

Факултет инжењерских наука Универзитета у Крагујевцу

Димитрије З. Ивановић

Програмирање машина за *EDM* обраду

мастер рад

Крагујевац, 2018.

Факултет инжењерских наука Универзитета у Крагујевцу



Назив студијског програма: Машинско инжењерство

Ниво студија: Мастер академске студије

Модул: Производно машинство

Предмет: Савремени обрадни системи

Број индекса: 342/2016

Димитрије З. Ивановић

Програмирање машина за *EDM* обраду
мастер рад

Комисија за преглед и одбрану:

1. Др Богдан Недић, ред. проф. - ментор

2. _____

3. _____

Датум одбране: _____

Оцена: _____

У оквиру мастер рада кандидат треба да изврши прикупљање и систематизацију података о електроерозионој обради (*EDM*). Такође, потребно је описати *EDM* обраду са пуном електродом и жичаном електродом. У овом делу рада дати приказ производне опреме за *EDM* обраду.

Посебан део рада посветити основама програмирања нумерички управљаних машина алатки. Потребно је дати детаљан опис програмирања машина за електроерозиону обраду и дати примере програмирања.

Препоручена литература:

- [1] Лазић М., Неконвенционални поступци обраде, Научна књига, Београд, 1990.
- [2] Гостимировић М., Неконвенционални поступци обраде, Факултет техничких наука, Нови Сад, 2012
- [3] Недић Б., Неконвенционални поступци обраде, скрипта, Машински факултет, Крагујевац, 2000.

Крагујевац, датум

ментор:

Др Богдан Недић, редовни професор

САДРЖАЈ

РЕЗИМЕ.....	1
1. УВОДНА РАЗМАТРАЊА.....	2
2. АНАЛИЗА ПРОЦЕСА ОБРАДЕ ЕЛЕКТРОЕРОЗИЈОМ.....	3
2.1. Анализа процеса електроерозије.....	5
2.2. Диелектрична течност.....	6
2.3. Алат.....	9
2.4. Квалитет и продуктивност обраде.....	9
2.5. Предности електроерозионе обраде.....	9
3. ПОСТУПЦИ <i>EDM</i> ОБРАДЕ.....	10
3.1. Електроерозиона обрада пуном електродом.....	11
3.2. Електроерозиона обрада жицом.....	11
4. ОПРЕМА ЗА <i>EDM</i> ОБРАДУ.....	12
5. ВРСТЕ ПРОГРАМИРАЊА.....	14
5.1. Типови нумеричког управљања.....	18
5.2. Управљачки системи.....	19
5.3. Мерни системи.....	19
5.4. Структура програма.....	25
5.5. Координатни системи.....	26
6. ОСНОВЕ ПРОГРАМИРАЊА МАШИНЕ ЗА <i>EDM</i>	31
6.1. Модалне функције.....	32
6.2. Опис G – кодова.....	35
6.2.1. G00 Заустављање у полазној позицији – брзо кретање у празном ходу.....	35
6.2.2. G01 Линеарна интерполација.....	36
6.2.3. G02, G03 Кружна интерполација.....	36
6.2.4. G4 – Време задржавања.....	38
6.2.5. G90, G91 Апсолутни и релативни координатни систем.....	39
7. ПРИМЕР ПРОГРАМИРАЊА МАШИНЕ.....	41
8. ЗАКЉУЧАК.....	48
9. ЛИТЕРАТУРА.....	49

РЕЗИМЕ:

У оквиру овог мастер рада извршена је систематизација података о обради електроерозијом (EDM), са посебним освртом на програмирање машина за ту врсту обраде. Принцип EDM обраде се састоји у уклањању металних делова материјала при електричном пражњењу између електрода. Дата је класификација и кратак преглед развоја методе. Показано је да се EDM обрада користи у следећим случајевима: када је механичка обрада немогућа или крајње отежана, при обради тврђих материјала (челика отпорних на високе температуре, корозију и сл.), при изради отвора малог пречника (0,1 - 1 mm), производа сложене конфигурације итд. Такође, извршена је анализа поступка обраде, елемената опреме и карактеристика машина. Затим је описан значај нумеричког управљања технолошким параметрима обраде и поступак програмирања машине за EDM обраду. Направљен је програм за конкретан пример EDM обраде жицом.

Кључне речи: електроерозија, програмирање машина, сложене конфигурације.

SUMMARY:

Within this master thesis, the systematization of data on electroerosion processing (EDM) was performed, with a special emphasis on the programming of machines for this kind of processing. The EDM processing principle consists in the removal of metal parts of materials in electrical discharges between electrodes. Data is a classification and a brief overview of the development of the method. It has been shown that EDM treatment is used in the following cases: when mechanical processing is impossible or extremely difficult, in the treatment of hard materials (high temperature resistant steel, corrosion, etc.), when making a small diameter opening (0.1-1 mm), complex configuration products, etc. Also, an analysis of the processing, equipment elements and machine characteristics was performed. The significance of the numerical control of the technological processing parameters and the procedure for programming the machine for EDM processing is described. A program was developed for a concrete example of EDM wire processing.

Key words: *electro-erosion, programming of machines, complex configuration.*

1. УВОДНА РАЗМАТРАЊА

Производња је процес трансформације идеје и захтева тржишта или потреба купаца за производ или услугу која ствара додатну вредност. Производни процес обухвата све догађаје током израде производа:

- процес рада којим се директно и сврсисходно делује на материјал (предмете рада) и тако повећава његова вредност (обрада, монтажа, заштита материјала, ...) и

- активности које директно не доприносе повећању вредности материјала, али су неопходне за одвијање целокупног процеса (контрола квалитета, транспорт, застоји и складиштење).

Технолошки процес је део производног процеса непосредно везан за постепену промену стања предмета рада (изгледа, облика, димензија и особина) сагласно унапред постављеним техничким захтевима. Технолошки процес одређује начин и редослед извођења технолошких (производних) операција којима се, из полазног (почетног) материјала под одређеном условима, израђује део, склоп или производ коришћењем одређених алата, прибора и направа на одређеним машинама (радним местима) у одређеном времену, укључујући контролу квалитета. Производни процес представља решење технолошког процеса у простору и времену.

У условима глобалне тржишне конкуренције тражи се брза и јефтина израда квалитетног производа што захтева оптимално пројектовање и извођење технолошког поступка обраде. Побољшање традиционалних технолошких поступака и развој нових технологија обраде делом је последица развоја нових конструкционих материјала. Осим тога, развој нових технологија омогућио је израду производа конструкционих и геометријских карактеристика које се нису могле израђивати традиционалним поступцима обраде. Карактеристике материјала обрада и захтеване карактеристике површине производа представљају основне улазне параметре код пројектовања технолошког поступка. Са друге стране, величине серија и планиране укупне количине производа захтевају додатне анализе исплативости коришћења поједине технологије обраде, узимајући у обзир трошак коришћења обрадних машина, технолошко време израде те степен аутоматизације.

Тренд у многим гранама индустрије, као што су индустрија медицинских уређаја, ваздухопловна индустрија, електронска индустрија и сл., је смањивање величине производа и њихових компонената. Смањивањем димензија повећавају се захтеви за квалитетом површине. Због једноставности поступка монтаже, смањивања потребе за људском радном снагом и повећања аутоматизације производње, од великог је значаја пројектовање производа са што мањим бројем компоненти. Међутим, приликом смањивања броја компоненти веома је важно да се задрже све карактеристике површина и облика произведених елемената, како би коначни производ имао функционалност и поузданост на једнаком или вишем нивоу од производа састављеног од већег броја компоненти. Захтеви за врло чврстим материјалима и материјалима отпорним на хабање, високе температуре и хемијске утицаје и захтеви за квалитетом површине, диктирају сталну потребу за даљим развојем и унапређењем технолошких поступака обраде. Обрада нових материјала класичним поступцима обраде је веома отежана, често и немогућа. Због тога се, паралелно

са развојем нових материјала, развијају, усавршавају и уводе нови прогресивни поступци обраде, веће продуктивности и економичности прераде метала. То су неконвенционални поступци обраде (НПО) код којих се уклањање вишка материјала, измена облика, димензија и структуре материјала остварује коришћењем електричне, хемијске, светлосне, магнетне, нуклеарне и других видова енергије доведених непосредно у процес - зону резања. Једна од метода НПО, која има најширу примену, је електроерозија или *Electrical Discharge Machining (EDM)*. Овај рад је фокусиран на опште карактеристике обраде EDM и програмирање машина за ту врсту обраде.

Електроерозиона обрада функционише по принципу електропроводних материјала низом одвојених електричних пражњења. Варнице настају између супротно напуњених електрода алата и обратка [1]. Процес се одвија на металним површинама под напоном, а познат је још од 18. века. Руски научници који су истраживали хабање електричних контаката, дошли су почетком 40-тих година прошлог века на идеју примене електроерозијског ефекта у процесу обраде метала. Од свих нових поступака обраде електроерозија има најширу примену. Поступак се користи у микро-обradi (на пример, бушење проврта пречника од 10 μm) и макро-обradi (на пример, израда матрица за пресовње, тешких и до неколико тона). У поређењу са старијим методама, електроерозија има низ предности, нарочито при обради тврдих, отпорних на топлоту материјала и обрадака, који имају сложени геометријски облик, као што су: калупи за ливење и пресовање пластичних маса, жигови, матрице и слични облици [2].

Код електроерозије електрода-алата и електрода-обратка су супротно спојене на истосмерни извор струје и потопљене у течност. Течност има изолациона својства и назива се диелектрична течност или диелектрик. На месту где је размак између електроде и алата најмањи долази до одвајања материјала из обратка. Важан предуслов обраде јесу одвојена узастопна пражњења варница. Правилан избор материјала алата и одређени термички, електрички и механички ефекти омогућују уклањање материјала на електроди-обратку, а не на електроди-алату [3].

Сви материјали, који проводе електрицитет (метали, легуре, карбиди, графити и др.), погодни су за обраду електроерозијом. Механичка својства материјала (тврдоћа, чврстоћа и жилавост) не утичу на процес обраде. У већини случајева, алат је повезан са позитивним полом-анодом, а обрадак са негативним полом-катодом. Размак између алата и обратка је врло мали: од 0,4 до 0,004 mm, и регулише се радним напоном.

Узимајући у обзир досадашња разматрања у области обраде електроерозијом и разноврсност њене примене, основни циљ овог рада је да се електроерозија опише са становишта њених карактеристика, програмирања технолошког поступка и практичног примера. У том смислу, проблематика обрађена у овом раду је подељена у осам поглавља. После уводних разматрања, следи друго поглавље у коме је дата анализа процеса обраде електроерозијом. Описан је механизам и процес обраде, а затим су наведене предности обраде електроерозијом у односу на традиционалне поступке обраде одвајањем материјала.

Треће поглавље обухвата опис главних карактеристика две врсте електроерозионих обрада: обраде пуном електродом и обраде жицом.

У четвртом поглављу је дат преглед опреме за обраду електроерозијом, описана су њена значајна својства и специфичности. Посебно је дат начин њиховог избора са становишта примене за обраду пуном електродом и обраду жицом.

Пето поглавље обухвата дефинисање значаја програмирања поступака обраде, а затим су дате и врсте програмирања које се примењују. У оквиру овог поглавља наведени су системи кодирања информација према *ISO* и *EIA* стандардима, а такође и мерни и координатни системи.

Детаљан опис основа програмирања машине за EDM дат је у шестом поглављу. Најпре је дефинисана G – функција, а затим су представљене врсте G - функција (услови путање) и њихово значење.

У оквиру седмог поглавља дат је пример који илуструје примену програмирања машине за EDM уз коришћење одговарајућих софтвера.

У осмом поглављу дата су закључна разматрања о програмирању машина за обраду електроерозијом, изведена на основу резултата истраживања представљених у овом раду. На крају рада дат је списак коришћене литературе.

2. АНАЛИЗА ПРОЦЕСА ОБРАДЕ ЕЛЕКТРОЕРОЗИЈОМ

EDM је термоелектрични процес који еродира материјал обратка користећи серију електричних пражњења између електроде и обратка који се или испиру, или су уроњени у диелектричну течност. Механизам електроерозије материјала састоји се у томе да се електрична енергија, пре свега, претвара у топлотну енергију кроз серију варничних пражњења која се појављују између електроде и обратка, а који су потопљени у диелектричној течности [4]. Топлотна енергија ствара канал плазме између катодe и аноде с температуром између 8 000 и 12 000 °C [5], у зависности од материјала на површинама, омогућујући довољну количину топлоте за топљење материјала површине обратка и електроде [6]. Тренутна температура узрокује локално испаравање на површини електроде и обратка. Ова појава резултира наглим смањењем температуре и тако омогућава току диелектричне течности испирање растаљеног материјала с површине електрода у облику микроскопских нечистоћа. Одвајање материјала представља трансформацију елемената материјала између електроде и обратка. Ови се елементи избијају из електроде, иду према обратку и обрнуто, мењајући тако чврсто, течностно и гасовито стање, да би после стога створили легуру кроз обрнути процес, из гасовитог у течностно и чврсто стање [7], [8]. Фазе одвајања материјала електроерозијом у великој мери зависе од врсте елемената материјала електроде и обратка, заједно с дезинтегрисаним елементима диелектричне течности [9]. Процес топљења и испаравања материјала са површине обратка представља потпуно другачији начин обраде у односу на традиционалне методе обраде код којих одвајање материјала настаје механичким деловањем на површину обратка. Брзина одвајања материјала код EDM поступка износи од 2 до 400 mm³/min [10], [11]. Овако мала брзина одвајања материјала у односу на традиционалне поступке обраде представља главни разлог истраживања EDM поступка. Већина истраживања се искључиво бави препознавањем најважнијих утицајних фактора на брзину одвајања материјала, и њиховом оптимизацијом. Функција циља представља максималну брзину одвајања материјала уз задовољавање неких додатних услова, као што су задовољавајуће површинске карактеристике, или хабање електроде и стабилност процеса.

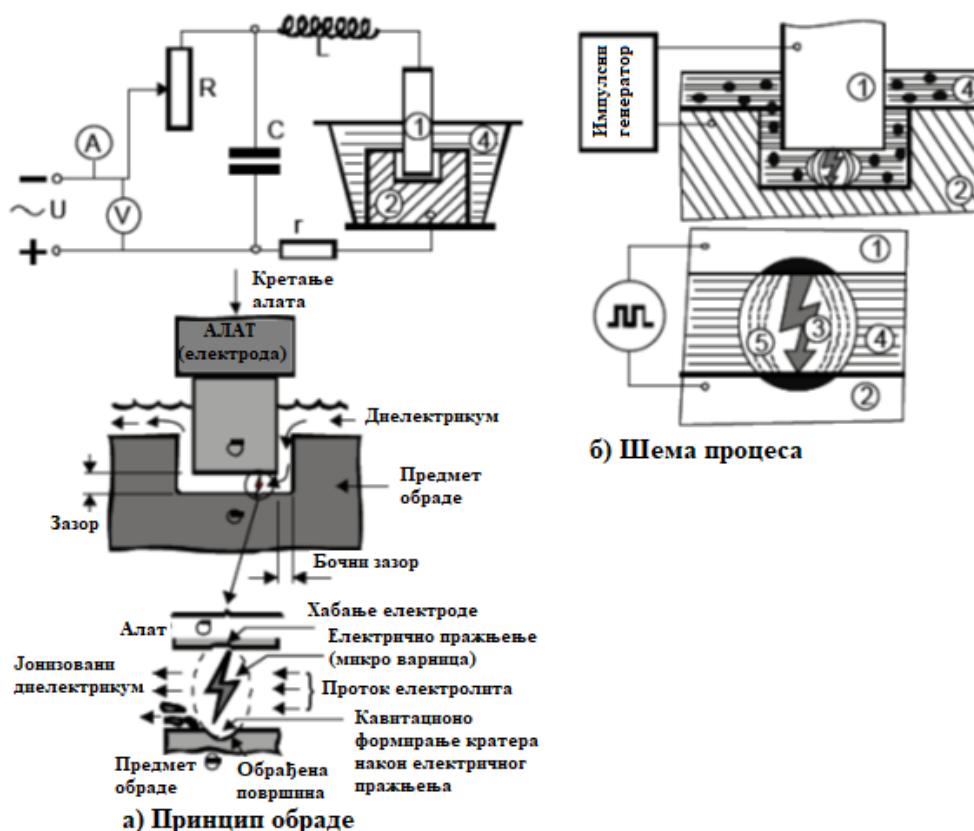
Процес електроерозионе обраде материјала већ се деценијама користи у производњи предмета сложених облика од електропроводних материјала. Основне предности EDM поступка у односу на традиционалне поступке обраде одвајањем материјала су:

- употреба врло мале силе, јер током поступка обраде алат не ствара физички контакт са обратком, и
- EDM процес омогућује обраду врло тврдих и чврстих материјала које је тешко или немогуће обрађивати традиционалним поступцима обраде одвајањем материјала.

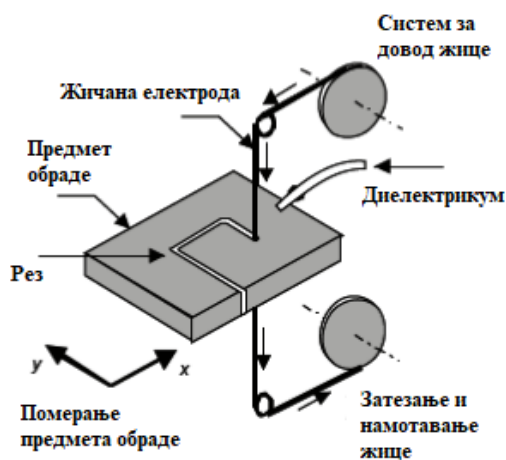
Ако се код EDM поступка као алат користи електрода у облику негатива изратка, такав се поступак назива *SEDM* (енгл. *sinking electro discharge machining*) поступак. Ако се код EDM поступка резање одвија помоћу електроде у облику жице, такав се поступак назива *WEDM* (енгл. *wire electro discharge machining*) поступак.

2.1. Анализа процеса електроерозије

Електроерозна обрада обухвата поступке обраде метала код којих се уклањање вишка материјала остварује серијом електричних пражњења периодичног карактера, насталих између алата (катоде) и предмета обраде (анодe). На слици 2.1 дати су принцип обраде и шема процеса електроерозије, а на слици 2.2 шематски приказ обраде жичаном електродом[12].



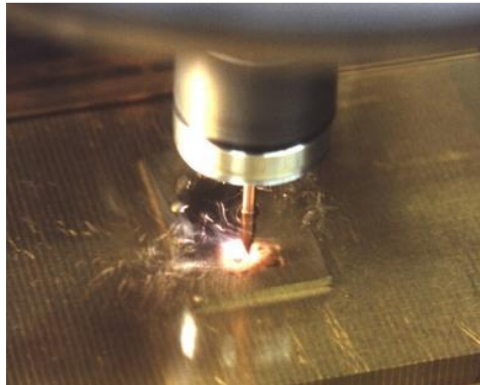
Слика 2.1 - Принцип обраде и шема процеса електроерозије [12]



Слика 2.2 - Обрада жичаном електродом [12]

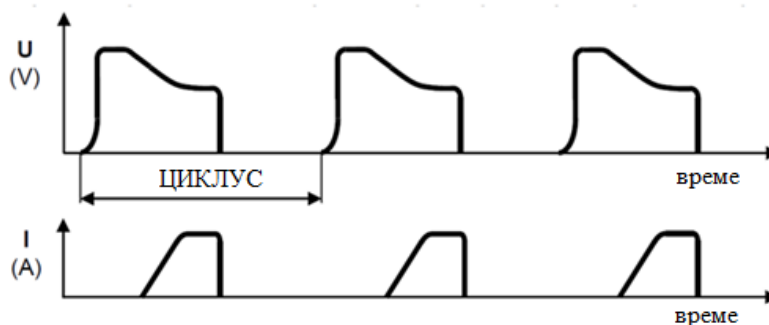
Електроерозија је сложен процес који зависи од великог броја физичких ефеката (слика 2.3). Постоји више теорија процеса електроерозије, а најпознатија је термоелектрична теорија. Теорија се базира на објашњењу да се обрада одвија дискретно, односно да свака појединачна варница уклања врло малу количину материјала обратка (у мањој мери уклања и материјал алата). Електрода-алат и електрода-обрадак су размакнуте и потопљене у диелектричну течност. Када пробојни напон у радном размаку достигне вредност од 107-108 V/cm, он покрене слободне електроне из течности и катоду према аноди. Варнице имају температуру од 8.000 до 12.000 °C и стварају се у размацима од 2 μ s до 1000 μ s. Топлота варнице, која је у ствари усијана плазма у каналу избијања, преноси се на врло малу површину обратка. Велика топлота изазива његово топљење и делимично испаривање. После тога, диелектрик одстрањује растопљени материјал и остаје веома мали кратер на површини обратка.

Да би се постигла квалитетна и прецизна обрада с уским толеранцијским пољима, струја је временски ограничена, односно делује у врло кратким импулсима. Временски период између две варнице је чак и нешто већи од самог трајања варнице. Да би се уклонила велика запремина материјала у јединици времена, електрични импулси се појављују један за другим великом фреквенцијом (од 500 до 5000 варница у секунди) [13].



Слика 2.3 - Процес електроерозије [13]

На слици 2.4 приказани су напонски и струјни импулси у току времена. Један циклус је време које обухвата време укључења струје и време искључења струје.



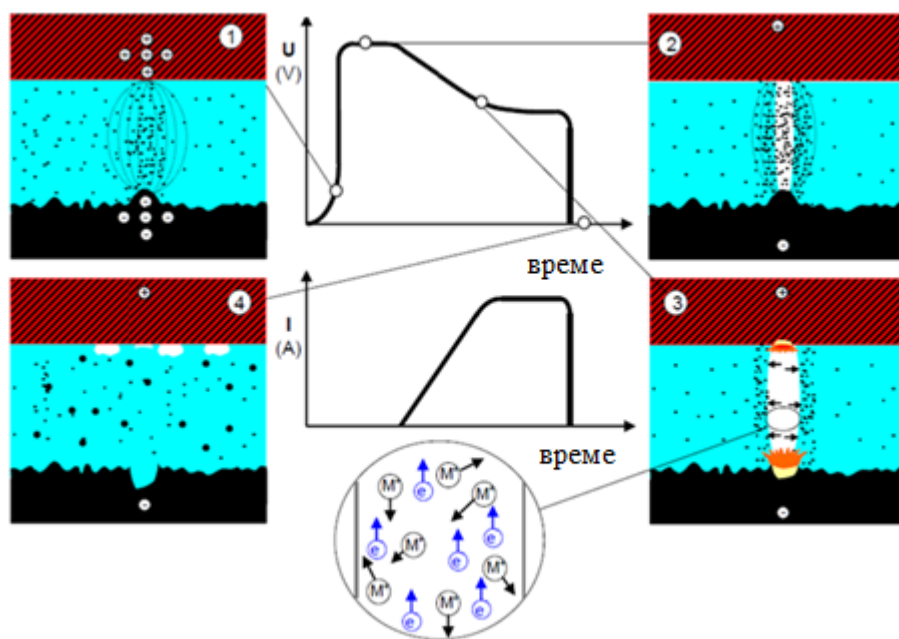
Слика 2.4 - Напонски и струјни импулси [13]

Према термоелектричној теорији један циклус процеса електроерозије се укратко описује на следећи начин:

1. Алат и обрадак су под напоном и између њих је диелектрична течност, која је добар изолатор. На месту где је размак између електроде и алата најмањи концентрација јона је највећа и електрично поље најснажније. Када пробојни напон достигне вредност у интервалу од 107-108 V/cm, слободни електрони, делимично из течности, а делимично и из катодe, крећу се према аноди. Електрични потенцијал је толико велики да изазива разлагање течности у јонизирајуће фрагменте. На слици 2.5 се види раст напона, док је јачина струје нула.

2. Формирана је уска колона са великим бројем јонизирајућих честица. Оне се центрирају у најмоћнијем делу поља. Повећава се електрична проводљивост диелектричне течности. Напон достиже своју највећу вредност, али јачина струје је нула.

3. Струја почиње да тече, а напон пада. Топлота брзо расте и узрокује испаравање дела течности, обратка и електроде и ствара се канал пражњења. Јачина струје наставља да расте, а напон пада. Кад се јачина струје и напон стабилизију, уклања се део материјала из обратка. Канал за пражњење се тада састоји од супер загрејане плазме (јонизирани гас на врло високој температури, који садржи позитивне јоне метала и негативне електроне).



Слика 2.5 - Механизам процеса електроерозије и пробојни канал [13]

4. Кад се струја прекине јачина и напон струје падну на нулу па настаје имплозија варнице (имплозија је супротно од експлозије). Температура се смањи, мехурић паре се распадне, а диелектрична течност испере металне честице. Избачени метал очврсне у облику ситних куглица и распрши се у диелектричној течности. Преостали гас се диже до површине алата. Без довољно великог временског прекида струје, металне куглице би се сакупљале на

површини алата. То би довело до нестабилности варнице и целог процеса. Обложени алат би створио лук истосмерне струје, који би могао оштетити алат и обрадак.

2.2. Диелектрична течност

Већ прва испитивања електроерозивног процеса су показала да је ерозија материјала много већа и размак између електрода много мањи ако се користи диелектрична течност. Она има задатак да:

1. створи погодне услове за електроерозиони процес,
2. одстрани отопљени материјал из међуелектродног размака,
3. хлади обрадак и алат.

Диелектрична течност мора да делује као изолатор, све док се не створи пробојни напон између електрода. Диелектрик мора да буде хемијски и термички стабилан. Он мора да има антикорозивне особине и што нижи вискозитет. Ове захтеве испуњавају угљоводоници као што су: парафин, *white spirit*, трансформаторска уља и др. Струјање течности, између алата и обратка, је потребно ради постизања ефикасне обраде. Чистоћа течности има врло снажан утицај на тачност обраде. Током циркулације течности чврсте честице, које су настале за време електроерозије, уклањају се филтрацијом и таложењем у главном резервоару (слика 2.5).

2.3. Алат

Алат се израђује као нешто умањени негативни облик обратка. Најчешћи материјали за израду алата су: месинг, бакар и графит. Систем управљања машине за електроерозију аутоматски регулише посмак алата. Размак између алата и обратка се одржава константним уз промењиву брзину еродирања. Зависно од разлике између напона у размаку UG и референтног напона UR сервомотор брже подиже или спушта алат. Ако се повећа размак између алата и обратка, повећава се и напон UG , а тиме и разлика $UG - UR$, што повећава број обртаја сервомотора и брзину посмака алата. Обрнуто, ако се размак смањује, смањује се радни напон размака, смањује се број обртаја сервомотора и посмак алата према обратку.

2.4. Квалитет и продуктивност обраде

Квалитет површине, пре свега њена храпавост, зависи од енергије варнице. Ако она има велики топлотни капацитет, храпавост површине ће бити груба и брзина одвајања материјала у јединици времена (производност) ће бити висока. Ако варница има малу енергију, храпавост површине ће бити врло фина, а производност ће бити мала. Могуће је постићи храпавост и до $Ra = 0,10 \mu m$ (има сјај огледала). Стандардне храпавости површина као $Ra = 0,4-0,8 \mu m$ (N5 – N6) су уобичајене. Продуктивност обраде је мала и зависи од енергије варнице. Запремина уклоњеног материјала је у распону од $1 mm^3/min$ до $250.000 mm^3/min$.

2.5. Предности електроерозионе обраде

- Никакве механичке силе не делују на обрадак, одсуство механичких сила елиминише проблем хабања алата и самим тим гарантује апсолутну тачност димензија без обзира на број обрађених предмета.
- Чврст положај обрадака током обраде елиминише потребу за стезним уређајима и смањује време припреме.
- Иако се у поступку користе електричне варнице опасности за оператера нема, а не постоје ни превелики еколошки проблеми.
- Врло тврди материјали (тврде челичне легуре, каљени челици, титан) могу се врло ефикасно обрађивати електроерозијом, без проблема са ломом алата.
- Глодање четвртасог удубљења није могуће. Електроерозија жицом може да постигне врло оштре ивице.
- Електроерозија може изгледати као спора обрада, али то није случај зато што алат у континуираној обради ствара контуру обратка.
- Квалитетна површина обраде, која се одмах постиже електроерозијом, елиминише потребу за великим бројем операција потребних код традиционалне обраде.
- Код електроерозије само неколико секвенци је потребно. Обрадак се обрађује само једим алатом и на једној машини.

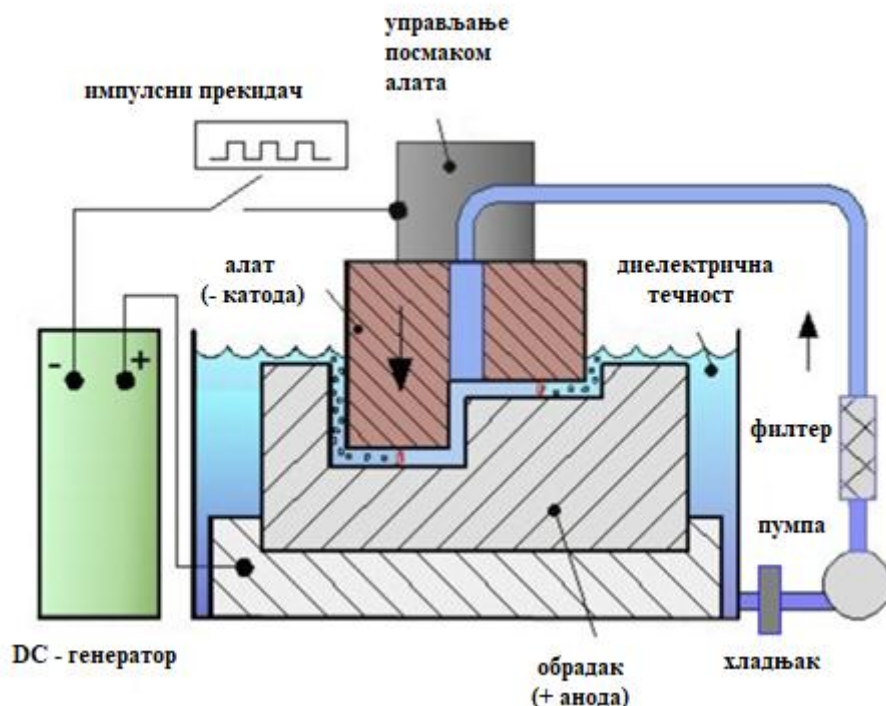
3. ПОСТУПЦИ EDM ОБРАДЕ

3.1. Електроерозиона обрада пуном електродом

Принцип рада поступка састоји се у електричном пражњењу између електрода: алата (катоде) и обрадка (аноде), прикључених на истосмерну струју и уроњених у диелектричну течност. На месту прескакање варнице долази до загревања, топљења и испаравања материјала обратка. Температуре су од 6000 – 12000 °C.

Диелектрична течност (техничка вода или минерално уље) је изолатор који код одређеног напона (до 500 V) омогући електрично пражњење међу електродама. Други задатак диелектрика је да у непрестаној струји односи продукте изгарања. Због тога се мора филтрирати и хладити. Алат се израђује од бакрених легура или графита, сложеног је облика јер је “негатив” дела који се обрађује и приликом обраде се хаба па мора да се мења. Код CNC управљања, у одређеним случајевима алат може бити и једноставног облика. На слици 3.1 приказана је шема машине за електроерозију.

EDM поступак се примјењује при обради тешкообрадивих али електропроводних материјала (каљени челик, тврди метал ...) и при обради површина сложеног облика (алати, калупи, уковњи, делови турбина ...). На слици 3.2 приказани су типични производи израђени поступком електроерозије [13].



Слика 3.1 - Шема машине за електроерозију [10]



Слика 3.2 - Типични производи израђени поступком електроерозије [13]

Главне карактеристике поступка *EDM* пуном електродом су следеће:

- поступак је погодан за појединачну производњу, јефтинији је и прецизнији од *ECM*,
- квалитет обраде је N3 - N6,
- тачност димензија изратка је од 0,002 – 0,02 mm,
- мања производност од *ECM* $< 10\,000\text{ mm}^3/\text{min}$,
- диелектрична течност мора одводити насталу тогасу и мора се хладити, и
- у обратку могу остати заостали напони од високих температура.

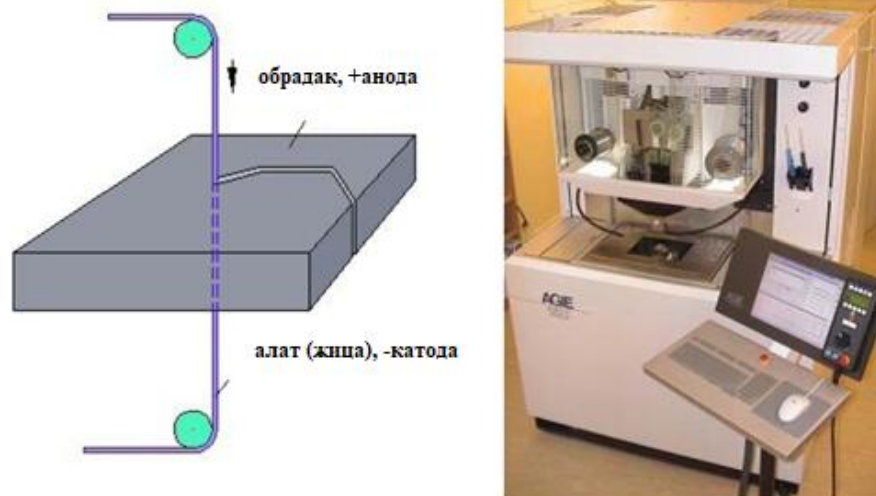
3.2. Електроерозиона обрада жицом

Главне карактеристике поступка *EDM* жицом су следеће:

- Алат је жица од бакрене легуре $\varnothing 0,25\text{ mm}$ - стандард волфрамова жица $\varnothing 0,02 - 0,08\text{ mm}$,
- Вођење жице је кроз прецизне сафирне вођице отпорне на хабање,
- Жица се као алат-електрода хаба и после употребе се баца,
- Жица се одмотава с калема и намотава на други калем,
- Бржи је поступак са жицом од *EDM* поступка са електродом,
- Брзина кретања жице у ху равни утиче на ширину реза:
 - Жица $\varnothing 0,2\text{ mm}$ уз $v_{ху} = 1\text{ mm/min}$ даје ширину реза од 0,25 mm,

- Примењује се нумерички управљана машина.

На слици 3.3 приказан је поступак и шема машине за *EDM* жицом, а на слици 3.4 типични производи израђени поступком *EDM* жицом.



Слика 3.3 – Поступак и машина обраде *EDM* жицом [13]



Слика 3.4 - Типични производи израђени поступком *EDM* жицом

4. ОПРЕМА ЗА EDM ОБРАДУ

Иако су *SEDM* и *WEDM* машине намењене електроерозионој обради, њихова примена и сврха ипак се разликују. Због тога графикони и подаци о технолошким параметрима обраде морају одговарати машини која се користи. Ово су само неке од разлика између ова два поступка.

Диелектрична течност:

- Машине за *SEDM* користе угљикохидратна уља у која је уроњен и обрадак и пражњење;
- Машине за *WEDM* обично користе дејонизовану воду.

Примена:

- Машине за *SEDM* обично се користе за производњу тродимензионалних облика, на пример калупа или обрадака са отворима;
- С обзиром да жица мора проћи кроз материјал који се обрађује, *WEDM* машине се искључиво користе за обраду предмета чије су спољашње површине и површине отвора обрадиве жицом постављеном између вођица машине.

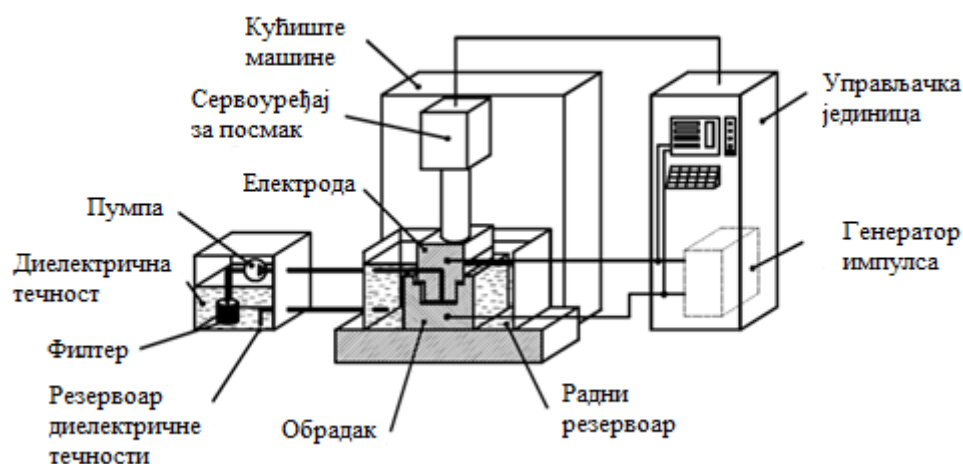
Пражњење код *SEDM* и *WEDM* поступка:

- Пражњења код *SEDM*-а настају по чеоној површини електроде и од рубова електроде. Дужина пражњења дефинисана је поставкама машине. Пражњења која се појављују са руба електроде стварају размак између руба електроде и бочне обрађене површине обратка који се зове додатни рез. Чеона површина електроде и површина додатног реза чине подручје пражњења.

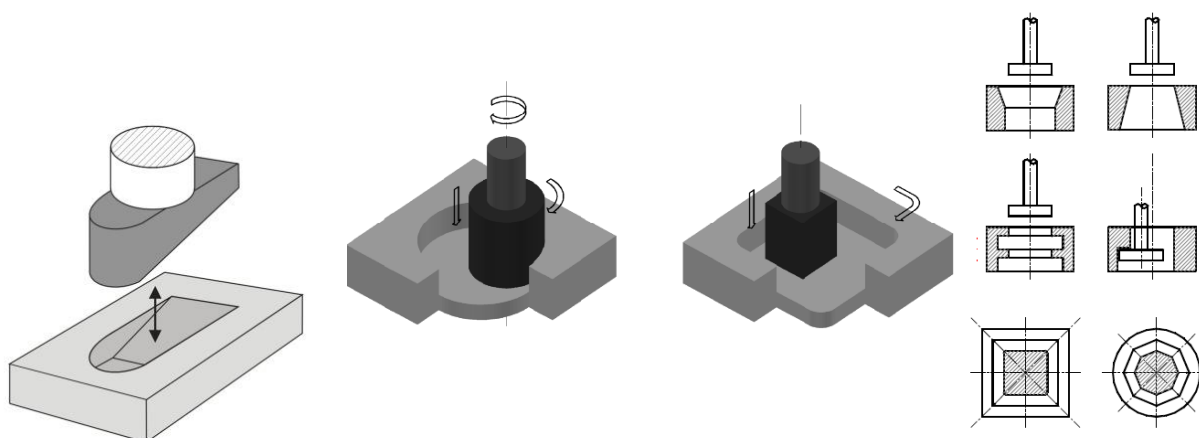
- Пражњења код *WEDM*-а настају по бочном рубу жице и обрађиване површине обратка.

Дужина пражњења дефинисана је поставкама машине. Подручје пражњења састоји се од само 180° предње стране жице, увећано за два размака дужине пражњења са сваке стране електроде током резања. Овај размак зове се додатни рез, а укупна ширина реза зове се усек.

На слици 4.1 приказани су основни елементи машине за *SEDM* поступак, а посебне могућности које те машине могу постићи помоћу *CNC* управљања приказане су на слици 4.2 [14].



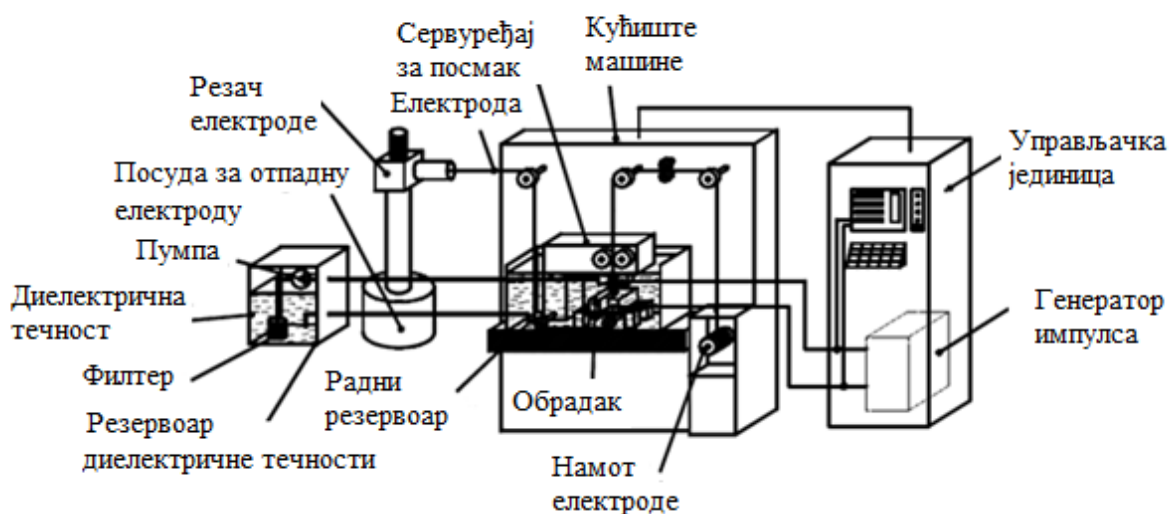
Слика 4.1 - Основни елементи машине за *SEDM* поступак



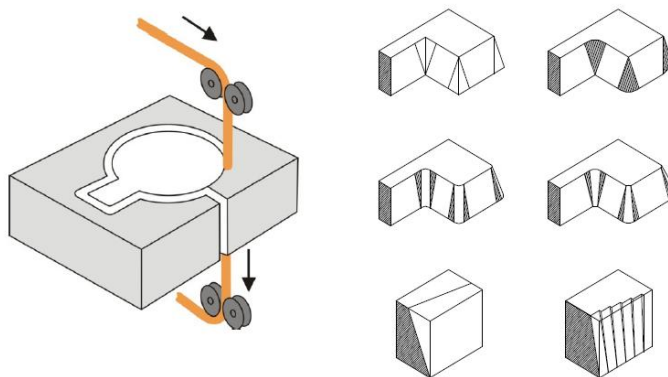
Слика 4.2 - Основни принципи и посебне могућности *SEDM* поступка с помоћу *CNC* управљања

На слици 4.3 приказани су основни елементи машине за *WEDM* поступак. Са слике је видљиво да је конструкција ове машине сложенија од машине за *SEDM* поступак. Међутим, управљање овом машином је једноставније јер се не мора окретати алат [14].

Посебне могућности, које те машине могу постићи уз *CNC* управљање и додатне две осе које омогућавају нагиб електроде, приказане су на слици 4.4. Нагиб се остварује тако што путање горњег и доњег механизма вођења жице немају идентичну путању. Комбинацијом путања могуће је направити сложене облике. На пример: на доњој површини кружна путања, а на горњој многоугаоник.



Слика 4.3 - Основни елементи машине за WEDM поступак



Слика 4.4 - Основни принцип и посебне могућности WEDM поступка помоћу CNC управљања

Квалитет производа израђеног неком од технологија описује се карактеристикама производа којима се прописују следеће дозвољена одступања:

- дозвољена одступања мера,
- дозвољена одступања геометријског облика површина (равност, кружност, цилиндричност,...),
- дозвољена одступања положаја површина (паралелност, управност,...),
- дозвољена одступања квалитета површине (микрогеометријска одступања - површинска храпавост),
- остала дозвољена одступања (механичка, хемијска).

Један од показатеља квалитета обрађене површине је површинска храпавост. Због утицаја великог броја фактора, захтевана површинска храпавост не може се једноставно постићи. После *WEDM* и *CWEDT* поступака, на површини обратка настаје бели слој (енгл. *white layer*) са карактеристикама лошијим од карактеристики материјала обратка. Најутичајнији фактори на површинску храпавост и брзину одвајања материјала код *WEDM* и *CWEDT* поступака су параметри импулса, геометријске карактеристике електроде-жице, динамичко понашање машине и електроде, притисак испирања, квалитет диелектричне течности итд [14].

Основни недостатак сваког *EDM* поступка је спорост одвијања поступка у односу на неки од традиционалних поступака обраде. Већина досадашњих истраживања имају за циљ повећање брзине одвајања материјала, уз мање трошкове електрода и боље карактеристике обрађене површине. Тај се циљ може остварити управљањем технолошким параметрима обраде. Међутим, сваки технолошки процес прати различите међусобно зависне параметре, што на крају доводи управљање таквим процесом до високог степена сложености.

5. ВРСТЕ ПРОГРАМИРАЊА

Развој обрадних система и машина високих експлоатацијских својстава омогућава истраживање обрадивости нових материјала, метода и поступака пројектовања модуларне изградње машина и управљања, итд.

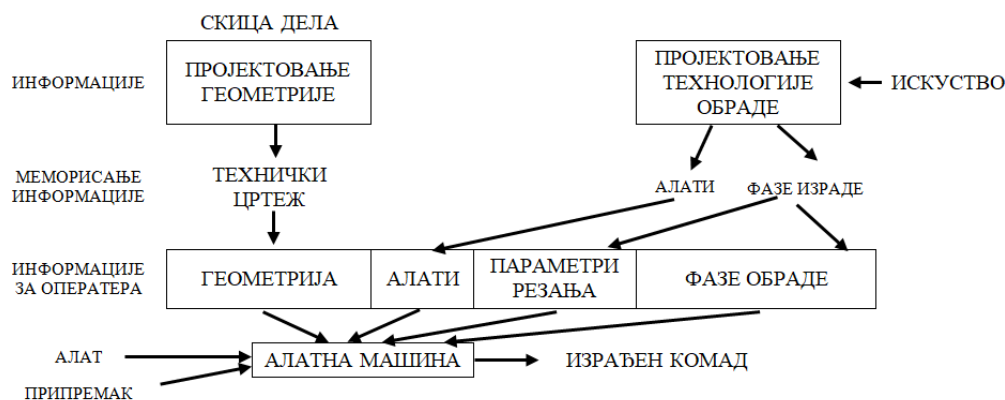
При проучавањима је потребно начинити разлику између пројектовања обрадних процеса и програмирања обраде. Пројектовање обрадних процеса је појам који се односи на проучавању законитости које се одвијају при појединим обрадама, дефинишући:

- Параметре обрадних процеса;
- Редослед операцијских захвата;
- Избор алата за обраду;
- Геометрију резних алата;
- Времена обраде;
- Трошкове обраде и слично.

Програмирање поступака обраде је појам који се веже за рачунарски управљане системе и обрадне системе, а односи се поред горе наведеног на дефинисање:

- Геометријских информација;
- Технолошких информација;
- Проучавања принципа и облика програмирања;
- Проучавања програмског језика;
- Програмирање и симулацију;
- Избор обрадног састава.

Алатна машина са нумеричким управљањем употребљава нумеричке податке за директно управљање кретања поједних делова машине. Нумерички подаци се процесирају у управљачкој јединици за обраду, (NC управљачког система), и онда се прослеђују погонима алатног строја за извршење програмираног кретања. За производњу једног одређеног машинског дела потребно је неколико врста података, као што су геометријски, технолошки, подаци резног алата, итд. Извор свих информација је технички цртеж, направљен у конструкцијском одељењу. Обрада тих података се изводи ручно за конвенционалне алатне машине и аутоматски за нумерички управљане алатне машине [15].



Слика 5.1 Информације потребне за производњу [15]

5.1. Типови нумеричког управљања

Постоји више могућности уношења података у управљачке јединице CNC машина, а неке од њих су:

- Ручно уношење програма у управљачку јединицу директно на машини;
- *DNC (Direct numerical control)* директно нумеричко управљање је у потпуности аутоматско преношење информација из рачунара у управљачку јединицу, а функције су му:
- Манипулација са NC програмима (учитавање, меморисање, брисање, извршавање, итд.);
- Едитовање NC програма;
- Уношење NC програма;
- Контрола протока материјала;
- Контрола производње.

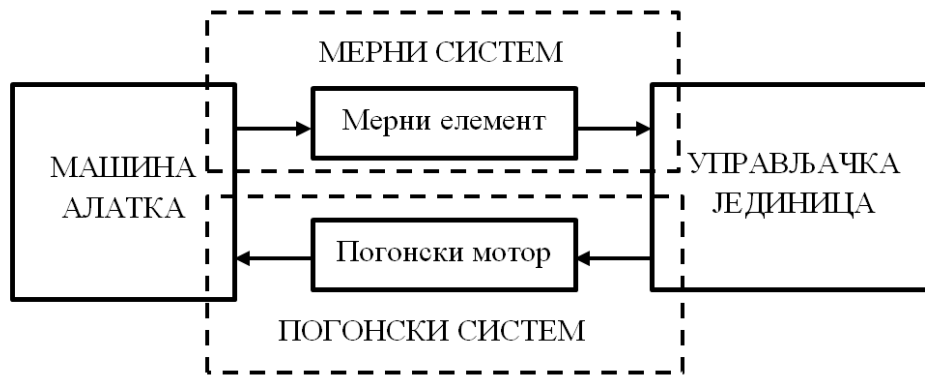
Напредније нумеричко управљање је адаптивно управљање (АЦ), које укључује сензоре за мониторинг (праћење) процеса обраде одвајањем честица и прилагођавањем истог новим условима.

5.2. Управљачки системи

Управљачки системи (управљачке јединице), представљају један од најважнијих система нумеричких и рачунарско управљаних машина. Управљачки систем има задатак да преко погонског система и система покретаних оса управља процесом обраде [15].

Управљачка јединица зависи о врсти нумеричког управљања, које се, у основи, карактерише геометријским и технолошким одредбама, те одређеним софтверским функцијама. На подручју нумеричког управљања до сада су развијени и налазе се у употреби многи управљачки системи, који се одликују високом флексибилношћу у раду. Сложеност управљачке јединице дефинише се низом одредби као што су:

- Број управљачких оса;
- Облика интерполације;
- Облика информација;
- Софтверске функције.



Слика 5.2 CNC систем [15]

Што се тиче броја управљачких оса може се рећи да су развијени системи: једноосног, двоосног и вишеосног управљања. Број управљачких оса зависи од машинског извођења, али синхронизација оса не мора бити на свим осама које су уграђене у машини. Јединице за двоосно управљање поседују могућност линеарне, кружне и контурне интерполације за кретање оса током обраде материјала.

Управљачке јединице су развијене на принципу модуларне изградње, а поједини модули омогућују одређене управљачке функције:

- Меморијски модул;
- Модул за интерполацију;
- Управљачки модул;
- Комуникацијски модул;
- Модул за приказивање слике на заслону;

- Модул за улаз података.

Управљачки системи NC и CNC машина тако су конципирани да програмиране информације прихватају ако су написане или задане у одговарајућем разумљивом коду. При кодирању информације се задају у алфа – нумеричком облику и према тачно дефинисаним правилима и одређеном редоследу.

Управљачки системи аутоматски препознају систем кодираних информација, мерних јединица и сл. Постоји више система кодирања од којих се углавном примењују ISO и EIA системи кодирања који су приказани у табели 5.1 и табели 5.2 [16].

Табела 5.1. Систем кодирања информација ISO

ISO DIN 66024										
	P	7	6	5	4		3	2	1	
	8	7	6	5	4	T	3	2	1	
Знак	Комбинација рупа									Функција (значење)
1.	2.									3.
NUL						.				Без бушења рупе
BS	•				•	.				Ход назад
HT					•	.			•	Табулатор
LF					•	.		•		Крај реченице
CR	•				•	.	•		•	Повратак (ход назад)
SP	•		•			.				Размак (међупростор)
(			•		•	.				Отворена заграда
)	•		•		•	.			•	Затворена заграда (напомена)
%	•		•			.	•		•	Почетак програма крај премотавања траке
:			•	•	•	.		•		Главни слог
/	•		•		•	.	•	•	•	Поништавање реченице
+			•		•	.		•	•	Позитиван предзнак
-			•		•	.	•		•	Негативан предзнак
.			•		•	.	•	•		Бројна вредност (цифра)
0			•	•		.				Број 0
1	•		•	•		.			•	Број 1
2	•		•	•		.		•		Број 2
3			•	•		.		•	•	Број 3
4	•		•	•		.	•			Број 4
5			•	•		.	•		•	Број 5
6			•	•		.	•	•		Број 6
7	•		•	•		.	•	•	•	Број 7
8	•		•	•	•	.				Број 8
9			•	•	•	.			•	Број 9
@	•	•				.				
A		•				.			•	Обртање око X осе

B		•				.		•		Обртање око Y осе
C	•	•				.		•	•	Обртање око Z осе
D		•				.	•			Обртање око било које осе
E	•	•				.	•		•	Крај блока програма
F	•	•				.	•	•		Помак, време задржавања
G		•				.	•	•	•	Услови пута, врсте кретања
H		•			•	.				Корекција дужине
I	•	•			•	.			•	Интерполација параметра за X осу
J	•	•			•	.		•		Интерполација параметра за Y осу
K		•			•	.		•	•	Интерполација параметра за Z осу
L	•	•			•	.	•			Подпрограма
M		•			•	.	•		•	Помоћне функције
N		•			•	.	•	•		Број слога
O	•	•			•	.	•	•	•	Не применити
P		•		•		.				Кретање паралелно са осом X
Q	•	•		•		.			•	Подпрограма (повећање дубине)
R	•	•		•		.		•		Подпрограма, параметар (радијус)
S		•		•		.		•	•	Број обртаја вретена
T	•	•		•		.	•			Број алата (корекција)
U		•		•		.	•		•	Кретање паралелно са осом X
V		•		•		.	•	•		Кретање паралелно са осом Y
W	•	•		•		.	•	•	•	Кретање паралелно са осом Z
X	•	•		•		.				Кретање у правцу осе X
Y		•		•		.			•	Кретање у правцу осе Y
Z						.				Кретање у правцу осе Z
DEL	•	•	•	•	•	.	•	•	•	Грешка (исправка грешке)

Табела 5.2. Систем кодирања информација EIA

EIA 244 A										
	8	7	6	P	4		3	2	1	P - контролни (парни бит) T - погонски (тактни) канал
	8	7	6	5	4	T	3	2	1	
Знак	Комбинација рупа									Функција (значење)
1.	2.									3.
O.						.				Без бушења

rupa										
RT			•		•	.		•		Ход назад
TAB			•	•	•	.	•	•		Табулатор
< = EOB	•					.				Крај реченице, крај траке
LC)		•	•	•	•	.		•		Повратак (ход назад)
ZWR				•		.				Пауза, прескок
(≡				•	•	.		•		Почетак напомене
) ≡		•			•	.		•		Завршетак напомене
EOR					•	.		•	•	Почетак програма, крај премотавања траке
.		•	•		•	.		•	•	Главни слог
/			•	•		.			•	Поништавање реченице
+		•	•	•		.				Позитиван предзнак
-		•				.				Негативан предзнак
0			•			.				Број 0
1						.			•	Број 1
2						.		•		Број 2
3				•		.		•	•	Број 3
4						.	•			Број 4
5				•		.	•		•	Број 5
6				•		.	•	•		Број 6
7						.	•	•	•	Број 7
8					•	.				Број 8
9				•	•	.			•	Број 9
@ ≡		•	•		•	.	•		•	
a		•	•			.			•	Обртање око X осе
b		•	•			.		•		Обртање око Y осе
c		•	•	•		.		•	•	Обртање око Z осе
d		•	•			.	•			Обртање око било које осе
e		•	•	•		.	•		•	Контрола читања
f		•	•	•		.	•	•		Помак, време задржавања
g		•	•			.	•	•	•	Функција кретања
h		•	•		•	.				Помоћна функција
i		•	•	•	•	.			•	Интерполација параметара
j		•		•		.			•	Интерполација параметара
k		•		•		.		•		Интерполација параметара
l		•				.		•	•	Подпрограма, на располагању
m		•		•		.	•			Помоћне функције
n		•				.	•		•	Број реченице
o		•				.	•	•		Не користи се

p		•		•		•	•	•	Време задржавања подпрограма
q		•		•	•	•			Подпрограм (повећање дубине)
r		•			•	•		•	Референтна раван, радијус
s			•	•		•		•	Број обртаја вретена
t			•			•		•	Број алата (коректура)
u			•	•		•			Оса паралелна X оси
v			•			•		•	Оса паралелна Y оси
w			•			•		•	Оса паралелна Z оси
x			•	•		•	•	•	Главна оса X
y			•	•	•	•			Главна оса Y
z			•		•	•		•	Главна оса Z
IRR		•	•	•	•	•	•	•	Исправка
UC		•	•	•	•	•			

Систем кодирања поред основних информација садржи и допунске функције и главне функције. Преглед допунских функција у систему кодирања дат је у табели 5.3 [16].

Табела 5.3. Преглед допунских функција у систему кодирања

EIA	ISO	ФУНКЦИЈА
i	I	Интерполациони параметар за циркуларну интерполацију (удаљеност почетне тачке од центра круга у правцу осе X)
j	J	Интерполациони параметар за циркуларну интерполацију (удаљеност почетне тачке од центра круга у правцу осе Y)
k	K	Интерполациони параметар за циркуларну интерполацију (удаљеност почетне тачке од центра круга у правцу осе Z)
k	K	Растојање крајње тачке код G28 и G83
r	R	Референтна раван код циклуса бушења G81 и G89
f	F	Помак у mm/min
f	F	Помак у mm/o код G95
f	F	Време задржавања код G04 у секунди и код G95 у обртајима вретена
f	F	Редуковање помака код G28
f	F	Програмирање времена помака G93
g	G	Главна функција
h	H	Корекција дужине
d	D	Корекција радијуса глодала
p	P	Број програма
p	P	Време задржавања (време обртања вретена код циклуса бушења)

5.3. Мерни системи

Тачност алатних машина у великој мери зависи од уграђеног мерног система. Свака управљачка оса има свој властити мерни систем који надзире кретање оса и упоређује их са задатом вредношћу.

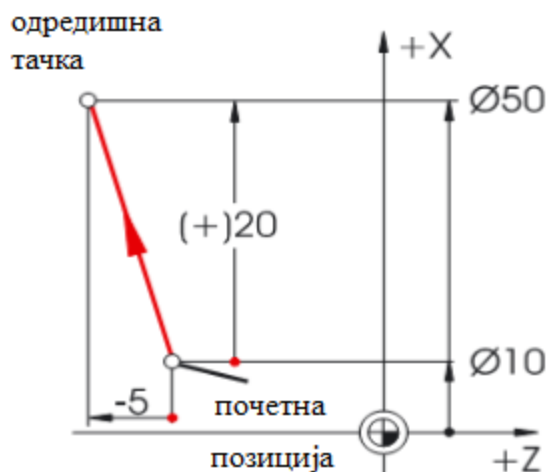
Врста машине и захтевана тачност одређује избор прикладног система мерења. Мерни системи раде углавном на оптичком- електронском принципу. Према поступку мерења разликују се следећи мерни системи:

1. Абсолютни мерни систем, (позива се функцијом G90), је такав систем код којег је свака тачка мерне стазе означена једнозначном вредношћу (слика 5.3). Нул тачка је у исходишту мерног система и то је почетна тачка за све остале мере [16].



Слика 5.3 Абсолютни мерни систем

2. Инкрементални мерни систем, (позива се функцијом G91), је такав систем где се мерна стаза дели на пуно малих инкремената (слика 5.4). Нулта тачка се може поставити на било којем месту, с тиме да је њено премештање врло једноставно. Унесене вредности су релативне у односу на тренутну позицију.



Слика 5.4 Инкрементални мерни систем

5.4. Структура програма

Програмирање представља припрему и састављање програма управљања (процес програмирања), који се у облику низа команди преноси на управљачку јединицу машине (ручним уносом, бушеном траком, рачунаром, итд.). Низом команди у програму дефинишу се геометријски, технолошки и помоћни услови који су потребни да би се добио жељени квалитет и облик радног дела.

Програмирање се изводи у *ISO* ситему - систем кодирања за бројке, слова и ознаке. Сваки програм састоји се из низа наредби, односно блокова у којима се налазе речи, а речи се састоје од адресе и нумеричког податка.

Програм представља скуп инструкција обрадном систему уређених по редоследу захвата с циљем извршења процеса обраде. Он се састоји од програмских речи и реченица. На слици 5.5 дат је пример програма процеса обраде.

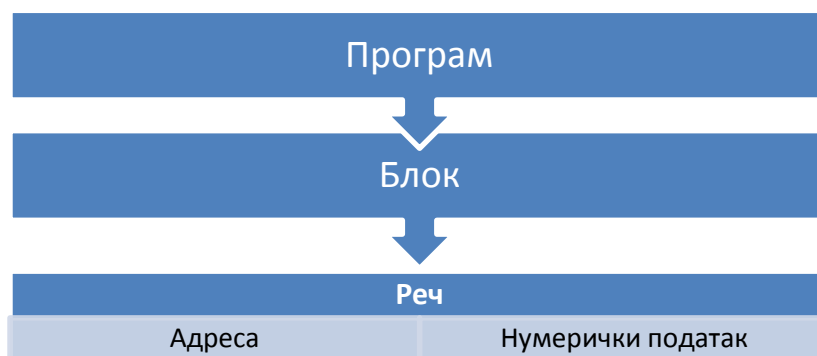
```

%
O00002 (PROGRAM 1)
N10 T1 M06 (ALAT D20)
N20 G54
N30 G00 X50. Y60. M08
N40 G43 H01 Z50.
N50 S1000 M03
N60 G00 X100. Y100.
N70 G00 Z5.
N80 G01 Z-2. F200.
N90 G01 X0 Y150. F800.
N100 X-100.
N110 Y-100.
N120 X100.
N130 Y150.
N140 G00 Z100. M09
N150 X70. Z50.
N160 Y50. Z150.
N170 X100. Y100. Z200.
N180 M30
%
```

Слика 5.5 Пример програма

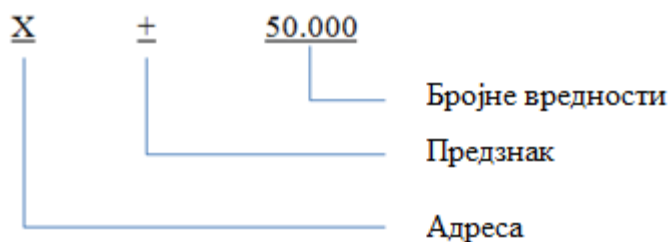
Сваки програм састоји се из низа наредби, односно блокова у којима се налазе речи, а речи се састоје од адресе и нумеричког податка (слика доле). Осим адреса и нумеричких знакова користе се и разни други знаци - %, /, (), ;... Адресе су уствари команде (функције) и означавају се словним ознакама G, S, F, M, T, D,...

На слици 5.6 приказана је једноставна шема система програмирања [16].



Слика 5.6 Систем програмирања

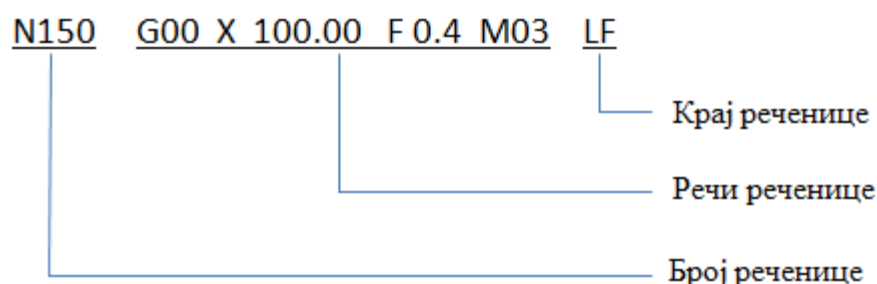
Програмска реченица, као и у говорном језику састављена је од програмских речи. Програмска реч је основни носилац информација и при програмирању има тачно одређени облик писања, величину (дужину) и садржај. Начином писања се идентификује реч, величином се ограничава број знакова, а садржајем бројне вредности или смисао. Он представља комбинацију слова, знакова и бројева. На пример:



Слика 5.7 Програмска реченица

Овако написана програмска реч представља инструкцију управљачком систему алатне машине за померање алата у позитивном смеру X осе за одређену бројну вредност.

Програмска реченица се састоји из више програмских речи и краја реченице. Знак краја реченице је потребно увек написати. Програмске реченице садрже услове пута, информације пута и помоћне функције. Структурна изградња реченице у ISO систему има облик приказан на слици 5.8.



Слика 5.8 Састав програмске реченице у ISO систему

Програмске реченице се могу програмирати с променљивим бројем знакова и могу бити изграђене на основи фиксне и променљиве дужине речи. Управљачки систем који прихвата информације путем програма с променљивом дужином реченице има предност, јер се тиме скраћује програм и време програмирања.

Прва реч реченице је број програмске реченице. Носи ознаку N(ISO) или n(EIA) и може узети вредност од 1 до 9.999. Број реченице се програмира само једанпут у реченици, и то у растућем редоследу. Програмске реченице се програмирају у интервалу 2,5, или 10, што омогућава увођење у програм додатних реченица. На пример, N2, N4, N6,..., N5, N10, N15, ... N10, N20, N30, ...

При програмирању користе се и остали знаци из система кодирања, који програмској реченици употпуњују смисао и осигуравају прегледност програма.

Поред главних функција неки произвођачи управљачких јединица користе и друге па на тај начин проширују могућности програмирања. Главне функције треба узимати из каталога дотичног управљачког система, јер постоје извесне разлике између појединих управљачких система.

Број помоћних функција варира од једног управљачког система до другог и зависи од врсте и намене алатне машине, затим од обима помоћних инструкција и уређаја на алатној машини.

Најважнији подаци који су потребни за израду програма су:

- Стезање обратка;
- Редослед захвата и операција;
- Алати за обраду;
- Технолошки подаци;
- Димензије изратка.

Да би се одредила кретања алата, на машину (обрадак) се поставља замишљени координатни систем. Његов центар се поставља по потреби, зависно од начина обраде и толеранција. Смерови оса одређени су интернационалним стандардом, као што је *ISO/R 841* или *DIN 66217*. Жељени помаци алата тада су одређени као тачке унутар тог координатног система и морају се подударати са димензијама изратка.

Свако појединачно кретање алата мора се написати као посебна инструкција управљања, заједно са припадајућим технолошким подацима (бр. обртаја вретена, смер обртања, корак...). Зависно од начина и места где се прави програм, разликује се ручно и машинско програмирање.

Ручно програмирање обично се ради ван машине, а накнадно уноси програм у меморију укуцавањем са тастатуре управљачке јединице (може се ручно програмирати и директно на машини).

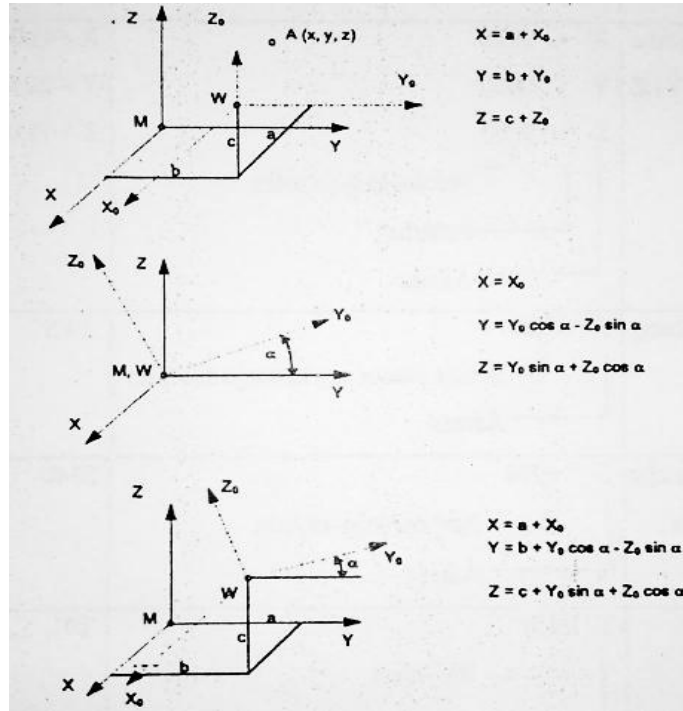
Машинско програмирање ради се на рачунару уз помоћ *CAD/CAM* софтвера, а програм такође накнадно уноси у меморију машине.

Екстерно уношење програма на машину врши се са рачунара, остваривањем стандардне комуникације *RS 232* (серијски порт), или, што је случај код новијих машина, уношењем преко *USB* порта који се налази на самој машини.

5.5. Координатни системи

За дефинисање узајамних положаја алата и предмета који се обрађују употребљавају се координатни системи. Најчешће се примењују правоугли и поларни координатни системи. Узајамни положаји алата и предмета дефинишу се са два координатна система: координатним системом алатне машине и координатним системом предмета. За координатни систем машине преко референтне и нулте тачке машине везан је положај алата, док се преко координатног система предмета дефинише геометрија коју треба обрадом постићи [16].

У обрадном процесу, као последица промене узајамних положаја алата и радног предмета, врши се трансформација једног координатног система у односу на други. На слици 5.9 приказане су трансформације координатних система за транслацију, ротацију и комбиновано кретање.



Слика 5.9 Основне трансформације координатних система

Зависно од врсте обраде дефинишу се одговарајући координатни системи машине и радног предмета. На слици 5.9 приказан је координатни систем машине и предмета при обради бушењем. Са X, Y и Z означен је координатни систем машине, а са X₀, Y₀, и Z₀ координатни систем обрађиваног предмета. За опис контуре обратка на располагању су геометријски елементи, као што су тачка, права, раван, круг итд. и за њих при програмирању постоје одређене математичке и симболичке дефиниције. Помоћу математичких и симболичких дефиниција описана је контура предмета, а инструкцијама за померање предмета и алата осигурана је обрада по тако дефинисаној контури. Програмирање обрадног процеса се изводи у координатном систему програма након чега се врши усаглашавање овог система са координатним системом машине.

При програмирању димензије обратка се могу везати за координатни систем у апсолутном или релативном облику, па тако настају два облика програмирања, апсолутно и релативно (инкрементно). Диспозиција координатних система зависи од типа алатне машине и поступка обраде.

6. ОСНОВЕ ПРОГРАМИРАЊА МАШИНЕ ЗА EDM

G код је заједничко име за групацију кодова који се највише употребљавају код програмирања нумерички управљаних машина (NC) а који могу имати различите примене. Најчешће се употребљава у аутоматски управљаним процесима и део су софтвера за рачунаром подржано инжењерство (CAE - *computer-aided engineering*).

G код се понекад назива G програмски језик. У језичком смислу G код је језик помоћу којег људи говоре NC машинама шта да направе и како то да направе.

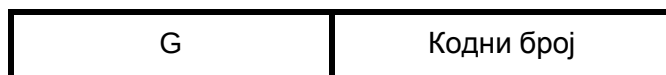
Израз “како” дефинише наредбе померања, колико брзо померити, по којим координатама померити, и кроз који део материјала алат треба да прође. Померање резног алата је најчешће према овим наредбама (инструкцијама) као и одсецање вишка материјала с циљем добијања завршног изгледа комада.

Први програм за нумеричко управљање машина са, имплементираним G кодовима, развијен је на MIT (*Massachusetts Institute of Technology*).

Према другом аутору G код има следећу дефиницију: G код (функција, реч) поставља услове за извршење наредбе путање X, Y, Z.

CNC управљању се саопштава, како код жељене обраде изратка треба бити извршено довођење алата за обраду на циљану тачку.

Реч за G код се састоји из адресног слова G и кодног броја како је приказано на слици 6.1.



Слика 6.1 G код

G-функције, или како се називају, услови пута, одређују кретање алата током обраде. Пуна адреса G-функције обележава се са GX, где X представља неки број који дефинише дату функцију (адресу).

На пример: G1, G28, G92 итд.

G - функције се деле на функције једноставног кретања и функције сложеног кретања или тзв. “циклусе”.

Једноставне G - функције су оне помоћу којих машина изводи једно кретање или операцију – линеарно, кружно кретање, чекање у месту, одлазак у референтну тачку итд.

Сложене G - функције или циклуси су оне помоћу којих машина извршава низ кретања и радњи у оквиру једне области – циклус дубоког бушења, циклус обраде жљебова, циклус урезивања навоја, итд.

Да би машина извршавала оно што је потребно, уз одређену G - функцију морају стајати и атрибути који одређују позиције алата или неку другу радњу, зависно од врсте G – функције: G01 X100. Y100. Z100.; G04 P5.; G43 X01 Z1.

Према намени управљачке функције деле се на:

- Функције за дефинисање система мерења (програмирања) G90 и G91;
- Функције за успостављање везе између координатног система машине и предмета обраде G92 и G93;
- Функције за дефинисање мода помака G94 и G95;
- Функције за дефинисање начина кретања G00, G01, G02, G03;
- Остале функције.

G – функције активне при укључивању машине су следеће:

- G0 – Брзи ход, позиционирање;
- G17 – Актуелна равна обраде је равна XY;
- G21 – Програмирање у метричком систему мера;
- G40 – Поништавање компензације пречника алата (G41, G42);
- G49 – Поништавање компензације дужине алата (G43, G44);
- G54 – Нулта тачка (прва у низу);
- G64 – Поништавање тачног заустављања (G61);
- G80 – Поништавање свих циклуса;
- G90 – Апсолутно програмирање;
- G94 – Брзина помоћног кретања у мм/мин;
- G98 – Повратак алата у иницијалну тачку циклуса.

6.1. Модалне функције

Модалне функције су оне које важе кроз више блокова, све док се не укину неком функцијом из исте класе. То у доброј мери убрзава програмирање јер се дозвољава прескакање писања функција и координата које су у претходним блоковима дате, а нису укинута неком функцијом из своје класе. Функције чије значење вреди само унутар једног блока (или док се не изврше) нису модалне, а то су помоћне функције и G - функције из модалне класе 0.

У табели 6.1 дат је списак G - функција, где је поред значења одређене функције дата и припадност модалној класи. Програмски језик CNC - управљања предвиђа цели низ кодираних G – функција [17].

Табела 6.1. G - функције (услови путање) и њихово значење

Редни Број	Речи G Функције	Значење речи
1	G0	Брзо позиционирање (ход)
2	G1	Линеарна интерполација
3	G2	Кружна интерполација (CW)
4	G3	Кружна интерполација (CCW)
5	G4	Време задржавања
6	G9	Тачно заустављање
7	G10	Модификација корисничких параметара CLE или Rmin
8	G11	Модификовање параметара за машинирање
9	G17	Избор равни
10	G20	Програмирање у инчном систему
11	G21	Програмирање у метричком систему
12	G22	Меморисана функција граничне капи ON
13	G23	Меморисана функција граничне капи OFF
14	G28	Одлазак у референтну тачку
15	G29	Међуположај пре референтне тачке
16	G30	2, 3, 4 повратак у тачку корисника
17	G32	Чување тренутне тачке као корисничке тачке 2, 3, 4
18	G33	Постављање корисничке тачке 2, 3, 4
19	G40	Поништавање коректуре пречника алата
20	G41	Корекција дужине алата – лева
21	G42	Корекција пречника алата – десна
22	G46	Оптимална обрнута контрола ON
23	G47	Оптимална обрнута контрола OFF
24	G48	Функција заокруживања угла ON
25	G49	Функција заокруживања угла OFF
26	G50	Отказивање нагиба жице
27	G51	Нагиб жице лево
28	G52	Нагиб жице десно

29	G53	Померање у апсолутном координатном систему
30	G60	Стални радијус ивице
31	G61	Минимални конични угао
32	G62	Средњи конични угао
33	G63	Максимални конични угао
34	G65	Позивање тасго локално
35	G66	Позивање тасго глобално
36	G67	Поништавање тасго позива
37	G68	Режим просецања
38	G69	Зауставни режим
39	G70	Завршетак
40	G71	Центрирање
41	G72	Центрирање главе
42	G73	Подешавање жице и циклус подешавања водича
43	G74	Подешавање мерне тачке
44	G75	Позиционирање у координатном систему машине
45	G76	Позиционирање према мерној тачки
46	G77	Позиционирање према мерној тачки
47	G78	Позиционирање – угао
48	G79	Прорачун угла нагиба радног комада
49	G86	Отказивање функције везивања
50	G87	Задржавање отпада притиском mod
51	G88	Отклањање везивања
52	G89	Дужина прилога
53	G90	Апсолутна команда
54	G91	Релативна команда
55	G92	Подешавање дела система координата
56	G93	Подешавање локалног координатног система
57	G94	Константно напајање
58	G95	Серво напајање

Из табеле 6.1 се види подела у групе према припадајућим G - функцијама. Све G - функције наведене у табели 6.1 остају важеће у програму и за наредне програмске реченице, све док се изричито не измене.

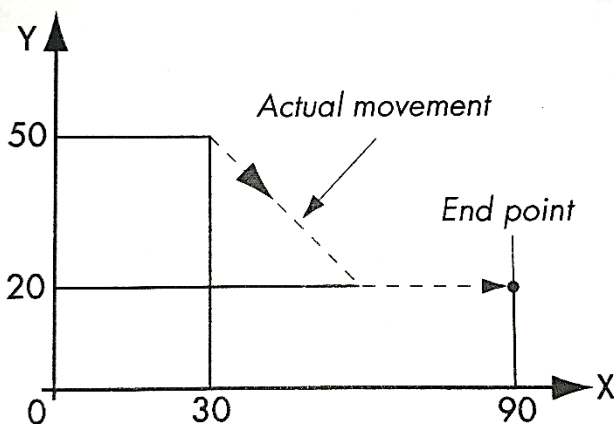
6.2. Опис G - кодова

6.2.1. G00 Заустављање у полазној позицији – брзо кретање у празном ходу

Наредбом G00 врши се брзо кретање у празном ходу (алат и обрадак нису у контакту) до програмиране циљне тачке (слика 6.2). Брзина овог кретања се посебно не наводи. Код сваке алатне машине брзина овог кретања је већ програмски одређена. Ово кретање од тренутне до циљне тачке може се вршити истовремено у правцу свих координатних оса, или ће пак максимална брзина бити по оној оси у чијем правцу је пут кретања највећи. На пример, формат наредбе је:

- Апсолутна команда: N.... G00 X.... Z....
- Релативна команда: N.... G00 X.... Y.... Z....

где су X, Y, Z, координате циљне тачке у апсолутном систему, или растојања у правцима координатних оса између почетне и циљне тачке у инкременталном систему.



Слика 6.2 Кретање у брзом ходу, G00 [17]

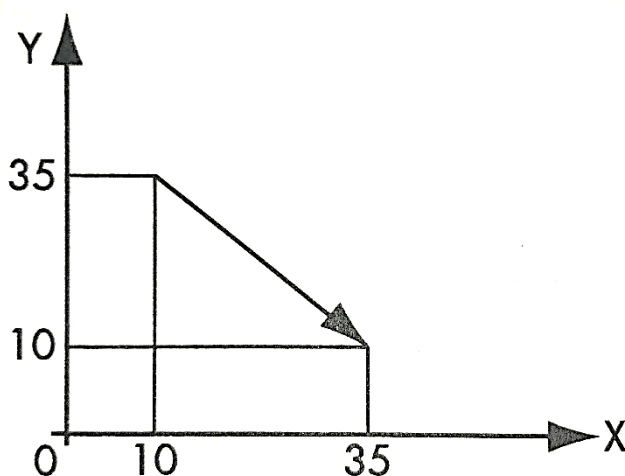
Ова функција служи за кретање у брзом ходу (m/min) од тренутне позиције до програмиране позиције. Програмира се са условом пута G0 и крајњом позицијом алата X, Y, Z. Ова крајња позиција може бити програмирана у апсолутним координатама (у односу на координатни почетак "W") или инкременталним мерама (у односу на предходну позицију). Кретање по X, Y и Z осама од једне до друге тачке контролисано је линеарним интерполатором. Пређени пут не достижу све три осе истовремено. Прво се врши кретање по две осе најкраћим растојањем (под 45°), а онда и кретање по трећој оси до програмиране тачке. Треба избегавати брзи ход G0 дат са све три координате у једном блоку (G0 X100. Y150. Z200.).

6.2.2. G01 Линеарна интерполација

Наредбом G01 врши се помоћно кретање по правој линији произашлој из линеарне интерполације. Померање алата од почетне до циљне тачке се у овом случају врши програмираном брзином и то F – наредбом. На пример, формат ове наредбе је:

- Апсолутна команда: N.... G01 X.... Z.... F....;
- Релативна команда: N.... G01 X.... Y.... Z.... F....

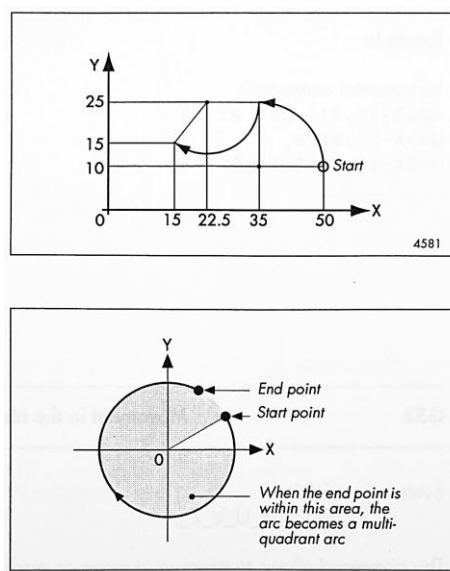
где су X, Y, Z, координате циљне тачке у апсолутном систему, или растојања у правцима координатних оса између почетне и циљне тачке у инкременталном систему, а F је брзина радног хода, mm/min.



Слика 6.3 Линеарна интерполација [17]

6.2.3. G02, G03 Кружна интерполација

Помоћу наредбе G02 управљачка јединица генерише кружно кретање алата од почетне до циљне тачке и то у смеру кретања казаљке на сату, а помоћу наредбе G03, у смеру супротном кретању казаљке на сату (слика 6.4). Подаци којима се описује кружни лук дају се за десно оријентисани координатни систем. При томе се раван у којој се описује кружни лук у смеру кретања казаљке на сату (G02) и смеру супротном кретању казаљке на сату (G03) посматра у негативном смеру координатне осе која је нормална на остале две осе којима се дефинише дата раван (слика 6.5). Директно везано с овим, дате су и наредбе G17, G18 и G19 за избор равни XY, XZ и YZ. За кружну интерполацију, осим услова пута G02 и G03, програмска реченица мора да садржи и податке о координатама циљне тачке и координатама средишта круга, или величине радијуса датог круга.



Слика 6.4 Кружна интерполација G02, G03 [17]

Формат Апсолутна команда:

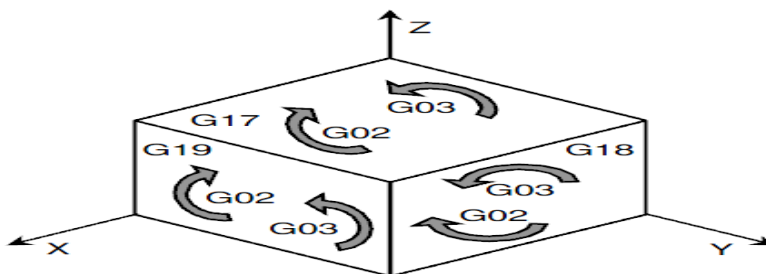
- N.... G02 X.... Z.... I.... K.... или
- N.... G02 X.... Z.... B....

где је: X, Z, координате циљне тачке кружног лука; I, K, релативни кружни параметри (удаљености од почетне тачке кружног лука до центра; I се односи на X осу, а K на Z осу); B, радијус кружног лука (ротација око Y осе).

Формат Релативна команда:

- N.... G02 X.... Y.... Z.... I.... J.... K.... или
- N.... G02 X.... Y.... Z.... U....

где је: X, Y, Z, координате циљне тачке кружног лука; I, J, K, релативни кружни параметри (I се односи на X, J на Y и K на Z осу); U, радијус кружног лука (кретање паралелно X оси).



Слика 6.5. Оријентација кретање за наредбе G02, G03 и наредбе за избор равни G17, G18, G19 [17]

Наиме, по укључивању машине важи наредба G17 (раван XY), тако да се не мора наглашавати ако се обрада изводи у равни XY. Уколико се обрада врши у некој од две преостале равни (XZ или YZ), потребно је у реченици са G2 дати и радну раван G18 или G19. Постоје две могућности да се програмира кретање по кружници. Прва је да се зада полупречник кружног лука R по којем се креће алат. Друга могућност, и уједно најсигурнија, је да се дају растојања почетне тачке кретања алата до центра кружнице I, J, K. У овом случају кретање је независно од нулте тачке и величине кружног лука.

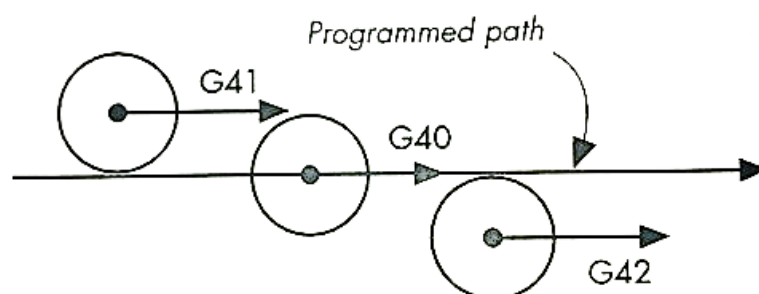
Предзнаци растојања I, J, K су врло битни и одрђују се правцем оса по којима се мере, а у смеру од почетне тачке кретања ка центру кружнице.

6.2.4. G4 – Време задржавања

Време задржавања се програмира адресом G4.

На пример G4 P200. Параметром P дефинише се време задржавања алата у месту, у секундама (без тачке иза целог броја су милисекунде).

Кретање жице у зависности од изабране команде приказано је на слици 6.6.



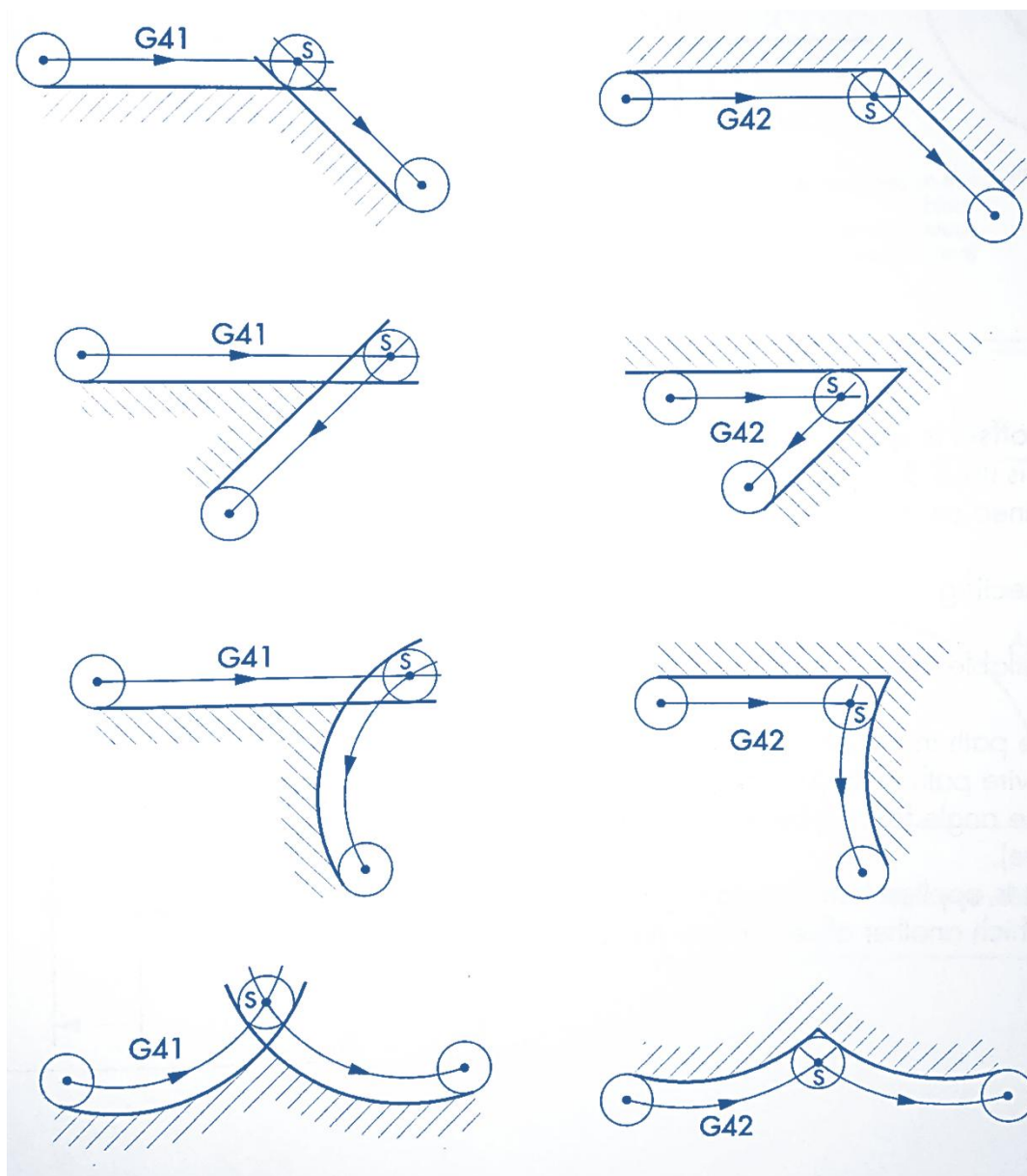
Слика 6.6 G40, G41, G42 програмирана путања [17]

Када се жица помера по програмираној путањи, офсет жице је поништен. Ово стање се постиже када је укључена машина или је NC ресетовано.

Када је команда G40 селектована, офсет жице је поништен на почетку блока где је он програмиран.

Када је G41 или G42 команда селектована, жица се помера помера по левој односно десној страни у следећем блоку.

Команде G40, G41, G42 су модалне, оне остају у функцији све док се неке друге G40, G41, G42 не селекују или док се NC не ресетује. Пример машинирања може се видети на слици 6.7.



Слика 6.7 Пример машинирања [17]

6.2.5. G90, G91 Абсолютни и релативни координатни систем

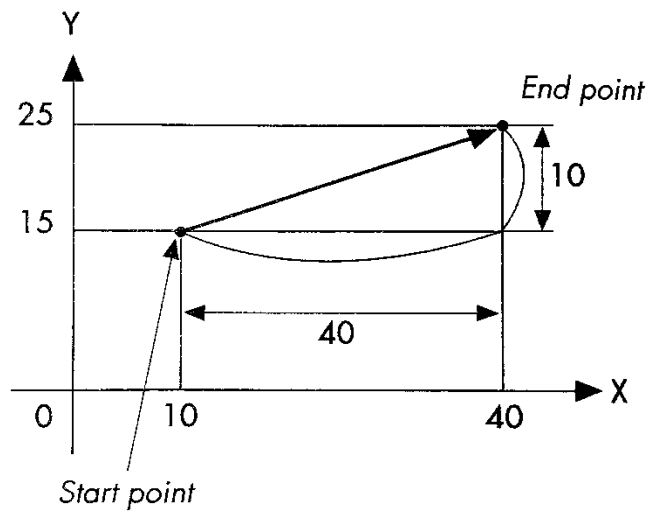
Кретање може бити дефинисано на два начина:

1. Абсолютна команда дефинише координате тачке по којој ће кретање бити остварено. Координате су дефинисане у координатном систему.
2. Релативна команда дефинише кретање релативно у односу на тренутну позицију.

- Абсолютна команда: N.... G90 X40 Z25
- Релативна команда: N.... G91 X30.Y10

Апсолутна и релативна команда се могу заменити на опционом месту у оквиру блока.

На слици 6.8 приказан је пример команде у апсолутном и релативном координатном систему.

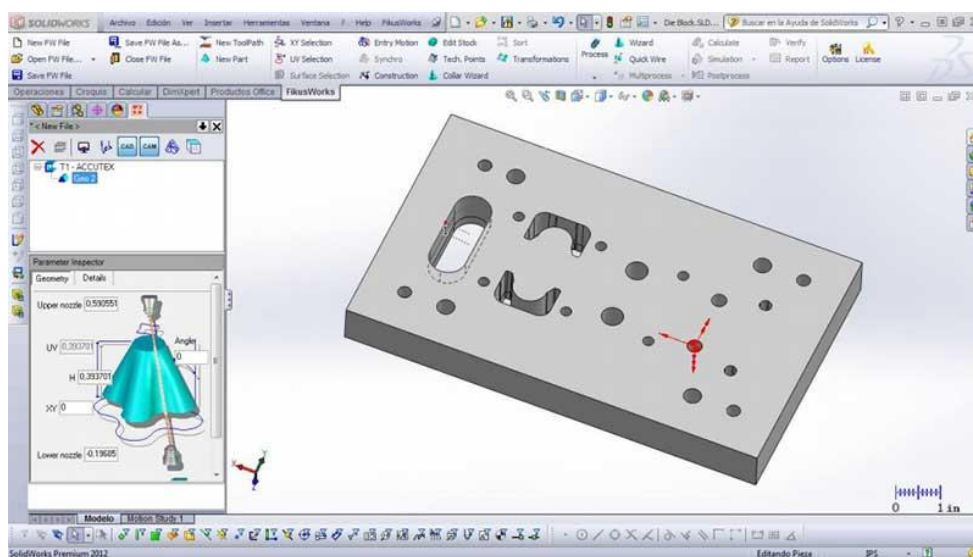


Слика 6.8 Пример команде [17]

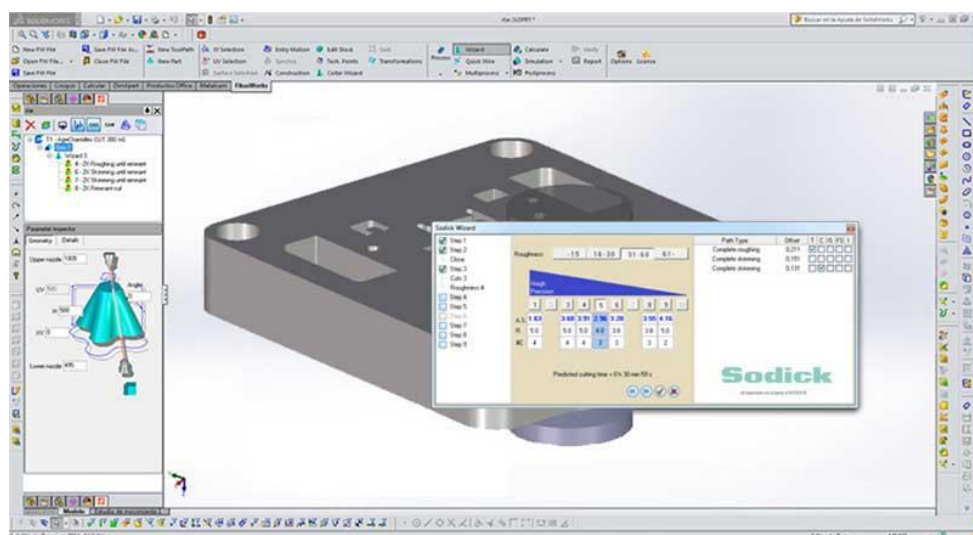
7. ПРИМЕР ПРОГРАМИРАЊА МАШИНЕ

Програмирање обрадних процеса за NC и CNC машине изводе углавном технологији програмери који треба да познају технологију обраде, карактеристике обрадних система, правила програмирања, поступке оптимизације обрадних процеса и друга знања из подручја процеса обраде и управљачких система – рачунара.

Када се заврши са CAD задацима, директно се отвара картица *FikusWorks* (слика 7.1) у главном менију *SolidWorks* и почиње се са радом са интуитивним, једноставним за коришћење и ефикасним *Fikus CAM* решењем за жичани EDM. Сви алати укључени у *FikusWorks* су дизајнирани за повећање продуктивности.

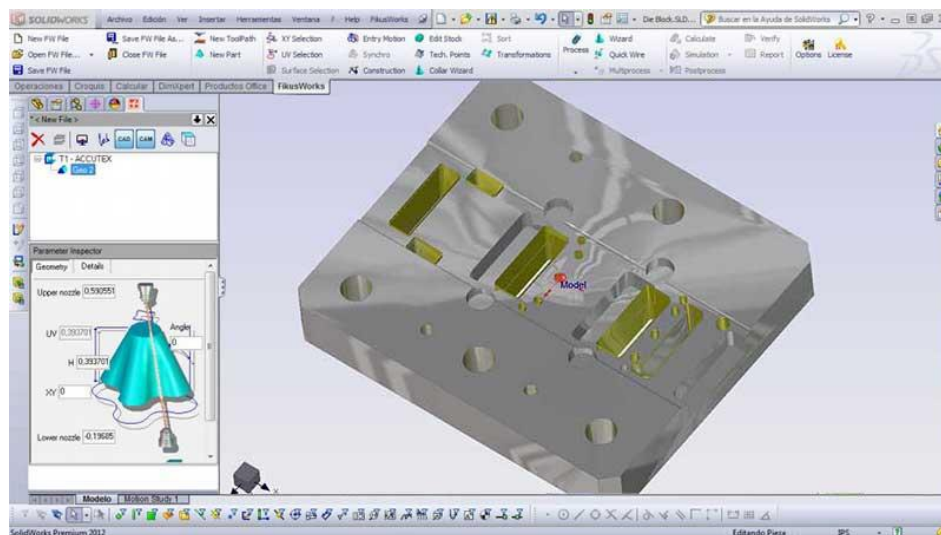


Слика 7.1 - *FikusWorks* прозор



Слика 7.2 - *FikusWorks* са отвореним *Sodick Wizard*-ом

Са *FikusWorks*-ом може да се обради било који облик калупа, језгро, облик шупљине или профил. Контролише се сваки параметар резања: офсетинг, аутоматско навођење, положај жице, константан и варијабилни конус и *Auto-fix*, контрола величине остатка за бољи део одвајања.

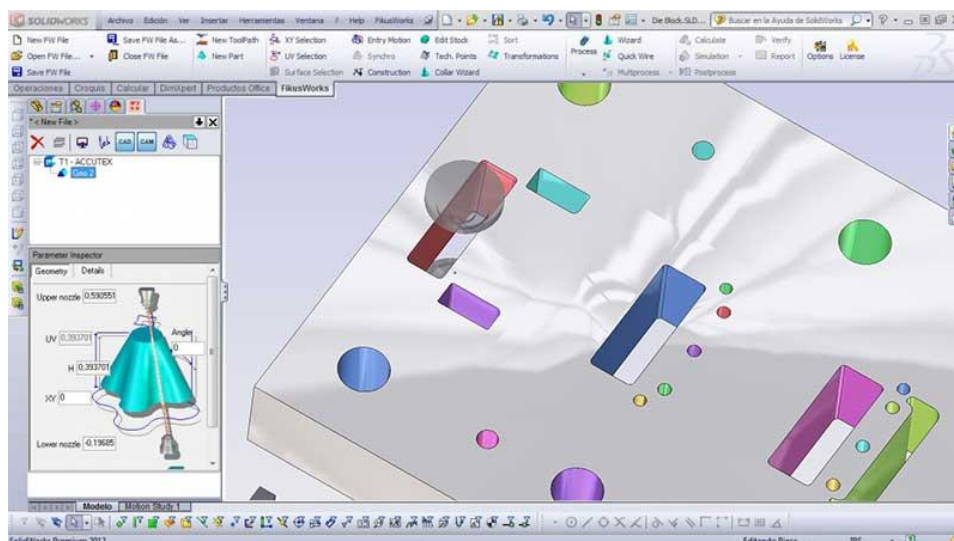


Слика 7.3 - *Fikus Recognition*



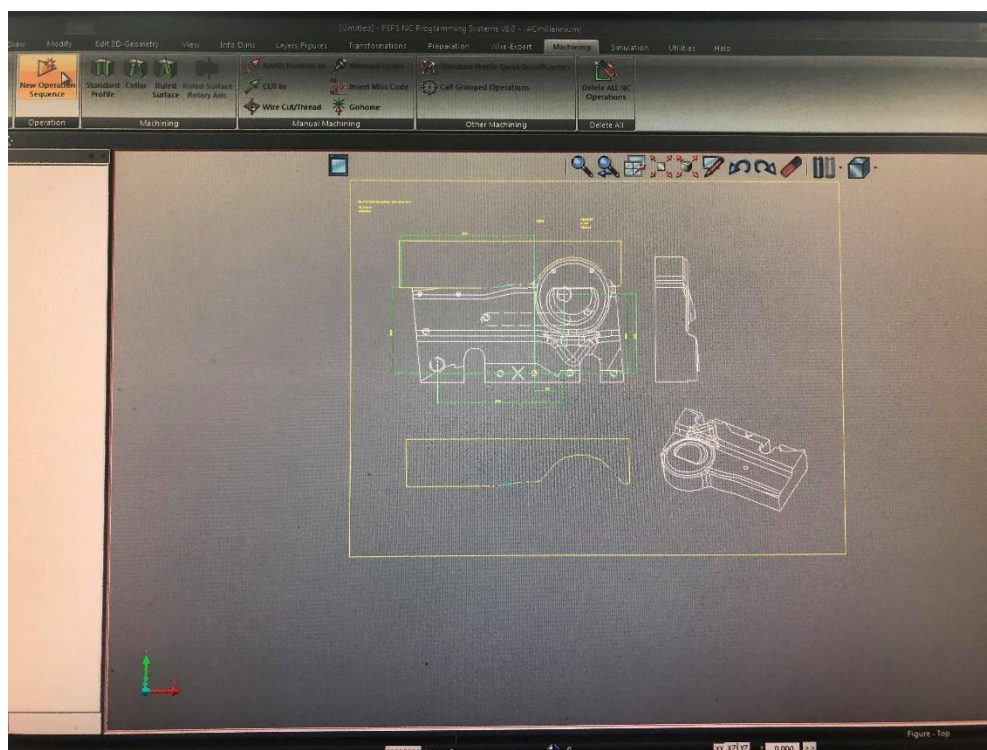
Слика 7.4 - Одабир машине за рад

Функција аутоматског препознавања открива све делове који се одстрањују са модела. Након тога се пушта симулација у рад (Слика 7.5).



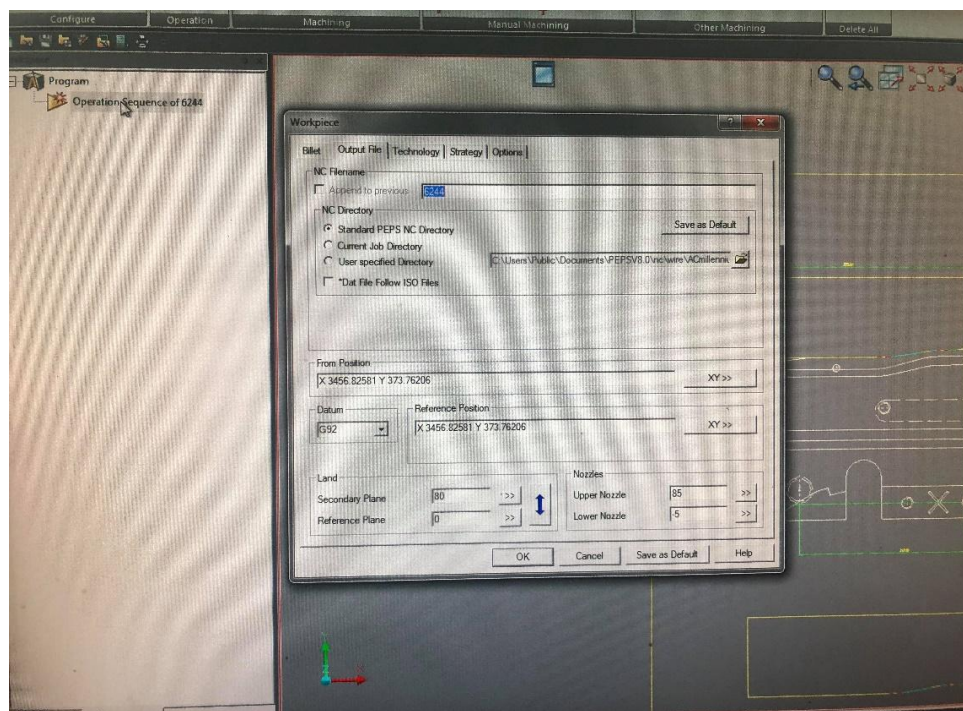
Слика 7.5 - *FikusWorks* симулација

Други практични пример је урађен у *PEPS* софтверу. Када се заврши са *CAD* задацима, у првом кораку се уцртава путања кретања жице (Слика 7.6).



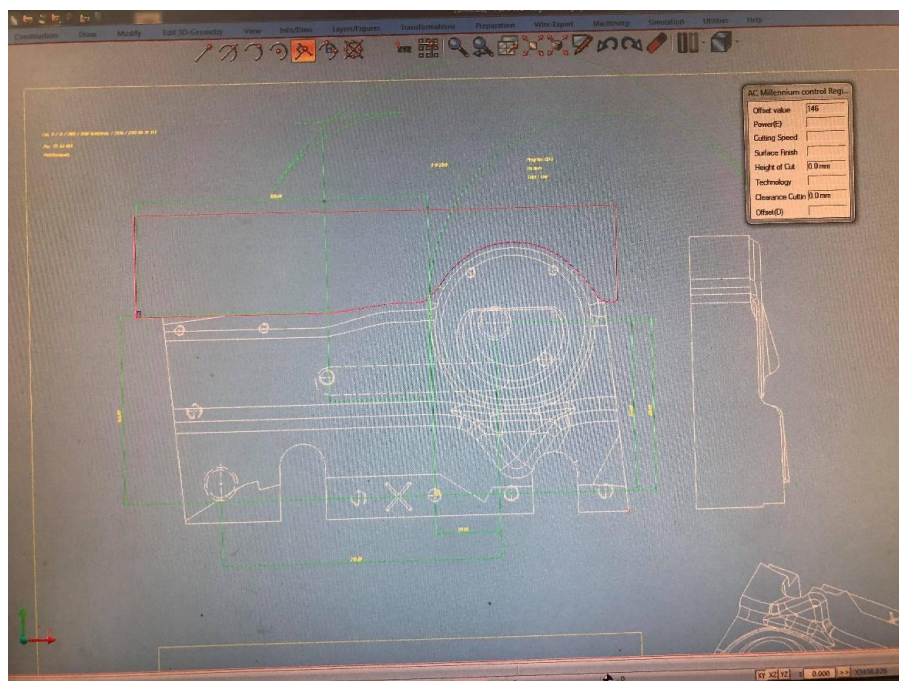
Слика 7.6 Путања кретања жице означена жутом линијом

Након тога се уносе основни подаци о алату (Слика 7.7).

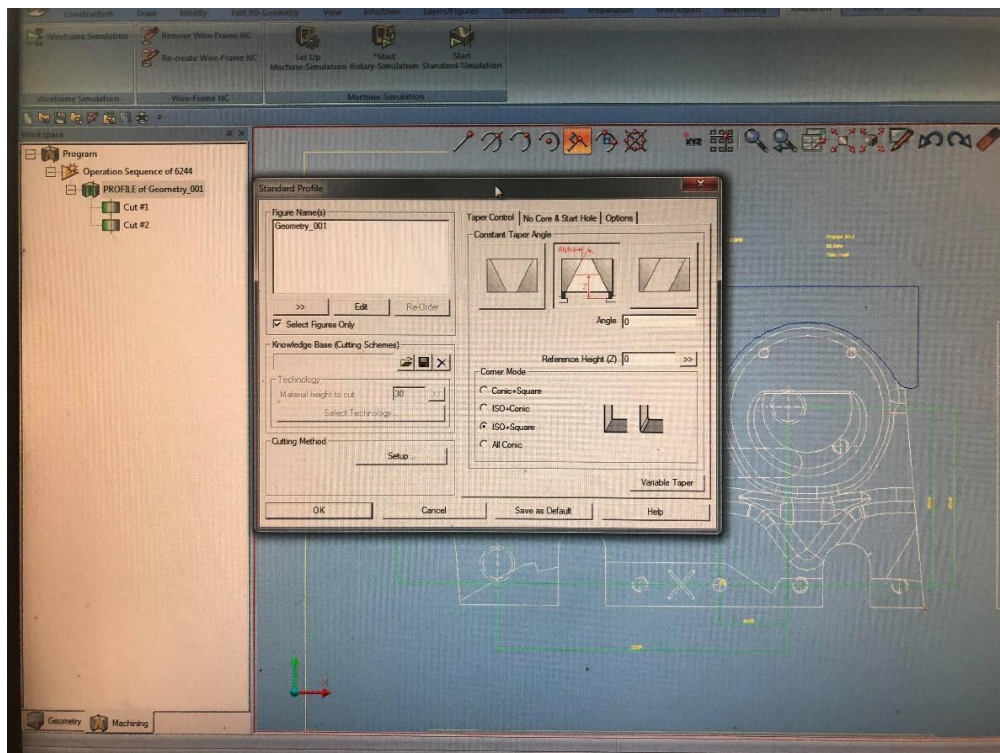


Слика 7.7 Уписивање основних података о алату

Унаредном кораку се одређује почетна тачка (Слика 7.8) и путања по којој ће се кретати жица (Слика 7.9).

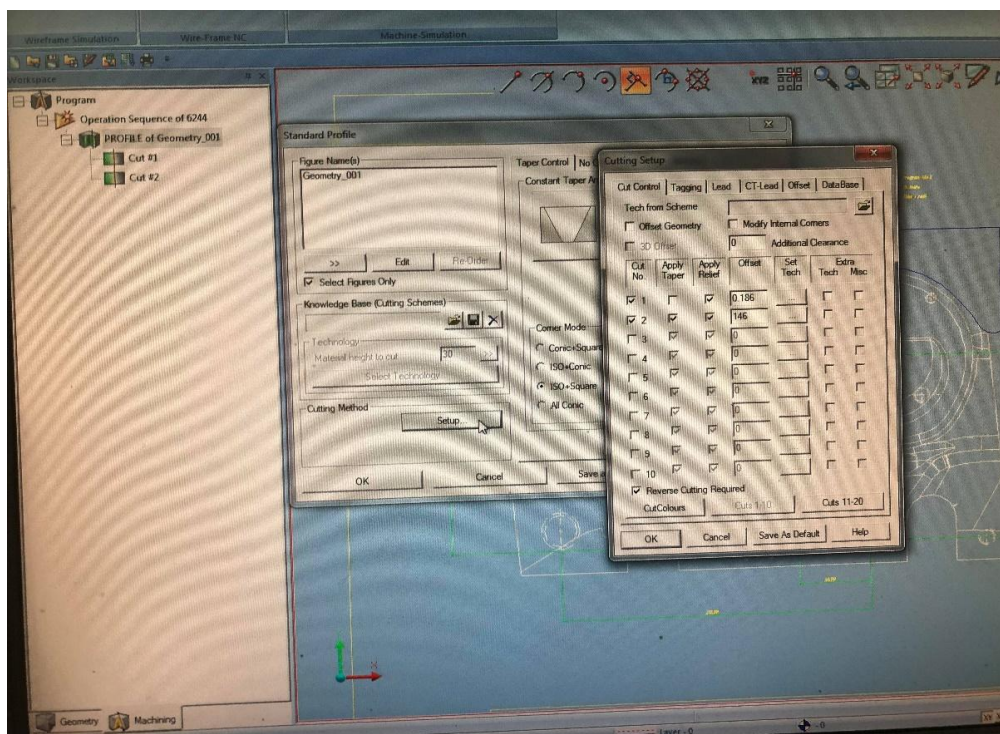


Слика 7.8 Одабир почетне тачке



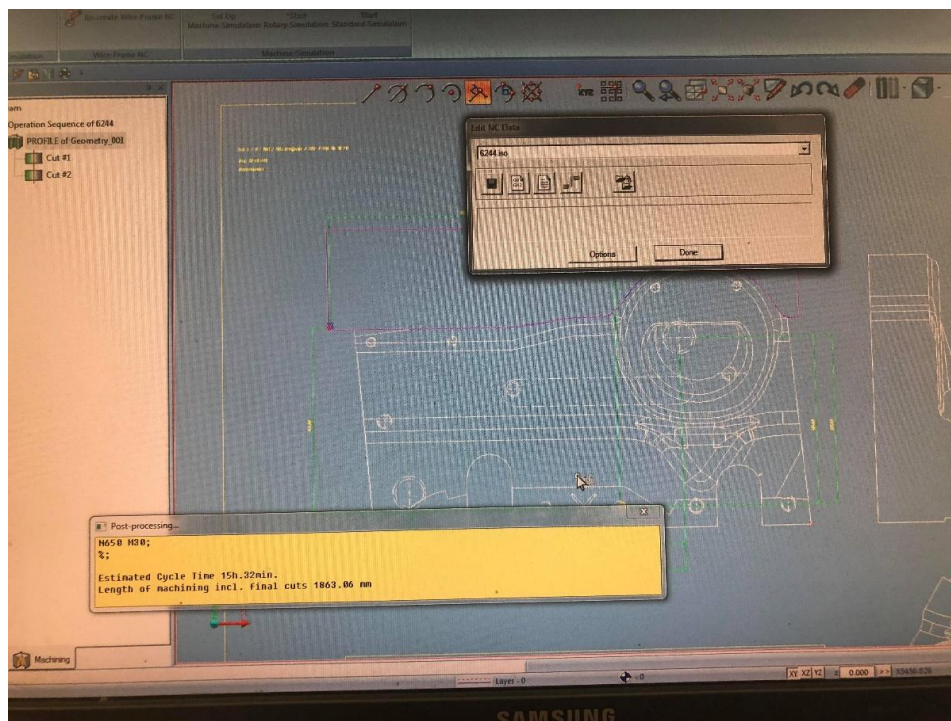
Слика 7.9 Обележавање путање жице

У следећем кораку се уносе потребни параметри алата и пушта се симулација (Слика 7.10).

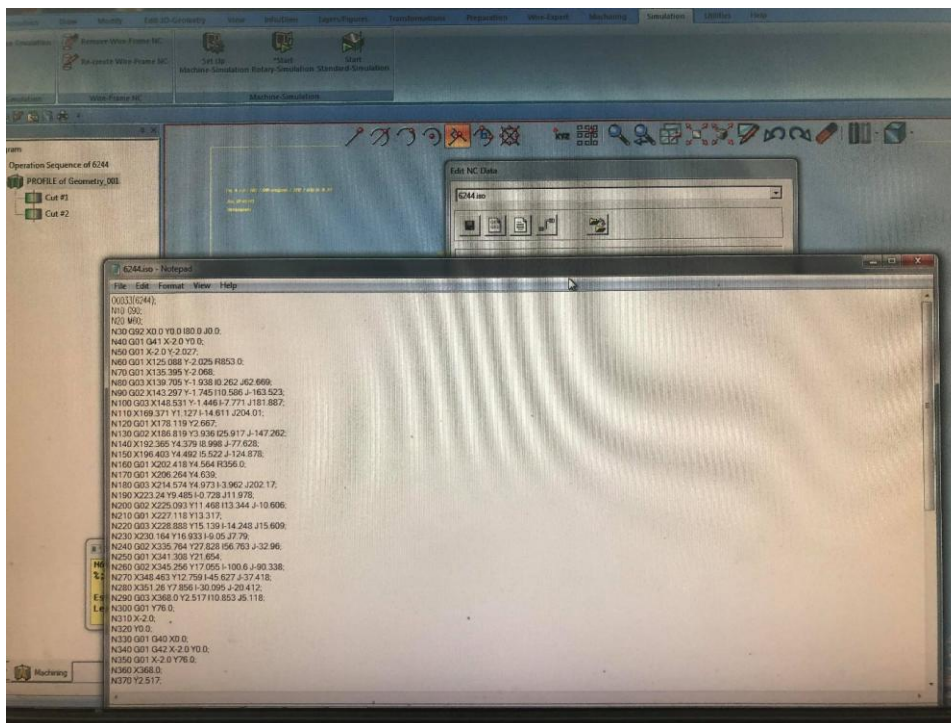


Слика 7.10 Уношење потребних параметара

Након завшетка симулације добијају информације о времену потребном да обрада изврши (Слика 7.11) и кодови који се шаљу CNC машини (Слика 7.12 и Слика 7.13).



Слика 7.11 Време до завшетка обраде



Слика 7.12 Кодови за обраду

%
(6244)
G92X0Y0;
G41G91G01X-2.000;
G01Y-2.027;
G01X125.300Y.001;
G02X3.577Y-.007I.010J-853.000;
G01X8.518Y-.036;
G03X4.311Y.130I.262J62.670;
G02X3.592Y.193I10.586J-163.523;
G03X5.235Y.299I-7.770J181.887;
G03X20.840Y2.573I-14.611J204.010;
G01X8.748Y1.539;
G02X8.700Y1.269I25.917J-147.262;
G02X5.546Y.443I8.998J-77.627;
G02X4.038Y.113I5.522J-124.878;
G01X4.639Y.055;
G03X2.751Y.043I-4.225J355.975;
G01X2.471Y.048;
G03X8.310Y.334I-3.962J202.170;
G03X8.666Y4.512I-.728J11.978;
G02X1.852Y1.983I13.344J-10.606;
G01X2.026Y1.849;
G03X1.770Y1.823I-14.248J15.609;
G03X1.276Y1.793I-9.051J7.790;
G02X105.600Y10.895I56.763J-32.960;
G01X5.544Y-6.174;
G02X3.948Y-4.599I-100.600J-90.338;
G02X3.208Y-4.295I-45.627J-37.418;
G02X2.796Y-4.903I-30.095J-20.412;
G03X16.740Y-5.339I10.854J5.118;
G01Y73.483;
G01X-370.000;
G01Y-76.500;
G01X2.000Y.500G40;
M02;

Слика 7.13 Кодови за обраду

8. ЗАКЉУЧАК

Електроерозионим поступцима обраде је могуће реализовати велики број производних операција коришћењем профилисаног или непрофилисаног алата у виду пуне или жичане електроде. Отуда се *EDM* поступци обраде деле на: *EDM* поступке обраде пуном електродом, код којих се обликовање површина остварује копирањем облика алата или узајамним кретањем алата и предмета обраде и *EDM* поступке обраде жичаним електродама, код којих се користи непрофилисани алат (жичана електрода). Различите методе за електроерозиону обраду захтевају основну опрему која се састоје од машине, инсталације за диелектрикум и од генератора импулса. Савремене инсталације за *EDM* изводе се и са нумеричким системима управљања.

Основни недостатак сваког *EDM* поступка је спорост одвијања поступка у односу на неки од традиционалних поступака обраде. Већина досадашњих истраживања имају за циљ повећање брзине одвајања материјала, уз мање трошкове електрода и боље карактеристике обрађене површине. Тај се циљ може остварити управљањем технолошким параметрима обраде. Међутим, сваки технолошки процес прати различите међусобно зависне параметре, што на крају доводи управљање таквим процесом до високог степена сложености.

Програмирање технолошких процеса је најважнија активност за успешну експлоатацију *CNC* обрадних система. Програмирање технолошких процеса за *CNC* машине садржи низ корака које треба реализовати да се на основу: цртежа изратка и припремка, технолошког поступка операцијских захвата, плана стезања обратка, машине и алата за обраду, технолошких параметара обраде и геометрије изратка прилагођене изради програма добије у одређеном облику управљачки програм (*CAM*) исписан одређеним следом и кодом по правилима програмског језика и на начин (*ISO 6983* или *DIN 66024*) да их управљачка јединица нумерички управљане машине може прихватити и обрадити.

Под програмирањем технолошких процеса обраде подразумева се скуп активности на разради, систематизацији, кодирању, уписивању информација на одговарајући носач и преношењу у меморију управљачког система. У овом раду је ближе објашњено коришћење *G* кодова чије је познавање неопходно за функционално коришћење *CNC* машина.

8. ЛИТЕРАТУРА

- [1] М. Лазић, Неконвенционални поступци обраде, Научна књига, Београд, 1990.
- [2] М. Гостимировић, Неконвенционални поступци обраде, Факултет техничких наука, Нови Сад, 2012
- [3] Б. Недић, Неконвенционални поступци обраде, скрипта, Машински факултет, Крагујевац, 2000.
- [4] N. Malhotra, S. Rani, H. Singh, Improvements in performance of EDM-A review, Southeastcon 2008. Proceedings, str. 599-603. 2008.
- [5] G. Boothroyd i A.K. Winston, Fundamentals of Machining and Machine Tools, Marcel Dekker, Inc, New York, str. 491, 1989.
- [6] S. F. Krar, A. F. Check, Electrical discharge machining, Technology of Machine Tools, Glencoe/McGraw- Hill, New York, str. 800, 1997.
- [7] F. Roethel, L. Kosec, V. Garbajs, J. Peklenik, Contribution to the micro-analysis of the spark eroded surfaces, CIRP Ann. 25-1, str. 135-140, 1976.
- [8] J. S. Soni, G. Chakraverti, Experimental investigation on migration of material during EDM of die steel (T215 Cr12), Journal of Material Processing Technology, 56 1-4, str. 439-451, 1996.
- [9] A. Erden, Effect of materials on the mechanism of electric discharge machining (EDM). Journal of Engineering and Material Technology, 105, str. 132-138, 1983.
- [10] D. K. Aspinwall, R. C. Dewes, J. M. Burrows, M. A. Paul, Hybrid high speed machining (HSM): system design and experimental results for grinding/HSM and EDM/HSM, CIRP Ann. 50-1, str. 145-148, 2001.
- [11] S. Kalpajian, V. Schmid, Manufacturing Processes for Engineering Materials, Prentice Hall, New Jersey str. 541, 2003.
- [12] Д. Б. Регодић, Технички системи, Инжењерски менаџмент, Универзитет Сингидунум, изводи са предавања, Београд, 2011.
- [13] <https://www.scribd.com/document/327744963/TMO-Nekonvencionalni-Postupci>
Пристапљено 26.09.2018.
- [14] N. Gjeldum, Oblikovanje odzivnih veličina obrade rotacijskih elemenata elektroerozijom, Sveučilište u Splitu, Fakultet elektrotehnike, strojarstva i brodogradnje, doktorska disertacija, Split 2011.
- [15] N. Petrović: „Programiranje numerički upravljanih mašina“, Zavod za školstvo – Podgorica, Podgorica 1993.
- [16] Adamović, Cvjetičanin, Šurina: „Tehnologija obrade numerički upravljanim mašinama“, Školska knjiga Zagreb, Zagreb 2004.
- [17] Упутство CHARMILLES ROBOFIL 240*440/390*690