програма матрично се описују алати. На бази трансформисаних података о кретању алата из NC програма и матричног описа припремка и алата, генерише се кретање алата у односу на припремак. Као резултат добија се међусобни положај алата и припремка дуж путање. Затим се прерачунава матрица обратка у сваком положају алата на путањи и израчунавају се елементи процеса резања. На овај начин могуће је пратити промене дубине и ширине резања и угла захвата током процеса резања у свакој тачки путање алата.

На основу података о правцу и промени правца кретања алата и на основу програмираних вредности корака, одређен је профил корака и брзине помоћног кретања дуж путање алата. При томе је примењен је модел трапезоидног профила брзине помоћног кретања.

Два различита модела сила резања су примењена у овом раду: први општеприхваћен у анализираној светској [7] и други у домаћој литератури [8]. У оба ова модела, силе резања се одређују у функцији угла захвата, ширине резања и корака одређених претходним корацима програма.

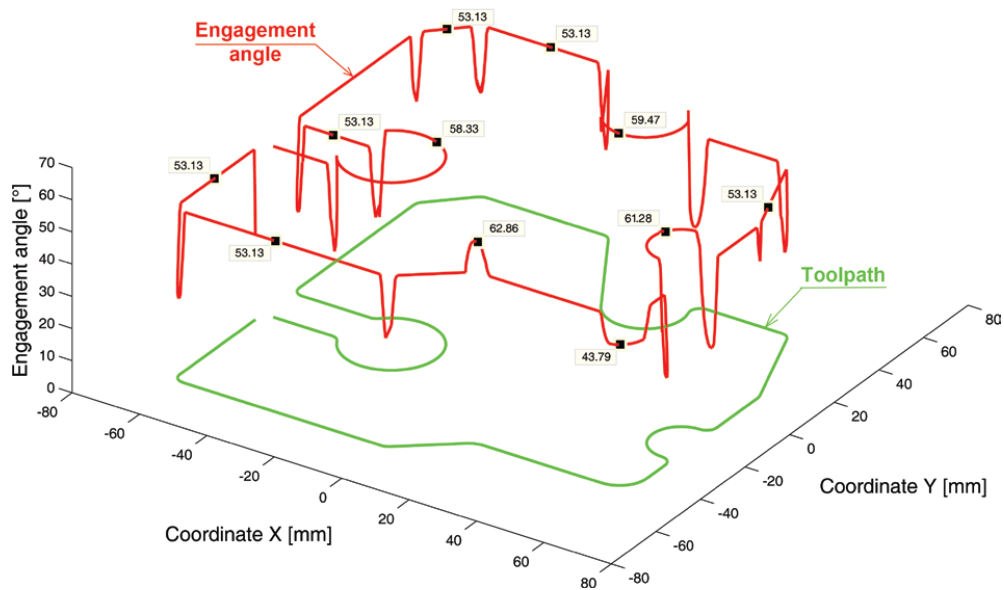


Слика 5.92. Блок дијаграм програмског система за праћење елемената и фактора обраде дуж путање алата

Промена сила резања дуж путање алата, укупна дужина путање и време обраде добијени применом овог програмског система, коришћени су даље у раду за анализу и оцену адекватности путање обраде.

**ВЕРИФИКАЦИЈА ПРОГРАМСКОГ
СИСТЕМА ЗА ПРАЋЕЊЕ ЕЛЕМЕНАТА И
ФАКТОРА ОБРАДЕ ДУЖ ПУТАЊЕ АЛАТА**

Нешић је у свом докторату [66] користио две методе: методу зановану на пикселима и тачну методу. На слици 6.2 приказани су резултати угла захвата добијени применом тачне методе [66].



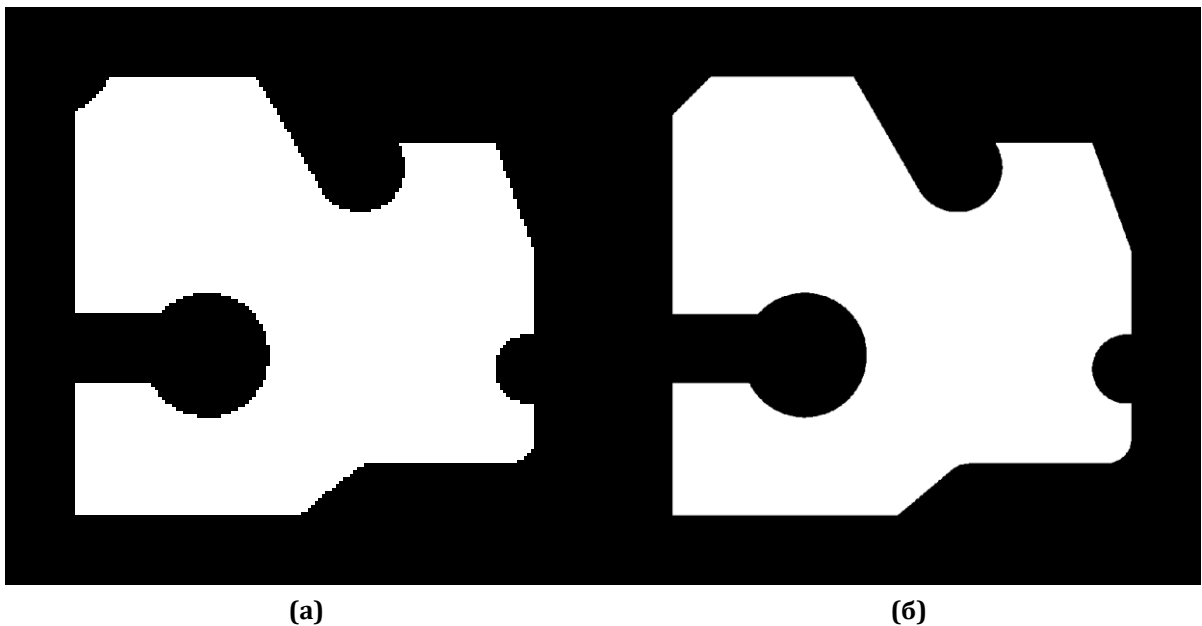
Слика 6.2. Пример 1: углови захвата добијени при обради спољашње контуре према [66]

Пример 1 је урађен у две варијанте:

- подела мреже припремка је $w_{pm} = 0.5 \text{ mm}$,
- подела мреже припремка је $w_{pm} = 0.1 \text{ mm}$,

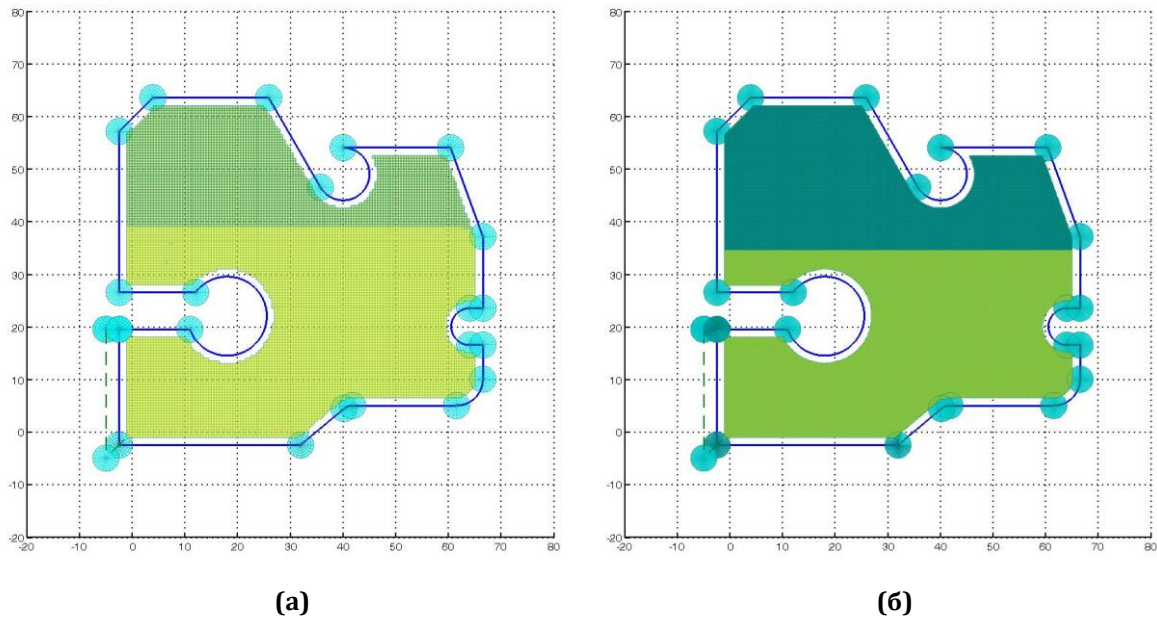
како би се показао утицај повећања резолуције мреже припремка на тачност резултата.

Улазни елемент за реализацију програма је растеризована слика припремка у XU равни (слика 6.3), заједно са NC програмом за обраду дела и геометријским подацима о алату.



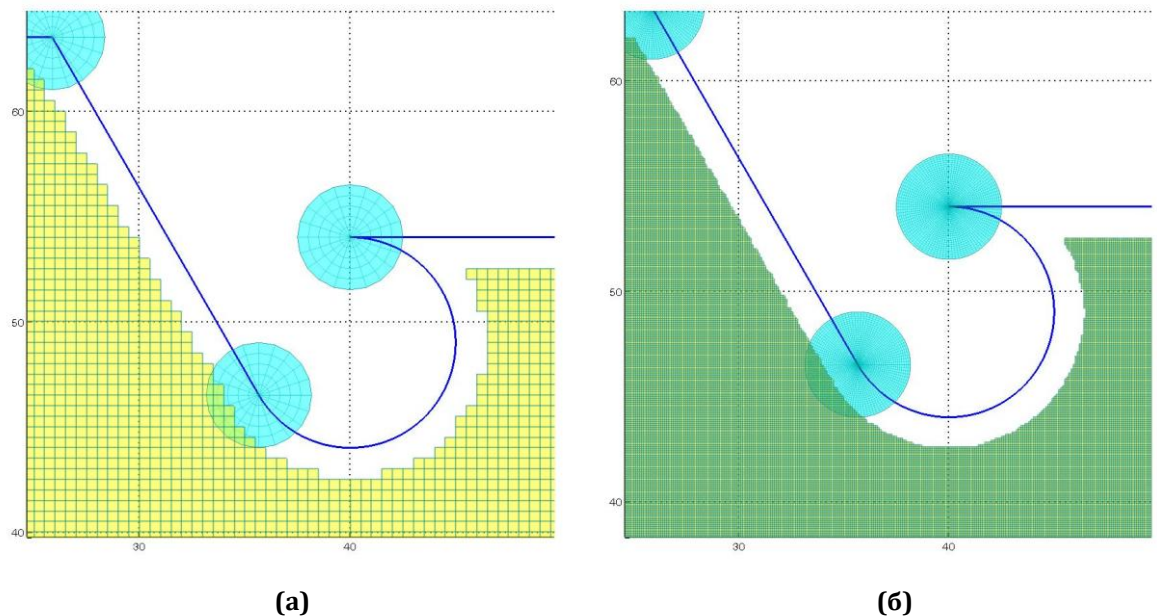
Слика 6.3. Припремак за пример 1: (а) 1пиксел=0,5 mm, (б) 1пиксел=0,1 mm

После реализације програма за учитавање положаја алата у тачкама промене правца кретања добија се слика 6.4 која може да послужи и за визуелну проверу тачности NC програма.



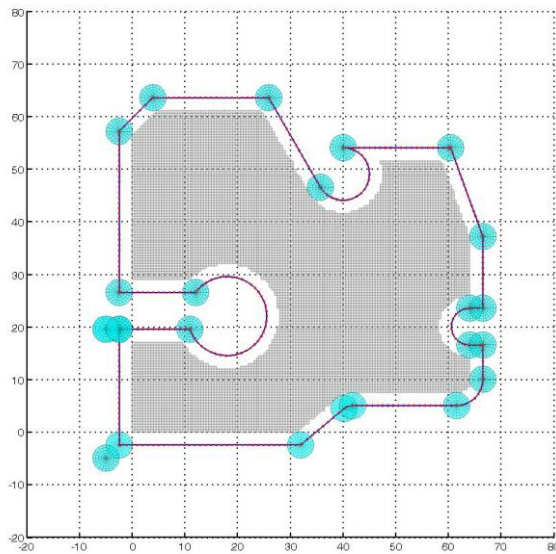
Слика 6.4. Положај алата и обртка у тачкама промене правца кретања за пример 1 (а) 1пиксел=0,5 mm, (б) 1пиксел=0,1 mm

На увеличаном детаљу (слика 6.5) види се да су димензије припремка паралелне осама потпуно тачне, док се на делу припремка са нагибом и радијусом виде извесна одступања која се смањују повећањем резолуције припремка.

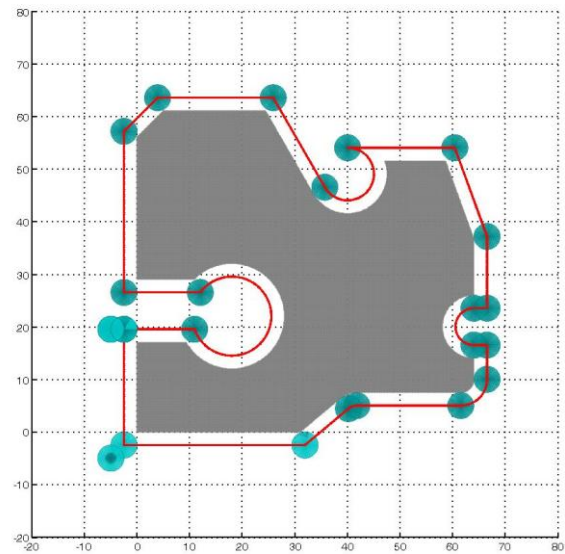


Слика 6.5. Детаљ положаја алата и обртка у тачкама промене правца кретања за пример 1: (а) 1пиксел=0,5 mm, (б) 1пиксел=0,1 mm

При одређивању изгледа обрађеног дела (слика 6.6) такође се види утицај резолуције припремка, поготову на увеличаном приказу детаља (слика 6.7).

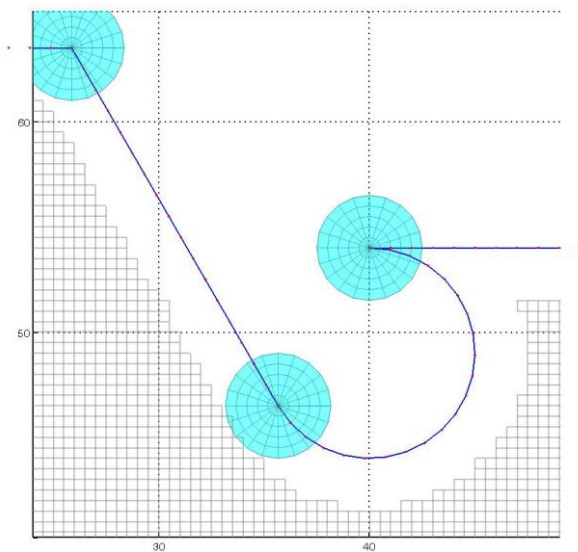


(a)

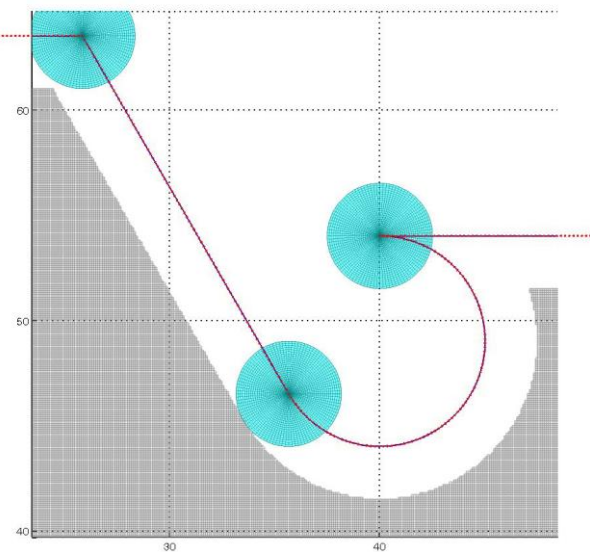


(б)

Слика 6.6. Положај алата и обрађеног дела у тачкама промене правца кретања за пример 1 (а) 1 пиксел=0,5 мм, (б) 1 пиксел=0,1 мм



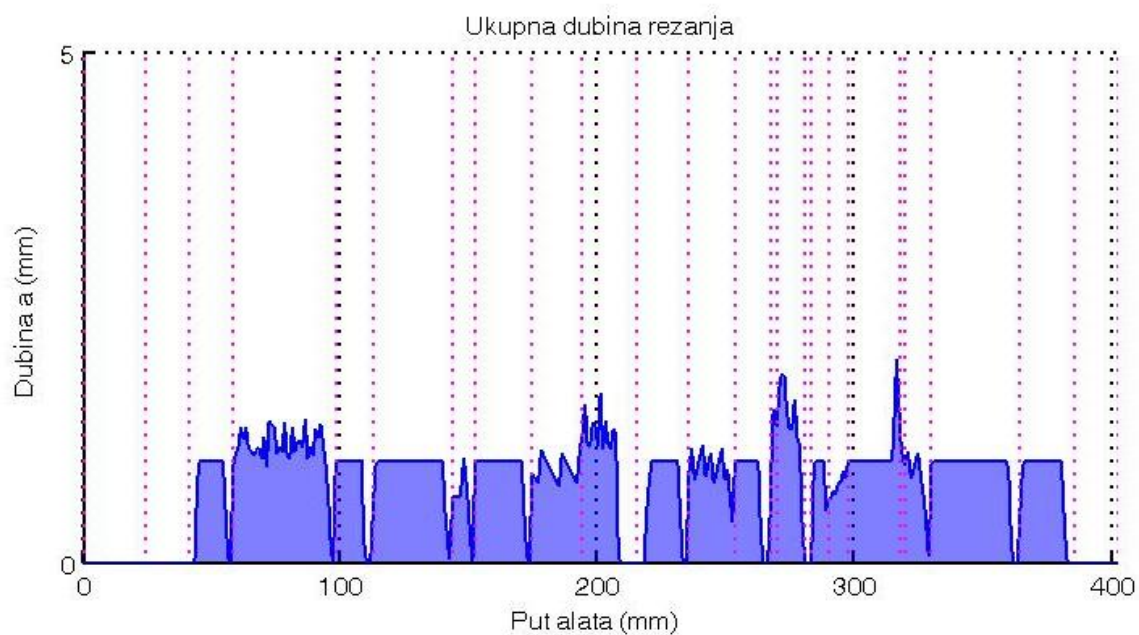
(a)



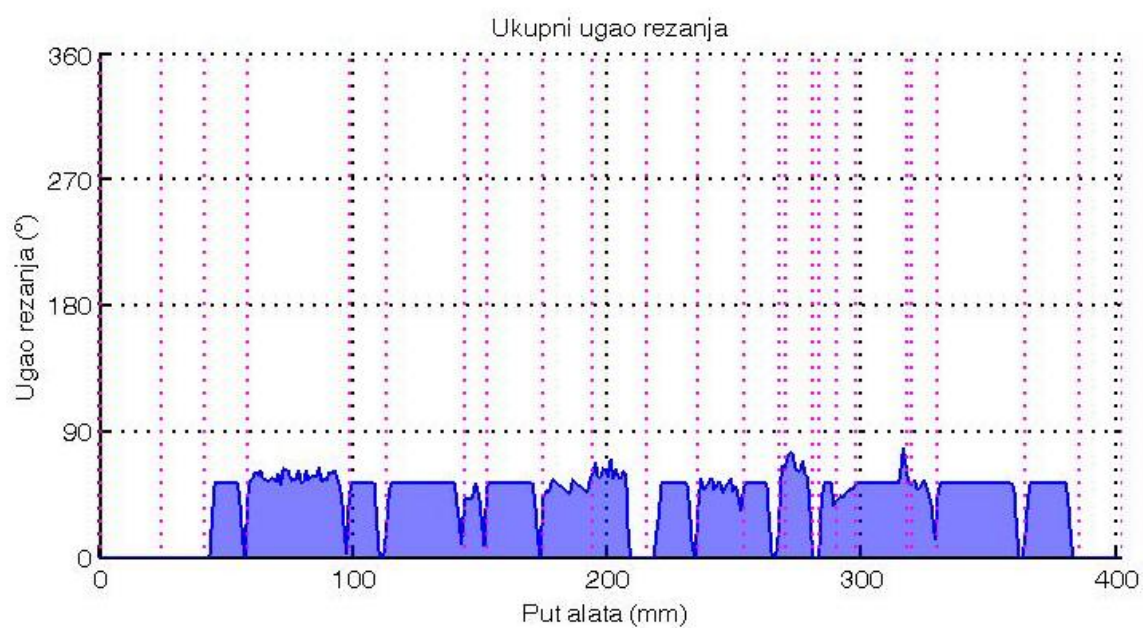
(б)

Слика 6.7. Детаљ положаја алата и обрађеног дела у тачкама промене правца кретања за пример 1: (а) 1 пиксел=0,5 мм, (б) 1 пиксел=0,1 мм

Дијаграми промене елемената зоне захвата за пример 1, варијанта (а) приказани су на сликама 6.8 и 6.9. На дијаграмима промене дубине резања и угла захвата може се приметити да су на деловима путање који одговарају линеарној интерполацији у правцу оса, добијене равне линије које одговарају тачним вредностима: дубина резања је 1 мм, угао захвата 53.13° . Тачне вредности ће бити добијене у сваком случају када је димензија припрема дељива са w_{pm} (у овом примеру све димензије припрема паралелне осама су дељиве са 0,5).



Слика 6.8. Укупна дубина резања за пример 1 (1пиксел=0,5 mm)



Слика 6.9. Угао захвата за пример 1 (1пиксел=0,5 mm)

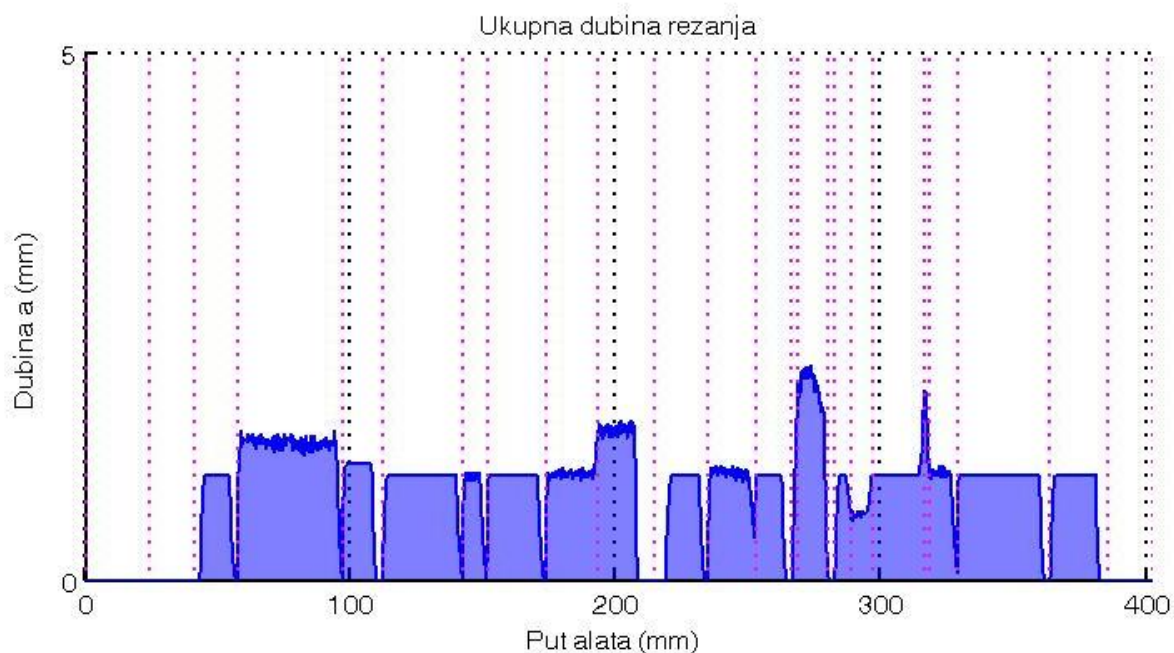
На деловима дијаграма који одговарају кретању глодала дуж обе осе (косе линије) и циркуларној интерполацији (делови кружнице) примећују се извесна одступања. Средње вредности добијене дубине резања и угла захвата (табела 6.1) приближно одговарају аналитички одређеним (тачним) вредностима (релативна грешка до 5%), осим на кратким сегментима путање (редови NC програма 290 и 320).

Табела 6.1- Вредности и одступања угла захвата за пример 1 варијанта (а)

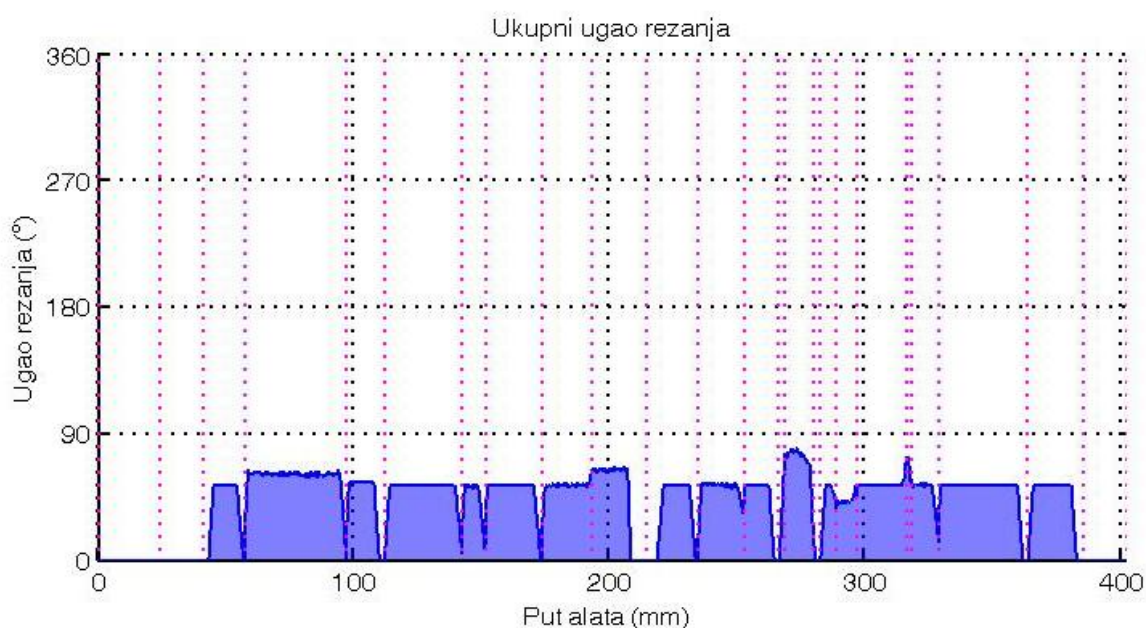
ред програма	интерполација	према [66]	средња вредност	тачна вредност	релативно одступање средње вредности	највеће релативно одступање на сегменту
140	| (хоризонтално)	53.13°	53.13°	53.13°	0%	0%
150	(	58.33°	58.37°	60.44°	2.6%	6,2%
160	| (хоризонтално)	53.13°	53.13°	53.13°	0%	0%
170	| (вертикално)	53.13°	53.13°	53.13°	0%	0%
190	| (хоризонтално)	53.13°	53.13°	53.13°	0%	0%
200	| (косо)	53.13°	51.58°	53.13°	2.91%	5.54%
210	(	59.47°	60.86°	63.90°	4.75%	9.83%
220	| (хоризонтално)	53.13°	53.13°	53.13°	0%	0%
230	| (косо)	53.13°	51.85°	53.13°	2.41%	7.98%
240	| (вертикално)	53.13°	53.13°	53.13°	0%	0%
260	(	61.28°	64.83°	67.25°	3.6%	11.27%
280	| (вертикално)	53.13°	53.13°	53.13°	0%	0%
290	)	43.79°	45.01°	40.54°	11.04%	24.07%
300	| (хоризонтално)	53.13°	53.13°	53.13°	0%	0%
320	| (косо)	53.13°	51.42°	53.13°	22.6%	29.6%
330	| (хоризонтално)	53.13°	53.13°	53.13°	0%	0%
340	| (вертикално)	53.13°	53.13°	53.13°	0%	0%

Из табеле 6.1 се види да су применом тачне методе у [66] добијене тачне вредности за све сегменте линеарне интерполације, док за сегменте кружне интерполације, добијене вредности одступају од тачне вредности слично као средње вредности добијене применом програмског система за праћење угла захвата развијеног у оквиру дисертације.

И у варијанти (б) (слике 6.10 и 6.11) на деловима путање који одговарају линеарној интерполацији у правцу оса добијене су равне линије које одговарају тачним вредностима.

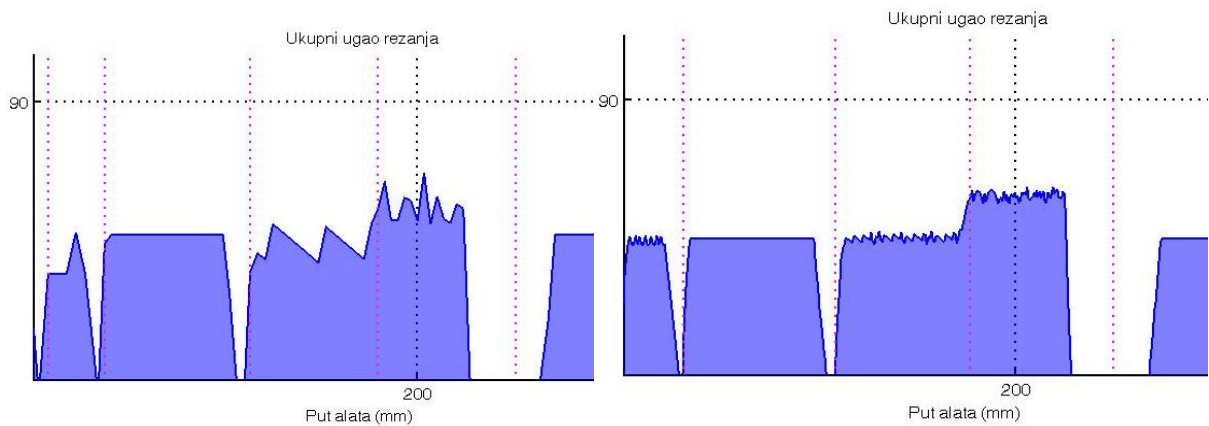


Слика 6.10. Укупна дубина резања за пример 1 (1пиксел=0,1 мм)



Слика 6.11. Угао захвата за пример 1 (1пиксел=0,1 мм)

У овом случају се може приметити да су одступања на деловима дијаграма који одговарају кретању глодала дуж обе осе (косе линије) и циркуларној интерполацији (делови кружнице) знатно мања него у претходној варијанти и средње вредности су много ближе тачним вредностима. Највећа одступања су на кружним сегментима путање (редови NC програма 150, 210, 260, 290 и 310) и на кратким сегментима линеарне интерполације при кретању алата у правцу обе осе (ред 320 NC програма). Повећање тачности може се показати на увеличаном деловима дијаграма угла захвата за обе варијанте (слика 6.12) који одговарају детаљу приказаном на сликама 6.5 и 6.7.



(a)

(б)

Слика 6.12. Део дијаграма угла захвата за детаљ путање приказан на слици 6.7:
(а) 1 пиксел=0,5 мм, (б) 1 пиксел=0,1 мм

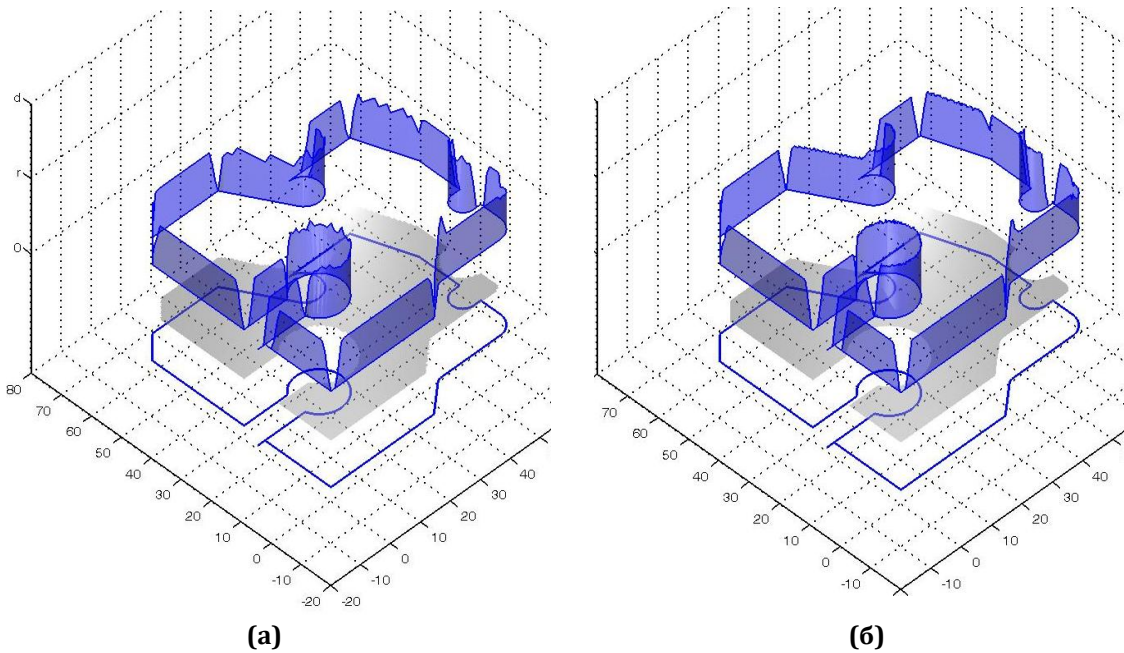
Табела 6.2- Вредности и одступања угла захвата за пример 1 варијанта (б)

ред програма	интерполација	према [66]	средња вредност	тачна вредност	релативно одступање средње вредности	највеће релативно одступање на сегменту
140	| (хоризонтално)	53.13°	53.13°	53.13°	0%	0%
150	(	58.33°	61.44°	60.44°	1.66%	5.46%
160	| (хоризонтално)	53.13°	53.13°	53.13°	0%	0%
170	| (вертикално)	53.13°	53.13°	53.13°	0%	0%
180	| (косо)	53.13°	52.44°	53.13°	1.3%	3.08%
190	| (хоризонтално)	53.13°	53.13°	53.13°	0%	0%
200	| (косо)	53.13°	53.28°	53.13°	0.28%	3.91%
210	(	59.47°	64.38°	63.90°	0.74%	4.56%
220	| (хоризонтално)	53.13°	53.13°	53.13°	0%	0%
230	| (косо)	53.13°	53.73°	53.13°	1.12%	4,71%
240	| (вертикално)|	53.13°	53.13°	53.13°	0%	0%
260	(	61.28°	68.56°	67.25°	1.95%	5.92%
270	| (хоризонтално)	53.13°	53.13°	53.13°	0%	0%
280	| (вертикално)	53.13°	53.13°	53.13°	0%	0%
290	)	43.79°	41.66°	40.54°	2.42%	5.68%
300	| (хоризонтално)	53.13°	53.13°	53.13°	0%	0%
310	(	62.86°	72.09°	73.74°	2.23%	5.04%
320	| (косо)	53.13°	53.47°	53.13°	0.6%	4.36%
330	| (хоризонтално)	53.13°	53.13°	53.13°	0%	0%
340	| (вертикално)	53.13°	53.13°	53.13°	0%	0%

Из табеле 6.2 се види да су применом тачне методе у Нешићевом докторату [66], за сегменте кружне интерполације, добијене вредности које више одступају од тачних вредности него средње вредности добијене применом програмског система за праћење угла захвата са већом резолуцијом мреже припремка.

Ради илустрације повећања тачности методе за одређивање дубине резања, са повећањем резолуције мреже припремка, дат је и тродимензионални приказ промене дубине резања

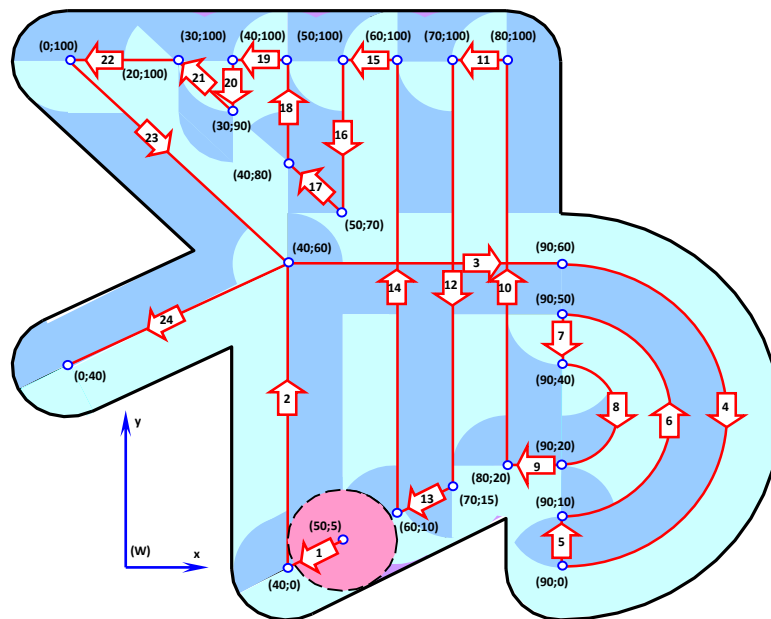
дуж путање алата добијен применом програмског система за праћење елемената и фактора обраде, развијеног у оквиру дисертације (слика 6.13).



Слика 6.13. 3D дијаграм промене дубине резања дуж путање за пример 1:
(а) 1пиксел=0,5mm; (б) 1пиксел=0,1 mm

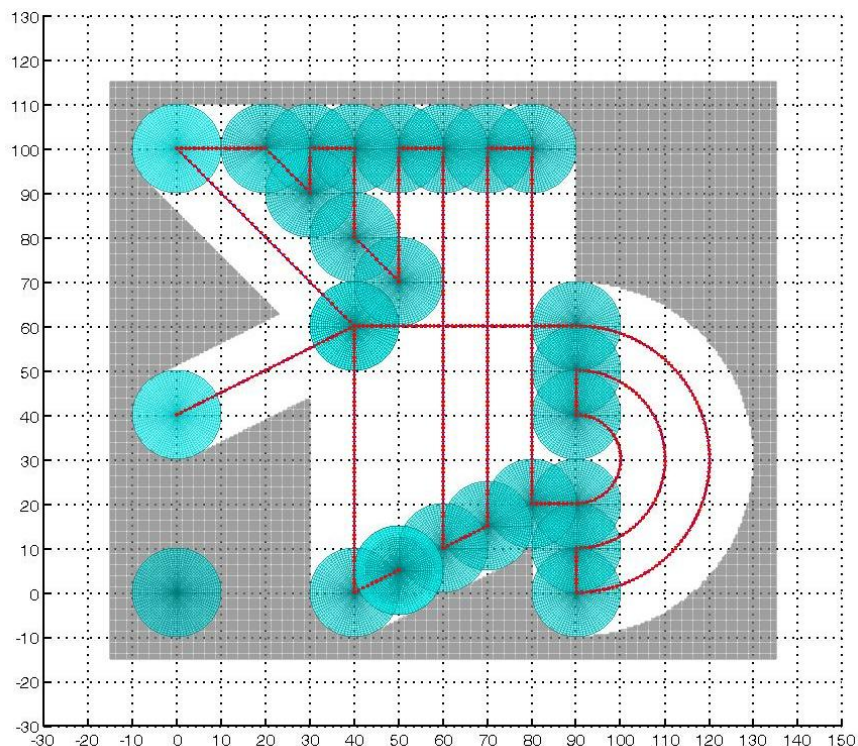
6.1.2. Пример 2

Други пример је обрада унутрашње контуре глодалом пречника 20mm, променљиве номиналне дубине резања, при произвољно формираној путањи алата (слика 6.14) према Нешићевом докторату [66].



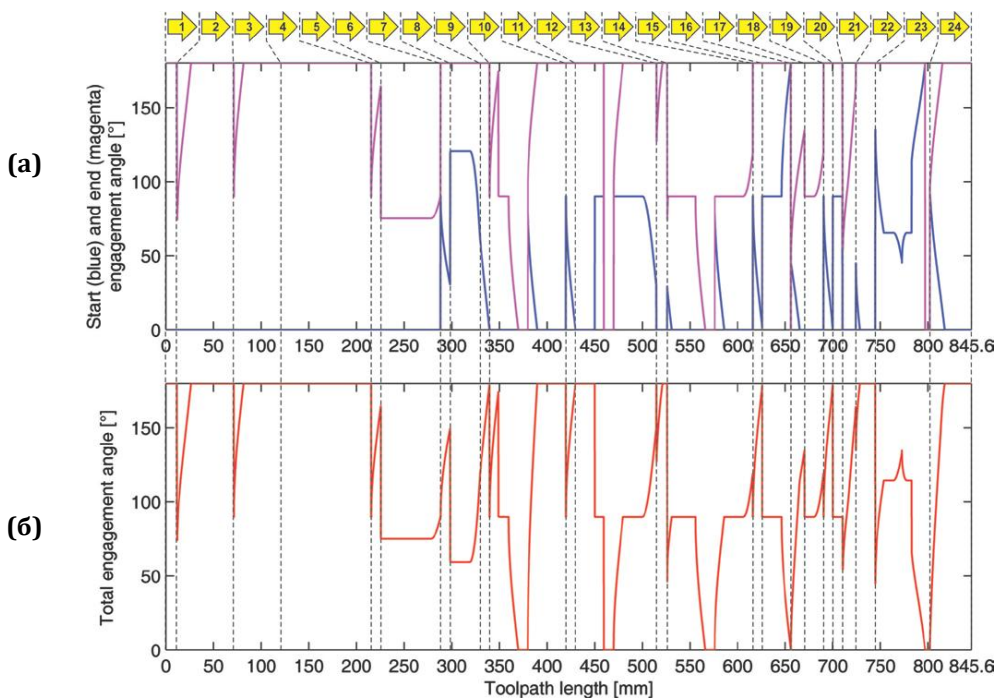
Слика 6.14. Пример 2: путања алата за обраду унутрашње контуре [66]

Приказан је положај алата у тачкама промене правца кретања и обрдак (слика 6.15), као резултат примене програмског система развијеног у оквиру дисертације.

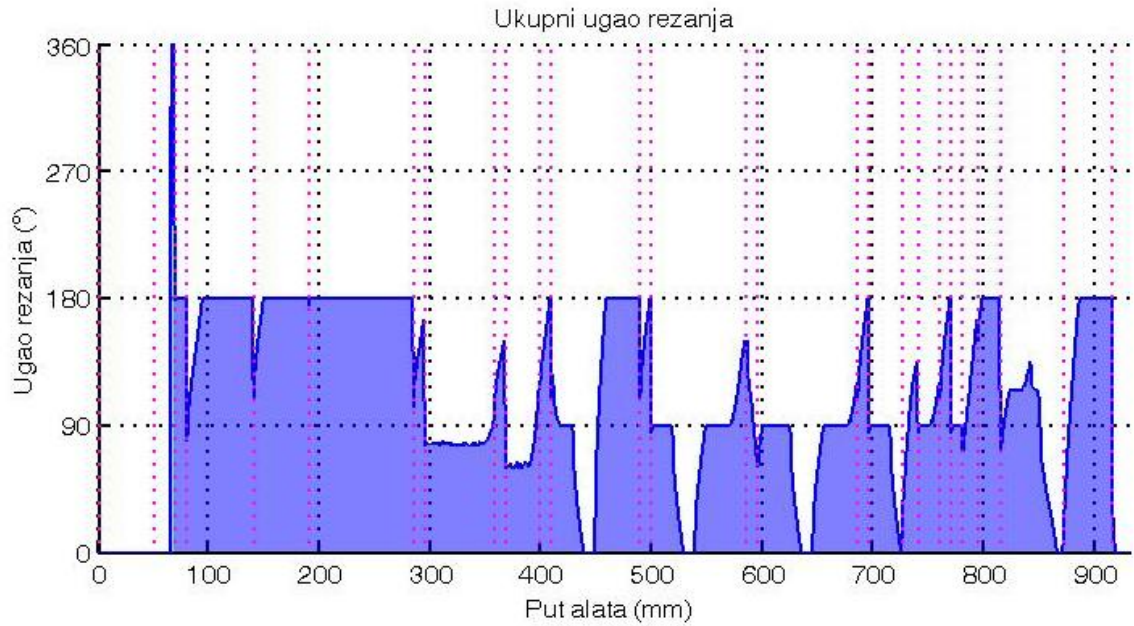


Слика 6.15. Пример 2: Обрадак и положаји глодала на почетку и крају сваког сегмента путање алата (1пиксел=0,5 mm)

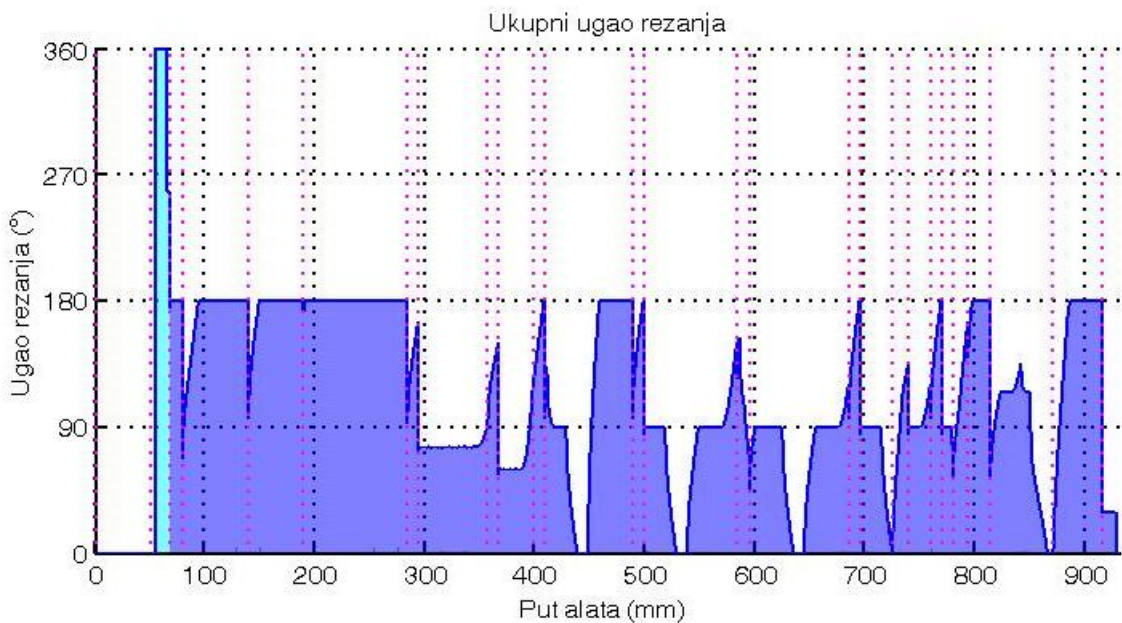
Даље су приказани дијаграми промене угла захвата добијени у Нешићевом докторату [66] (слика 6.16) и применом програма развијеног у овиру дисертације (Слике 6.17 и 6.18) за различите резолуције мреже припремка.



Слика 6.16. Пример 2: Резултати добијени у Нешићевом докторату [66]: (а) промена почетног и крајњег угла захвата, (б) промена укупног угла захвата дуж путање

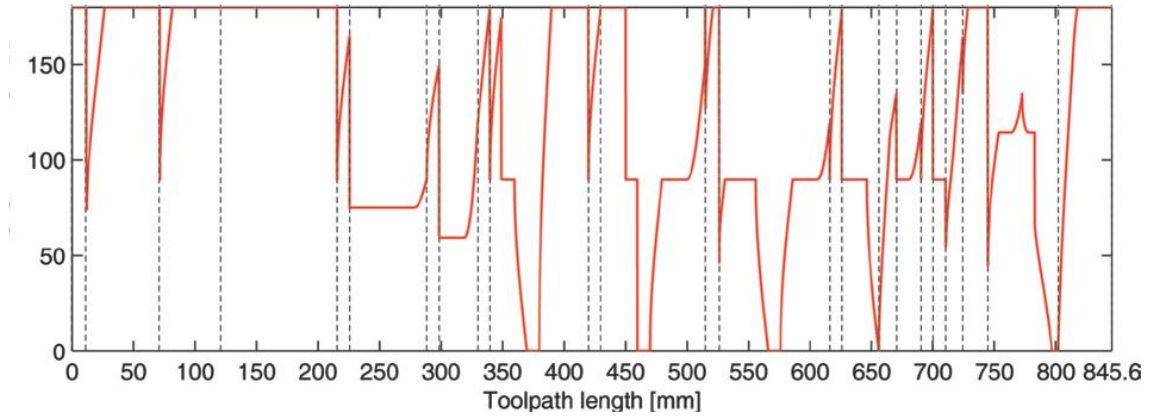


Слика 6.17. Пример 2: Резултати добијени у дисертацији за промену угла захвата (1пиксел=0,5 mm)

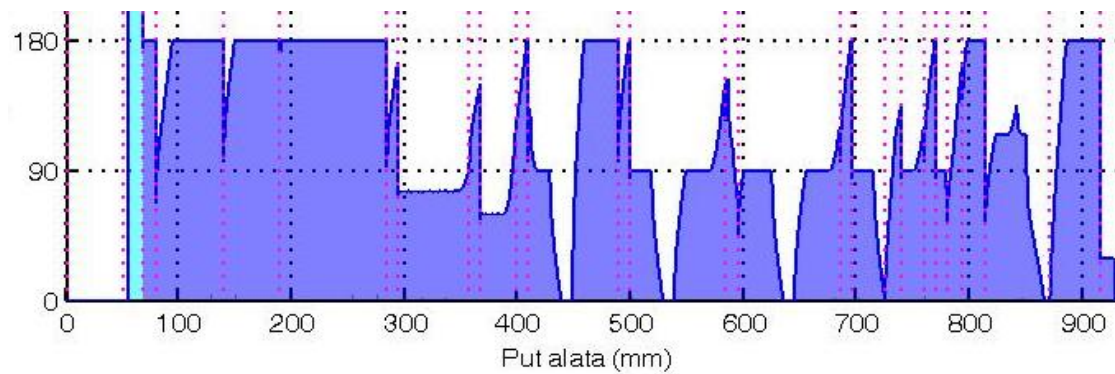


Слика 6.18. Пример 2: Резултати добијени у дисертацији за промену угла захвата (1пиксел=0,1 mm)

На упоредном приказу промена угла захвата добијених у Нешићевом раду (слика 6.19а) и у овом раду (слика 6.19б), може се уочити сличност резултата у великој мери.



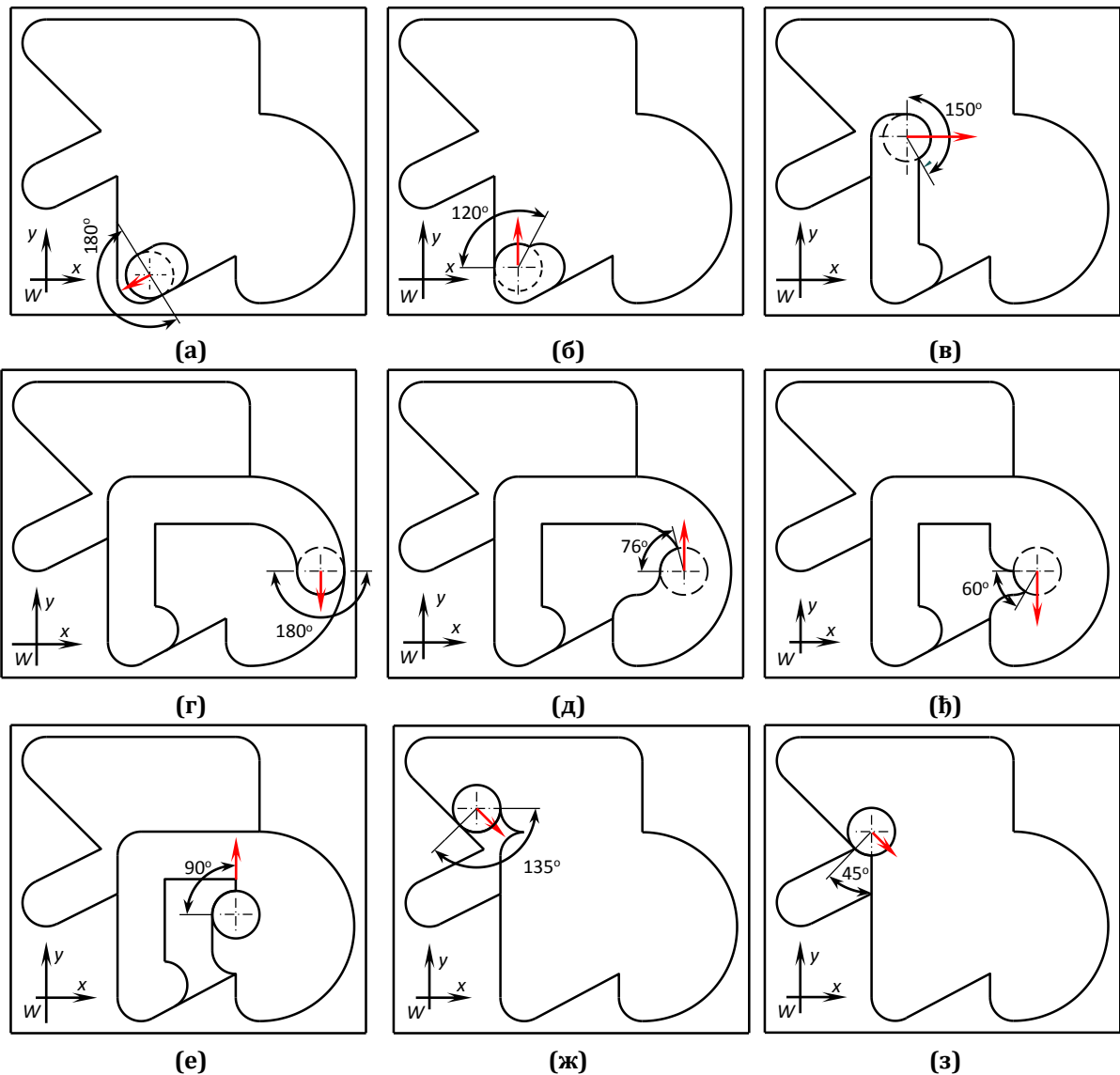
(a)



(б)

Слика 6.19. Пример 2: Упоредни приказ укупног угла захвата: (а) добијеног у [66] и (б) добијеног у дисертацији (1пиксел=0,1mm)

Ради даље потврде тачности развијене методе за праћење промене елемената обраде дуж путање алата, изабрано је 9 карактеристичних тачака на путањи алата (слика 6.20), израчунате су аналитичке вредности угла захвата (према формулама у табели 3.1) и упоређене су са вредностима добијеним применом програмског система развијеног у дисертацији (табела 6.3).



Слика 6.20. Пример 2: илустрација положаја глодала, правца кретања и угла захвата у 9 карактеристичних тачака путање алата: (а) линеарна интерполација са кретањем алата дуж обе осе, (б) линеарна интерполација са кретањем алата у правцу у осе, (в) линеарна интерполација са кретањем алата у правцу х осе, (г), (д), (ђ) кружна интерполација, (е), (ж), (з) линеарна интерполација

Само у две тачке (слика 20д и 20ђ) добијене вредности угла захвата одступају од тачних вредности и то за мање од 0,3%.

Даље је за два сегмента кружне интерполације одређена средња вредност угла захвата за две различите резолуције мреже припремка и упоређена са израчунатом (тачно) вредношћу (табела 6.4), да би се утврдио утицај пречника алата и резолуције мреже припремка на тачност добијених резултата.

Табела 6.3- Провера тачности одређивања угла захвата у 9 карактеристичних тачака за пример 2

Тачка (ознака према слици 6.20)	X координата	Y координата	аналитички израчуната (тачна) вредност угла	добијени угао (1пиксел=0,5 милиметара)	добијени угао (1пиксел=0,1 милиметара)
(а)	44	2	180°	180°	180°
(б)	40	5	120°	120°	120°
(в)	45	60	150°	150°	150°
(г)	120	30	180°	180°	180°
(д)	110	30	75,56°	75,7°	75,75°
(ђ)	100	30	60°	59,3°	59,93°
(е)	80	35	90°	90°	90°
(ж)	20	80	135°	135°	135°
(з)	30	70	45°	45°	45°

Табела 6.4- Провера тачности одређивања угла захвата на два сегмента кружне интерполације

сегмент путање (према слици 6.14)	резолюција мреже припремка	средња вредност	тачна вредност	релативно одступање средње вредности	највеће релативно одступање на сегменту
6	1пиксел= 0,5 mm	76,9°	75,56°	1,78%	3,81%
	1пиксел= 0,1 mm	75,82°	75,56°	0,35%	0,79%
8	1пиксел= 0,5 mm	61,4°	60°	2,29%	6,67%
	1пиксел= 0,1 mm	60,03°	60°	0%	0,75%

У овом случају се види да одступање средње вредности применом веће резолуције мреже припремка не прелази 1%. У примеру 2, пречник глодала је четири пута већи него у примеру 1, а највеће одступање угла захвата је три пута мање. Овим се потврђује да на тачност резултата осим поделе мреже припремка утиче и пречник глодала.

Развијени програмски систем за праћење елемената и фактора процеса обраде дуж путање алата омогућио је добијање вредности дубине резања и угла захвата чије средње вредности на сегменту путање алата занемарљиво одступају од тачних вредности. Показало се да је, при резолуцији мреже припремка где једном пикселу одговара 0,1 mm и применом глодала пречника 20 mm, релативна грешка средње вредности мања од 1%.

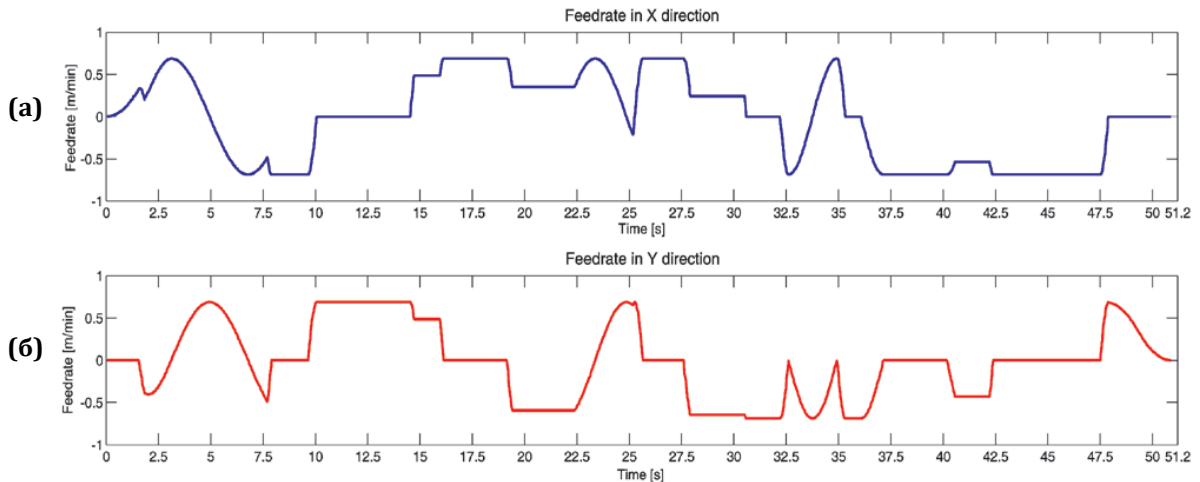
Поређењем резултата добијених у дисертацији са другим истраживањима у области одређивања елемената зоне захвата, очигледно је да се добијају тачнији резултати, посебно на сегментима путање који одговарају кружној интерполацији.

6.2. Верификација одређивања профила брзине помоћног кретања дуж путање

За верификацију одређивања промене брзине помоћног кретања коришћен је исти пример, као и за проверу елемената зоне захвата (пример 1), обрадак и припремак су истих димензија. Уместо глодала пречника 5 mm примењено је глодало пречника 6 mm, исто као у докторату Нешића [66], пошто су добијени резултати поређени са резултатима експеримента и симулације приказаним у [66]. Контурна обрада спољашње површине је изведена са смером обилажења контуре супротном смеру казаљке на сату. Номинална

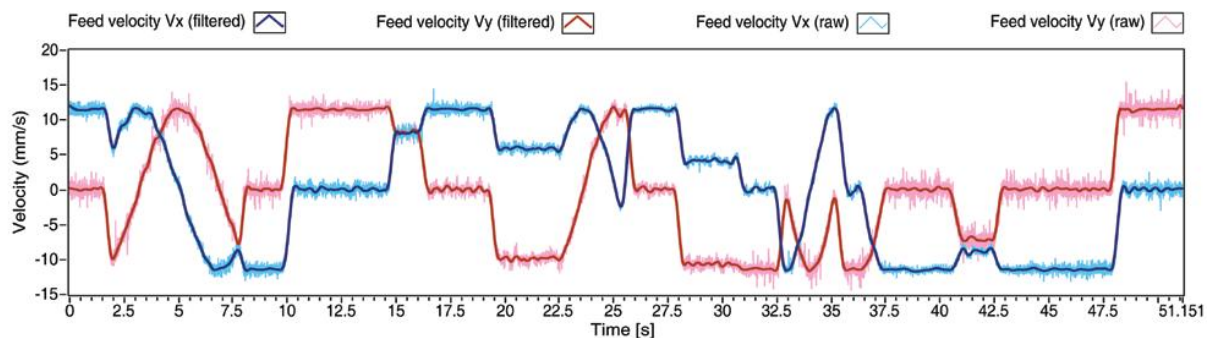
дубина резања је 1 mm, пречник глодала 6 mm, број обртаја 22918 о/min, корак 0.015mm/сечиву.

На слици 6.21 приказан је профил брзине помоћног кретања добијен симулацијом у [66] применом модела који узима у обзир трзај, односно промену убрзања у јединици времена.



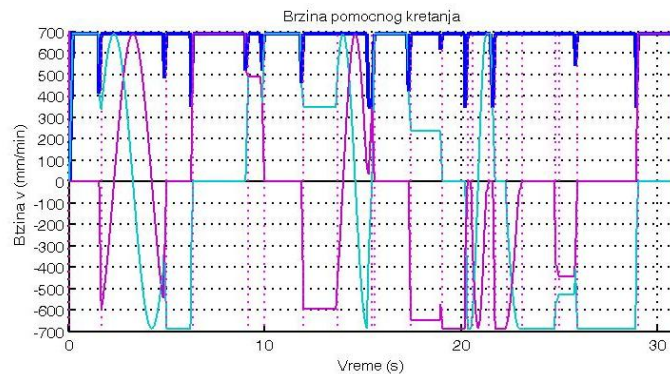
Слика 6.21. Профил брзине помоћног кретања за пример 1 добијен симулацијом [66]: (а) пројектованна x осу, (б) пројектован на у осу

Експериментални резултати профила брзине помоћног кретања преузети су из доктората [66] и приказани на слици 6.22.



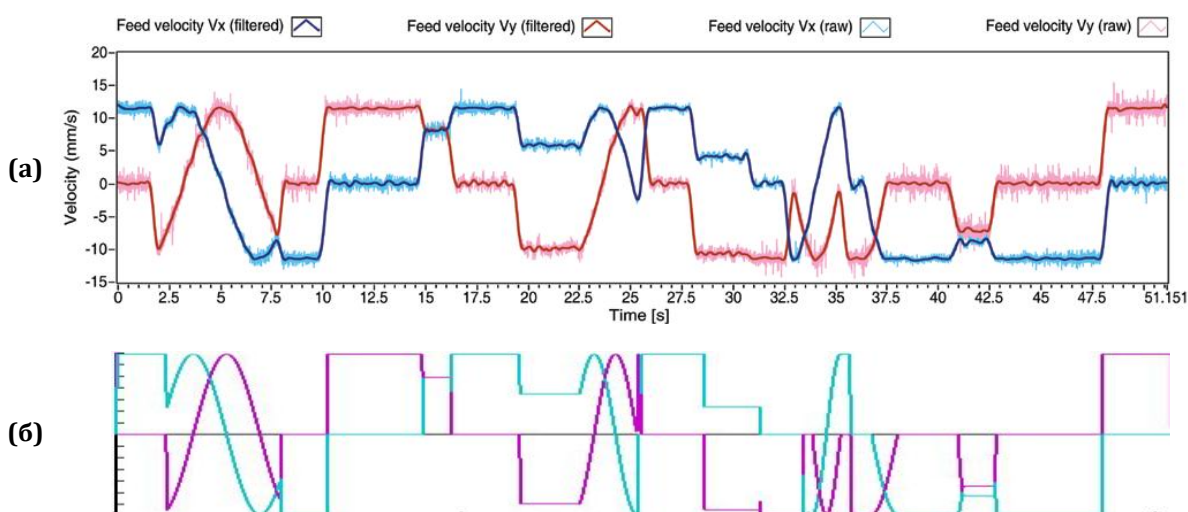
Слика 6.22. Профил брзине помоћног кретања за пример 1 добијен експериментално [66]

Резултати добијени применом трапезоидног профила брзине (једноставнији модел који не узима у обзир „трзај“) приказани су на слици 6.23 за резолуцију мреже припремка 0,5



Слика 6.23. Профил брзине помоћног кретања за пример 1 добијен у дисертацији

С обзиром на то да се NC програм за пример 1 који је примењен за реализацију експеримента и симулаци је у [66] разликује од NC програма који је коришћен у овом докторату по начину преласка измеђи две линеарне интерполације, као и да су коришћени различити модели брзине помоћног кретања, постоји извесно неслагање у времену обраде. Како је у овом раду коришћен тангентни прелаз између две суседне линеарне интерполације а у раду [66] је примењена кружна интерполација око тачке спајања два сегмента, добијено укупно време обраде је мање него експериментално. Мање време обраде од експерименталног је симулацијом добијено и у [66], али је развлачењем временске осе формиран дијаграм приказан на слици 6.21. Применом исте методе развлачења временске осе дијаграма са слике 6.23, добија се дијаграм брзине помоћног кретања приказан на слици 6.19 упоредо са експерименталним резултатом преузетим из [66].



Слика 6.24. Упоредни приказ брзине помоћног кретања: (а) добијене експериментално у [66], (б) добијене применом програмског система у дисертацији

На упоредном приказу види се да је једина разлика између резултата добијених у овом раду и експерименталних резултата у нагибу делова дијаграма при промени брзине помоћног кретања. Наиме нагиб је већи (линије су стрмије) на дијаграму добијеном применом трапезоидног профила брзине услед занемаривања „трзаја“ машине алатке, што је и узрок краћег времена обраде. Може се закључити да примењени метод, у потпуности не опонаша реално понашање машине алатке, односно кретање алата, због чега је дошло до разлике у времену обраде.

Закључује се да је за добијање реалнијег времена обраде потребно применити модел брзине помоћног кретања који узима у обзир „трзај“ при кретању алата дуж путање. Пошто брзина помоћног кретања по интензитету и начину промене у потпуности одговара експерименталним резултатима из [66], одступање од реалног времена обраде неће значајно утицати на вредности силе резања.

6.3. Верификација методе одређивања сила резања дуж путање

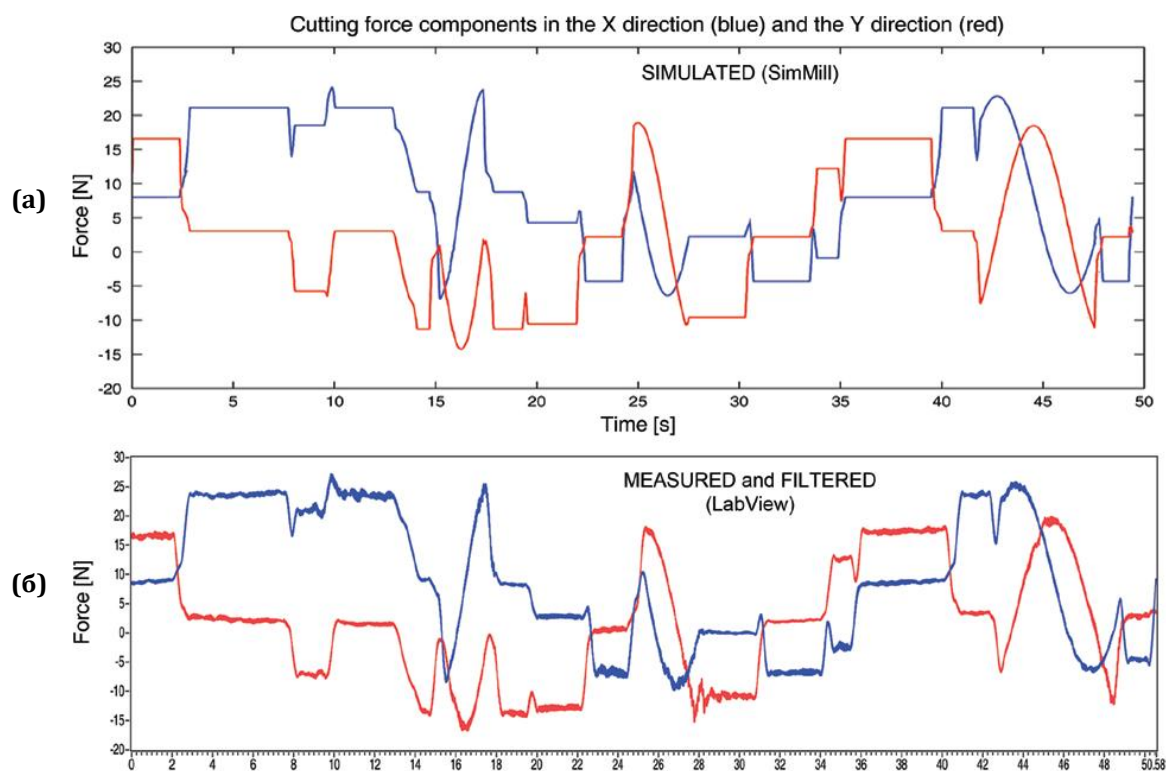
Према методологији приказаној у претходном поглављу добијају се вредности сила пројектованих на правац кретања и на нормалу на правац кретања. Да би се могли

упоредити са експерименталним резултатима потребно је пројектовати тако добијене вредности сила на правце координатних оса.

За верификацију методе одређивања сила резања дуж путање алата коришћен је исти пример, као и за проверу брзине помоћног кретања. Контурна обрада спољашње површине је изведена са смером обилажења контуре супротно кретању казаљке на сату. Номинална дубина резања је 1 mm, пречник глодала 6 mm, број обртаја 22918 o/min, корак 0.015mm/сечиву. Вредности специфичних сила резања (табела 6.5) преузети су из доктората [66] где су добијени експериментом на шестоосном обрадном центру „C.B. Ferrari A152A“, за материјал обратка CERTAL (AlZnMgCu легура). Експериментални резултати и резултати симулације добијени у Нешићевом раду [66] приказани су на слици 6.25.

Табела 6.5- Специфичне силе резања [66]

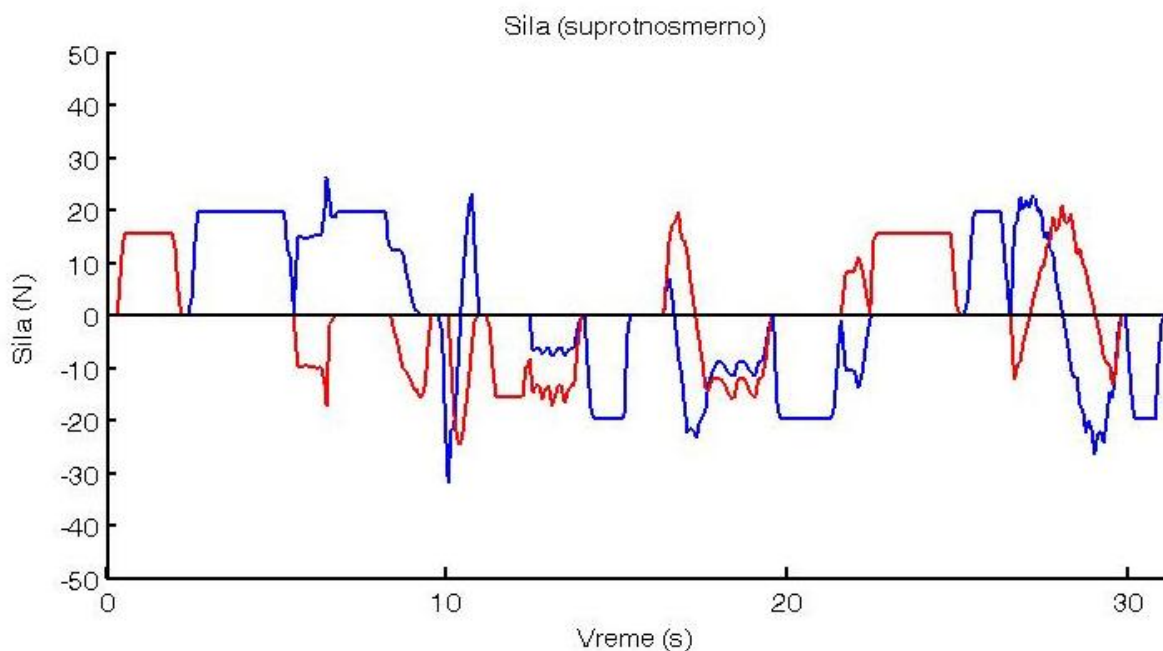
Специфичне силе резања	T01, Ø6
K_{tc} [MPa]	1090,699
K_{rc} [MPa]	718,304
K_{ac} [MPa]	140,915
K_{te} [N/mm]	12,855
K_{re} [N/mm]	4,787
K_{ae} [N/mm]	1,620



Слика 6.25. Компоненте силе резања добијене у [66]: (а) резултати симулације, (б) експериментални резултати

Резултати добијени симулацијом у [66] су модификовани смањењем специфичних сила резања за 25% јер је утврђено да њихове вредности нису добро одређене, вероватно услед похабаности алата. На исти начин, применом коефицијаната из табеле 6.5, смањених за

25% добијени су дијаграми сила применом програмског система за одређивање фактора резања развијеног у овом раду (слика 6.26).



Слика 6.26. Дијаграм сила резања добијен применом програмског система за праћење фактора обраде дуж путање алата

Примећује се да иако позитивне силе одговарају и по интензитету и по облику, негативне силе су по облику одговарајуће, али су им интензитети нешто већи, што је вероватно последица неједнаког одступања појединачних коефицијената (не треба све специфичне силе смањити за исту вредност), нешто другачијег програма за обраду и краћег времена обраде добијеног у овом раду.

6.4. Закључне напомене

Провером резултата програмског система за праћење елемената и фактора обраде дуж путање алата, развијеног у оквиру ове дисертације, на репрезентативним примерима из литературе, потврђена је њихова веродостојност. Део програмског система којим се одређују елементи обраде (дубина и ширина резања и угао захвата) омогућио је добијање резултата који се одлично поклапају са аналитички израчунатим вредностима. У поређењу са неким претходним истраживањима [66] добијени су тачнији резултати. Примена трапезоидног модела брзине помоћног кретања се није показала као најбоље решење, те ће се у будућем раду применити модел који узима у обзир „трзај“ при кретању алата. Примењени модел сила дао је задовољавајуће резултате. За верификацију модела сила резања коришћени су експериментални резултати из литературе што није потпуно поуздано.

Може се закључити да се применом програмског система за праћење елемената и фактора обраде добијају одлични резултати за елементе обраде и довољно добри резултати за факторе обраде, који могу да послуже као критеријуми за оцену адекватности путање алата.

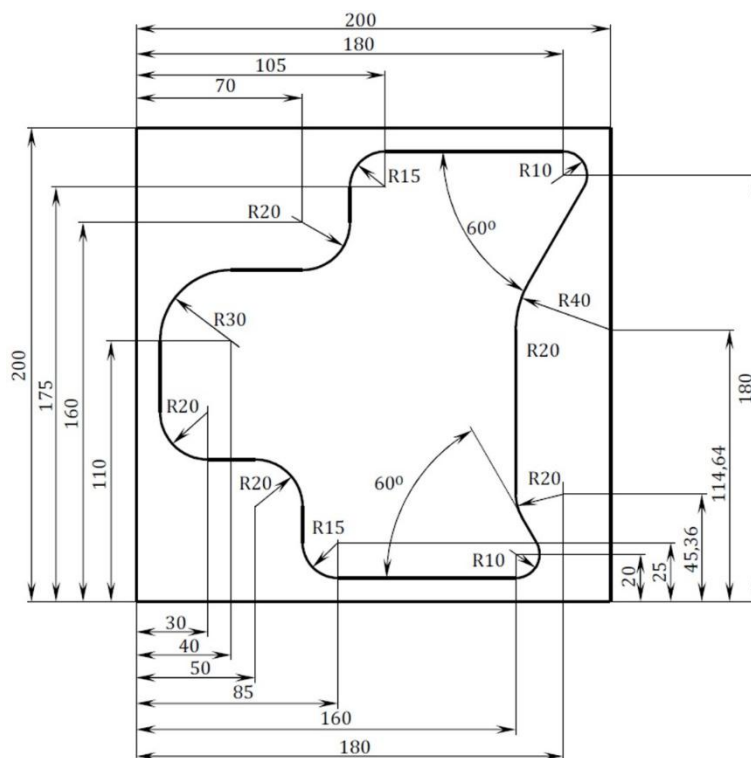
**ПРИМЕНА ПРОГРАМСКОГ СИСТЕМА ЗА
ПРАЋЕЊЕ ЕЛЕМЕНАТА И ФАКТОРА
ОБРАДЕ ДУЖ ПУТАЊЕ АЛАТА**

Приказан и верификован програмски систем за праћење елемената и фактора обраде дуж путање алата, може се користити за оцену адекватности путања алата генерисаних применом комерцијалних САМ система. Анализом података и дијаграма промене елемената и факторе обраде дуж путање алата, пре самог процеса обраде добијају се информације о различитим показатељима квалитета обрадног процеса. На основу графичког приказа међусобног положаја алата и обратка током процеса обраде, верификује се NC програм, односно, утврђује се да ли ће се применом генерисаног NC програма обрадак у потпуности обрадити, без колизије алата и обратка. Такође се може користити за поређење различитих путања алата генерисаних САМ системима и избор најадекватније путање према задатим критеријумима.

Примена програмског система за праћење елемената и фактора обраде приказана је на примеру обраде карактеристичне унутрашње контуре. Различити NC програми за обраду контуре генерисани су применом два САМ система, избором различитих опција стратегије обраде, а један програм је ручно написан. На свих десет NC програма примењен је програмски систем развијен у дисертацији. Дефинисани су критеријуми за оцену адекватности путање алата и применом вишекритеријумског одлучивања изабрана је оптимална путања алата.

7.1. Пример одређивања елемената и фактора обраде дуж путање алата

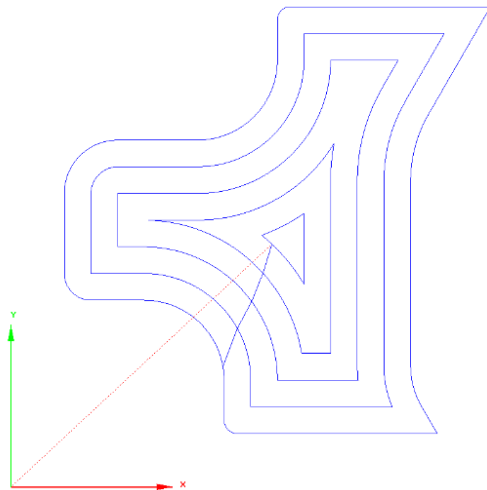
За илустрацију примене развијеног програма модификован је пример из литературе [95], који је коришћен за верификацију и у [66]. Примена програмског система је приказана за случај обраде унутрашње контуре једним алатом, глодалом пречника 20 mm и ширине резања 10 mm. Изглед обрађене контуре са димензијама дат је на слици 7.1.



Слика 7.1. Пример: скица обрађене контуре са димензијама

7.1.1. NC програми за пример обраде унутрашње контуре

Креирано је 10 различитих NC програма за обраду унутрашње контуре. Применом два САМ пакета (*Edge CAM* и *Inventor*) и избором различитих опција које САМ системи омогућују добијено је девет NC програма а десети NC програм је ручно написан. На наредним сликама (слике 7.2-7.11) су приказани изгледи путање и опције коришћене за њихово генерисање.



САМ систем: *Edge CAM*

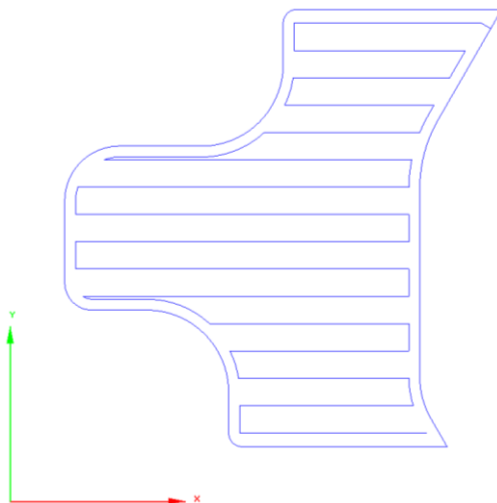
Глодало: пречник 20 mm

Преклоп: 10 mm

Опције:

1. Од центра ка периферији
2. *Optimized concentric*
3. без *r*

Слика 7.2. NC програм 1: изглед путање и изабране опције



САМ систем: *Edge CAM*

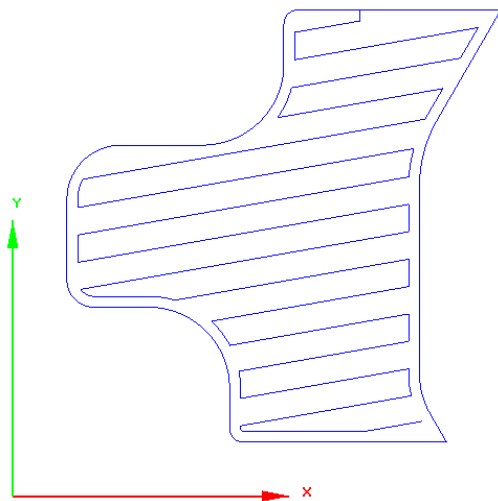
Глодало: пречник 20 mm

Преклоп: 10 mm

Опције:

1. *Optimized lace*
2. угао: 0°
3. са *r*

Слика 7.3. NC програм 2: изглед путање и изабране опције



САМ систем: *Edge CAM*

Глодало: пречник 20 mm

Преклоп: 10 mm

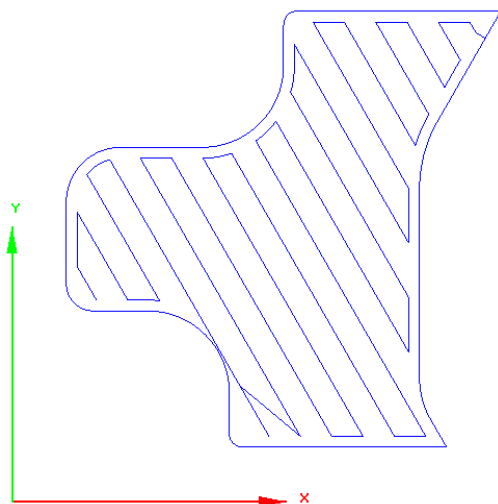
Опције:

1. *Optimized lace*

2. угао: 10°

3. са *r*

Слика 7.4. NC програм 3: изглед путање и изабране опције



САМ систем: *Edge CAM*

Глодало: пречник 20 mm

Преклоп: 10 mm

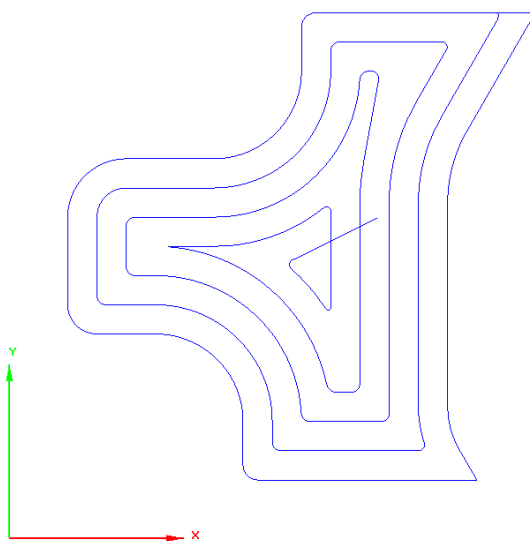
Опције:

1. *Optimized lace*

2. угао: -60°

3. без *r*

Слика 7.5. NC програм 4: изглед путање и изабране опције



САМ систем: *Edge CAM*

Глодало: пречник 20 mm

Преклоп: 10 mm

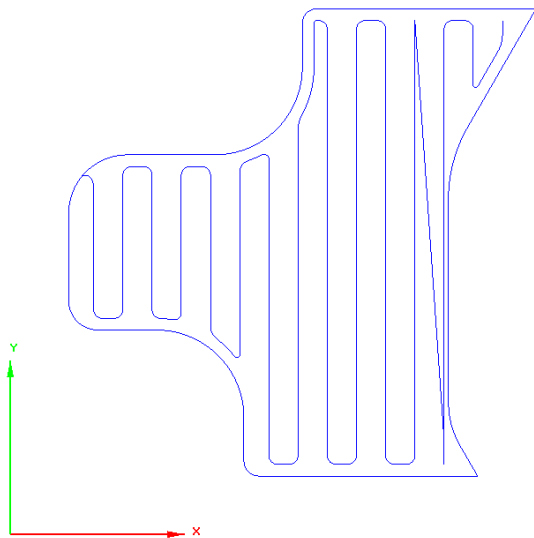
Опције:

1. Од центра ка периферији

2. *Optimized spiral*

3. са *r*

Слика 7.6. NC програм 5: изглед путање и изабране опције



САМ пакет: *Edge CAM*

Глодало: пречник 20 mm

Преклоп: 10 mm

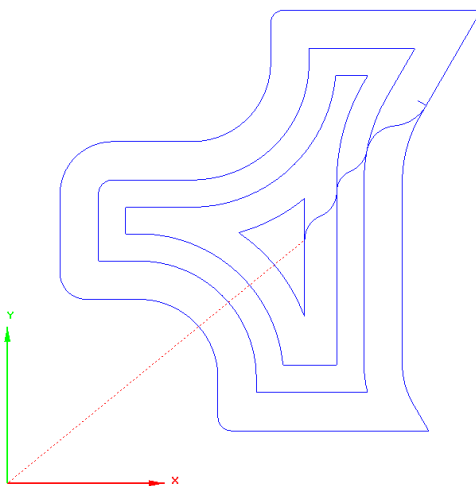
Опције:

1. *Optimized lace*

2. угао: 90°

3. са *r*

Слика 7.7. NC програм 6: изглед путање и изабране опције



САМ систем: *Inventor*

Глодало: пречник 20 mm

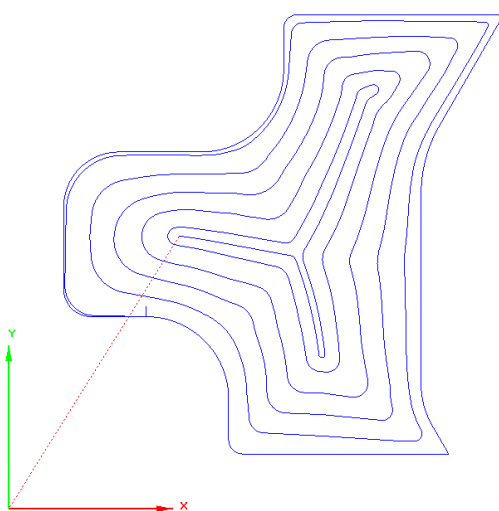
Преклоп: максимум 19 mm

Опције:

1. Од центра ка периферији

2. *2D Pocket*

Слика 7.8. NC програм 7: изглед путање и изабране опције



САМ систем: *Inventor*

Глодало: пречник 20 mm

Преклоп: максимум 19 mm

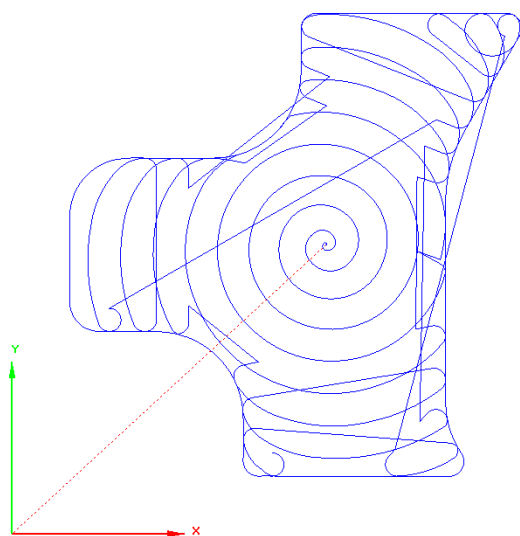
Опције:

1. Од центра ка периферији

2. *2D Pocket*

3. *Use morphed spiral machining*

Слика 7.9. NC програм 8: изглед путање и изабране опције



САМ систем: *Inventor*

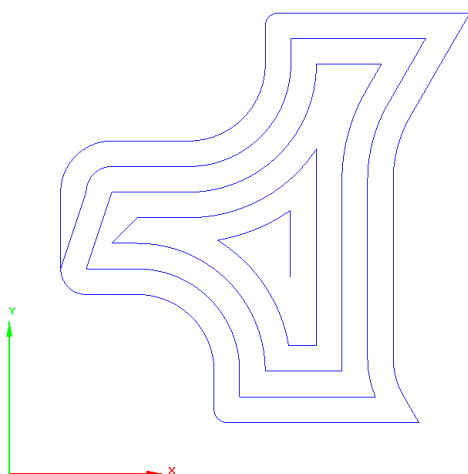
Глодало: пречник 20 mm

Преклоп: максимум 12 mm

Опције:

1. Од центра ка периферији
2. *2D Adaptive*
3. Минимални радијус 5 mm

Слика 7.10. NC програм 9: изглед путање и изабране опције



Ручно програмирање

Глодало: пречник 20 mm

Преклоп: максимум 20 mm

Опције:

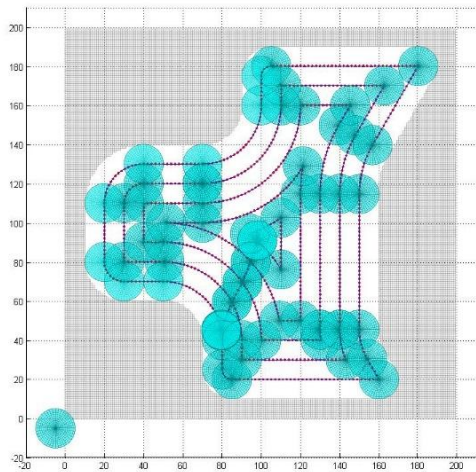
1. Од периферије ка центру

Слика 7.11. NC програм 10: изглед путање и изабране опције

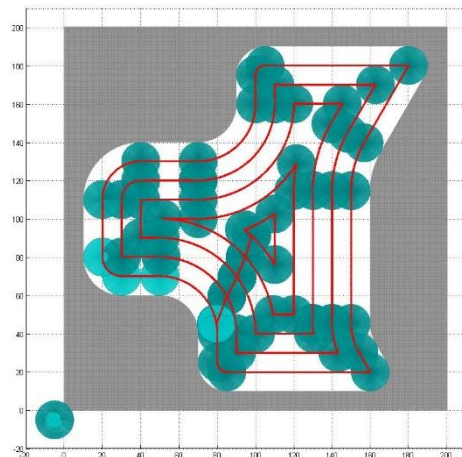
Како би приказ свих путања био једнообразан сви NC програми из САМ пакета и ручно написан програм учитани су у програм *editNC* и приказани су екрани изгледа путања. Могући број различитих путања је могао бити и знатно већи (применом још неких опција у изабраним програмима и применом других САМ система), али је за илустрацију примене развијеног програмског система изабраних десет путања сасвим довољно.

7.1.2. Положај алата у тачкама промене правца кретања и изглед обратка

NC програми, призматични припремак и димензије алата су учитани у програмски систем и добијени су прикази положаја алата у тачкама промене правца кретања, изглед путање и обратка (слике 7.12-7.21) за две различите поделе мреже припремка.

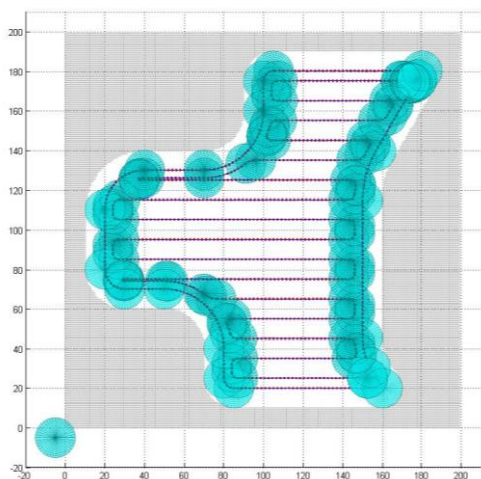


(a)

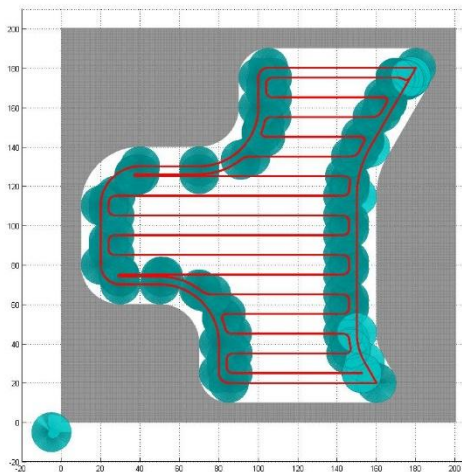


(б)

Слика 7.12. NC програм 1-положај алата и обрабка у тачкама промене правца кретања:
(a) 1пиксел=1mm, (б) 1пиксел=0,2 mm

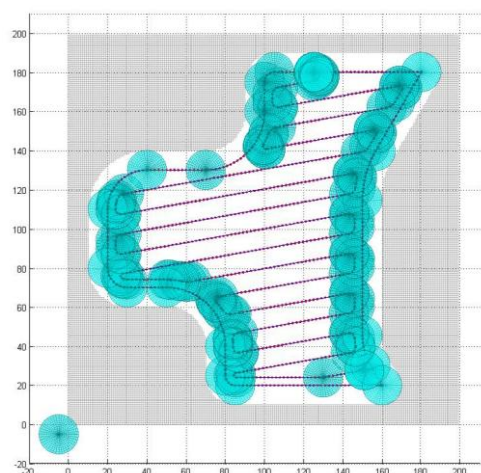


(a)

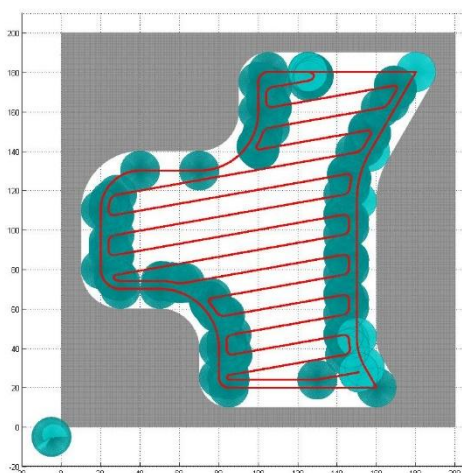


(б)

Слика 7.13. NC програм 2-положај алата и обрабка у тачкама промене правца кретања:
(a) 1пиксел=1mm, (б) 1пиксел=0,2 mm

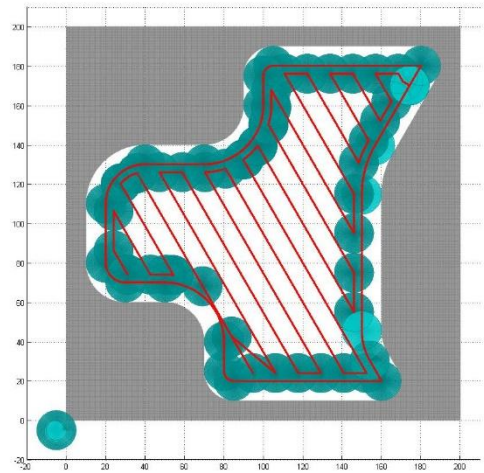
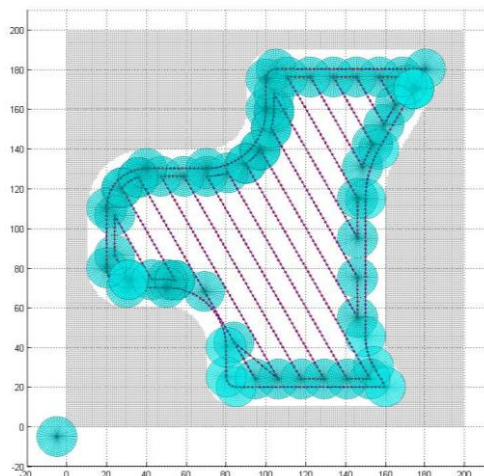


(a)

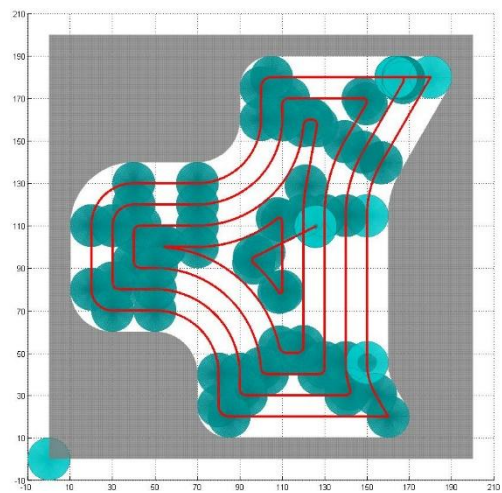
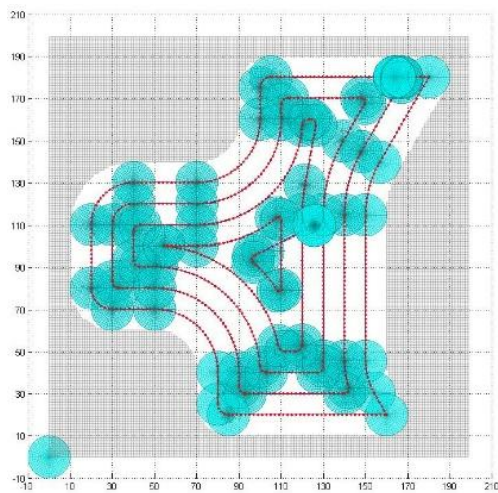


(б)

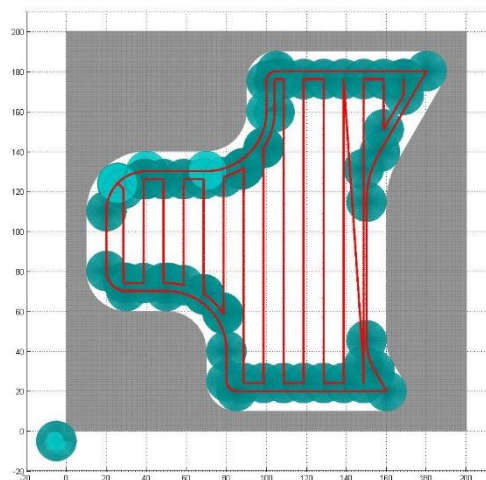
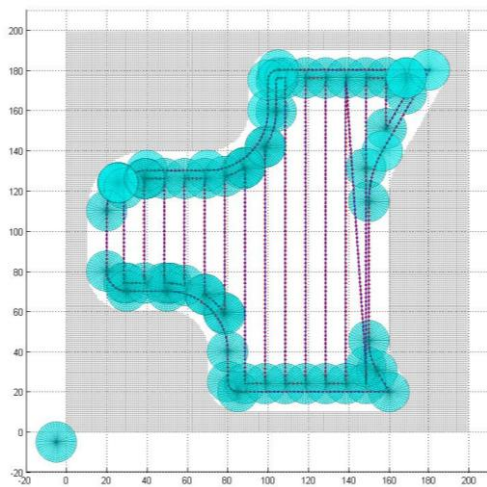
Слика 7.14. NC програм 3-положај алата и обрабка у тачкама промене правца кретања:
(a) 1пиксел=1mm, (б) 1пиксел=0,2 mm



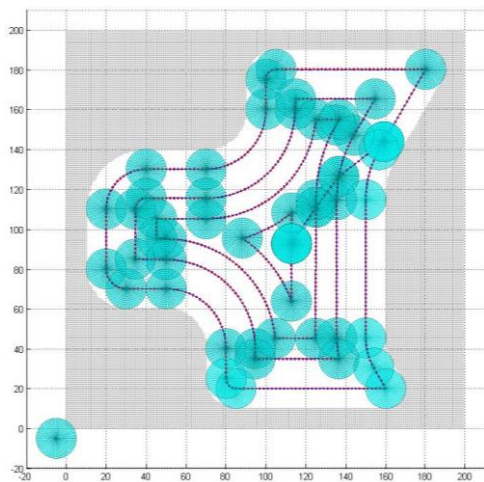
Слика 7.15. NC програм 4-положај алата и обратка у тачкама промене правца кретања:
(а) 1 пиксел=1mm, (б) 1 пиксел=0,2 mm



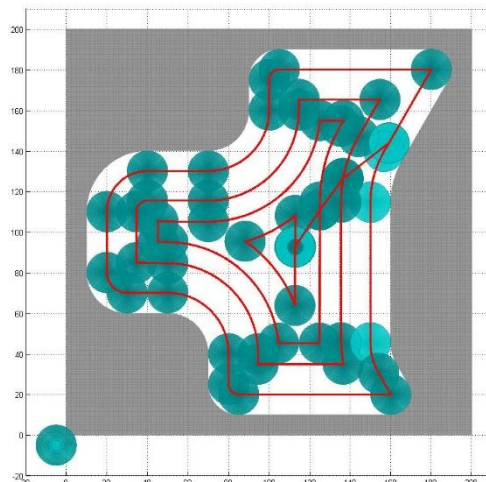
Слика 7.16. NC програм 5-положај алата и обратка у тачкама промене правца кретања:
(а) 1 пиксел=1mm, (б) 1 пиксел=0,2 mm



Слика 7.17. NC програм 6-положај алата и обратка у тачкама промене правца кретања:
(а) 1 пиксел=1mm, (б) 1 пиксел=0,2 mm

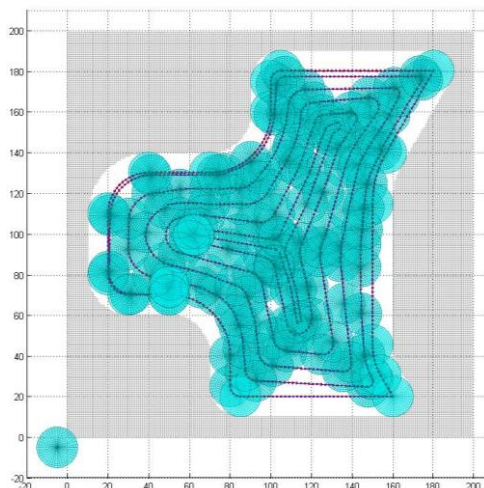


(a)

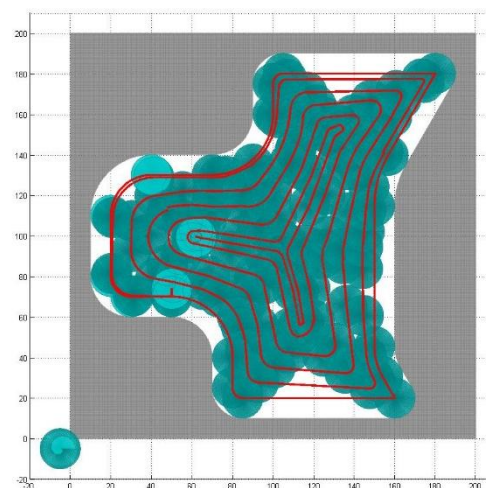


(б)

Слика 7.18. NC програм 7-положај алата и обрабка у тачкама промене правца кретања:
(a) 1пиксел=1mm, (б) 1пиксел=0,2 mm

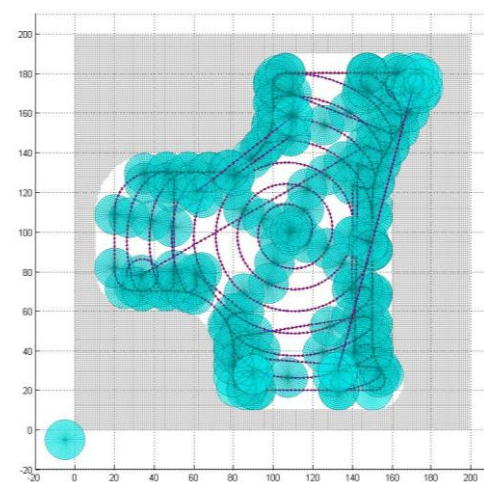


(a)

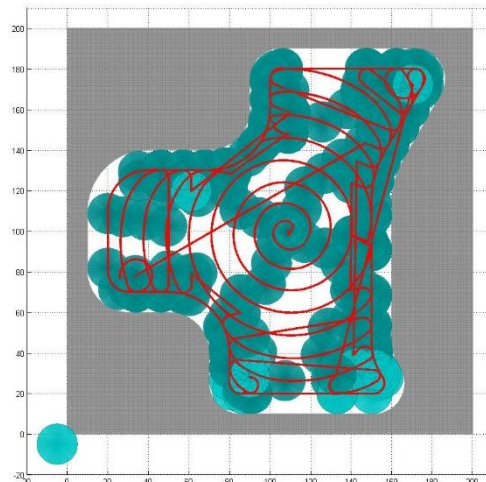


(б)

Слика 7.19. NC програм 8-положај алата и обрабка у тачкама промене правца кретања:
(a) 1пиксел=1mm, (б) 1пиксел=0,2 mm

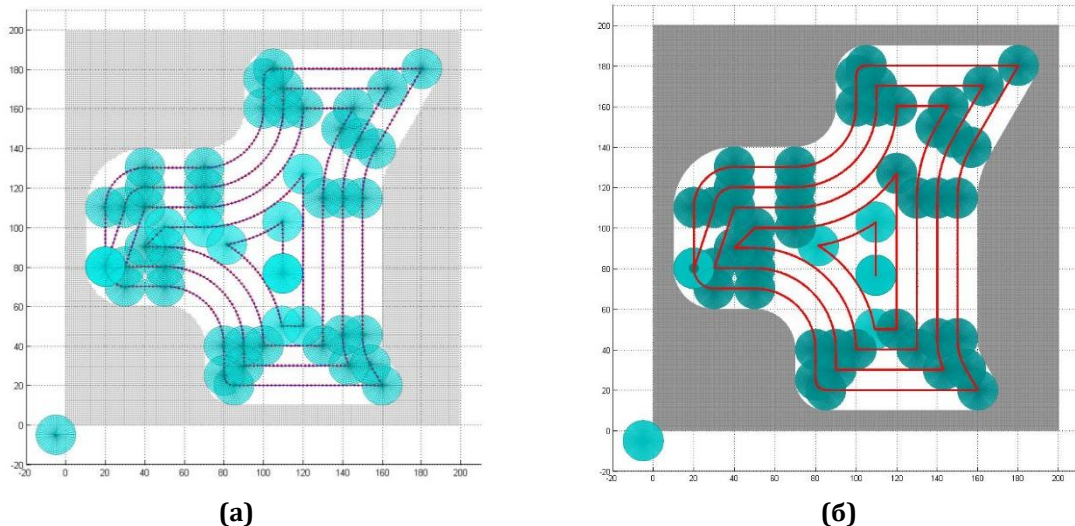


(a)



(б)

Слика 7.20. NC програм 9-положај алата и обрабка у тачкама промене правца кретања:
(a) 1пиксел=1mm, (б) 1пиксел=0,2 mm

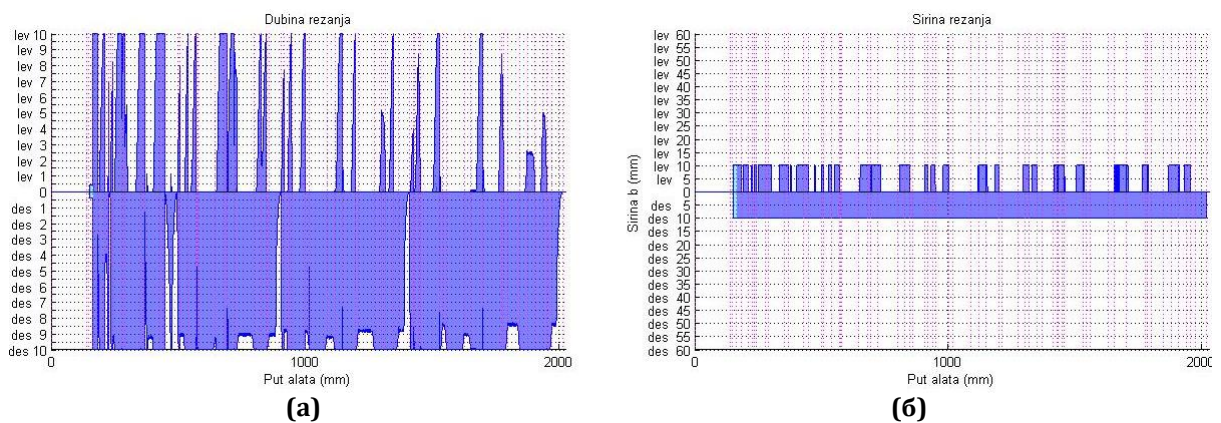


Слика 7.21. NC програм 10 -положај алата и обратка у тачкама промене правца кретања: (а) 1пиксел=1mm, (б) 1пиксел=0,2 mm

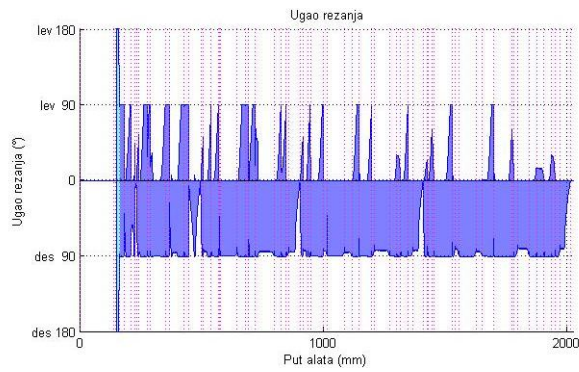
На приказаним сликама, види се да свих десет NC програма обезбеђује добијање тачне контуре обратка. На приказу међусобног положаја алата и обратка са мањом резолуцијом мреже обратка и алата, уочавају се црвене тачке. Оне представљају тачке на путањи алата у којима се рачунају елементи и фактори процеса обраде. На приказу међусобног положаја алата и обратка са већом резолуцијом мреже обратка и алата црвене тачке су веома близу, па се не уочавају (изгледа као да је у питању непрекидна линија).

7.1.3. Дијаграми дубине и ширине резања и угла захвата дуж путање алата

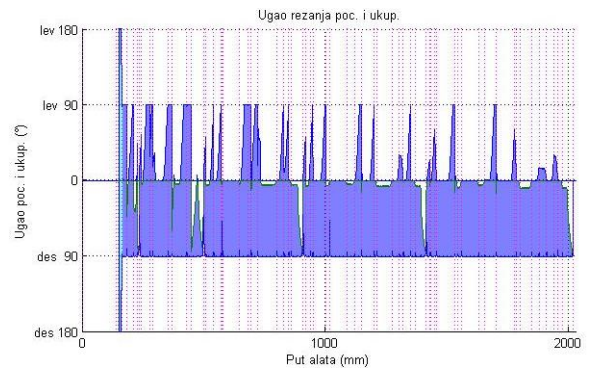
За свих десет NC програма одређени су ширина и дубина резања, угао захвата и расподела контаката и приказани дијаграмима промене дуж путање алата. У овом делу рада приказани су само дијаграми промене за NC програм 1 (слике 7.22-7.26) и то за за поделу мреже припремка од 0,2 mm, док су дијаграми за преостале NC програме дати у Прилогу.



Слика 7.22. NC програм 1-дијаграми промене елемената процеса обраде са леве и десне стране: (а) дубина резања, (б) ширина резања 1пиксел=0,2 mm

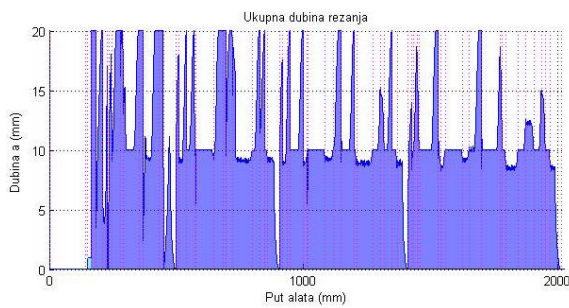


(a)

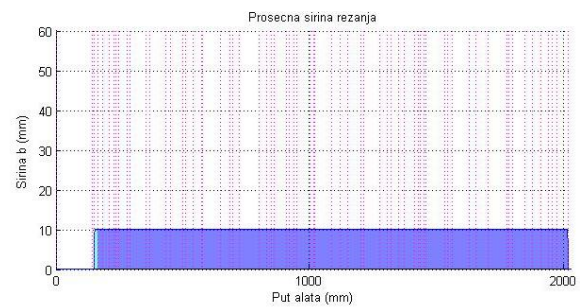


(б)

Слика 7.23. NC програм 1-дијаграми промене елемената процеса обраде са леве и десне стране: (а) угао захвата, (б) почетни и укупни угао захвата

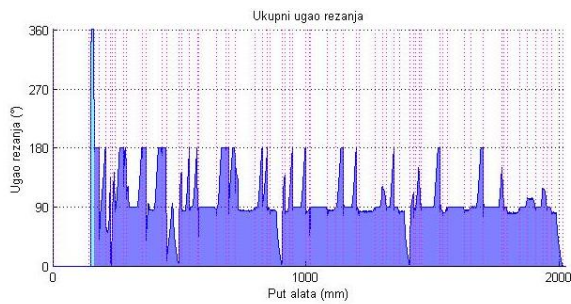


(a)

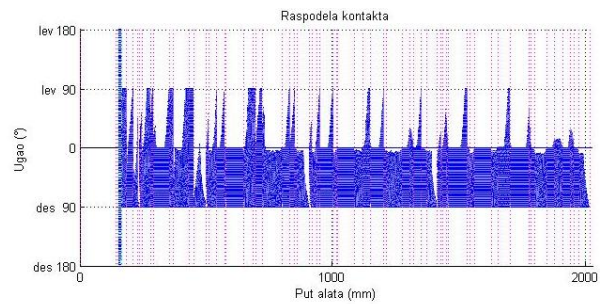


(б)

Слика 7.24. NC програм 1-дијаграми промене укупних вредности елемената процеса обраде: (а) дубина резања, (б) ширина резања

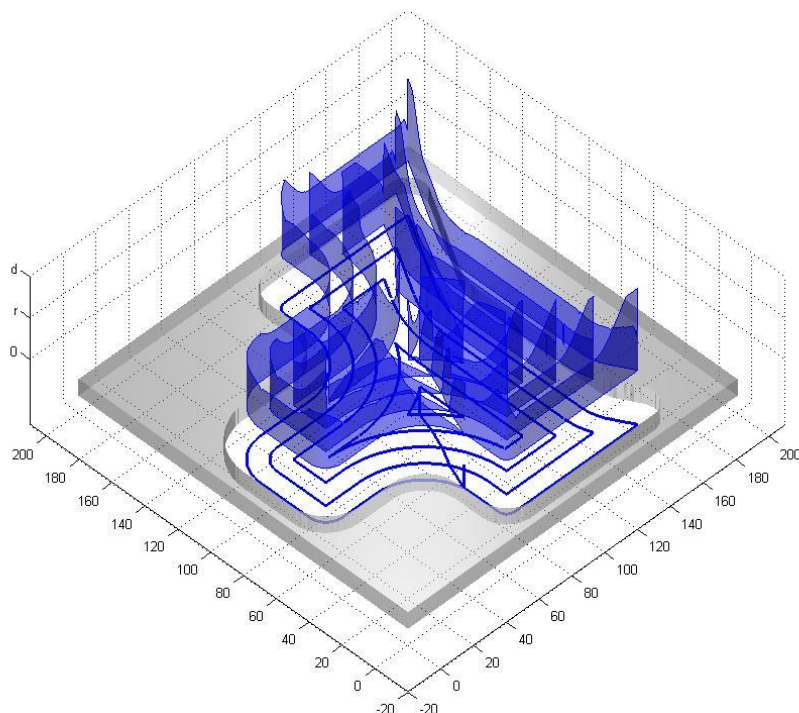


(a)



(б)

Слика 7.25. NC програм 1-дијаграми промене укупних вредности елемената процеса обраде: (а) угао захвата, (б) расподела контаката

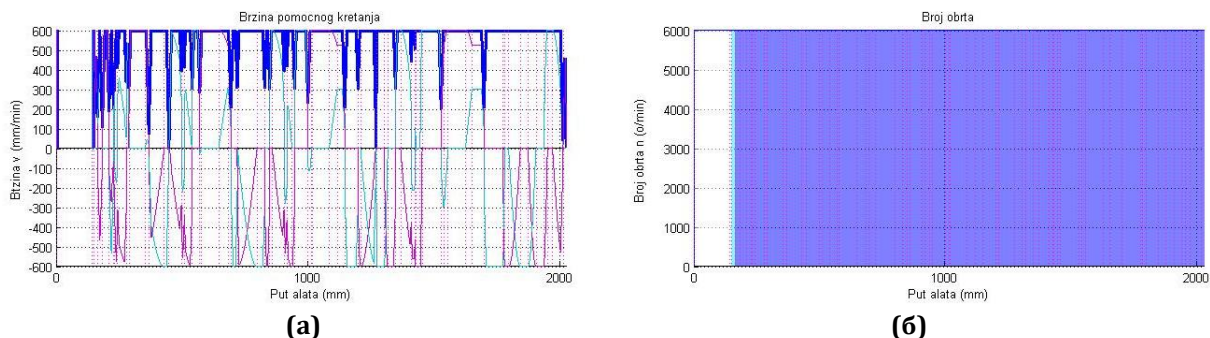


Слика 7.26. NC програм 1 - просторни приказ промене дубине резања дуж путање алата

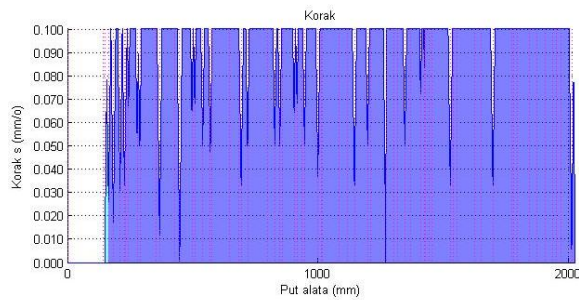
Сви приказани дијаграми су илустрација промене елемената процеса обраде дуж путање алата. Све вредности елемената процеса обраде смештени су у одговарајуће табеле базе података и користе се даље у прорачуну фактора обраде.

7.1.4. Дијаграми брзине помоћног кретања, броја обртаја, корака и времена обраде дуж путање алата

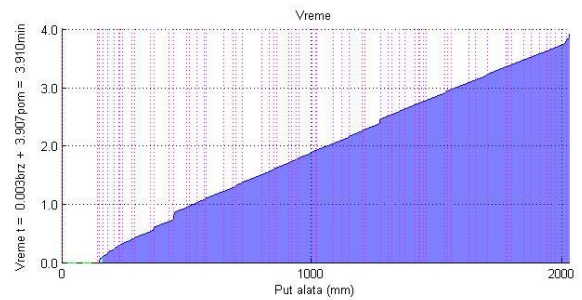
За свих десет NC програма одређене су промене брзине помоћног кретања, број обртаја, корак и време обраде и приказани дијаграмима промене дуж путање алата и током времена. У овом делу рада приказани су само дијаграми промене за NC програм 1 (слике 7.27-7.30), за поделу мреже припремка 0,5 mm, док су дијаграми за преосталих девет NC програма дати у Прилогу.



Слика 7.27. NC програм 1-дијаграми промене фактора процеса обраде дуж путање алата: (а) брзина помоћног кретања, (б) број обртаја

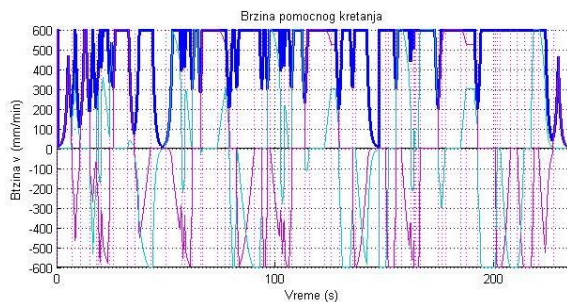


(а)

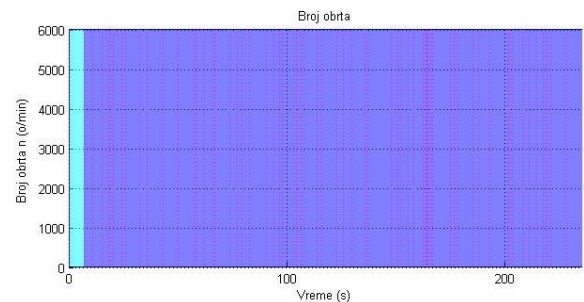


(б)

Слика 7.28. NC програм 1-дијаграми промене фактора процеса обраде дуж путање алата: (а) корак, (б) време обраде

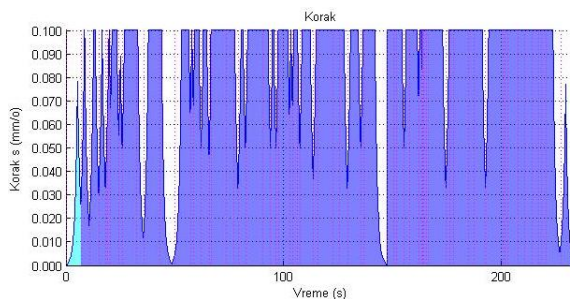


(а)

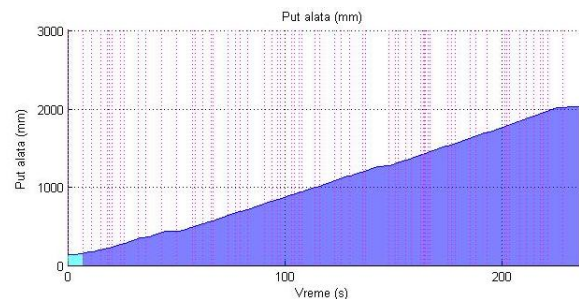


(б)

Слика 7.29. NC програм 1-дијаграми промене фактора процеса обраде током времена: (а) брзина помоћног кретања, (б) број обртаја



(а)



(б)

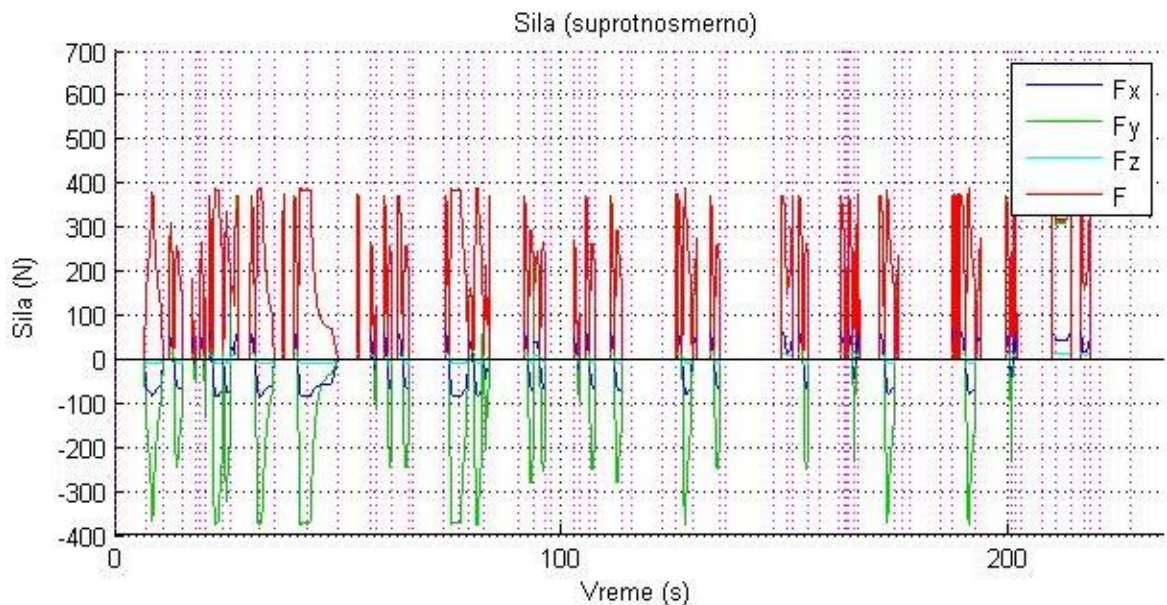
Слика 7.30. NC програм 1-дијаграми промене фактора процеса обраде током времена: (а) корак, (б) укупан пут алата

Приказани дијаграми су илустрација промене брзине помоћног кретања, броја обртаја (у овом случају константна вредност) и корака дуж путање алата и током времена. Њихове вредности смештене су у одговарајуће таблице базе података и користе се даље у прорачуну сила резања.

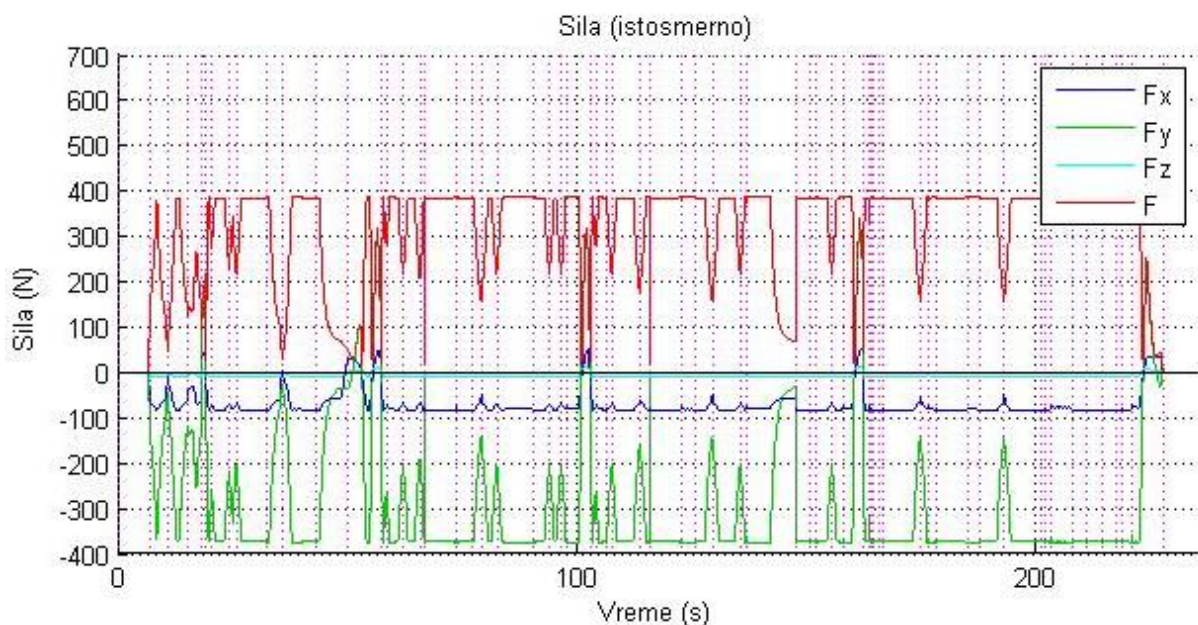
Са дијаграма приказаних на слици 7.28б и 7.30б, директно се читавају укупно време обраде и укупни пређени пут алата, који су често кључни критеријуми за оцену адекватности путање алата.

7.1.5. Дијаграми сила резања

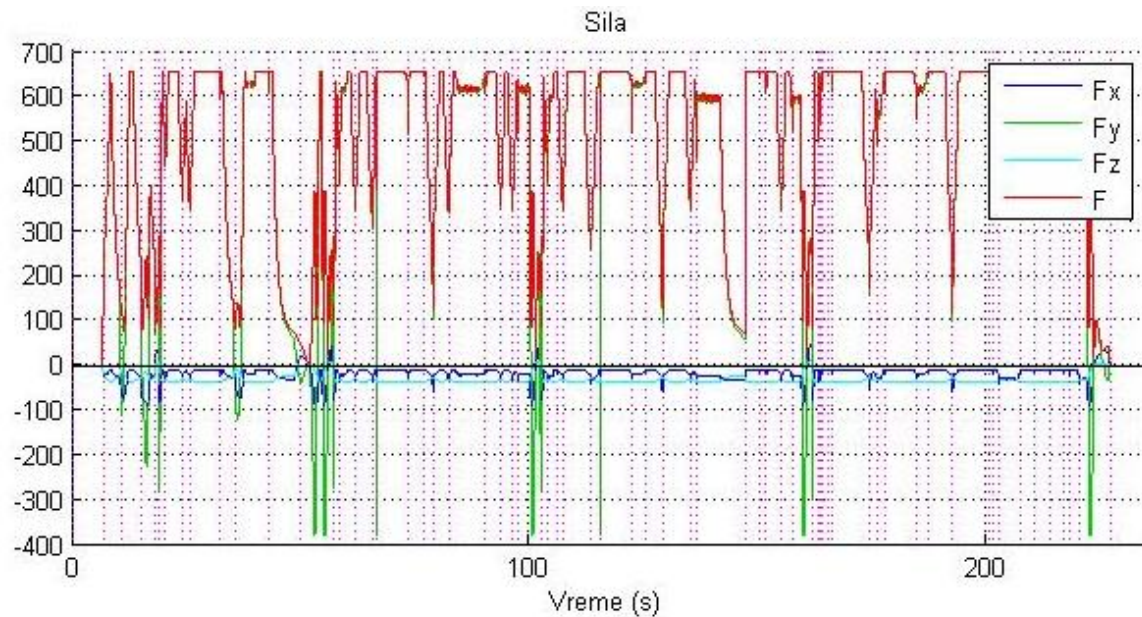
За свих десет NC програма одређене су вредности компоненти силе резања, према моделима који су описани у потпоглављу 5.2.9 и уграђени у програмски систем за праћење елемената и фактора обраде дуж путање алата. У овом делу рада приказани су само дијаграми промене сила резања за NC програм 1, добијени применом модела за одређивање сила резања према [7], током времена (слике 7.31, 7.32 и 7.33). Дијаграми промене силе резања за преостале NC програме дати су у Прилогу.



Слика 7.31. NC програм 1 - дијаграми сила резања при супротносмерном глодању према моделу [7]



Слика 7.32. NC програм 1 - дијаграми сила резања при истосмерном глодању према моделу [7]



Слика 7.33. NC програм 1 - дијаграми укупне силе резања према моделу [7]

Промене сила резања применом модела према [7] су одређене коришћењем специфичних сила резања за глодало пречника 20 mm према експерименталним резултатима из [66] (табела 6.5).

7.2. Критеријуми за оцену адекватности путање алата

Анализом процеса обраде глодањем и NC путања у поглављима 2, 3 и 4 закључено је да путања алата има утицај на више показатеља квалитета обрадног процеса. Критеријуми за оцену адекватности путање алата изабрани су на основу:

- промене дубине резања дуж путање алата,
- врсте глодања,
- укупног пута и времена обраде и
- укупне силе резања.

Дефинисаном путањом алата одређене су дубина и ширина резања чије вредности заједно са бројем обртаја одређују дијаграме стабилности обрадног процеса. Како су у примеру изабраном за илустрацију примене програмског система (слика 7.1) број обртаја и ширина резања константни, за оцену стабилности процеса глодања довољни су подаци о дубини резања дуж путање. У случају променљивих вредности ширине резања и броја обртаја, из базе података у које су уписани подаци о елементима и факторима обраде дуж путање алата могли би се генерисати односи дубина резања-број обртаја и ширина резања-број обртаја за сваку тачку на путањи алата. Поређењем тако добијених вредности са дијаграмима стабилности за дату комбинацију алата и обратка могло би се утврдити да ли процес глодања у датој тачки припада стабилном или нестабилном подручју процеса обраде

Превише мале дубине резања при обради великим брзинама резања изазивају велико загревање у зони резања и утичу неповољно на постојаност алата. Такође, мали део од пречника глодала у захвату доводи до повећане деформације алата.

Пожељно је да дубина резања у што већем делу путање одговара задатој вредности преклопа (енг. *stepover*) која је претходним анализама одређена као најбоља за дату комбинацију алата и обратка.

Како дубина резања на више начина утиче на квалитет обрадног процеса, генерисани су подаци о процентуалном учешћу појединих интервала дубине резања на укупној дужини путање алата (табела 7.1). Овако сортиране вредности дубине резања погодне су за примену у оцењивању путање алата по више критеријума.

Табела 7.1 - Расподела интервала дубине резања у процентима за 10 различитих путања алата

NC програм	Интервали дубине резања [mm]																			
	0-1	1-2	2-3	3-4	4-5	5-6	6-7	7-8	8-9	9-10	10-11	11-12	12-13	13-14	14-15	15-16	16-17	17-18	18-19	19-20
1011	4.64	1.03	0.73	0.6	0.96	0.58	0.41	0.49	12.01	42.11	5.37	2.86	3.46	2.12	2.84	1.69	1.69	2.24	2.09	12.08
1021	3.99	0.71	1.89	7.95	9.91	2.67	1.45	0.71	0.73	47.79	2.98	1.63	1.45	1.1	0.82	0.81	0.92	1.76	2.67	8.06
1031	1.97	0.17	0.98	8.66	5.46	3.55	3.43	2.3	1.55	26.53	24.92	2.19	1.38	1.13	1.09	1.02	1.38	1.48	1.8	9.01
1041	3.66	0.78	1.26	12.36	6.32	3.06	1.4	1.5	1.24	21.39	28.13	1.44	1.3	1.3	1.34	1.2	1.26	1.36	1.68	8.04
1051	1.1	0.38	0.16	0.41	0.38	0.63	0.52	0.45	14.7	41.36	6.53	3.33	4.01	2.27	2.63	2.93	2.03	2.14	2.81	11.23
1061	2.91	5.09	2.55	8.86	6.47	2.44	2.13	2.68	3.59	2	45.08	1.36	1.12	0.85	0.91	0.7	0.59	0.82	0.96	8.89
1071	4.49	1.01	0.81	0.71	0.66	0.74	1.14	1.04	0.91	10.6	10.93	6.22	3.86	8.88	17.83	3.48	4.31	2.66	3.27	16.44
1081	4.68	3.83	7.05	3.71	6	15.02	15.44	10.53	7.2	4.67	2.2	2.51	2.83	2.69	1.65	1.23	1.05	0.88	0.82	6.01
1091	41.85	1.72	1.17	1.15	1.03	0.92	2.07	1.13	1.03	1.19	1.03	6.75	37.78	0.73	0.31	0.01	0	0.01	0.01	0.11
1101	10.31	2.16	1.72	1.65	1.36	1.94	1.56	1.72	2.61	20.12	14.97	8.93	0.13	0.16	0.11	0.16	0.18	0.18	0.45	29.61

Како експериментална испитивања нису рађена, у циљу приказа могућности примене података добијених коришћењем програмског система за праћење елемената обраде дуж путање алата, претпоставља се:

- На основу дијаграма стабилности за задати број обртаја процес глодања је стабилан при дубинама резања мањим од 18 mm.
- Постојаност алата се знатно скраћује при дубинама резања мањим од 2mm.
- Пожељан режим обраде је дубина резања између 9 mm и 11 mm.

На основу наведених претпоставки усвајају се критеријуми за оцену путање алата на основу промене дубине резања дуж путање алата:

- K1: Минимално учешће дубина резања $a < 2$ mm,
- K2: Максимално учешће дубина резања $9 < a < 11$ mm,
- K3: Минимално учешће дубина $a > 18$ mm.

Како се услови резања мењају у зависности од врсте глодања, корисна информација за оцену путање алата је познавање заступљености истосмерног, супротносмерног и комбинованог глодања у укупној дужини путање алата (табела 7.2).

При обради истосмерним глодањем дебљина струготине се мења од максималне до минималне вредности и велики део топлоте се одводи из зоне резања са струготином. Утицај деформације алата на тачност обраде мањи је при истосмерном глодању. Применом комбиновог глодања, оптерећење алата се повећава.

Табела 7.2 – Учешће врсте глодања у процентима за 10 различитих путања алата

NC програм	супротносмерно глодање	истисмерно глодање	комбиновано глодање	без обраде
1011	0	61.78	37.28	0.94
1021	27.6	48.76	22.83	0.81
1031	15.16	37.8	46.08	0.96
1041	13.13	37.35	48.64	0.88
1051	0.02	58.87	40.62	0.49
1061	7.36	30.58	61.85	0.21
1071	0	19.99	78.72	1.29
1081	0	76.54	22.4	1.06
1091	0	17.73	47.15	35.12
1101	1.11	31.72	61.57	5.59

Усвајају се критеријуми за оцену путање на основу врсте глодања:

- К4: Минимално учешће комбинованог глодања,
- К5: Минимално учешће супротносмерног глодања,
- К6: Минимално учешће празног хода.

Дуго је укупна дужина путање била основни критеријум за оцену путање. Појавом високобрзинске обраде и укључивањем динамике машине алатке време обраде је постало значајнији показатељ процеса обраде. У табели 7.3 дати су подаци за укупну дужину путање и укупно време обраде, као и информације о појединачним сегментима путање и времена обраде.

Табела 7.3 – Пут и време обраде за 10 различитих путања алата

NC програм	Укупно		Брзи ход алата		Ход алата са помоћним кретањем		Радни ход алата	
	пут [mm]	време[min]	пут [mm]	време[min]	пут [mm]	време[min]	пут [mm]	време[min]
1011	2024.32	3.143	148.77	0.00297	1875.54	3.140	1858.54	3.110
1021	2341.74	3.628	168.32	0.00336	2173.41	3.624	2156.41	3.595
1031	2257.13	3.491	167.32	0.00334	2089.80	3.488	2070.71	3.455
1041	2279.22	3.662	94.86	0.00189	2184.36	3.660	2167.36	3.631
1051	2016.93	3.019	209.86	0.00419	1807.07	3.014	1798.21	2.998
1061	2555.01	3.848	258.74	0.00517	2296.26	3.843	2292.06	3.835
1071	1752.79	2.665	161.08	0.00322	1591.71	2.662	1572.27	2.629
1081	2837.97	4.518	132.05	0.00264	2705.92	4.516	2677.77	4.467
1091	3550.25	4.782	244.66	0.00489	3305.58	4.777	2101.67	3.506
1101	1904.48	3.026	96.6	0.00193	1807.88	3.024	1708.61	2.851

Усвајају се критеријуми за оцену путање на основу пута и времена обраде:

- К7: Минималан укупни пут глодања и
- К8: Минимално укупно време глодања.

Повећањем силе резања, повећава се хабање алата што доводи до смањења постојаности алата. Сила резања утиче и на стабилност процеса обраде, посебно њене варијације дуж путање. Циљ је смањити вредност средње силе резања и одступања од средње вредности (табела 7.4).

Табела 7.4 – Средња вредност силе и средње аритметичко одступање силе од средње вредности за 10 различитих путања алата

NC програм	Fsr (помоћно кретање) [N]	Fod (помоћно кретање) [N]	Fsr (радни ход)[N]	Fod (радни ход) [N]
1011	591.047	83.713	596.659	75.31
1021	425.71	169.519	429.168	168.19
1031	443.644	166.811	447.937	164.796
1041	431.934	168.354	435.767	166.76
1051	605.364	61.183	608.341	56.751
1061	432.163	154.262	433.069	153.901
1071	597.825	86.212	605.66	73.391
1081	369.46	182.693	373.371	180.805
1091	355.526	287.178	547.516	149.488
1101	511.285	188.942	541.218	155.999

Усвајају се критеријуми за оцену путање на основу укупне силе резања:

- К9: Минимална средња сила резања при помоћном кретању,
- К10: Минимално одступање свих вредности сила резања од средње вредности силе резања.

На основу дефинисаних критеријума, применом вишекритеријумске анализе бира се најадекватнија путања алата за изабрани пример обраде унутрашње контуре.

7.3. Избор најадекватније путање алата

У циљу решавања проблема који укључују истовремено различите циљеве, као што је случај са примером путање алата која би требало да испуни више захтева, примењују се методе вишекритеријумског одлучивања.

7.3.1. Вишекритеријумско одлучивање

Свака одлука коју донесемо укључује истовремено сагледавање из различитих углова, некад свесно, некад несвесно [96]. Циљ вишекритеријумског одлучивања је смањивање субјективности у процесу доношења одлука. Иако се субјективност не може у потпуности елиминисати [97], њеним експлицитним исказивањем се повећава транспарентност процеса доношења одлуке. С обзиром на широк спектар примене, развијени су бројни приступи решавању проблема вишекритеријумским одлучивањем.

У такозваној француској школи примењују су флексибилне методе засноване на моделирању приоритета [98] које не претпостављају упоредивост алтернатива, не захтевају хијерархијску структуру критеријума и не захтевају математичку функцију за моделирање аналитичке подршке процесу доношења одлуке.

Прва метода француске школе је из фамилије ELECTRE (*ELECTRE - Elimination Et Choix Traduisant la Réalité*), и еволуирала је у неколико верзија (ELECTRE I-IV). Овде ће се применити основна верзија ове методе, због једноставности процедуре и примене, а у циљу илустрације могућности примене вишекритеријумског одлучивања у избору оптималне путање алата. Поступак примене методе је итеративан и процедура се састоји од 9 корака.

7.3.2. Примена вишекритеријумског одлучивања при избору наједекватније путање алата

На основу критеријума дефинисаних у потпоглављу 7.2 формира се почетна матрица одлучивања (слика 7.34)

Broj kriterijuma: 10 Broj alternativa: 10

Uslovi: min, max, min, min, min, min, min, min, min, min

	Kriterijum_1	Kriterijum_2	Kriterijum_3	Kriterijum_4	Kriterijum_5	Kriterijum_6	Kriterijum_7	Kriterijum_8	Kriterijum_9	Kriterijum_10
Alternativa_1	5.67000	47.48000	14.17000	37.28000	0.00000	0.94000	2024.32000	3.14000	591.05000	83.71000
Alternativa_2	4.70000	50.77000	10.73000	22.83000	27.60000	0.81000	2341.74000	3.63000	425.71000	169.52000
Alternativa_3	2.14000	51.45000	10.81000	46.08000	15.16000	0.96000	2257.14000	3.49000	443.64000	166.81000
Alternativa_4	4.44000	49.52000	9.72000	48.64000	13.13000	0.88000	2279.23000	3.66000	431.93000	168.35000
Alternativa_5	1.48000	47.89000	14.04000	40.62000	0.02000	0.49000	2016.94000	3.02000	605.36000	61.18000
Alternativa_6	8.00000	47.08000	9.85000	61.85000	7.36000	0.21000	2555.01000	3.85000	432.16000	154.26000
Alternativa_7	5.50000	21.53000	19.71000	78.72000	0.00000	1.29000	1752.79000	2.67000	597.83000	86.21000
Alternativa_8	8.51000	6.87000	6.83000	22.40000	0.00000	1.06000	2837.97000	4.52000	369.46000	182.69000
Alternativa_9	43.57000	0.12000	0.12000	47.15000	0.00000	35.12000	3550.25000	4.78000	355.53000	287.18000
Alternativa_10	12.47000	30.06000	30.06000	61.57000	1.11000	5.59000	1904.49000	3.03000	511.29000	188.94000

Težinski faktori: 0.05000, 0.10000, 0.15000, 0.05000, 0.10000, 0.05000, 0.05000, 0.10000, 0.15000, 0.20000

I korak: Izracunavanje normalizovane matrice N ; II korak: Izracunavanje težinske normalizovane matrice odlucivanja

Слика 7.34. Почетна матрица одлучивања

У припремној фази потребно је квантификовати све критеријуме. Пошто су у овом случају сви критеријуми квантитативно изражени, квантификована матрица ће имати исти облик као почетна матрица одлучивања.

Корак 1: Израчунавање нормализоване матрице одлучивања (N)

Прво је потребно за сваки критеријум из квантификоване матрице одлучивања, израчунати његову норму, (овде се норма израчунава као квадратни корен збира квадрата елемената посматраног вектора), и то следећом формулом:

$$norma_j = \sqrt{\sum_{i=1}^m x_{ij}^2}. \quad (7.1)$$

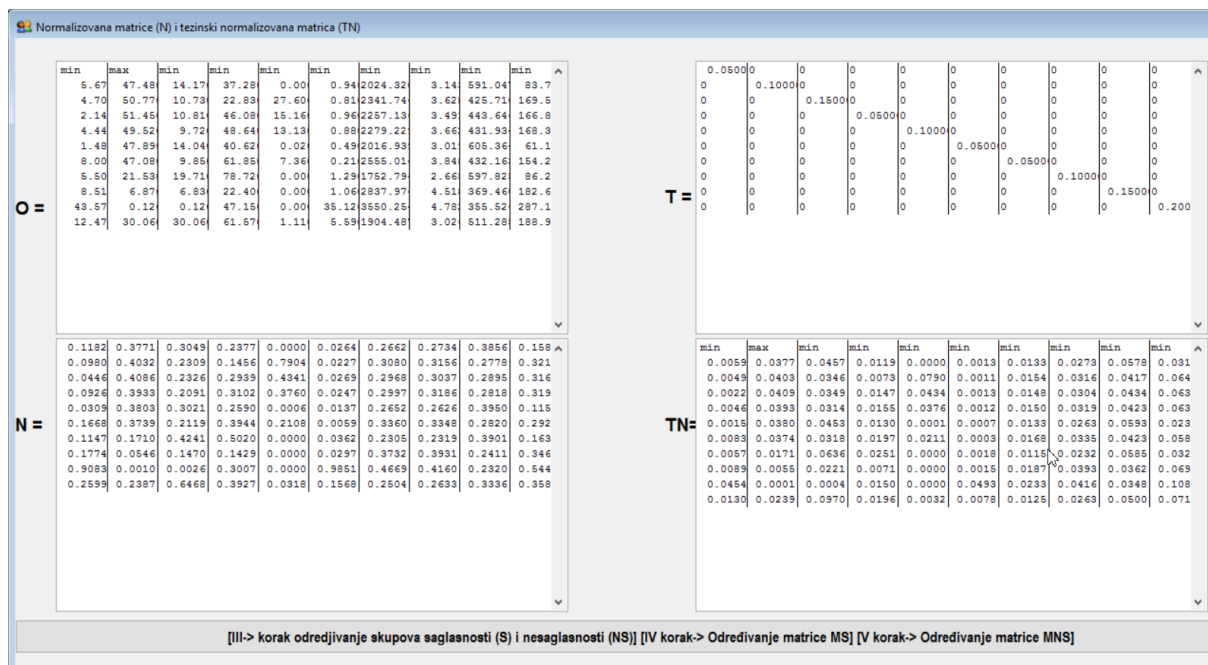
Потом се рачунају нормализовани елементи матрице одлучивања (слика 7.34), тако што се сваки елемент вектора критеријума подели са нормом тог критеријума (вектора), односно:

$$n_{ij} = \frac{x_{ij}}{norma_j}, \quad (7.2)$$

где је x_{ij} – вредност акције a_i , $i = \overline{1, m}$; у односу на критеријум f_j , $j = \overline{1, n}$.

Корак 2: Израчунавање тежински нормализоване матрице одлучивања (TN)

У овом кораку, доносилац одлуке активно учествује у процедури решавања проблема и одређује (дефинише) преференце, односно тежине корисничких критеријума, после чега се израчунава тзв. тежински нормализована матрица одлучивања (слика 7.35).



Слика 7.35. Формирање нормализоване матрице и тежинске нормализоване матрице

На основу матрице тежинских елемената (Т) и нормализоване матрице одлучивања (N), тежинска нормализована матрица (TN) одлучивања израчунава се множењем поменуте две, односно:

$$TN = N * T. \quad (7.3)$$

Корак 3: Одређивање скупова сагласности и несагласности (S) и (NS)

У овом кораку, упоређују се парови акција, обележиће се са p и r ($p, r = \overline{1, m}$ и $p \neq r$). Прво се формира тзв. скуп сагласности, S_{pr} за акције a_p и a_r , који се састоји од свих критеријума ($j = j \mid j=1, \dots, n$), за које је акција a_p пожељнија од акције a_r , односно:

$$S_{pr} = (j \mid x_{pj} \geq x_{rj}). \quad (7.4)$$

Уколико се ради о критеријуму типа минимизације, знак неједнакости је супротан (\leq).

Потом се формира комплементарни скуп, тзв. скуп несагласности, израчунат по следећој релацији:

$$NS_{pr} = (j \mid x_{pj} < x_{rj}), \quad (7.5)$$

водећи рачуна о типу критеријума. Ако је исти типа минимизације знак неједнакости је супротан ($>$). Односно овај скуп је комплементаран скупу сагласности:

$$NS_{pr} = J - S_{pr}. \quad (7.6)$$

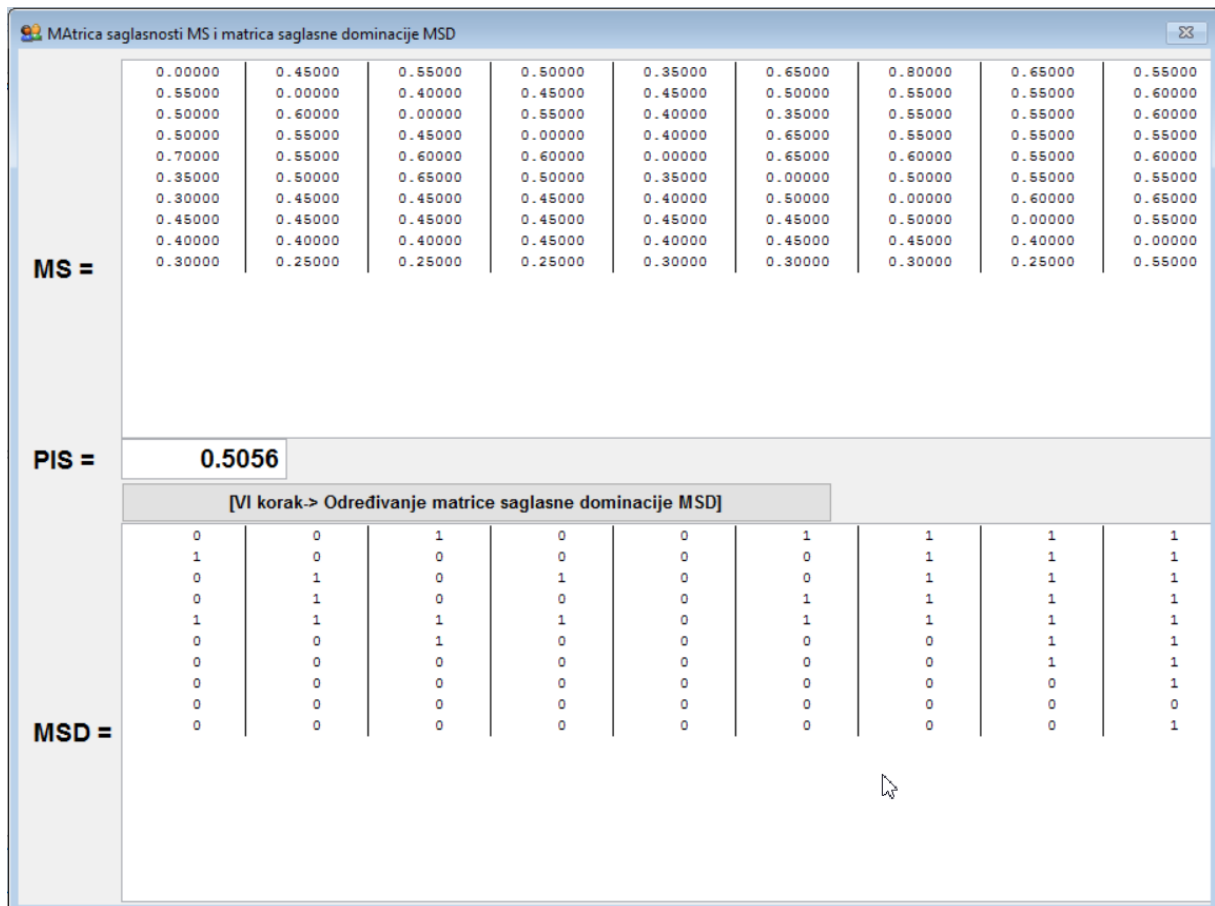
Корак 4: Одређивање матрице сагласности (MS)

Матрица сагласности се одређује на основу скупа сагласности у моделу, а елементе матрице сагласности чине тзв. индекси сагласности. Њихова вредност се рачуна као сума преференција (тежинских коефицијената), које одговарају припадајућим елементима скупова сагласности.

Тако се индекс сагласности S_{pr} за акције a_p и a_r , дефинише:

$$MS_{pr} = \sum_{j \in S_{pr}} t_j, \quad (7.7)$$

а S_{pr} узима вредност из $0 \leq S_{pr} \leq 1$, вредност за S_{pr} указује на већу пожељност акције a_p у односу на акцију a_r (према критеријуму сагласности). Индекси сагласности формирају тзв. матрицу сагласности (слика 7.36) која је димензија $m \times m$, са елементима на главној дијагонали једнаким нули, јер се не врши поређење акције саме са собом.



Слика 7.36. Матрица сагласности и матрица сагласне доминације

Корак 5: Одређивање матрице несагласности (MNS)

У овом кораку израчунава се тзв. индекс несагласности и попуњава матрица несагласности (слика 7.37). Релација за израчунавање индекса несагласности гласи:

$$MNS_{pr} = \frac{\max_{j \in NS_{pr}} |tn_{pj} - tn_{rj}|}{\max_{j \in J} |tn_{pj} - tn_{rj}|}. \quad (7.8)$$

Корак 6: Одређивање матрице сагласне доминације (MSD)

Ова матрица се попуњава на основу вредности тзв. прага индекса сагласности, који се може дефинисати као просечни индекс сагласности, израчунат по следећој релацији:

$$PIS = \frac{1}{m(m-1)} \sum_{p=1}^m \sum_{r=1}^m MS_{pr}. \quad (7.9)$$

Матрица сагласне доминације (слика 7.37) израчунава се на основу следећег критеријума:

$MSD_{pr} = 1$, за $MS_{pr} \geq PIS$,

$MSD_{pr} = 0$, за $MS_{pr} < PIS$.

Mатрица несагласности MSN i матрица несагласне доминације MNSD

MNS =	0.00000	0.20380	0.33180	0.41223	1.00000	0.57836	0.19903	0.62993	0.58755	0.15205
	1.00000	0.00000	1.00000	1.00000	1.00000	1.00000	1.00000	1.00000	1.00000	1.00000
	1.00000	0.20787	0.00000	1.00000	1.00000	1.00000	1.00000	1.00000	0.90417	0.64734
	1.00000	0.19807	0.41379	0.00000	1.00000	1.00000	1.00000	1.00000	0.78170	0.52439
	0.17647	0.22307	0.36721	0.41872	0.00000	0.48159	0.14833	0.50435	0.52453	0.17988
	1.00000	0.21416	0.27354	0.25455	1.00000	0.00000	0.81132	0.66144	0.62425	0.27454
	1.00000	0.36709	0.66129	0.85638	1.00000	1.00000	0.00000	1.00000	0.83049	0.21851
	1.00000	0.44051	0.81567	0.89894	1.00000	1.00000	0.87952	0.00000	0.45397	0.24566
	1.00000	0.61013	1.00000	1.00000	1.00000	1.00000	1.00000	1.00000	0.00000	0.42961
	1.00000	0.82322	1.00000	1.00000	1.00000	1.00000	1.00000	1.00000	1.00000	0.00000

PINS = 0.7382

[VII korak -> Određivanje matrice nesaglasne dominacije MNSD]

MNSD =	0	1	1	1	0	1	1	1	1	1
	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	0	1	0	0	0	0	0	0	0	1
	0	1	1	0	0	0	0	0	0	1
	1	1	1	1	0	1	1	1	1	1
	0	1	1	1	0	0	0	1	1	1
	0	1	1	0	0	0	0	0	0	1
	0	1	0	0	0	0	0	0	1	1
	0	1	0	0	0	0	0	0	0	1
	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

Слика 7.37. Матрица несагласности и матрица несагласне доминације

Корак 7: Одређивање матрице несагласне доминације (MNSD)

Ова матрица се израчунава аналогно MSD, односно, најпре се израчуна просечан индекс несагласности, следећом релацијом:

$$PINS = \frac{1}{m(m-1)} \sum_{p=1}^m \sum_{r=1}^m MNS_{pr}. \quad (7.10)$$

Матрица несагласне доминације (слика 7.38) израчунава се на основу следећег критеријума:

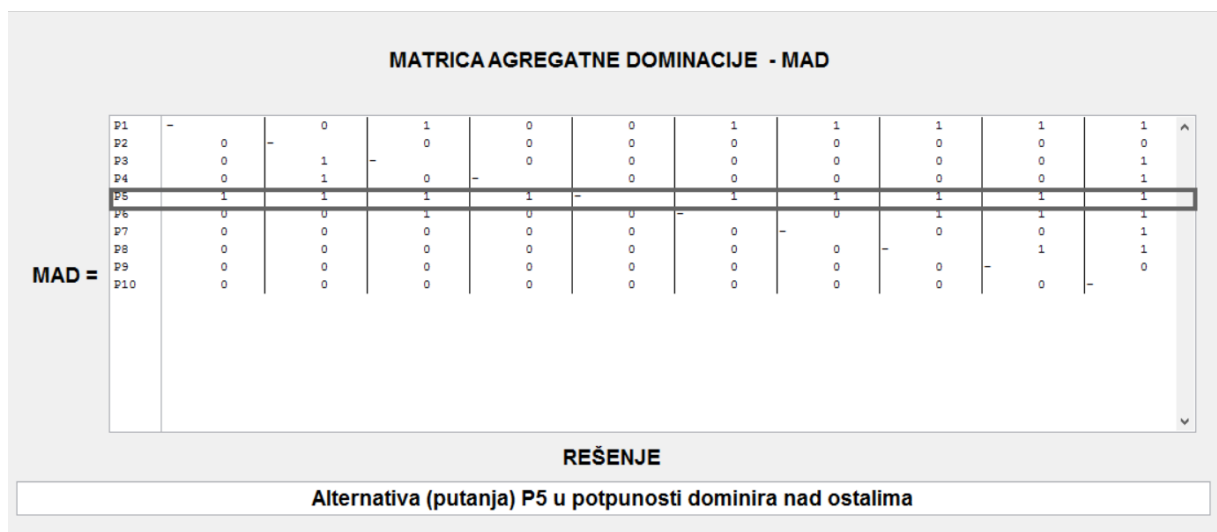
$MNSD_{pr} = 1$, за $MNS_{pr} \leq PINS$,

$MNSD_{pr} = 0$, за $MNS_{pr} > PINS$.

Корак 8: Одређивање матрице агрегатне доминације (MAD)

Производ елемената матрице сагласне и несагласне доминације, боље речено, позиција елемената поменутих матрица (не ради се о класичном матричном рачуну), представља начин израчунавања елемената MAD (слика 7.38):

$$MAD_{pr} = MSD_{pr} * MNSD_{pr}. \tag{7.11}$$



Слика 7.38. Матрица агрегатне доминације и утврђивање решења

Корак 9: Елеминисање мање пожељних акција

Анализом матрице доминације се види да алтернатива 5 у потпуности доминира над осталим, те се путања добијена NC програмом 5 може сматрати најприхватљивијом.

Програм за примену методе ELECTRE за вишекритеријумско одлучивање реализован је у програму Visual FoxPro.

7.4. Закључне напомене

На примеру 10 различитих путања алата генерисаних САМ системима и ручним програмирањем, показана је примена програмског система за праћење елемената и фактора обраде у дефинисању критеријума за оцену и избору најприхватљивије путање.

За једну карактеристичну унутрашњу контуру, применом два САМ система и ручног програмирања, генерисано је 10 различитих путања алата, ради илустрације разноликости могућих избора путање алата. У оквиру једног САМ система, избором различитих опција, могао се генерисати и већи број различитих путања алата. Сви NC програми учитани су у програмски систем. Приказан је положај алата у тачкама промене правца кретања и изглед обратка после завршеног процеса обраде. Показало се да сви NC програми омогућују остваривање геометријски тачне контуре обратка, без колизије алата и обратка. Одређене

су вредности: дубине резања, ширине резања, угла захвата, брзине помоћног кретања, броја обртаја, корака и сила резања дуж путање алата. Промене елемената и фактора обраде приказане су графички (у 7. поглављу за NC програм 1, а у Прилогу за остале NC програме) и уписане у табеле базе података.

Дефинисано је 10 различитих критеријума за оцену адекватности путања алата на основу четири показатеља: дубине резања, врсте глодања, укупног пута и времена обраде и укупне силе резања. Према задатим критеријумима формиране су табеле које садрже потребне податке за оцену адекватности путања алата. Напомиње се да је и број критеријума могао бити већи, али су за илустрацију проблема избора најадекватније путање алата довољни критеријуми дефинисани у дисертацији. На пример, могла се израчунати производност према моделу приказаном потпоглављу 3.4 и увести максимална производност и њена минимална промена дуж путање алата као још два критеријума.

Према појединачним критеријумима најбоље путање алата су:

- према K1: NC програм 5,
- према K2: NC програм 2,
- према K3: NC програм 9,
- према: NC програм 8,
- према K5: NC програми 1, 7, 8 и 9,
- према K6: NC програм 6,
- према K7: NC програм 7,
- према K8: NC програм 7,
- према K9: NC програм 9 и
- према K2: NC програм 5.

Пошто су различите путање алата најбоље оцењене према различитим критеријумима, за избор најадекватније путање алата узимајући у обзир све критеријуме, примењено је вишекритеријумско одлучивање. Методом ELECTRE, утврђено је да путања генерисана NC програм 5 у највећој мери испуњава све задате критеријуме за оцену адекватности путање алата.

Интеграцијом програмског система за праћење елемената и фактора обраде дуж путање алата, приказаног у поглављу 5, и методологије за избор најадекватније путање алата, приказане у овом поглављу, са САМ системима, омогућило би се генерисање најадекватније путање алата. Пројектанти технологије не би морали да се ослањају само на своје знање и искуство, већ би могли да унапред провере какве резултате ће дати примена изабране стратегије обраде.

ПОГЛАВЉЕ

8

ЗАКЉУЧАК

У савременом пројектовању технолошких процеса применом САМ система, инжењерске активности подразумевају дефинисање редоследа технолошких операција, избор геометрије алата и одређивање елемената режима резања, док се путања алата аутоматски генерише на основу изабране стратегије обраде, преузимањем параметара геометријског модела обратка из САД система. Избором стратегије обраде и различитих опција које су понуђене у САМ системима, пројектанти СНС технологије одређују и облик путање алата, који не гарантује испуњење свих потребних технолошких захтева оптималне путање алата при контурној обради великим брзинама резања. Пошто свака од могућих путања алата има различите техноекономске показатеље, у докторској дисертацији је развијен модел избора оптималне путање, на бази дефинисаних критеријума промене дубине и ширине резања дуж путање алата, смера глодања при захвату алата са обратком, укупне дужине путање алата, времена резања и интензитета и варијације силе резања током процеса обраде. На овај начин је елиминисан утицај искуства пројектанта технологије на техноекономске показатеље процеса контурног глодања, који је до сада увек био у значајној мери присутан код примене савремених САМ система.

Анализом процеса обимног глодања утврђено је да су дубина и ширина резања и угао захвата кључни елементи обраде који зависе од путање алата и утичу на главне факторе обраде. Развијен је и софтверски имплементиран оригиналан програмски систем за праћење елемената и главних фактора обраде дуж путање алата при контурном глодању великим брзинама резања, који технолошке, кинематичке и геометријске податке из блокова СС програма аутоматски трансформише у табеле релационе базе технолошких података. Програмски систем омогућава да се израчунавају сви параметри кретања алата који су потребни за аутоматско генерисање путање и начина кретања алата током контурног глодања. Геометрија припремка се задаје у облику *bitmap* слике на основу које се припремак матрично описује. Према подацима из СС програма матрично се описују и алати. На бази трансформисаних података о кретању алата из СС програма и матричног описа припремка и алата, генерише се међусобни положај алата у односу на припремак дуж путање. Затим се прерачунава матрица обратка у сваком положају алата на путањи и израчунавају се елементи процеса резања, на основу којих се могу пратити промене дубине и ширине резања и угла захвата током процеса резања у свакој тачки путање алата.

На основу података о правцу и промени правца кретања алата и програмираних вредности корака, одређен је профил корака и трапезоидни профил брзине помоћног кретања дуж путање алата. Према одређеним геометријским подацима о углу захвата и ширини резања и кинематским подацима о начину и брзини кретања алата одређене су компоненте силе резања применом два различита модела.

Ваљаност програма за праћење елемената и фактора обраде потврђена је на примерима аналитички или поређењем са расположивим резултатима симулације и експеримента из литературе [66].

Развијени су критеријуми за оцену адекватности путање алата према више различитих технолошких аспеката и применом метода вишекритеријумског одлучивања дефинисана оптимална путања алата при контурном глодању великим брзинама резања.

Применом развијеног програмског система пројектанти NC технологије могу да провере адекватност путање алата генерисане неким комерцијалним САМ пакетом или мануелно програмиране путање према стандардним NC програмима. Генерисањем путање и ажурирањем обратка може се проверити да ли ће технолошки облик бити у потпуности обрађен и да ли је добијена жељена геометрија обратка. Анализом резултата елемената и фактора обраде дуж путање алата може се утврдити да ли генерисана путања испуњава технолошке захтеве обраде. Такође, у случају недоумица око избора опција које нуде САМ пакети, у почетној фази пројектовања NC технологије може се изабрати неколико могућих стратегија обраде. Провером алтернативних решења програмским системом за праћење елемената и фактора обраде може се установити које решење је најприхватљивије у зависности од захтева који су приоритетни. Такође, програмски систем за праћење елемената и фактора обраде дуж путање алата, може се користити за анализу утицаја димензија глодала и режима резања на техноекономске показатеље обрадног процеса.

Применом развијеног програмског система и метода вишекритеријумског одлучивања пројектанти CNC технологије имају потпуно поуздан начин да утврде која путања алата обезбеђује минималне силе резања, највећу постојаност алата, минимално хабање сечива, највећу динамичку стабилност NC машине алатке или најкраће време обраде.

Посебан научни допринос остварених резултата у оквиру докторске дисертације је могућност примене развијеног модела дефинисања оптималне путање алата на обратцима неправилног облика. До сада су методе моделирања зоне захвата углавном развијане за призматичне обратке, док методологија која је развијена у оквиру ове докторске дисертације за препознавање припремка као растеризоване слике, ствара могућност примене на комплекснијим геометријским и просторно сложеним облицима припремка добијеним неком претходном методом обраде обликовањем.

Развијени модели се могу успешно применити и при обради дрвета и других конструкционих машинских материјала у циљу оптимизације обрадних процеса током обраде сложених контурних површина [99].

Применом различитих критеријума и метода оптимизације добијају се различита решења за оптималну путању алата. Резултати оптимизације се могу проверити и потврдити применом програмског система за праћење елемената и фактора обраде.

У будућем раду, планира се увођење профила брзине помоћног кретања који узима у обзир „трзај“ и боље описује стварно понашање од примењеног трапезоидног модела. Очекује се да се експерименталним истраживањима додатно потврди адекватност примењених метода за моделирање силе резања.

Тренутна истраживања су усмерена на додатно повећање тачности моделирања зоне захвата независно од поделе мреже припремка.

Знања и искуства стечена у изради докторске дисертације примениће се и у развоју методе за генерисање путање алата и оптимизацију облика путање према различитим критеријумима. Развијени програмски систем за праћење елемената и фактора обраде користиће се за верификацију добијених резултата.

Литература

- [1] **Лукић Љ.**, *Инжењерска професија у актуелном привредном амбијенту индустријске производње у Србији*, Зборник радова који су изложени на Научном скупу поводом 40 година рада Машинског факултета у Краљеву, Машински факултет Краљево, , 2010, p. 57–76
- [2] **Lukić L., Đapić M., Kolarević M.**, *Mechanical engineers in economic environment of industrial production*, IMK -14- Res. Dev. Heavy Mach., 2013, Vol. 19, № 3, p. EN 97–104
- [3] **Zhao Z.Y., Wang C.Y., Zhou H.M., Qin Z.**, *Pocketing toolpath optimization for sharp corners*, J. Mater. Process. Technol., 2007, Vol. 192-193, p. 175–180
- [4] **Pateloup V., Duc E., Ray P.**, *Corner optimization for pocket machining*, Int. J. Mach. Tools Manuf., 2004, Vol. 44, № 12-13, p. 1343–1353, DOI:10.1016/j.ijmachtools.2004.04.011
- [5] **Daneshmand S., Abdolhosseini M.M., Aghanajafi C.**, *Investigating the Optimal Tool Path Strategies Based on Machining Time in CAD-CAM*, Aust. J. Basic Appl. Sci., 2011, Vol. 5, № 12, p. 2320–2326, DOI:ISSN 1991-8178
- [6] **Merchant M.E.**, *Mechanics of the Metal Cutting Process. I. Orthogonal Cutting and a Type 2 Chip*, J. Appl. Phys., AIP, 1945, Vol. 16, № 5, p. 267–275, DOI:10.1063/1.1707586
- [7] **Altintas Y.**, *Manufacturing Automation: Metal Cutting Mechanics, Machine Tool Vibrations, and CNC Design*, illustrate, Cambridge University Press, 2012
- [8] **Kalajdžić M.**, *Tehnologija mašinogradnje*, osmo izdanje, Mašinski fakultet Univerziteta u Beogradu, Beograd, 2002
- [9] **Li H.Z., Zhang W.B., Li X.P.**, *Modelling of cutting forces in helical end milling using a predictive machining theory*, Int. J. Mech. Sci., 2001, Vol. 43, № 8, p. 1711–1730, DOI:10.1016/S0020-7403(01)00020-0
- [10] **Li X., Nee A.Y., Wong Y., Zheng H.**, *Theoretical modelling and simulation of milling forces*, J. Mater. Process. Technol., 1999, Vol. 89-90, p. 266–272, DOI:10.1016/S0924-0136(99)00076-X
- [11] **Zaghbani I., Songmene V.**, *A force-temperature model including a constitutive law for Dry High Speed Milling of aluminium alloys*, J. Mater. Process. Technol., 2009, Vol. 209, № 5, p. 2532–2544, DOI:10.1016/j.jmatprotec.2008.05.050
- [12] **Altıntaş Y., Lee P.**, *A General Mechanics and Dynamics Model for Helical End Mills*, CIRP Ann. - Manuf. Technol., 1996, Vol. 45, № 1, p. 59–64, DOI:10.1016/S0007-8506(07)63017-0
- [13] **Perez H., Diez E., Marquez J.J., Vizan A.**, *An enhanced method for cutting force estimation in peripheral milling*, Int. J. Adv. Manuf. Technol., 2013, Vol. 69, № 5-8, p. 1731–1741, DOI:10.1007/s00170-013-5153-0
- [14] **Yoon M.C., Kim Y.G.**, *Cutting dynamic force modelling of endmilling operation*, J. Mater. Process. Technol., 2004, Vol. 155-156, № null, p. 1383–1389, DOI:10.1016/j.jmatprotec.2004.04.218
- [15] **Kim S.-J., Lee H.U., Cho D.-W.**, *Prediction of chatter in NC machining based on a dynamic cutting force model for ball end milling*, Int. J. Mach. Tools Manuf., 2007, Vol. 47, № 12-13, p. 1827–1838, DOI:10.1016/j.ijmachtools.2007.04.005

- [16] **Liu X.-W., Cheng K., Longstaff A.P., Widiyanto M.H., Ford D.**, *Improved dynamic cutting force model in ball-end milling. Part I: theoretical modelling and experimental calibration*, Int. J. Adv. Manuf. Technol., 2004, Vol. 26, № 5-6, p. 457–465, DOI:10.1007/s00170-003-2014-2
- [17] **Peigne G., Paris H., Brissaud D., Gousskov A.**, *Impact of the cutting dynamics of small radial immersion milling operations on machined surface roughness*, Int. J. Mach. Tools Manuf., 2004, Vol. 44, № 11, p. 1133–1142, DOI:10.1016/j.ijmachtools.2004.04.012
- [18] **Altintas Y., Engin S.**, *Generalized Modeling of Mechanics and Dynamics of Milling Cutters*, CIRP Ann. - Manuf. Technol., 2001, Vol. 50, № 1, p. 25–30, DOI:10.1016/S0007-8506(07)62063-0
- [19] **Matsubara A., Ibaraki S.**, *Monitoring and Control of Cutting Forces in Machining Processes: A Review*, Int. J. Autom. Technol., 2009, Vol. 3, № 4, p. 445–456
- [20] **Hou J., Zhou W., Duan H., Yang G., Xu H., Zhao N.**, *Influence of cutting speed on cutting force, flank temperature, and tool wear in end milling of Ti-6Al-4V alloy*, Int. J. Adv. Manuf. Technol., 2013, Vol. 70, № 9-12, p. 1835–1845, DOI:10.1007/s00170-013-5433-8
- [21] **Wojciechowski S., Twardowski P.**, *Tool Life and Process Dynamics in High Speed Ball End Milling of Hardened Steel*, Procedia CIRP, 2012, Vol. 1, p. 289–294, DOI:10.1016/j.procir.2012.04.052
- [22] **Li H.Z., Zeng H., Chen X.Q.**, *An experimental study of tool wear and cutting force variation in the end milling of Inconel 718 with coated carbide inserts*, J. Mater. Process. Technol., 2006, Vol. 180, № 1-3, p. 296–304, DOI:10.1016/j.jmatprotec.2006.07.009
- [23] **Sun Y., Sun J., Li J., Li W., Feng B.**, *Modeling of cutting force under the tool flank wear effect in end milling Ti6Al4V with solid carbide tool*, Int. J. Adv. Manuf. Technol., 2013, Vol. 69, № 9-12, p. 2545–2553, DOI:10.1007/s00170-013-5228-y
- [24] **Saglam H., Yaldiz S., Unsacar F.**, *The effect of tool geometry and cutting speed on main cutting force and tool tip temperature*, Mater. Des., 2007, Vol. 28, № 1, p. 101–111, DOI:10.1016/j.matdes.2005.05.015
- [25] **Tian X., Zhao J., Zhao J., Gong Z., Dong Y.**, *Effect of cutting speed on cutting forces and wear mechanisms in high-speed face milling of Inconel 718 with Sialon ceramic tools*, Int. J. Adv. Manuf. Technol., 2013, Vol. 69, № 9-12, p. 2669–2678, DOI:10.1007/s00170-013-5206-4
- [26] **Longbottom J.M., Lanham J.D.**, *A review of research related to Salomon's hypothesis on cutting speeds and temperatures*, Int. J. Mach. Tools Manuf., 2006, Vol. 46, № 14, p. 1740–1747, DOI:10.1016/j.ijmachtools.2005.12.001
- [27] **Lee K.-J., Lee T.-M., Yang M.-Y.**, *Tool wear monitoring system for CNC end milling using a hybrid approach to cutting force regulation*, Int. J. Adv. Manuf. Technol., 2006, Vol. 32, № 1-2, p. 8–17, DOI:10.1007/s00170-005-0350-0
- [28] **Ibaraki S., Shimizu T.**, *A long-term control scheme of cutting forces to regulate tool life in end milling processes*, Precis. Eng., 2010, Vol. 34, № 4, p. 675–682, DOI:10.1016/j.precisioneng.2010.05.001
- [29] **Quintana G., Ciurana J.**, *Chatter in machining processes: A review*, Int. J. Mach. Tools Manuf., 2011, Vol. 51, № 5, p. 363–376, DOI:10.1016/j.ijmachtools.2011.01.001

- [30] **Altıntaş Y., Budak E.**, *Analytical Prediction of Stability Lobes in Milling*, CIRP Ann. - Manuf. Technol., 1995, Vol. 44, № 1, p. 357–362
- [31] **Altıntaş Y., Shamoto E., Lee P., Budak E.**, *Analytical Prediction of Stability Lobes in Ball End Milling*, J. Manuf. Sci. Eng., American Society of Mechanical Engineers, 1999, Vol. 121, № 4, p. 586, DOI:10.1115/1.2833064
- [32] **Altintas Y., Stepan G., Merdol D., Dombovari Z.**, *Chatter stability of milling in frequency and discrete time domain*, CIRP J. Manuf. Sci. Technol., 2008, Vol. 1, № 1, p. 35–44, DOI:10.1016/j.cirpj.2008.06.003
- [33] **Quintana i Badosa G.**, *Stability lobes diagram identification and surface roughness monitoring in milling processes*, Doktorska disertacija, Universitat de Girona, Girona, Spain, 2010
- [34] **Rott O.**, *Simulation and Stability of Milling Processes*, Doktorska disertacija, Universitätsbibliothek der Technischen Universität Berlin, Berlin, Germany, 2011
- [35] **Quintana G., Ciurana J., Ferrer I., Rodríguez C.A.**, *Sound mapping for identification of stability lobe diagrams in milling processes*, Int. J. Mach. Tools Manuf., 2009, Vol. 49, № 3-4, p. 203–211, DOI:10.1016/j.ijmachtools.2008.11.008
- [36] **Quintana G., Ciurana J., Teixidor D.**, *A new experimental methodology for identification of stability lobes diagram in milling operations*, Int. J. Mach. Tools Manuf., 2008, Vol. 48, № 15, p. 1637–1645, DOI:10.1016/j.ijmachtools.2008.07.006
- [37] **Altintas Y., Khoshdarregi M.R.**, *Contour error control of CNC machine tools with vibration avoidance*, CIRP Ann. - Manuf. Technol., 2012, Vol. 61, № 1, p. 335–338, DOI:10.1016/j.cirp.2012.03.132
- [38] **Aggarwal S.**, *Part Programming to Realize Chatter Free and Efficient High Speed Milling*, Doktorska disertacija, EPFL, Lausanne, Switzerland, 2012, DOI:10.5075/epfl-thesis-5549
- [39] **N.J.M. van Dijk**, *Active chatter control in high-speed milling processes*, Doktorska disertacija, Technische Universiteit Eindhoven, Eindhoven, Netherlands, 2011, 180 p.
- [40] **R.P.H. Faassen**, *Chatter prediction and control for high-speed milling: modelling and experiments*, Doktorska disertacija, Technische Universiteit Eindhoven, Eindhoven, Netherlands, 2007, 144 p.
- [41] **Yusoff A.**, *Optimisation of variable helix end milling tools*, Doktorska disertacija, University of Sheffield, Sheffield, England, UK, 2010
- [42] **Lin Z., Fu J., He Y., Gan W.**, *A robust 2D point-sequence curve offset algorithm with multiple islands for contour-parallel tool path*, Comput. Des., 2013, Vol. 45, № 3, p. 657–670, DOI:10.1016/j.cad.2012.09.002
- [43] **Park S.C., Choi B.K.**, *Uncut free pocketing tool-paths generation using pair-wise offset algorithm*, Comput. Des., 2001, Vol. 33, № 10, p. 739–746, DOI:10.1016/S0010-4485(00)00109-3
- [44] **Narayanaswami R., Pang J.**, *Multiresolution analysis as an approach for tool path planning in NC machining*, Comput. Des., 2003, Vol. 35, № 2, p. 167–178, DOI:10.1016/S0010-4485(02)00050-7
- [45] **Park S.C., Choi B.K.**, *Tool-path planning for direction-parallel area milling*, Comput. Des.,

- 2000, Vol. 32, № 1, p. 17–25, DOI:10.1016/S0010-4485(99)00080-9
- [46] **Park S.C., Chung Y.C.**, *Tool-path generation from measured data*, Comput. Des., 2003, Vol. 35, № 5, p. 467–475, DOI:10.1016/S0010-4485(02)00070-2
- [47] **Kim B.H., Choi B.K.**, *Guide surface based tool path generation in 3-axis milling: an extension of the guide plane method*, Comput. Des., 2000, Vol. 32, № 3, p. 191–199, DOI:10.1016/S0010-4485(99)00086-X
- [48] **Lo C.-C.**, *Two-stage cutter-path scheduling for ball-end milling of concave and wall-bounded surfaces*, Comput. Des., 2000, Vol. 32, № 10, p. 597–603, DOI:10.1016/S0010-4485(00)00033-6
- [49] **Chiou C.-J., Lee Y.-S.**, *A machining potential field approach to tool path generation for multi-axis sculptured surface machining*, Comput. Des., 2002, Vol. 34, № 5, p. 357–371, DOI:10.1016/S0010-4485(01)00102-6
- [50] **Ding S., Mannan M.A., Poo A.N., Yang D.C.H., Han Z.**, *Adaptive iso-planar tool path generation for machining of free-form surfaces*, Comput. Des., 2003, Vol. 35, № 2, p. 141–153, DOI:10.1016/S0010-4485(02)00048-9
- [51] **Stori J., Wright P.**, *Constant engagement tool path generation for convex geometries*, J. Manuf. Syst., 2000, Vol. 19, № 3, p. 172–184, DOI:10.1016/S0278-6125(00)80010-2
- [52] **Kloypayan J., Lee Y.-S.**, *Material engagement analysis of different endmills for adaptive feedrate control in milling processes*, Comput. Ind., 2002, Vol. 47, № 1, p. 55–76, DOI:10.1016/S0166-3615(01)00136-1
- [53] **Bae S.-H., Ko K., Kim B.H., Choi B.K.**, *Automatic feedrate adjustment for pocket machining*, Comput. Des., 2003, Vol. 35, № 5, p. 495–500, DOI:10.1016/S0010-4485(01)00195-6
- [54] **Yeh S.-S., Hsu P.-L.**, *Adaptive-feedrate interpolation for parametric curves with a confined chord error*, Comput. Des., 2002, Vol. 34, № 3, p. 229–237, DOI:10.1016/S0010-4485(01)00082-3
- [55] **Altintas Y., Erkorkmaz K.**, *Feedrate Optimization for Spline Interpolation In High Speed Machine Tools*, CIRP Ann. - Manuf. Technol., 2003, Vol. 52, № 1, p. 297–302, DOI:10.1016/S0007-8506(07)60588-5
- [56] **Ferreira J.C., Ochoa D.M.**, *A method for generating trochoidal tool paths for 2D/3D pocket milling process planning with multiple tools*, Proc. Inst. Mech. Eng. Part B J. Eng. Manuf., 2013, Vol. 227, № 9, p. 1287–1298, DOI:10.1177/0954405413487897
- [57] **Lee E.**, *Contour offset approach to spiral toolpath generation with constant scallop height*, Comput. Des., 2003, Vol. 35, № 6, p. 511–518, DOI:10.1016/S0010-4485(01)00185-3
- [58] **Kim H.-C.**, *Tool path modification for optimized pocket milling*, Int. J. Prod. Res., 2007, Vol. 45, № 24, p. 5715–5729, DOI:10.1080/00207540600919340
- [59] **López de Lacalle L.N., Lamikiz A., Sánchez J.A., Salgado M.A.**, *Toolpath selection based on the minimum deflection cutting forces in the programming of complex surfaces milling*, Int. J. Mach. Tools Manuf., 2007, Vol. 47, № 2, p. 388–400, DOI:10.1016/j.ijmachtools.2006.03.010
- [60] **Kim T., Sarma S.E.**, *Toolpath generation along directions of maximum kinematic performance; a first cut at machine-optimal paths*, Comput. Des., 2002, Vol. 34, № 6, p.

453–468, DOI:10.1016/S0010-4485(01)00116-6

- [61] **Park S.C.**, *Tool-path generation for Z-constant contour machining*, Comput. Des., 2003, Vol. 35, № 1, p. 27–36, DOI:10.1016/S0010-4485(01)00173-7
- [62] **Uddin M.S., Ibaraki S., Matsubara A., Nishida S., Kakino Y.**, *Constant Engagement Tool Path Generation to Enhance Machining Accuracy in End Milling*, JSME Int. J. Ser. C, 2006, Vol. 49, № 1, p. 43–49, DOI:10.1299/jsmec.49.43
- [63] **Wang H., Jang P., Stori J.A.**, *A Metric-Based Approach to Two-Dimensional (2D) Tool-Path Optimization for High-Speed Machining*, J. Manuf. Sci. Eng., American Society of Mechanical Engineers, 2005, Vol. 127, № 1, p. 33, DOI:10.1115/1.1830492
- [64] **Roth D., Ismail F., Bedi S.**, *Mechanistic modelling of the milling process using an adaptive depth buffer*, Comput. Des., 2003, Vol. 35, № 14, p. 1287–1303, DOI:10.1016/S0010-4485(03)00044-7
- [65] **Altintas Y., Spence A., Tlustý P.**, *End Milling Force Algorithms for CAD Systems*, CIRP Ann.-Manufacturing Technol., 1991, Vol. 40, № 1, p. 31–34
- [66] **Nesic N.**, *Modeling and Simulation of Energy Efficient Milling Process Plans for Prismatic Parts*, Doktorska disertacija, ÉCOLE POLYTECHNIQUE FÉDÉRALE DE LAUSANNE, 2012
- [67] **Merchant M.E.**, *Mechanics of the Metal Cutting Process. II. Plasticity Conditions in Orthogonal Cutting*, J. Appl. Phys., The American Institute of Physics, , 1945, Vol. 16, № 6, p. 318, DOI:10.1063/1.1707596
- [68] **Dhanik S.**, *NC Tool Path Evaluator and Generator for High Speed Milling*, Doktorska disertacija, ÉCOLE POLYTECHNIQUE FÉDÉRALE DE LAUSANNE, Lausanne, Switzerland, 2009, Vol. 4533, 201 p.
- [69] **Engin S., Altintas Y.**, *Mechanics and dynamics of general milling cutters. Part I: helical end mills*, Int. J. Mach. Tools Manuf., 2001, Vol. 41, № 15, p. 2195–2212, DOI:10.1016/S0890-6955(01)00045-1
- [70] **Budak E., Altintaş Y., Armarego E.J.A.**, *Prediction of Milling Force Coefficients From Orthogonal Cutting Data*, J. Manuf. Sci. Eng., American Society of Mechanical Engineers, , 1996, Vol. 118, № 2, p. 216, DOI:10.1115/1.2831014
- [71] **Kramer T.R.**, *Pocket Milling with Tool Engagement Detection*, J. Manuf. Syst., 1992, Vol. 11, № 2, p. 114–123
- [72] **Choi B.K., Kim B.H.**, *Die-cavity pocketing via cutting simulation*, Comput. Des., 1997, Vol. 29, № 12, p. 837–846, DOI:10.1016/S0010-4485(97)00031-6
- [73] **Yip-Hoi D., Huang X.**, *Cutter/Workpiece Engagement Feature Extraction from Solid Models for End Milling*, J. Manuf. Sci. Eng., American Society of Mechanical Engineers, , 2006, Vol. 128, № 1, p. 249, DOI:10.1115/1.1948395
- [74] **Merdol S.D., Altintas Y.**, *Virtual Simulation and Optimization of Milling Operations—Part I: Process Simulation*, J. Manuf. Sci. Eng., American Society of Mechanical Engineers, , 2008, Vol. 130, № 5, p. 051004, DOI:10.1115/1.2927434
- [75] **Bieterman M.B., Sandstrom D.R.**, *A Curvilinear Tool-Path Method for Pocket Machining*, J. Manuf. Sci. Eng., American Society of Mechanical Engineers, , 2003, Vol. 125, № 4, p. 709, DOI:10.1115/1.1596579

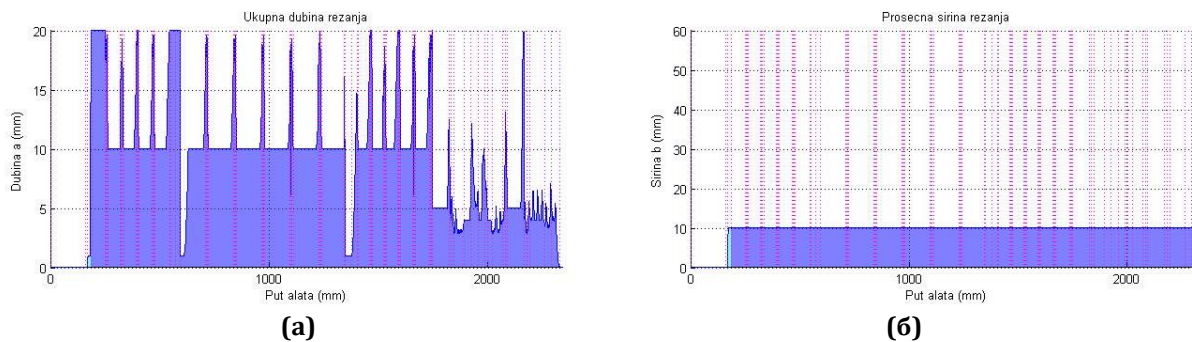
- [76] **Kim B.H., Choi B.K.**, *Machining efficiency comparison direction-parallel tool path with contour-parallel tool path*, *Comput. Des.*, 2002, Vol. 34, № 2, p. 89–95, DOI:10.1016/S0010-4485(00)00139-1
- [77] **Choy H.S., Chan K.W.**, *A corner-looping based tool path for pocket milling*, *Comput. Des.*, 2003, Vol. 35, № 2, p. 155–166, DOI:10.1016/S0010-4485(02)00049-0
- [78] **Held M.**, *VRONI: An engineering approach to the reliable and efficient computation of Voronoi diagrams of points and line segments*, *Comput. Geom.*, 2001, Vol. 18, № 2, p. 95–123, DOI:10.1016/S0925-7721(01)00003-7
- [79] **Held M., Spielberger C.**, *A smooth spiral tool path for high speed machining of 2D pockets*, *Comput. Des.*, 2009, Vol. 41, № 7, p. 539–550, DOI:10.1016/j.cad.2009.04.002
- [80] **Chuang J.-J., Yang D.C.H.**, *A laplace-based spiral contouring method for general pocket machining*, *Int. J. Adv. Manuf. Technol.*, 2006, Vol. 34, № 7-8, p. 714–723, DOI:10.1007/s00170-006-0648-6
- [81] **Uddin M.S., Ibaraki S., Matsubara A., Nishida S., Kakino Y.**, *A Tool Path Modification Approach to Cutting Engagement Regulation for the Improvement of Machining Accuracy in 2D Milling With a Straight End Mill*, *J. Manuf. Sci. Eng., American Society of Mechanical Engineers*, , 2007, Vol. 129, № 6, p. 1069, DOI:10.1115/1.2752526
- [82] <http://www.mastercam.dk/pdf/X6-Mill.pdf>; [Electronic resource]
- [83] http://www.inventorcam.com/fileadmin/PDF/EN/InventorCAM2012_iMachining_Presentation_Customer_Jan_2012.pdf; [Electronic resource]
- [84] **Petrović A., Lukić L., Bjelić M., Pljakić M.**, *Optimal Tool Path Modelling in Contour Milling Process*, 35th Int. Conf. Prod. Eng., Kopaonik, 2013, p. 263–271, ISBN 978-86-82631-69-9
- [85] **Лукић Љ.**, *Флексибилни технолошки системи*, Машински факултет Краљево, Краљево, 2008
- [86] **Ivanović S., Lukić L.**, *Database Design from Technological and Kinematic Parameters of NC Program for Production in Flexible Manufacturing System*, Sixth Trienn. Int. Conf. Heavy Mach. HM 2008, Mataruška Banja, 2008
- [87] **Ивановић С.**, *Постпроцесор генератор ЦНЦ програма у флексибилним производним системима*, Докторска дисертација, Универзитет у Крагујевцу, 2009
- [88] **Ivanović S., Lukić L.**, *Module for update of technological parameters in postprocessor generator of NC programs in flexible manufacturing system*, Seventh Trienn. Int. Conf. Heavy Mach. HM 2011, Vrnjačka Banja, 2011, p. E.25 – E.30
- [89] **Ivanović S., Lukić L., Petrović Z.**, *Реконфигурисање базе података флексибилног производног система на основу параметара из NC програма*, ИМК-14 истраживање и развој - часопис института ИМК “14. Октобар” Крушевац, 2008, Vol. 28-29, № 1-2/2008
- [90] **Petrović A., Ivanović S., Lukić L.**, *Generating Parametres from the NC Code Needed for Defining the Optimal Tool Path*, MMA 2015 - Flex. Tehnol., Novi Sad, 2015, p. 157–160
- [91] **Ivanović S., Petrović A., Lukić L.**, *Matrix blank description as part of module for machining parameters generation along the tool path for peripheral milling*, ИМК-14 – Res. Dev. Heavy Mach., 2015, Vol. 21, № 4, p. EN119–EN124, ISSN 0354-6829

- [92] **Petrović A., Ivanović S., Lukić L.**, *NC Tool Path and Its Influence on Cutting Force in Peripheral Milling Analyses*, IMK -14-Res. Dev. Heavy Mach., 2015, Vol. 21, p. 41–46, UDC 621, ISSN 0354-6829
- [93] **Kalajdžić M.**, *Tehnologija obrade rezanjem - Priručnik*, 2. izdanje, MAŠINSKI FAKULTET UNIVERZITETA U BEOGRADU, 2000
- [94] **Miao Z.**, *A fuzzy system approach of feed rate determination for CNC milling*, 2009 4th IEEE Conf. Ind. Electron. Appl., IEEE, 2009, p. 1911–1916, DOI:10.1109/ICIEA.2009.5138535
- [95] **Li Z., Zhang S.**, *Cutting Conditions Optimization of Circular Milling Based on Dynamic Modeling and Simulation*, 2010 Int. Conf. Meas. Technol. Mechatronics Autom., IEEE, , 2010, Vol. 1, p. 878–881, DOI:10.1109/ICMTMA.2010.138
- [96] **Belton V., Stewart T.**, *Multiple Criteria Decision Analysis: An Integrated Approach*, 2002
- [97] **Goodwin P., Wright G.**, *Decision Analysis for Management Judgement, 5th Edition*, Wiley, 2014, 496 p.
- [98] **Rangel L.A.D., Gomes L.F.A.M., Moreira R.A.**, *Decision theory with multiple criteria: an application of ELECTRE IV and TODIM to SEBRAE/RJ*, Pesqui. Operacional, SOBRAPO, 2009, Vol. 29, Nº 3, p. 577–590, DOI:10.1590/S0101-74382009000300007
- [99] **Petrovic A., Lukic L., Ivanovic S., Pavlovic A.**, *Optimisation of tool path for wood machining on CNC machines*, Proc. Inst. Mech. Eng. Part C J. Mech. Eng. Sci., 2016, DOI:10.1177/0954406216648715

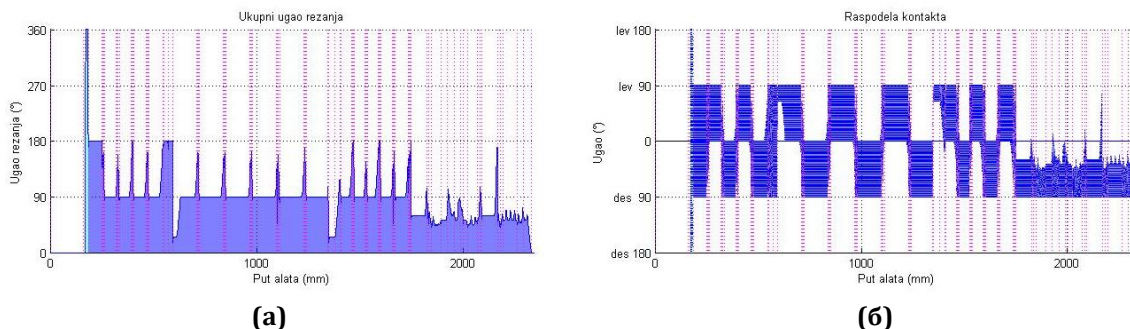
Прилог

У прилогу су приказани су дијаграми промене елемената и фактора обраде за NC програме 2-10.

Дијаграм дубине и ширине резања и угла захвата дуж путање алата за NC програм 2

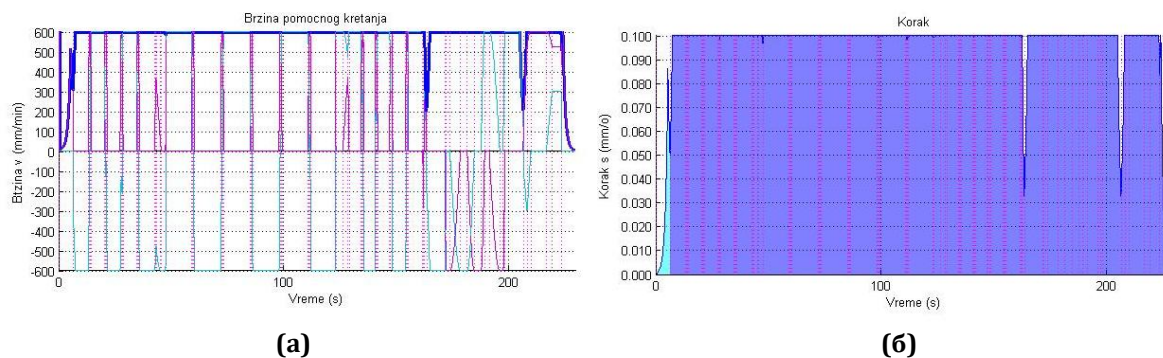


Слика П1. NC програм 2-дијаграми промене укупних вредности елемената процеса обраде: (а) дубина резања, (б) ширина резања



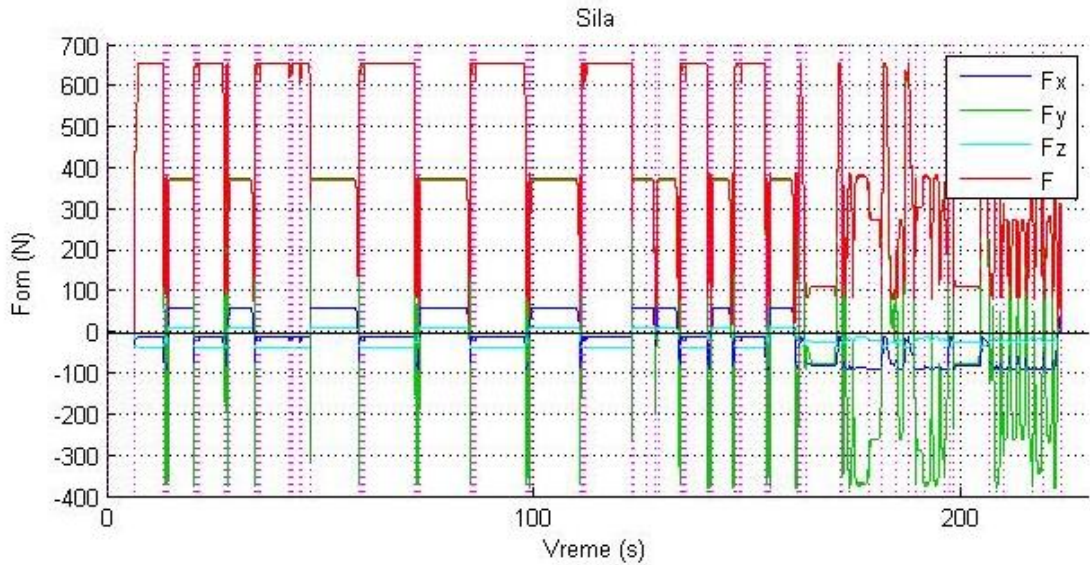
Слика П2. NC програм 2 - дијаграми промене укупних вредности елемената процеса обраде: (а) угао захвата, (б) расподела контаката

Дијаграми брзине помоћног кретања и корака током времена за NC програм 2



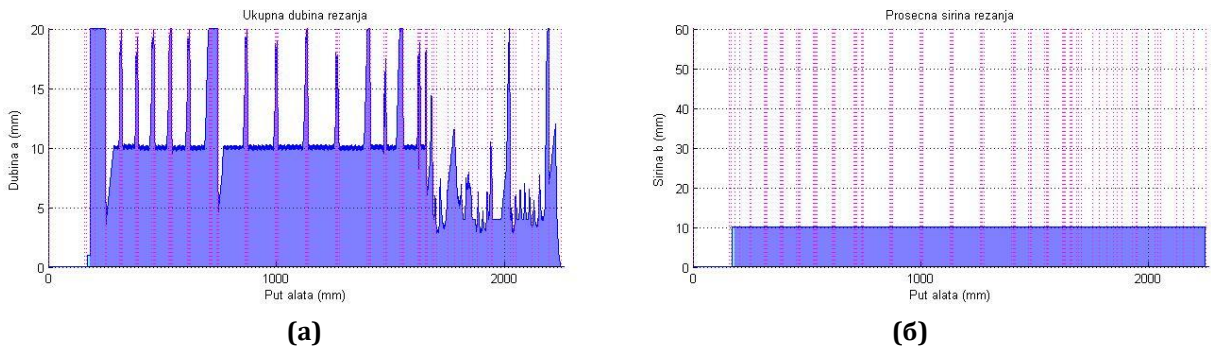
Слика П3. NC програм 2 - дијаграми промене фактора процеса обраде током времена: (а) брзина помоћног кретања, (б) корак

Дијаграм силе резања за NC програм 2

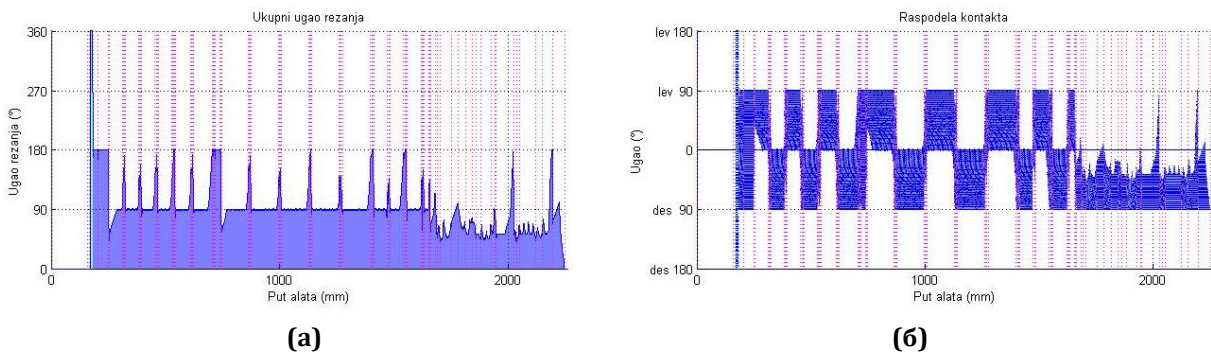


Слика П4. NC програм 2- дијаграми укупне силе резања према моделу [7]

Дијаграм дубине и ширине резања и угла захвата дуж путање алата за NC програм 3

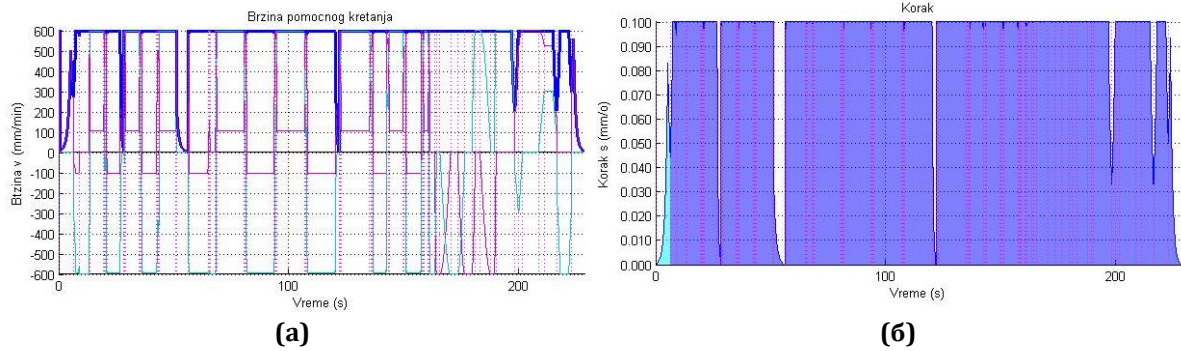


Слика П5. NC програм 3 - дијаграми промене укупних вредности елемената процеса обраде: (а) дубина резања, (б) ширина резања



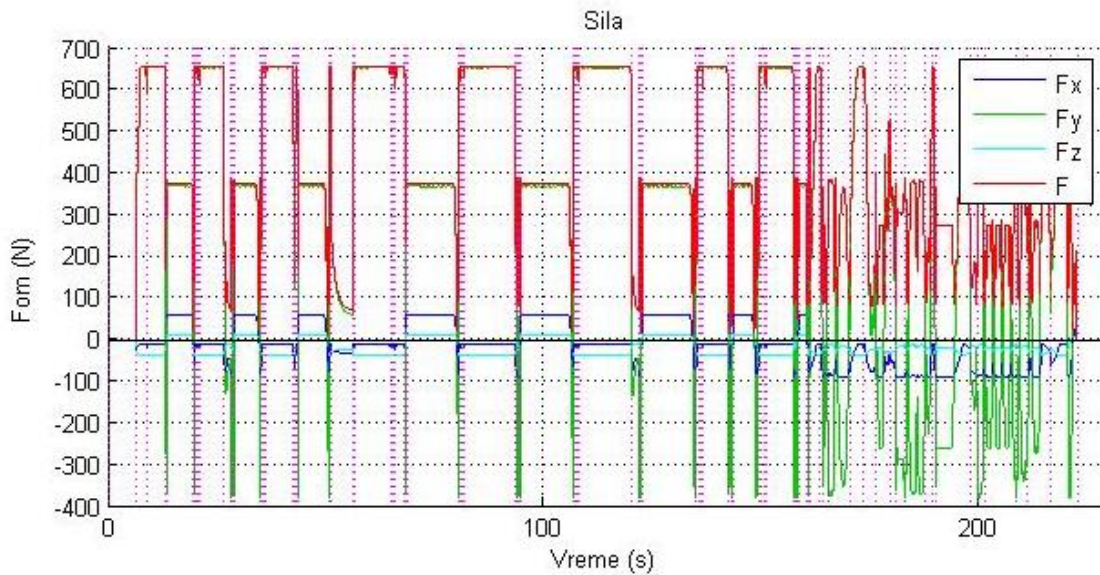
Слика П6. NC програм 3 - дијаграми промене укупних вредности елемената процеса обраде: (а) угао захвата, (б) расподела контаката

Дијаграми брзине помоћног кретања и корака током времена за NC програм 3



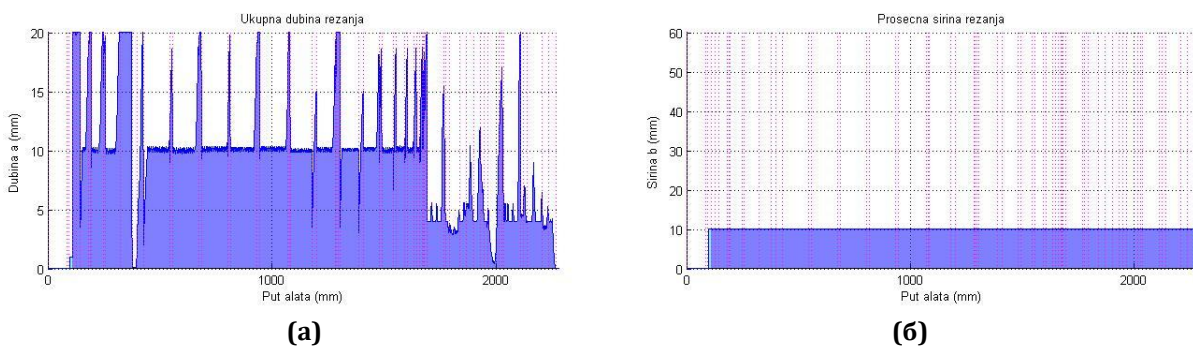
Слика П7. NC програм 2- дијаграми промене фактора процеса обраде током времена: (а) брзина помоћног кретања, (б) корак

Дијаграм силе резања за NC програм 3

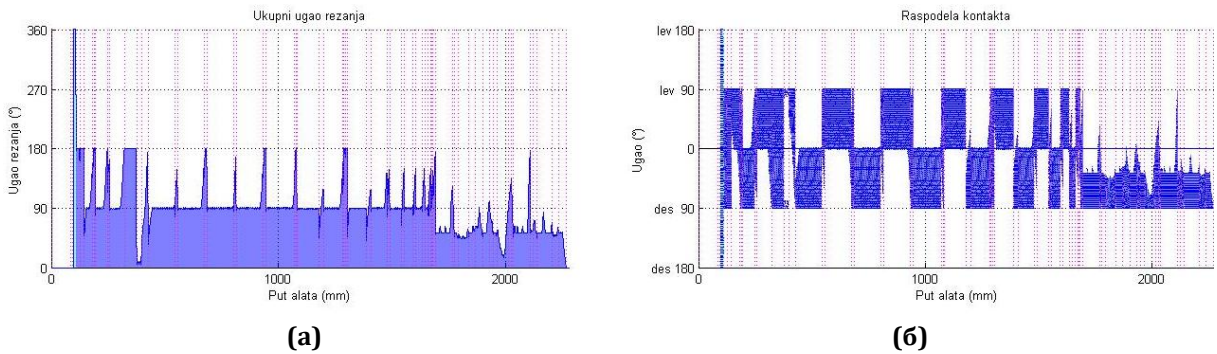


Слика П8. NC програм 3 - дијаграми укупне силе резања према моделу [7]

Дијаграм дубине и ширине резања и угла захвата дуж путање алата за NC програм 4

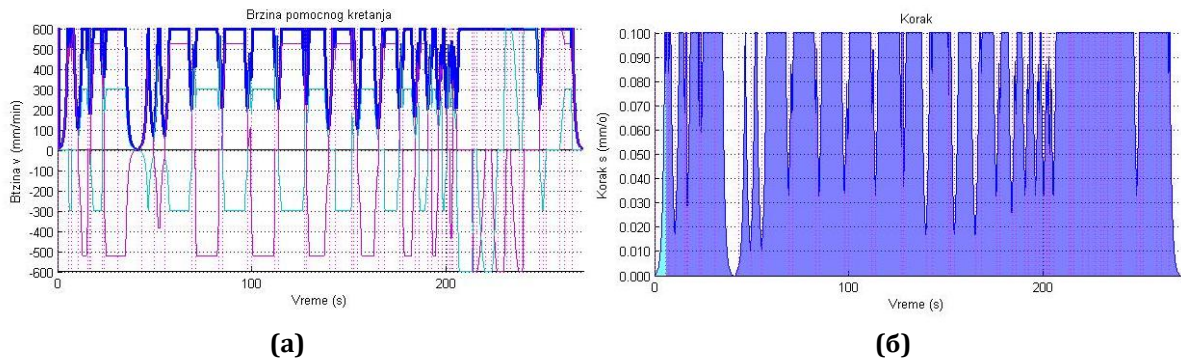


Слика П9. NC програм 4 - дијаграми промене укупних вредности елемената процеса обраде: (а) дубина резања, (б) ширина резања



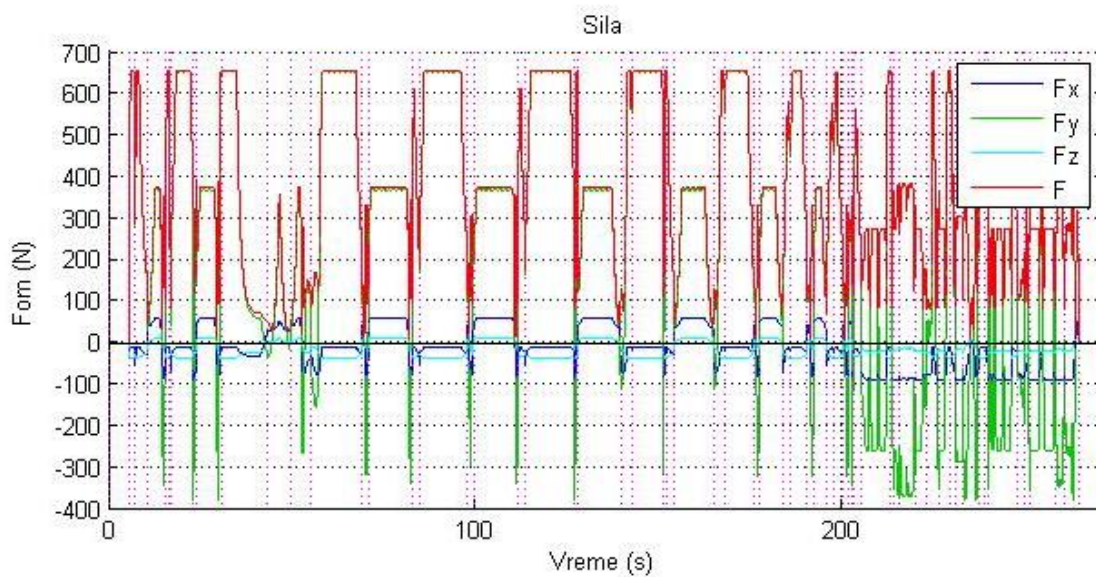
Слика П10. NC програм 4 - дијаграми промене укупних вредности елемената процеса обраде: (а) угао захвата, (б) расподела контаката

Дијаграми брзине помоћног кретања и корака током времена за NC програм 4



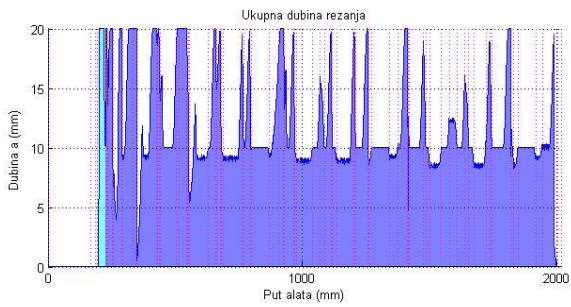
Слика П11. NC програм 4 - дијаграми промене фактора процеса обраде током времена: (а) брзина помоћног кретања, (б) корак

Дијаграм силе резања за NC програм 4

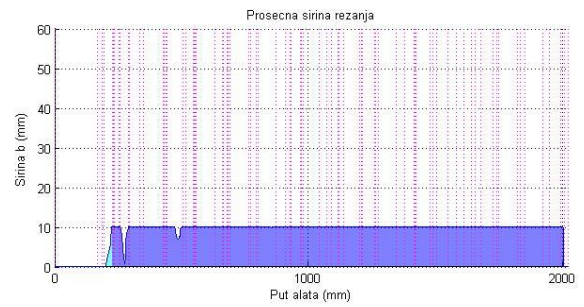


Слика П12. NC програм 4 - дијаграми укупне силе резања према моделу [7]

Дијаграм дубине и ширине резања и угла захвата дуж путање алата за NC програм 5

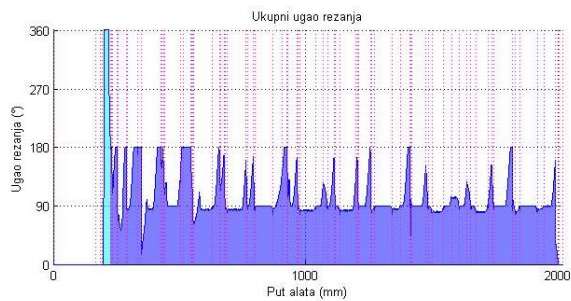


(a)

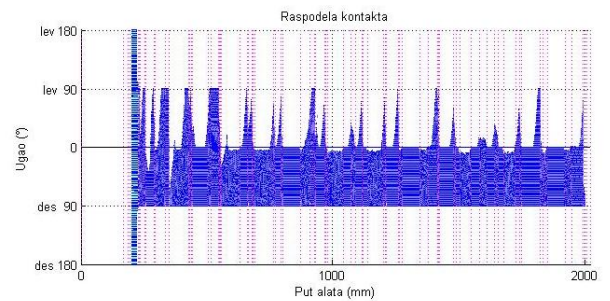


(б)

Слика П13. NC програм 5 - дијаграми промене укупних вредности елемената процеса обраде: (а) дубина резања, (б) ширина резања



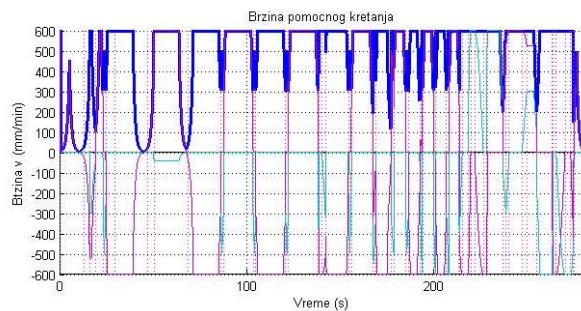
(a)



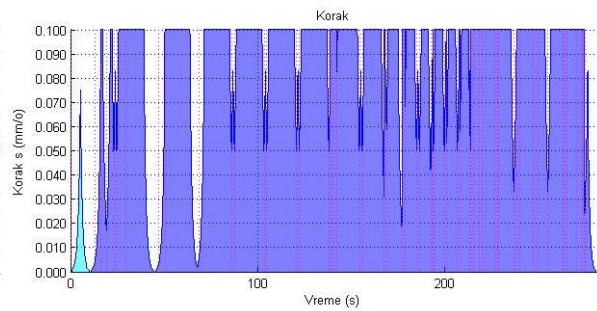
(б)

Слика П14. NC програм 5 - дијаграми промене укупних вредности елемената процеса обраде: (а) угао захвата, (б) расподела контаката

Дијаграми брзине помоћног кретања и корака током времена за NC програм 5



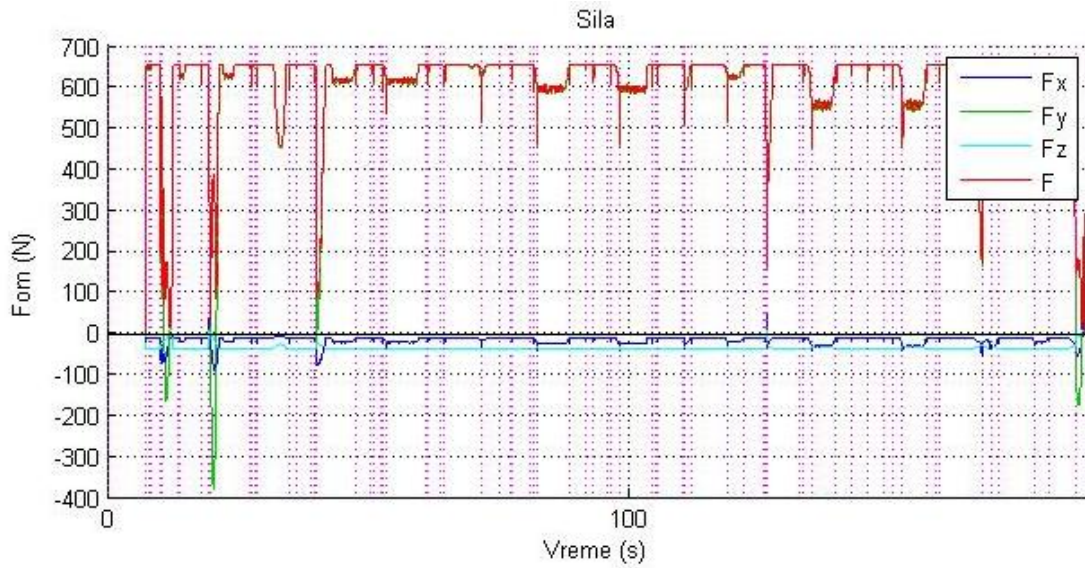
(a)



(б)

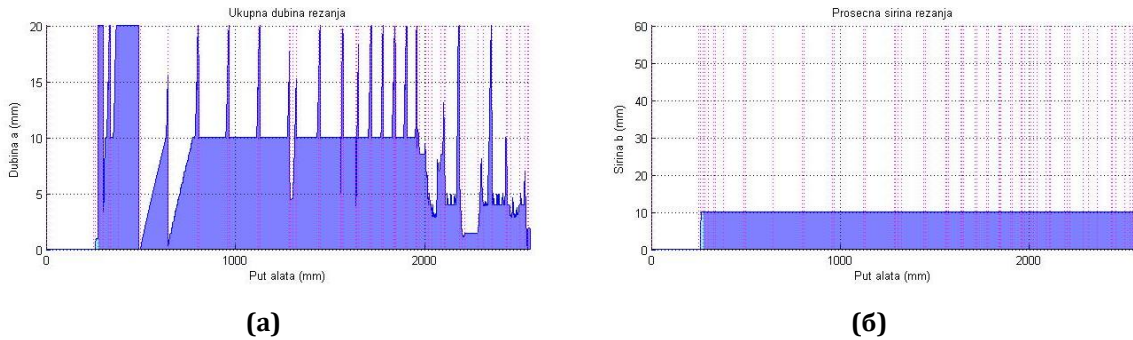
Слика П15. NC програм 5 - дијаграми промене фактора процеса обраде током времена: (а) брзина помоћног кретања, (б) корак

Дијаграм силе резања за NC програм 5



Слика П16. NC програм 5 - дијаграми укупне силе резања према моделу [7]

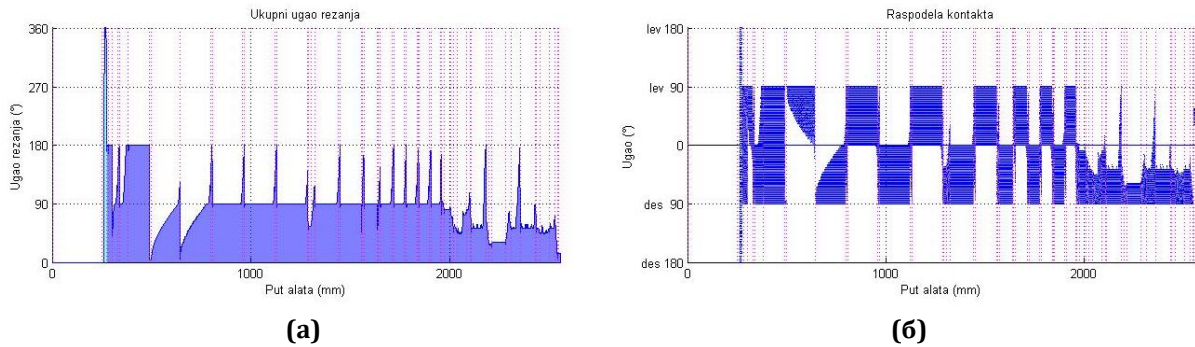
Дијаграм дубине и ширине резања и угла захвата дуж путање алата за NC програм 6



(a)

(б)

Слика П17. NC програм 6 - дијаграми промене укупних вредности елемената процеса обраде: (а) дубина резања, (б) ширина резања

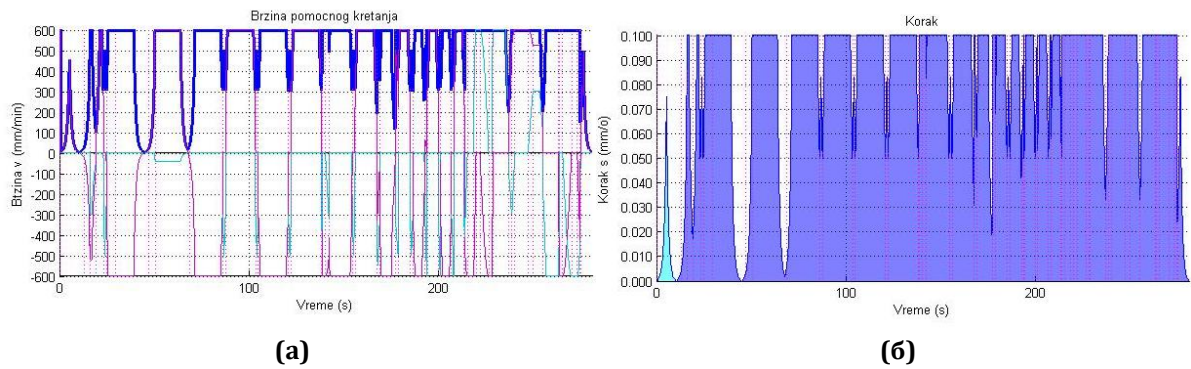


(a)

(б)

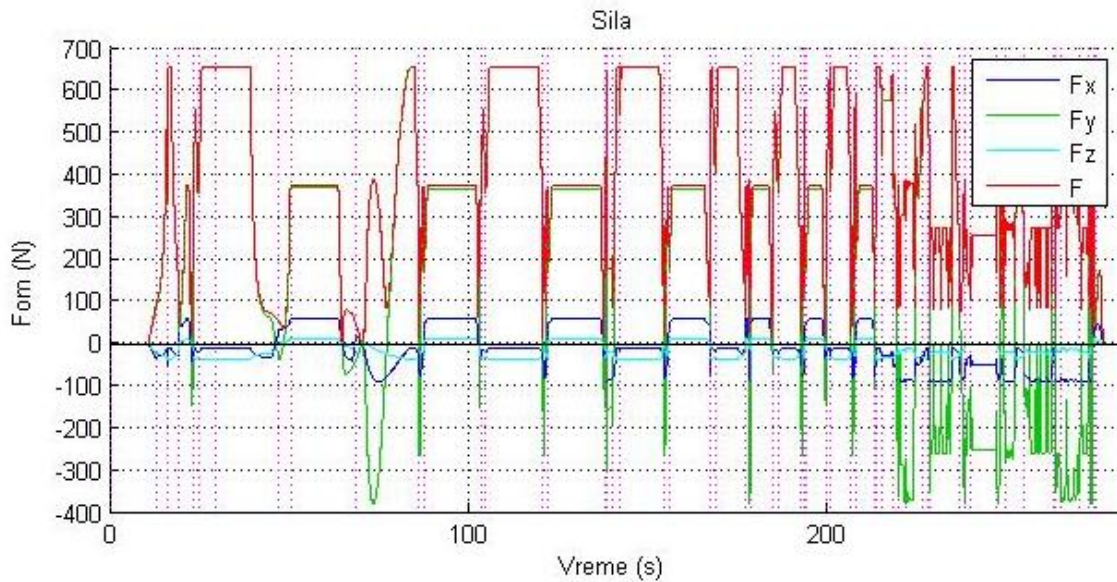
Слика П18. NC програм 6 - дијаграми промене укупних вредности елемената процеса обраде: (а) угао захвата, (б) расподела контаката

Дијаграми брзине помоћног кретања и корака током времена за NC програм 6



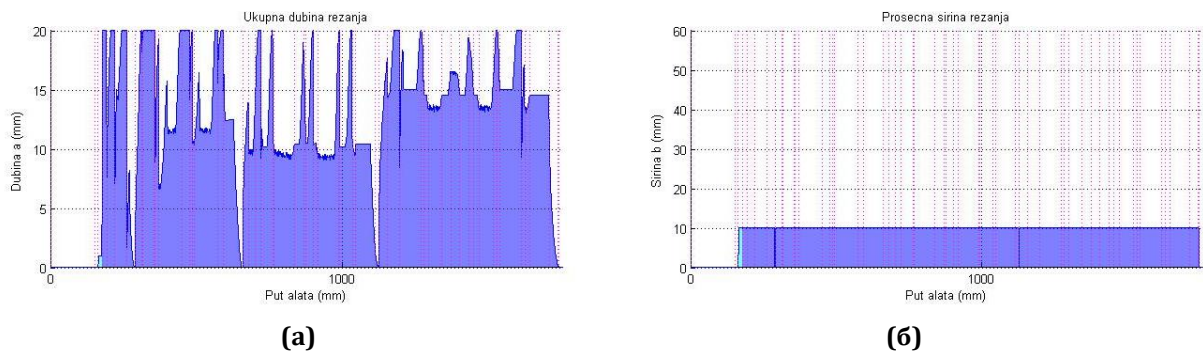
Слика П19. NC програм 6 - дијаграми промене фактора процеса обраде током времена: (а) брзина помоћног кретања, (б) корак

Дијаграм силе резања за NC програм 6

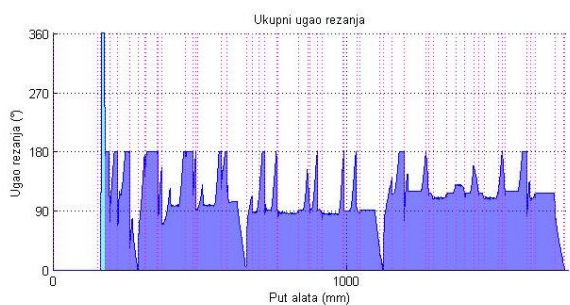


Слика П20. NC програм 6 - дијаграми укупне силе резања према моделу [7]

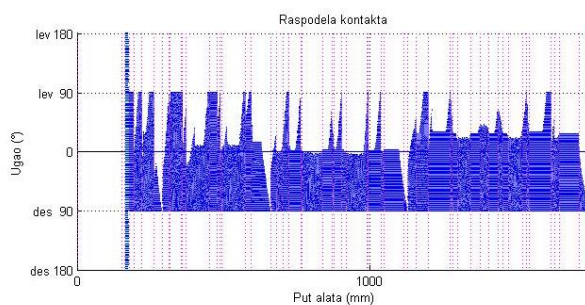
Дијаграм дубине и ширине резања и угла захвата дуж путање алата за NC програм 7



Слика П21. NC програм 7- дијаграми промене укупних вредности елемената процеса обраде: (а) дубина резања, (б) ширина резања



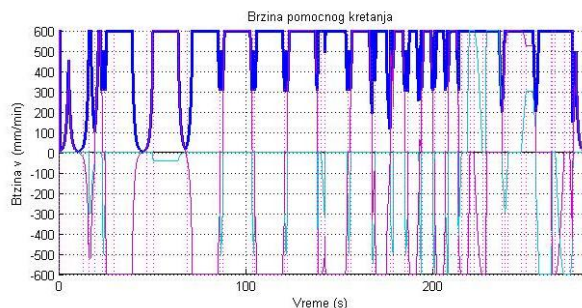
(a)



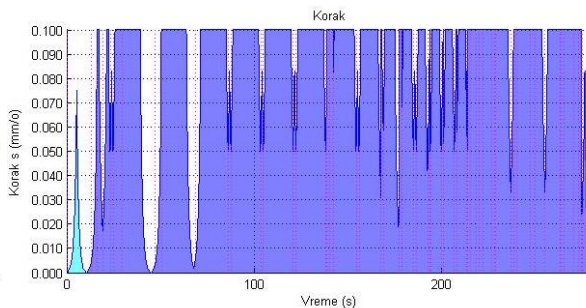
(б)

Слика П22. NC програм 7- дијаграми промене укупних вредности елемената процеса обраде: (а) угао захвата, (б) расподела контакта

Дијаграми брзине помоћног кретања и корака током времена за NC програм 7



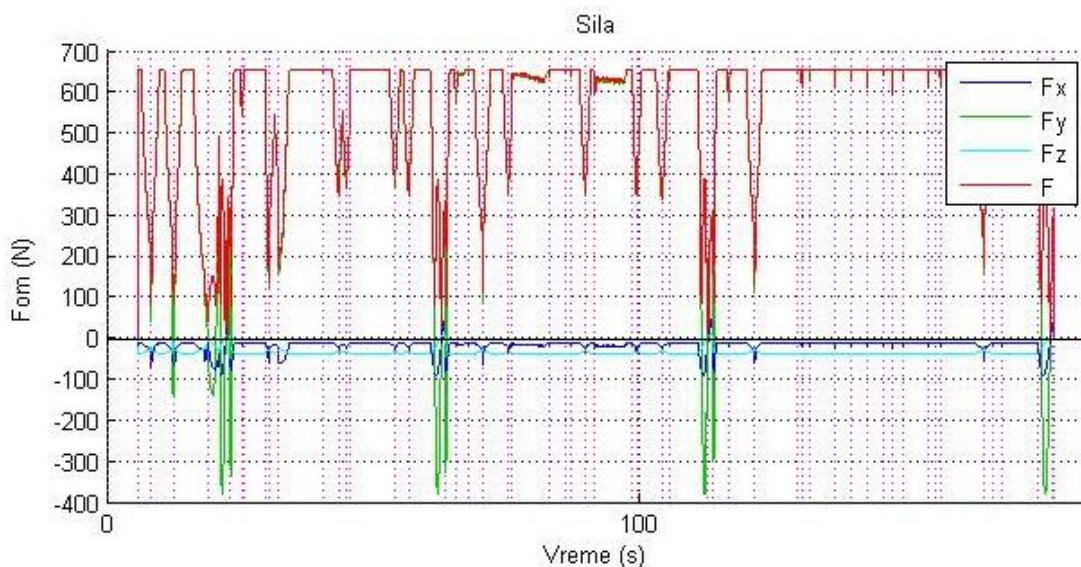
(a)



(б)

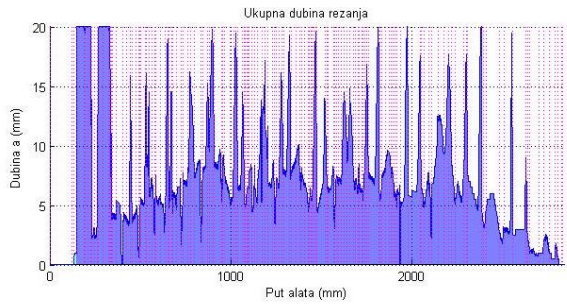
Слика П23. NC програм 7 - дијаграми промене фактора процеса обраде током времена: (а) брзина помоћног кретања, (б) корак

Дијаграм силе резања за NC програм 7

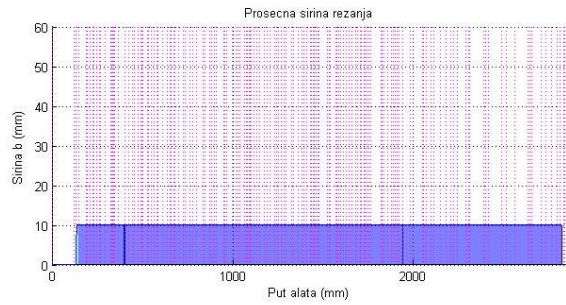


Слика П24. NC програм 7- дијаграми укупне силе резања према моделу [7]

Дијаграм дубине и ширине резања и угла захвата дуж путање алата за NC програм 8

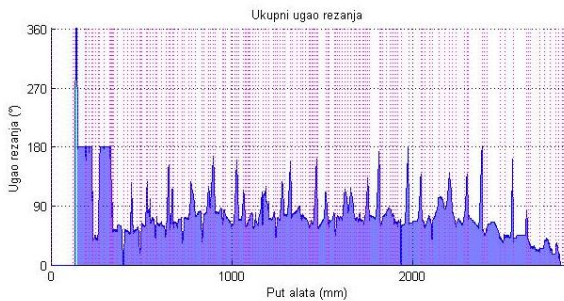


(a)

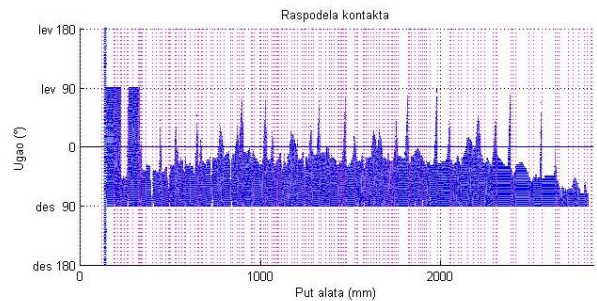


(б)

Слика П25. NC програм 8 - дијаграми промене укупних вредности елемената процеса обраде: (а) дубина резања, (б) ширина резања



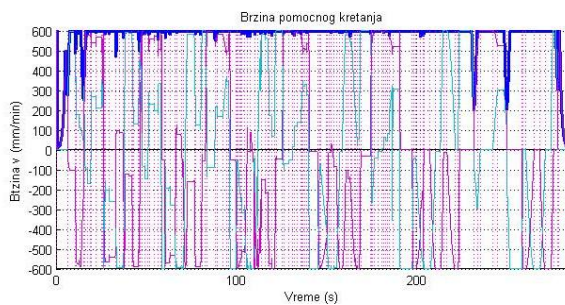
(a)



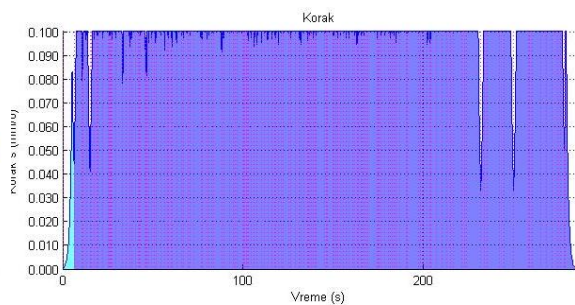
(б)

Слика П26. NC програм 8 - дијаграми промене укупних вредности елемената процеса обраде: (а) угао захвата, (б) расподела контаката

Дијаграми брзине помоћног кретања и корака током времена за NC програм 8



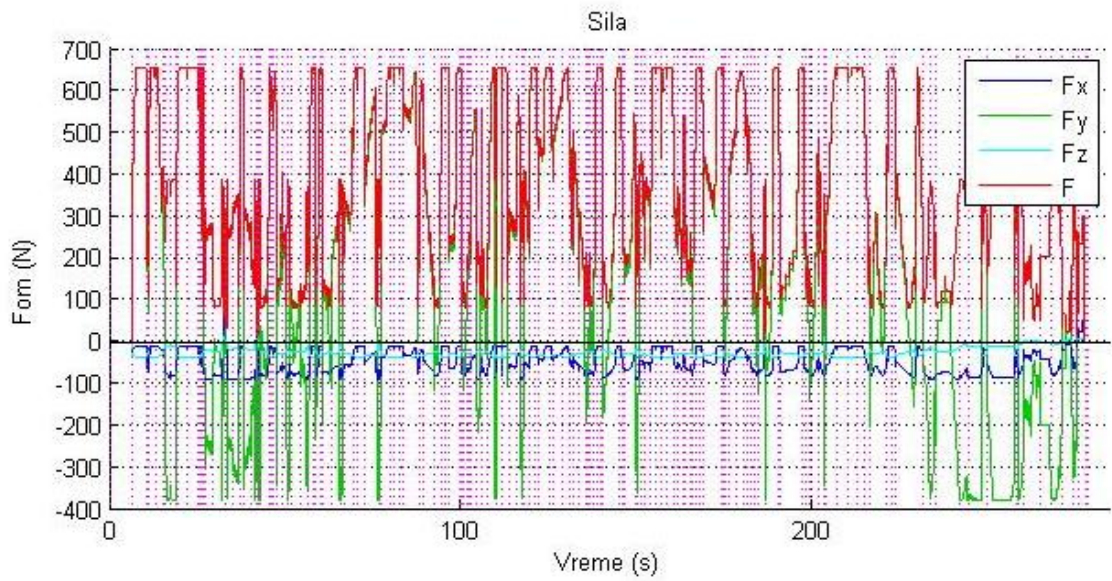
(a)



(б)

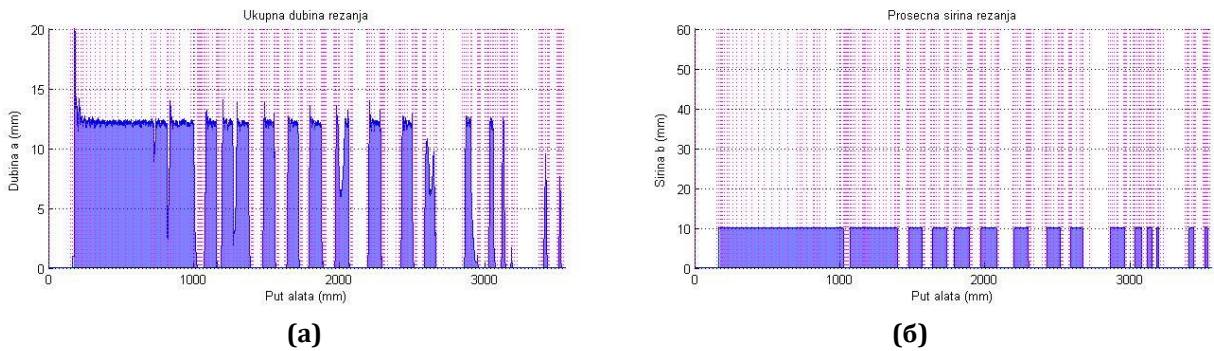
Слика П27. NC програм 8 - дијаграми промене фактора процеса обраде током времена: (а) брзина помоћног кретања, (б) корак

Дијаграм силе резања за NC програм 8

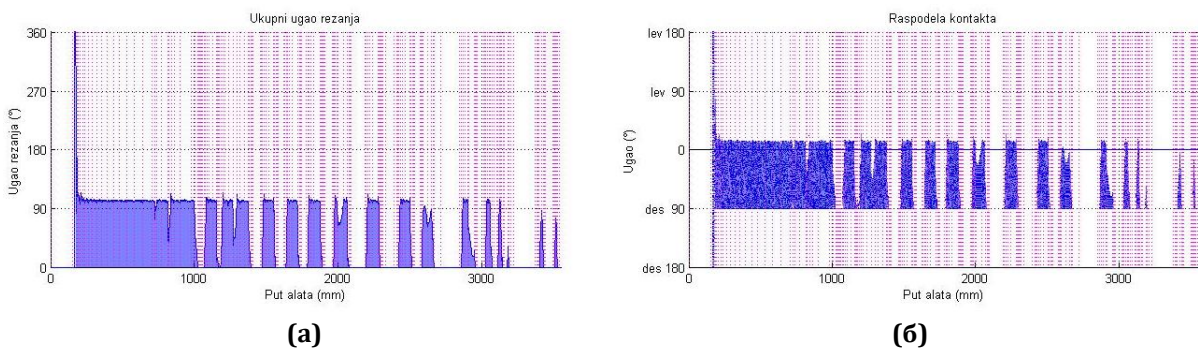


Слика П28. NC програм 8 - дијаграми укупне силе резања према моделу [7]

Дијаграм дубине и ширине резања и угла захвата дуж путање алата за NC програм 9

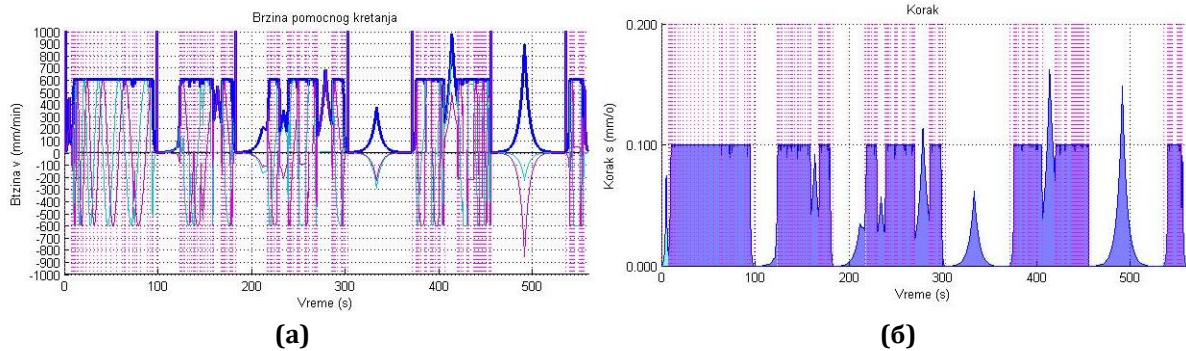


Слика П29. NC програм 9 - дијаграми промене укупних вредности елемената процеса обраде: (а) дубина резања, (б) ширина резања



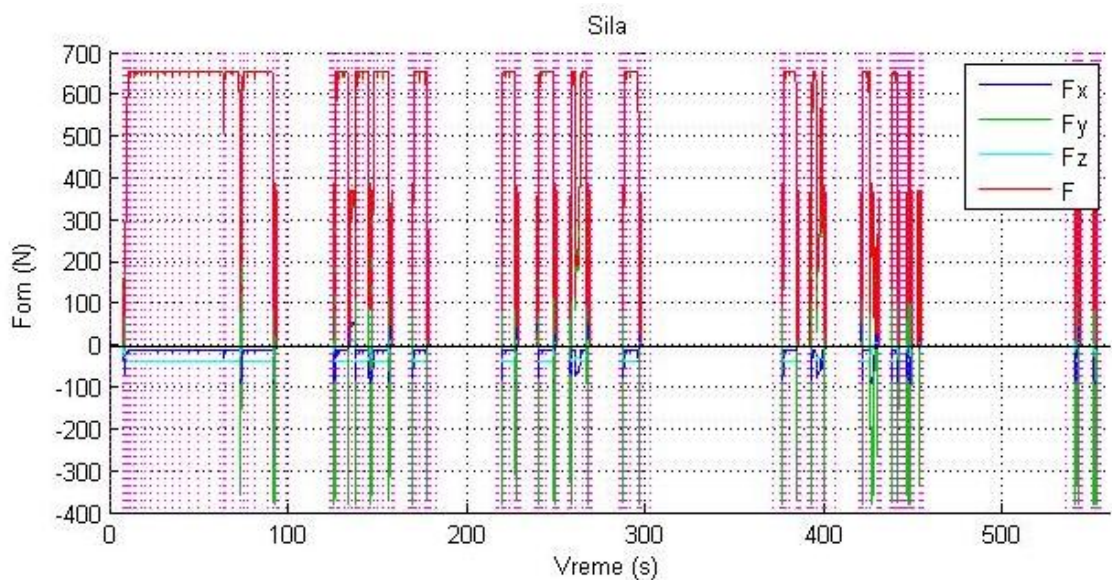
Слика П30. NC програм 9 - дијаграми промене укупних вредности елемената процеса обраде: (а) угао захвата, (б) расподела контаката

Дијаграми брзине помоћног кретања и корака током времена за NC програм 9



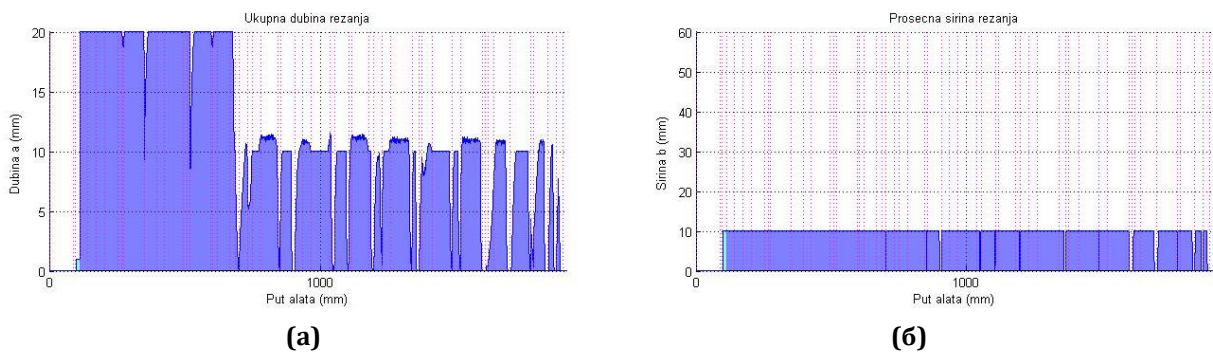
Слика П31. NC програм 9 - дијаграми промене фактора процеса обраде током времена: (а) брзина помоћног кретања, (б) корак

Дијаграм силе резања за NC програм 9

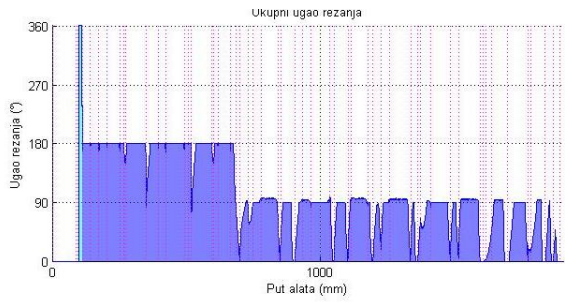


Слика П32. NC програм 9- дијаграми укупне силе резања према моделу [7]

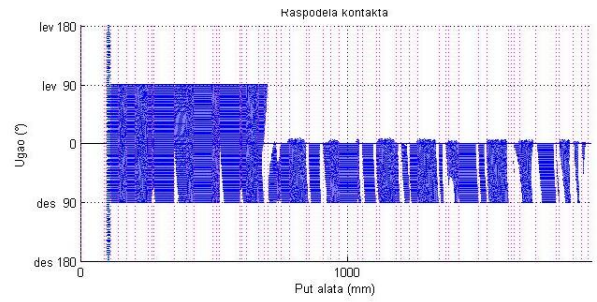
Дијаграм дубине и ширине резања и угла захвата дуж путање алата за NC програм 10



Слика П33. NC програм 10 - дијаграми промене укупних вредности елемената процеса обраде: (а) дубина резања, (б) ширина резања



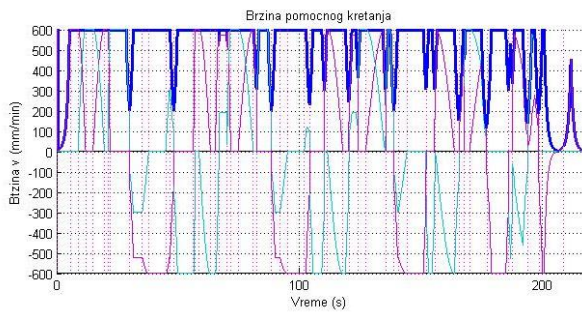
(a)



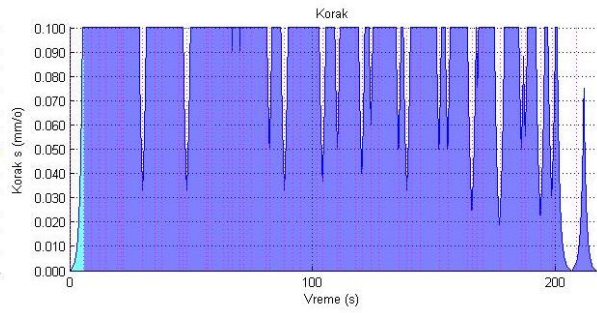
(b)

Слика П34. NC програм 10 - дијаграми промене укупних вредности елемената процеса обраде: (а) угао захвата, (б) расподела контакта

Дијаграми брзине помоћног кретања и корака током времена за NC програм 10



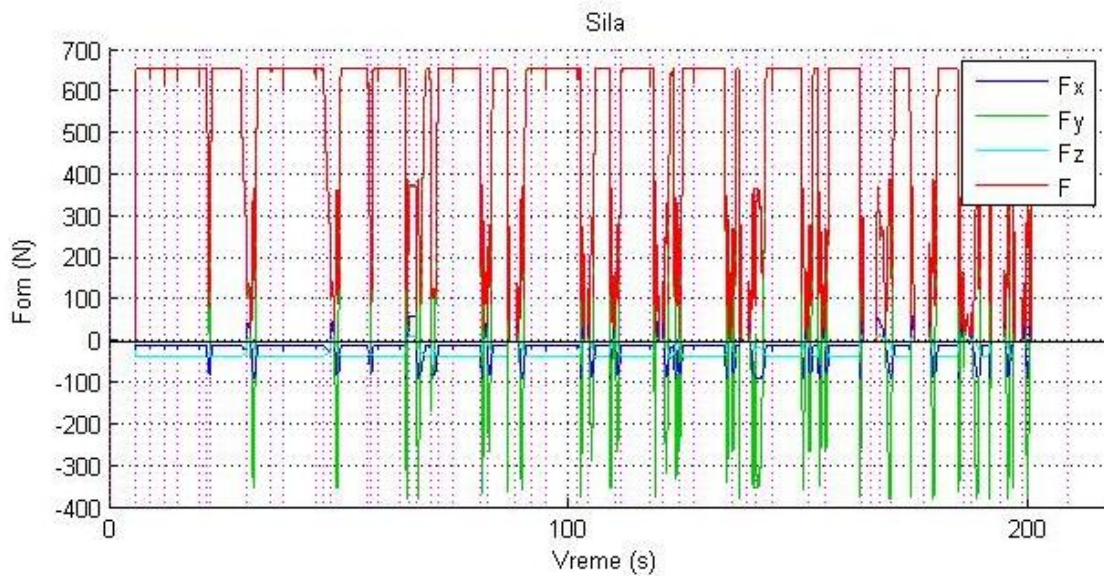
(a)



(b)

Слика П35. NC програм 10 - дијаграми промене фактора процеса обраде током времена: (а) брзина помоћног кретања, (б) корак

Дијаграм силе резања за NC програм 10



Слика П36. NC програм 10 - дијаграм укупне силе резања према моделу [7]