

# Kinematika i primjena 5-osnih CNC strojeva

---

Kolmanić, Teo

Undergraduate thesis / Završni rad

2019

Degree Grantor / Ustanova koja je dodijelila akademski / stručni stupanj: **University North / Sveučilište Sjever**

Permanent link / Trajna poveznica: <https://um.nsk.hr/um:nbn:hr:122:781136>

Rights / Prava: [In copyright](#)/[Zaštićeno autorskim pravom.](#)

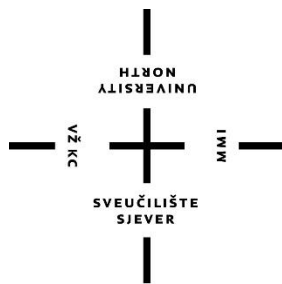
Download date / Datum preuzimanja: **2025-02-02**



Repository / Repozitorij:

[University North Digital Repository](#)





**Sveučilište  
Sjever**

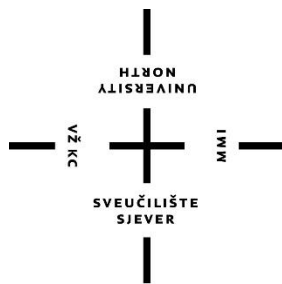
**Završni rad br. 295/PS/2019**

## **Kinematika i primjena 5-osnih CNC strojeva**

**Teo Kolmanić, 1530/336**

Varaždin, rujan 2019. godine





# Sveučilište Sjever

Odjel za Proizvodno strojarstvo

Završni rad br. 295/PS/2019

## **Kinematika i primjena 5-osnih CNC strojeva**

### **Student**

Teo Kolmanić, 1530/336

### **Mentor**

Tomislav Pavlic, mag.ing.mech.

Varaždin, rujan 2019. godine

# Prijava završnog rada

## Definiranje teme završnog rada i povjerenstva

ODJEL Odjel za strojarstvo

STUDIJ preddiplomski stručni studij Proizvodno strojarstvo

PRISTUPNIK Teo Kolmanić

MATIČNI BROJ 1530/336

DATUM 20.03.2019.

KOLEGIJ CNC obradni sustavi

NASLOV RADA Kinematika i primjena 5-osnih CNC strojeva

NASLOV RADA NA ENGL. JEZIKU Kinematics and application of 5-axis CNC machines

MENTOR Tomislav Pavlic, mag.ing.mech.

ZVANJE viši predavač

ČLANOVI POVJERENSTVA

1. dr. sc. Zlatko Botak, viši predavač
2. Tomislav Pavlic, mag.ing.mech., viši predavač
3. Marko Horvat, dipl.ing., predavač
4. prof.dr.sc. Antun Stoić
- 5.

## Zadatak završnog rada

BROJ 295/PS/2019

OPIS

U završnome je radu potrebno:

- definirati zahtjeve za petoosnim alatnim strojem
- objasniti kinematike alatnih strojeva
- ukazati na razlike u obradi troosnim alatnim strojevima
- ukazati na razlike u obradi petoosnim alatnim strojevima
- na odabranome primjeru pokazati programiranje i simulaciju obrade na petoosnom alatnom stroju koristeći simultano petoosno glodanje



ZADATAK URUČEN

21.08. 2019.

PODPIS MENTORA

T. Pavlic

SVEUČILIŠTE  
SJEVER

## **Predgovor**

U prvom redu veliku zahvalu dugujem svom mentoru Tomislavu Pavlicu koji mi je omogućio svu potrebnu literaturu te mi pomogao svojim savjetima pri izradi ovog završnog rada, i što je uvijek imao strpljenja i vremena za moje upite.

Također, zahvaljujem svojim prijateljima i kolegama s fakulteta na moralnoj podršci tijekom cijelog studija.

Posebnu zahvalu iskazujem Amandi na neizmjernom strpljenju, pomoći, nesebičnom razumijevanju i podršci.

I na kraju, najveću zaslugu za ono što sam postigao pripisujem svojim roditeljima i bratu, bez kojih sve ovo što sam dosad postigao ne bi bilo moguće.

## **Sažetak**

Prvi dio završnog rada opisuje povijest CNC strojeva i razvoj petoosne obrade, kinematiku petoosnih CNC strojeva, te CAD/CAM sustave. Posebna pažnja u prvom dijelu završnog rada posvećena je suvremenim procesima obrade te hibridnim tehnologijama strojne obrade.

U drugom djelu je pobliže objašnjen program Sinutrain te programiranje petoosne obrade u programu SolidCam. Kao bazni model za programiranje obrade u SolidCam-u korišten je model svrdla promjera 10 mm.

Ključne riječi: CNC, SolidCam, Sinutrain, CAD, CAM, petoosna obrada

## **Abstract**

The first part of the undergraduate work describes the history of CNC machines and the development of 5-axis machining, kinematics of 5-axis CNC machines and CAD/ CAM systems. Special attention in the first part is devoted to modern machining processes and hybrid machining technologies.

In the second part, you can find out more about Sinutrain and how to program 5-axis machining in SolidCam. As a base model for machining programming in SolidCam, a drill bit with diameter of 10 mm was used.

Key words: CNC, SolidCam, Sinutrain, CAD, CAM, 5-axis machining



## **Popis korištenih kratica**

NC- numeričko upravljanje (eng. Numerical control)

CNC- numeričko upravljanje računalom (eng. Computer numerical control)

MCU- kontrolna jedinica stroja (eng. Machine control unit)

CAD- dizajn potpomognut računalom (eng. Computer-aided design)

CAM- računalom podržana proizvodnja (eng. Computer-aided manufacturing)

SHIP- sredstvo za hlađenje i podmazivanje

MQL- obrada uz minimalne količine sredstva za hlađenje i podmazivanje (eng. Minimum Quantity Lubrication)

CBN- kubični borov nitrid (eng. Cubic Boron Nitride)

# Sadržaj

1.	Uvod.....	1
2.	Razvoj petoosnih obradnih sustava.....	3
2.1.	Pojam CNC stroja.....	3
2.2.	Povijest CNC strojeva .....	3
2.3.	Razvoj petoosne obrade .....	5
2.4.	Prednosti i nedostaci CNC strojeva.....	5
3.	Osnovne značajke CNC strojeva .....	6
3.1.	Koordinatni sustav.....	6
3.2.	Vrste upravljanja .....	8
3.2.1.	<i>Upravljanje točka po točka</i> .....	8
3.2.2.	<i>Upravljanje po pravcu</i> .....	8
3.2.3.	<i>Konturno upravljanje</i> .....	9
3.3.	Sustavi upravljanja obzirom na kontrolnu petlju .....	10
3.3.1.	<i>Sustav s otvorenom petljom</i> .....	11
3.3.2.	<i>Sustav sa zatvorenom petljom i indirektnim mjerenjem</i> .....	11
3.3.3.	<i>Sustav sa zatvorenom petljom i direktnim mjerenjem</i> .....	12
3.4.	Podjela obzirom na broj osi.....	13
3.4.1.	<i>2 i 3-osni sustavi</i> .....	13
3.4.2.	<i>4 i 5-osni sustavi</i> .....	14
4.	Kinematika 5-osnih CNC strojeva .....	15
4.1.	Podjela strojeva prema broju osi kojima se gibaju alat i stol .....	16
4.1.1.	<i>G5/G0 'strojevi</i> .....	16
4.1.2.	<i>G0/G5 'strojevi</i> .....	16
4.1.3.	<i>G4/G1 'strojevi</i> .....	16
4.1.4.	<i>G1/G4 'strojevi</i> .....	17
4.1.5.	<i>G3/G2 'strojevi</i> .....	17
4.1.6.	<i>G2/G3 'strojevi</i> .....	17
4.2.	Podjela prema lokaciji rotacijskih osi: .....	18
4.2.1.	<i>Dvostruko rotirajući stol</i> .....	18
4.2.2.	<i>Dvostruko rotirajući alat</i> .....	19
4.2.3.	<i>Rotirajući stol + rotirajući alat</i> .....	20
5.	Primjena petoosne obrade .....	21
5.1.	Suvremeni procesi obrade .....	22
5.1.1.	<i>Visokobrzinska obrada</i> .....	22
5.1.2.	<i>Suha i polusuha obrada</i> .....	24
5.1.3.	<i>Tvrda obrada</i> .....	25
5.1.4.	<i>Obrada visokih performansi i učinkovitosti</i> .....	25
5.1.5.	<i>Obrada u jednom prolazu</i> .....	26
5.1.6.	<i>Ultrazvučno i termalno potpomognuta hibridna obrada</i> .....	27

6.	CAD/CAM sustavi.....	29
6.1.	CAD .....	29
6.2.	CAM.....	30
7.	Sinutrain.....	31
7.1.	Opis sučelja .....	32
8.	Programiranje petosne obrade u Solidcam-u .....	36
8.1.	SolidCam 2016.....	36
8.2.	Definiranje Simultanog 5-osnog glodanja.....	37
8.2.1.	<i>Glodanje žljebova.....</i>	<i>39</i>
8.2.2.	<i>Glodanje vrha alata .....</i>	<i>44</i>
9.	Zaključak.....	47
	Literatura.....	48
	Popis slika .....	50
	Popis tablica.....	52

# 1. Uvod

U doba kada je zadovoljiti kupca kvalitetom proizvoda te brzinom i preciznošću proizvodnje postalo ključno za opstanak na tržištu, CNC strojevi zauzeli su veliki dio proizvodnje, a obrada odvajanjem čestica je jedna od najznačajnijih obrada današnjice. CNC strojevi su zamijenili klasične strojeve kako bi se smanjio utjecaj čovjeka u proizvodnji te kako bi ista postala brža, preciznija i točnija. Posao radnika samim time je postao manje fizički naporan. Radionički crteži rađeni na papiru zamijenjeni su 3D modelima koji nam omogućavaju lakšu predodžbu dijela, jednostavnije pronalaženje grešaka te popravak grešaka. Zbog potrebe za sve većom fleksibilnošću proizvodnje te sve kompleksnijim i nepravilnijim proizvodima nastali su petoosni strojevi. U današnje vrijeme te strojeve se pokušava poboljšati sve većim stupnjevima automatizacije i umjetne inteligencije kako bi u konačnici mogli raditi sami, bez prisutnosti čovjeka.

Strojevi sa pet osi gibanja omogućavaju obradu i najkompleksnijih površina u samo jednom stezanju. Zbog činjenice da s tri translacijske i dvije rotacijske osi, alat može zauzeti bilo koju orijentaciju i položaj, ovi strojevi su danas široko upotrebljavani. Prednosti takvih strojeva posebno dolaze do izražaja pri obradi kalupa za lijevanje, turbinskih lopatica, brodskih vijaka i sličnih proizvoda vrlo kompleksne geometrije. Razvoju petoosnih strojeva uvelike je pridonio razvoj CAD/CAM sustava bez kojih takvi strojevi ne bi imali smisla zato što bi programiranje bilo previše kompleksno za svakodnevnu upotrebu. CAD/CAM sustavi nam omogućavaju razvoj i projektiranje pozicije, simuliranje rada te programiranje strojne obrade za zadanu poziciju. Time je ručno pisanje NC koda na temelju nacрта zamijenjeno programiranjem strojne obrade uz pomoć trodimenzionalnog modela.

Zbog velikih zahtjeva tržišta za bržom i fleksibilnijom proizvodnjom te sve većom točnošću izrade potrebno je osim više osnih strojeva pažnju posvetiti i tehnologiji obrade. Također se sve više pažnje posvećuje zaštiti okoliša što nas prisiljava da uvodimo nove tehnologije obrade koje koriste jako malo ili uopće ne koriste sredstva za hlađenje i podmazivanje. Napretku tehnologije obrade pridonijela je i činjenica da se svakodnevno na tržištu pojavljuju novi materijali sa sve boljim mehaničkim svojstvima. Kako bi se zadovoljili tako visoki zahtjevi razvijeni su suvremeni procesi obrade. Takvi procesi uključuju visokobrzinsku obradu, suhu ili polusuhu obradu, obradu potpomognutu laserom ili ultrazvukom i još mnogo toga.

Napredak alatnih strojeva i režima obrade rezultirao je i sve većim zahtjevima tržišta. Neka od obilježja suvremenog tržišta su:

- Jeftiniji i kvalitetniji proizvodi
- Utjecaj konkurencije
- Česte promjene želja kupaca
- Povećanje broja varijanti proizvoda
- Povećanje utjecaja želja kupaca te oblik i karakteristike proizvoda
- Smanjenje veličine serije proizvoda
- Skraćenje vijeka trajanja proizvoda na tržištu

Iz tih razloga se danas proizvode male serije proizvoda, radi se na održavanju kvalitete proizvoda uz što manje otpada, smanjuju se proizvodni troškovi. Poduzeća koja žele konkurirati na tržištu te biti uspješna moraju imati visok stupanj iskorištenja radnog vremena. Nadalje, veliku fleksibilnost proizvodnje i moraju biti u mogućnosti reagirati na zahtjeve kupaca u što kraćem vremenu te moraju imati dobru organizaciju i kvalitetan i obrazovan kadar.

## 2. Razvoj petoosnih obradnih sustava

### 2.1. Pojam CNC stroja

Kako bismo u potpunosti razumjeli što su CNC obradni sustavi i čemu služe, krenimo od definicije NC-a. Numeričko upravljanje je operacija nad alatnim strojem koja se sastoji od niza kodiranih instrukcija sastavljenih od slova, brojeva i simbola koje kontrolna jedinica stroja može (MCU) razumjeti. Dobivene instrukcije pišu se logičkim redoslijedom u unaprijed dogovorenom standardiziranom obliku. Skup svih instrukcija potrebnih da se provede određena obrada na stroju naziva se CNC program. U NC sustavu program se učitava u upravljačku jedinicu stroja te se provodi strojna obrada. Operater na stroju nema mogućnost izmjene programa, pa se kod takvih sustava sve promjene moraju odraditi na računalu izvan stroja i ponovo učitati u upravljačku jedinicu stroja.

Prema institutu za hrvatski jezik i jezikoslovlje definicija CNC stroja glasi „stroj upravljan računalom i kojim se mehanička obrada može izvoditi istodobnim pomakom alata i/ili obratka u najmanje dvjema ravninama prostora“ [1].

U CNC sustavima omogućena nam je izmjena računalnog programa na samom stroju, a izmjene je moguće provesti i tijekom strojne obrade. Takva fleksibilnost stroja nam omogućava uštede u vremenu programiranja i rada stroja te smanjuje mogućnost pogreške.

### 2.2. Povijest CNC strojeva

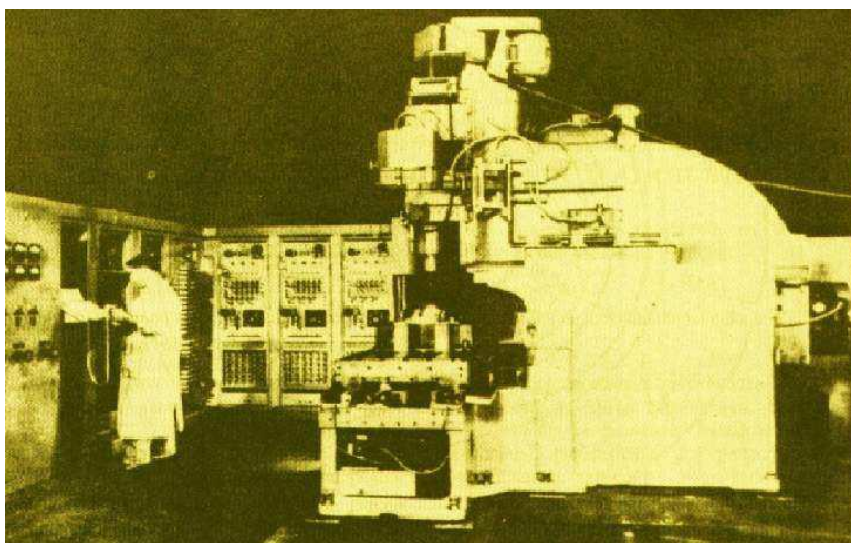
Najranija istraživanja i razvoj numeričkih strojeva provedena su u Sjedinjenim Američkim Državama. Veliki doprinos prvom numerički upravljanim troosnom stroju dalo je i Ujedinjeno Kraljevstvo. Automatsko upravljanje bilo je poznato i prije razvitka prvog numerički upravljanih alatnog stroja, a neki od povijesnih događaja koji su utjecali na njegov razvoj su [4]:

- 1650. Nizozemska- sustavi za automatsko zvonjenje zvonima
- 1700. Engleska- upotreba bušene kartice za upravljanje strojevima za pletenje
- 1800. Jacquard razvio stroj za pletenje i tkanje upravljan bušenom vrpcom
- 1800. Charles Babbage konstruirao prvi digitalni kompjuter (nikad nije bio proizveden)
- 1863. M. Fourneaux patentirao prvi automatski pijanino
- 1940. Uvode se hidraulika, pneumatika i elektrika za automatsko upravljanje strojem
- 1945. Mauchy i Echert prvi digitalni elektronički kompjuter ENIAC

Nakon drugog svjetskog rata napredak u svim područjima industrije (vojne i civilne) bio je toliko intenzivan da automatizacija i preciznost strojeva korištenih u to vrijeme više nije bila dovoljna da zadovolji potrebe moderne industrije. Prvo priznato istraživanje na temu numerički upravljanih strojeva provedeno je 1947. godine od strane SAD-a. Zaključak istraživanja bio je da niti jedno strojarstvo poduzeće unutar SAD-a ne može zadovoljiti zahtjeve Američke vojske. Kao rezultat istraživanja Američka ratna zrakoplovstvo je zaposlilo lokalno poduzeće Parsons Corporation koje je imalo zadatak napraviti fleksibilan i dinamičan stroj koji će unaprijediti produktivnost. MIT (Massachusetts Institute of Technology) bio je podizvođač te je zajedno s Parsons kompanijom u periodu od 1949.-1951. radio na spomenutom projektu. Zajedno su razvili prvi kontrolni sustav koji je bio primjenjiv na velik broj alatnih strojeva. Godine 1952. poduzeće Cincinnati Milacron koje proizvodi alatne strojeve pretvorilo je jednu od svojih ručnih glodalica u automatsku troosnu glodalicu. Osi glodalice pokretali su servo motori te se može smatrati da je to prva glodalica s mogućnošću konturne obrade.

Razvojem prve automatske troosne glodalice (slika 2.1) ubrzao se napredak u industriji alatnih strojeva:

- 1959.- MIT je razvio prvi programski jezik namijenjen programiranju NC strojeva (APT- Automatically programmed tools)
- 1960.- Razvijeno Direktno numeričko upravljanje (DNU)
- 1968.- Tvrtka Kearney & Trecker izradila je prvi obradni centar
- 1970-tih- Pojava CNC alatnih strojeva
- 1980-tih- Pojava CAD/CAM sustava
- 1985.- Pojava fleksibilnih proizvodnih sustava (FPS)
- 1997.- Pojava upravljačkih računala baziranih na otvorenoj strukturi (PC-Windows)



*Slika 2.1 Prva NC glodalica [3]*

### **2.3. Razvoj petoosne obrade**

Godine 1958., nedugo nakon razvoja troosne automatske glodalice, poduzeću Cincinnati Milacron ponuđen je ugovor od strane Američkog ratnog zrakoplovstva da proizvede 5-osni alatni stroj. Stroj se sastojao od tri linearne i dvije rotacijske osi gibanja, skraćeno označene sa slovima X, Y, Z, A i B. Osima su upravljale tri jedinice od kojih je jedna upravljala linearnim gibanjima (X, Y i Z), a preostale dvije rotacijskim gibanjima (A i B). Nadzor i upravljanje svim upravljačkim jedinicama vršilo je jedno upravljačko računalo. Iako u to vrijeme revolucionarna obrada, danas je petoosna obrada nužna za zadovoljavanje zahtjeva tržišta. I najkompleksnije pozicije danas je moguće dobiti takvom obradom.

### **2.4. Prednosti i nedostaci CNC strojeva**

CNC strojevi imaju mnoštvo prednosti naspram klasičnih strojeva za obradu odvajanjem čestica.

Prednosti CNC strojeva:

- Fleksibilnost
- Mogućnost izrade vrlo složenih pozicija
- Ponovljivost i točnost
- Smanjenje ili potpuno uklanjanje troškova skladištenja
- Smanjenje pripremno-završnih vremena i troškova izrade
- Mali zahtjevi za vještinama operatera
- Standardizirani alati
- Povećanje produktivnosti
- Smanjenje vremena potrebnog za kontrolu točnosti

Nedostaci CNC strojeva:

- Visoka cijena stroja
- Potrebno je programiranje stroja
- Visoki troškovi održavanja
- Neisplativost izrade jednostavnijih pozicija



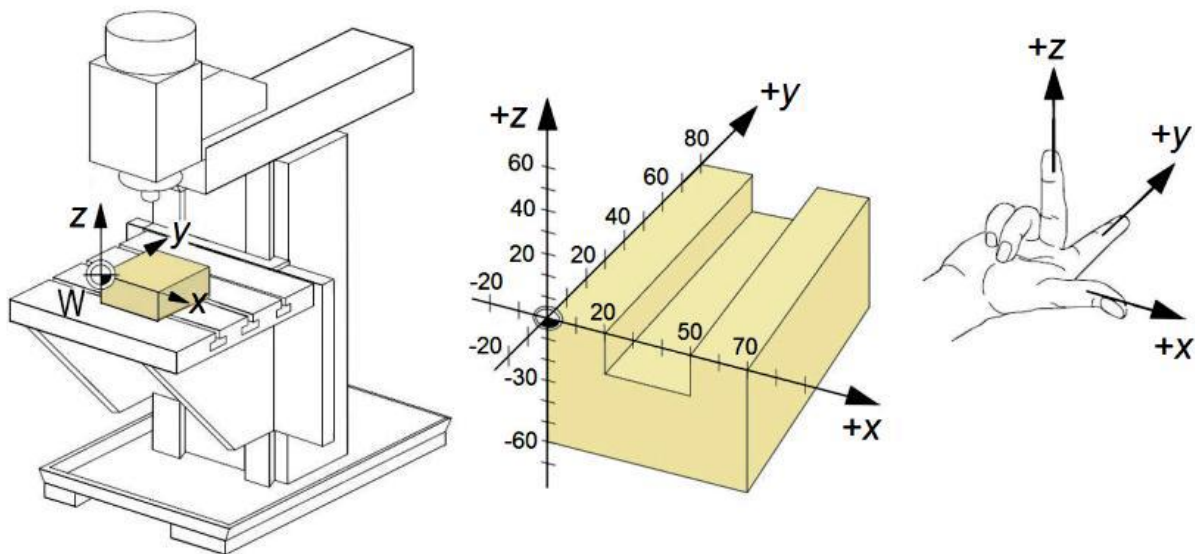
### 3. Osnovne značajke CNC strojeva

#### 3.1. Koordinatni sustav

Kako bi mogli definirati međusobni položaj alata i obratka u radnom prostoru stroja potrebno je na stroj i obradak postaviti koordinatne sustave i postaviti neke referentne točke. U primjeni je desnokretni koordinatni sustav. Zbog sve češćih zahtjeva konstrukcija strojeva da u jednom smjeru ima više mogućih gibanja, u smjeru pravocrtnih osi postoje osi kojima se označavaju dopunska gibanja.

Glavne pravocrtne osi označene su slovima X, Y i Z, dok su glavne rotacione osi obilježene slovima A, B i C. Pored glavnih rotacionih osi koriste se i dopunske rotacijske osi koje se označavaju:

- P, U- dopunske osi u smjeru osi X
- Q, V- Dopunske osi u smjeru osi Y
- R, W- Dopunske osi u smjeru osi Z



Slika 3.1 Koordinatni sustav stroja [3]

Kod postavljanja koordinatnog sustava na NC stroj polazi se od osi Z [6]:

- Kod strojeva s čvrstim glavnim vretenom os Z se podudara ili je usporedna s osi glavnog vretena
- Ako je glavno vreteno nagibno, ali tako da je samo u jednom položaju usporedno s nekom od osi, onda se ta os obilježava kao os Z
- Ako je glavno vreteno nagibno tako da može biti usporedno s više osi, onda je os Z ona koja je okomita na površinu stezanja obratka (radni stol)
- Ako se glavno vreteno može gibati u smjeru svoje osi (usporedno s osi Z), onda se ta obilježava kao os W
- Ako stroj ima više vretena, glavno je ono koje je okomito na radni stol
- Ako stroj nema glavno vreteno (blanjalice, erozimati, itd.) os Z je okomita na radni stol.

Os X je usporedna s radnim stolom i uvijek okomita na os Z, a smjer se može utvrditi na sljedeći način:

#### 1. Rotira alat

- Ako je os Z vodoravna, tada pozitivan smjer osi X ide u desno gledajući od glavnog vretena prema obratku
- Ako je os Z uspravna, onda kod jednostupnih strojeva (konzolne glodalice) pozitivan smjer osi X ide u desno kada se gleda od vretena prema obratku, a kod dvostupnih pozitivan smjer osi X ide u desno kada se od vretena gleda prema lijevom stupu

#### 2. Rotira obradak

- Os X je okomita (radijalna) u odnosu na obradak, a pozitivan smjer osi X ide od obratka prema nosaču alata

#### 3. Strojevi bez vretena

- Smjer osi X se podudara s glavnim smjerom obrade

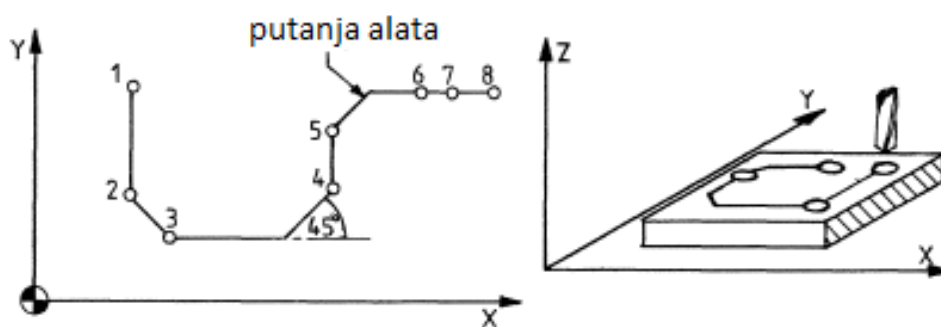
Položaj osi Y dobiva se prema položaju osi X i Z te primjenom pravila desne ruke. Ovakav način obilježavanja osi stroja podrazumijeva da sva gibanja vrši alat ili nosač alata. Ako gibanje vrši obradak ili nosač obratka, oznaci osi se dodaje apostrof ('). Tako os X postaje X', os Y postaje Y', itd., a pozitivan smjer gibanja se određuje suprotno nego kad gibanje vrši alat.

## 3.2. Vrste upravljanja

Postoje tri osnovne vrste upravljanja CNC stroja obzirom na gibanje alata. Poznati su kao upravljanje točka po točka, upravljanje po pravcu i konturno upravljanje. Osnovna razlika između spomenutih vrsta upravljanje je u funkcijama stroja koje treba kontrolirati.

### 3.2.1. Upravljanje točka po točka

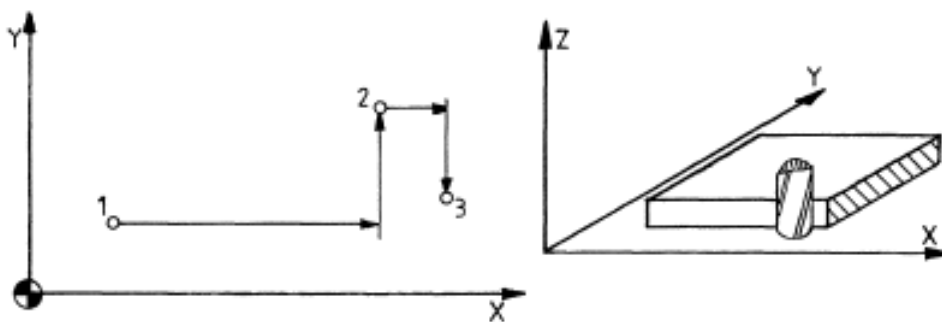
Neki strojevi kao na primjer bušilice zahtijevaju da se alat postavi na određenu poziciju u odnosu na obradak, te da u toj poziciji ostane za vrijeme obrade. Kod takvih strojeva, svaka os se upravlja zasebno, a može biti pogonjena servo motorima ili koračnim motorima. Gibanje alata u zadanu poziciju se ostvaruje pravocrtno i to najvećom mogućom posmičnom brzinom (ne postoji mogućnost regulacije brzine posmaka), a dodir alata s obratkom nije moguć sve dok pozicioniranje nije završeno. Na slici 3.2 prikazana je putanja alata pri takvom upravljanju.



Slika 3.2 Upravljanje točka po točka [5]

### 3.2.2. Upravljanje po pravcu

Kod upravljanja po pravcu (slika 3.3) postoji mogućnost radnog gibanja alata (gibanje kada je alat u zahvatu s radnim komadom), a ne samo pozicioniranja. Međutim, radno posmično gibanje se može izvoditi samo paralelno s jednom od osi. Što znači da je brzina radnog posmičnog gibanja jednaka ili brzini gibanja alata u smjeru osi X ili u smjeru osi Y. U takvim sustavima ne postoji mogućnost sinkroniziranog gibanja dviju osi. Ova vrsta upravljanja se koristi kod jednostavnih strojeva za plameno rezanje, zavarivanje i slično ili pak za strojeve posebne namjene.



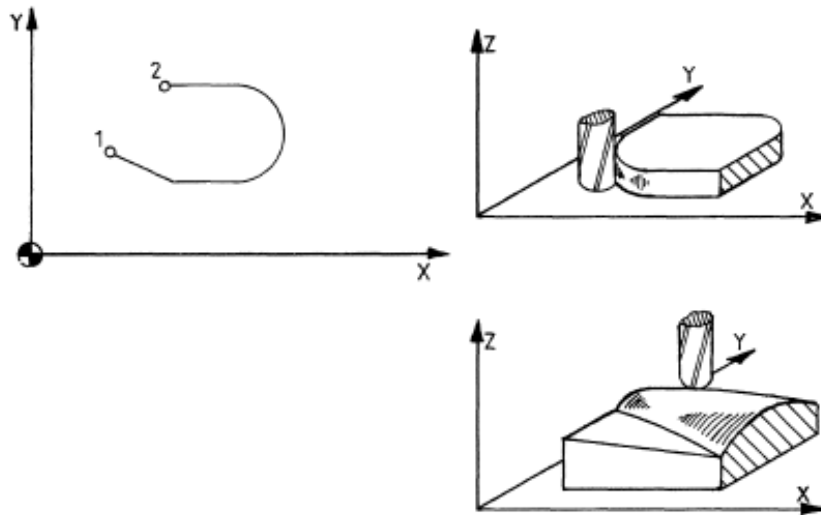
Slika 3.3 Upravljanje po pravcu [5]

### 3.2.3. Konturno upravljanje

Konturno upravljanje (slika 3.4) zahtjeva simultano upravljanje osima stroja, a rezultat toga je mogućnost stroja da radni komad obrađuje po krivulji, a ne samo po pravcu. Kod takvih sustava pozicija alata i obratka mora konstantno biti kontrolirana, a sve posmične brzine i brzina vrtnje alata se mogu programirati. Strojevi s konturnim upravljanjem se također mogu koristiti i kao linijski upravljani i kao upravljani točka po točka. S obzirom na broj osi koje se mogu upravljati sinkrono, konturno upravljanje se dijeli kako je prikazano u tablici 1. Kod tokarilica se vrlo često koristi 2D konturno upravljanje iako su danas sve češći tokarski centri s većim brojem osi i složenim konturnim upravljanjem. Kod glodalica i obradnih centara koriste se 3D i složenija konturna upravljanja. Danas se sve češće koriste i 5D konturna upravljanja.

Oznaka	Broj sinkronih osi	Napomena
2D	2	
21/2D	2 (izbor ravnine obrade)	Kod strojeva koji imaju više NC osi, ali se samo po dvije mogu upravljati sinkrono.
3D	3	
4D	4	Najčešće 3 translacije i jedna rotacija.
5D	5	Najčešće 3 translacije i 2 rotacije. Rotacijske osi mogu biti izvedene na glavi za prihvat alata, na radnom stolu stroja ili kombinirano.
6D i više	6 i više	Kod strojeva s više od 5 sinkronih osi prisutan je problem programiranja, jer standardni programski sustavi za NC strojeve ne podržavaju programiranje konturnog upravljanja složenijeg od 5D.

Tablica 1 Podjela konturnog upravljanja [6]



*Slika 3.4 Konturno upravljanje [5]*

### **3.3. Sustavi upravljanja obzirom na kontrolnu petlju**

Sustave upravljanja obzirom na kontrolnu petlju možemo podijeliti u 2 osnovne skupine:

1. Sustavi s otvorenom petljom
2. Sustavi sa zatvorenom petljom

Sustavi sa zatvorenom petljom se obzirom na vrstu mjerenja dijele na:

1. Sustave s indirektnim mjerenjem
2. Sustave s direktnim mjerenjem

Važno je napomenuti da se danas uglavnom koriste sustavi mjerenja sa zatvorenom petljom kako bi se povećala ponovljivost i preciznost strojeva. Slika 3.5 prikazuje vrste sustava upravljanja.

### **3.3.1. Sustav s otvorenom petljom**

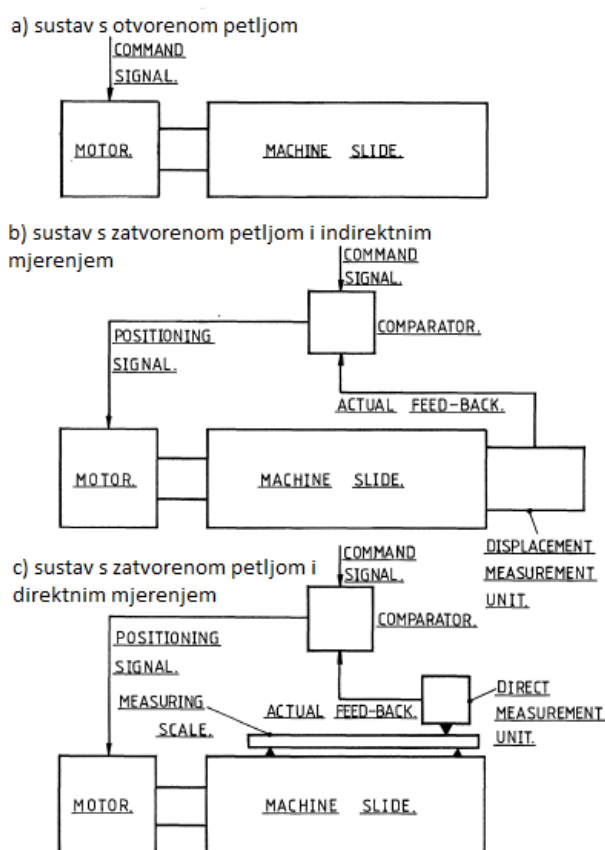
Kod sustava s otvorenom petljom ne dobivamo nikakve povratne informacije ni o položaju klizača ni o brzini. U takvim sustavima koračni motor pomiče klizač na zadanu poziciju koristeći samo broj impulsa dovedenih na motor. Kada motor napravi zadani broj koraka pretpostavlja se da se klizač pomaknuo za određenu udaljenost. Iako je ovakvo upravljanje relativno jeftino, ne možemo reći da je pouzdano. Svaka greška u sustavu, uključujući i mogućnost da koračni motor preskoči bit će akumulirana.

### **3.3.2. Sustav sa zatvorenom petljom i indirektnim mjerenjem**

Svaki upravljački sustav sa zatvorenom petljom posjeduje dva dodatna elementa koja sustav s otvorenom petljom nema. To su mjerni sustav i komparator. Mjerna glava nalazi se u sklopu s pogonskim vijkom. Kada servo motor započne vrtnju s njim će se vrtjeti i mjerna glava koja mjeri kutni pomak. Mjerene vrijednosti uspoređuje s vrijednošću koju zahtjeva komparator. Mjerenje i uspoređivanje zadanih i mjerenih vrijednosti u procesu se mjeri kontinuirano sve do trenutka kada se zadana i mjerena vrijednost ne izjednače. Takav sustav nam ulijeva više povjerenja i ima veći stupanj preciznosti obzirom na sustav s otvorenom petljom. Negativna strana ovakvoga sustava je da je sklon greškama zbog utjecaja momenta. Taj problem se ne može nadzirati te se s toga ne može niti kontrolirati. Zbog spomenutog efekta se na obratku mogu primijetiti manje nepravilnosti.

### 3.3.3. Sustav sa zatvorenom petljom i direktnim mjerenjem

Danas najprecizniji i najčešće korišteni sustavi upravljanja su sustavi upravljanja s direktnim mjerenjem. Kako bi postigli direktno mjerenje pomaka, na linearne vodilice se postavlja linearna mjerna oprema koja prati pomak klizača i pomoću komparatora uspoređuje mjerenu vrijednost sa zadanom vrijednošću. Linearnu mjernu opremu je potrebno zaštititi od utjecaja strojne obrade, međutim, eliminiraju se pogreške uslijed utjecaja momenta, zazora između vretena i matice te pogreške u visini navoja vretena.



Slika 3.5 Vrste sustava upravljanja [5]

### 3.4. Podjela obzirom na broj osi

Broj osi stroja odnosi se na broj stupnjeva slobode gibanja, to jest broj mogućih nezavisno upravljanih pomoćnih dijelova stroja.

#### 3.4.1. 2 i 3-osni sustavi

Kao 2-osne CNC sustave možemo navesti štanice, laserske rezačice, rezačice koje režu vodom i abrazivnim sredstvima te ostale slične strojeve koji imaju samo dvije osi gibanja (slika 3.6). Kod takvih strojeva gibanje se odvija po X i Y osi. Uglavnom se giba alat, a stol s obratkom miruje. Kod troosnih CNC sustava imamo još jednu os koja je okomita na prije spomenute osi i nazivamo ju Z os. U takvim sustavima alat obavlja dva gibanja, a treće gibanje obavlja stol ili obrnuto. Simultanom kontrolom svih triju osi moguće je obavljati kompleksne zadatke na stroju. Pod troosne strojeve najčešće mislimo na tokarilice i glodalice.



*Slika 3.6 EM K 3612 štanca*



### 3.4.2. 4 i 5-osni sustavi

Kod 4 i 5-osnih strojeva omogućena nam je obrada i najkompleksnijih pozicija. U tom slučaju osim standardnih X, Y i Z osi koje omogućavaju alatu i stolu translacijsko gibanje, dodane su još jedna ili dvije rotacijske osi koje omogućavaju nagib alata ili stola (A i B osi). Time se smanjuje vrijeme obrade, povećava preciznost i smanjuje hrapavost površine. Na slici 3.7 prikazan je univerzalni 5-osni vertikalni obradni centar.



*Slika 3.7 Haas UMC-750 obradni centar [8]*

## 4. Kinematika 5-osnih CNC strojeva

Promatrajući kinematiku CNC strojeva prema načinu gibanja njegovih osi, a koje mogu biti translacijske (T) ili rotacijske (R), postoje četiri osnovne podjele strojeva:

1. Strojevi s tri translacije i dvije rotacije
2. Strojevi s dvije translacije i tri rotacije
3. Strojevi s jednom translacijom i četiri rotacije
4. Strojevi s pet rotacija

Većina robota spada u grupe 3 i 4 te im se uglavnom dodaje veći broj osi. Strojevi druge grupe se uglavnom koriste pri izradi brodskih propelera i kalupa velikih dimenzija (slika 4.1). Velika većina petoosnih CNC strojeva spada u prvu grupu strojeva pa će se prema tome ta grupa i nadalje razmatrati.



Slika 4.1 5-osni obradni centar za izradu kalupa [9]

## 4.1. Podjela strojeva prema broju osi kojima se gibaju alat i stol

Uzevši u obzir broj osi stroja kojima se alat giba u radnom prostoru stroja i broj osi kojima se giba obradak, petoosni strojevi mogu se podijeliti na [10]:

- G5/G0'
- G0/G5'
- G4/G1'
- G1/G4'
- G3/G2'
- G2/G3

Brojevi u oznaci predstavljaju broj osi kojima se giba alat i/ili stol stroja. Oznaka bez apostrofa (') predstavlja broj osi kojima se giba alat dok oznaka s apostrofom predstavlja broj osi kojima se giba stol s obratkom.

### 4.1.1. G5/G0' strojevi

Alat se giba po svih pet osi, a pozicija koja se obrađuje je fiksirana na stolu stroja te se ne giba. Ovakva podjela osi stroja nastala je kako bi se mogle obrađivati pozicije vrlo velikih dimenzija. Glavni nedostatak ovakvih strojeva je velik broj veznih točaka u kinematici alata što uzrokuje greške pri obradi nastale elastičnim deformacijama i zračnostima u vodilicama.

### 4.1.2. G0/G5' strojevi

Svim osima stroja se giba stol s obratkom, a alat je fiksiran u prostoru. Ovakva izvedba stroja se koristi pri obradi pozicija jako malih dimenzija.

### 4.1.3. G4/G1' strojevi

Kod ovakve konfiguracije stroja alat se giba po četiri osi, a stol s obratkom samo po jednoj koja može biti translacijska (T) ili rotacijska (R).

#### **4.1.4. G1/G4' strojevi**

Samo jedna os pokreće alat dok se ostalim osima giba radni stol. Gibanje alata u prostoru je jednako gibanju radnog stola u prethodnom slučaju, što znači da može biti rotacijsko ili translacijsko.

#### **4.1.5. G3/G2' strojevi**

U ovom slučaju alat se giba po tri osi dok dvije osi nose radni stol. Kod ovakve konfiguracije postoje tri mogućnosti gibanja radnog stola: stol ima dvije rotacije ( $R'R'$ ), stol ima dvije translacije ( $T'T'$ ) ili se može gibati i rotacijski i translacijski ( $T'R'$ ). Kao i G5/G0' strojevi, ovaj tip stroja može obrađivati pozicije velikih dimenzija. Nedostatak ovakve konfiguracije stroja je komplicirana izvedba gibanja alata.

#### **4.1.6. G2/G3' strojevi**

Alat se giba po dvije osi koje mogu biti: rotacijske (RR), translacijske (TT) ili kombinirane (TR). Radni stol se u tom slučaju giba po preostale tri osi.

## 4.2. Podjela prema lokaciji rotacijskih osi:

1. Dvostruko rotirajući stol
2. Dvostruko rotirajući alat
3. Rotirajući stol + rotirajući alat

### 4.2.1. Dvostruko rotirajući stol

Kod petoosnih alatnih strojeva s dvostruko rotirajućim stolom (slika 4.2), obje rotacijske osi nalaze se na stolu. U tom slučaju alat može biti fiksiran u prostoru ili može imati od jedne do tri translacijske osi. Prednosti ovih strojeva su: kod horizontale izvedbe glavnog vretena odstranjivanje odvojenih čestica se izvodi uz pomoć gravitacije tako da ona jednostavno pada na podlogu, os Z stroja je tijekom obrade uvijek paralelna s osi alata. Tako se obrada prilikom određene orijentacije uvijek vrši u XY ravnini, time se postiže jednostavnost troosne obrade. Kompenzacija duljine alata izvodi se cijelo vrijeme u NC upravljačkom računalu stroja.

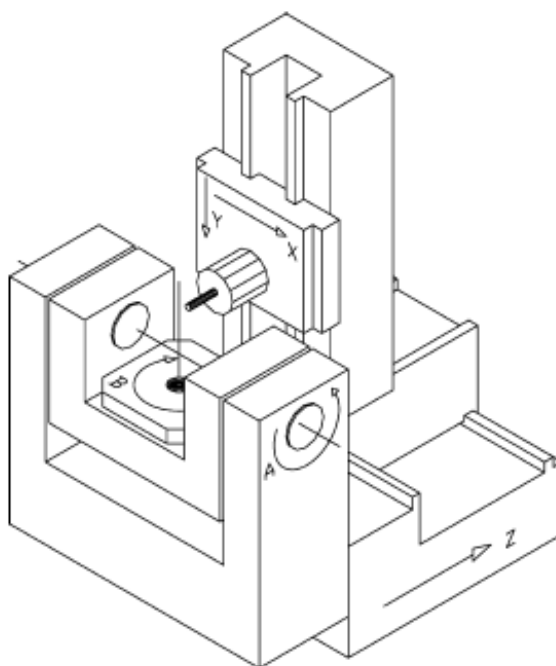
Nedostaci ove izvedbe su:

- Dimenzije pozicije koja se izrađuje su ograničene
- Radni prostor alata je zbog nagiba alata često smanjen
- Pretvorba kartezijevih koordinata pozicije alata u odnosu na koordinate osi stroja je ovisna o poziciji obratka na stolu

Prema tome, ako se položaj obratka na stolu promjeni, transformacija osi NC programa se ne može provesti automatski nego je potrebno ponovo generirati cijeli kod.

Bitnije prednosti ovakve izvedbe stroja:

- Omogućavaju obradu elektroda i ostalih obradaka sa svih strana
- Omogućavaju obradu dijelova koji zahtijevaju veliku preciznost (npr. turbinskih lopatica)



*Slika 4.2 dvostruko rotirajući stol [10]*

#### **4.2.2. Dvostruko rotirajući alat**

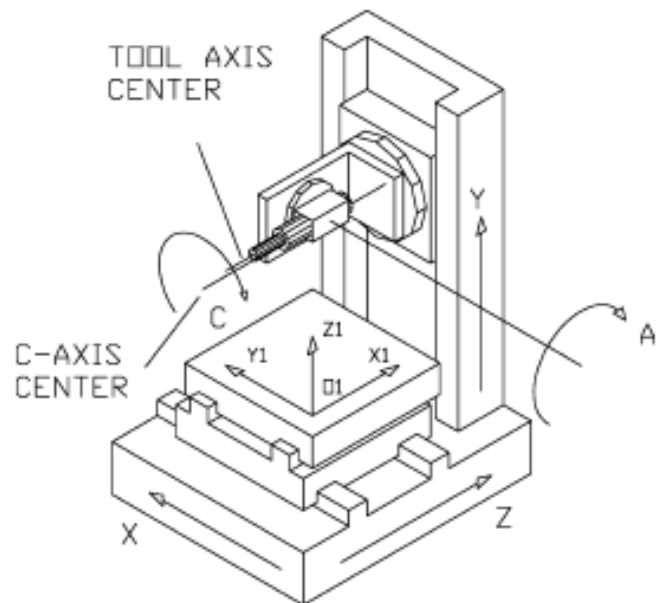
Česte su izvedbe gdje se rotacijske osi sijeku u jednoj točki. Time je značajno pojednostavljena obrada podataka i izračun za upravljačka računala. Konstrukcija takvog stroja prikazana je na slici 4.3.

Prednosti ovih strojeva su:

- Moguća je obrada velikih pozicija
- Vrijednosti X, Y, Z osi stroja u programu ovise samo o duljini alata

Nedostaci ovih strojeva su:

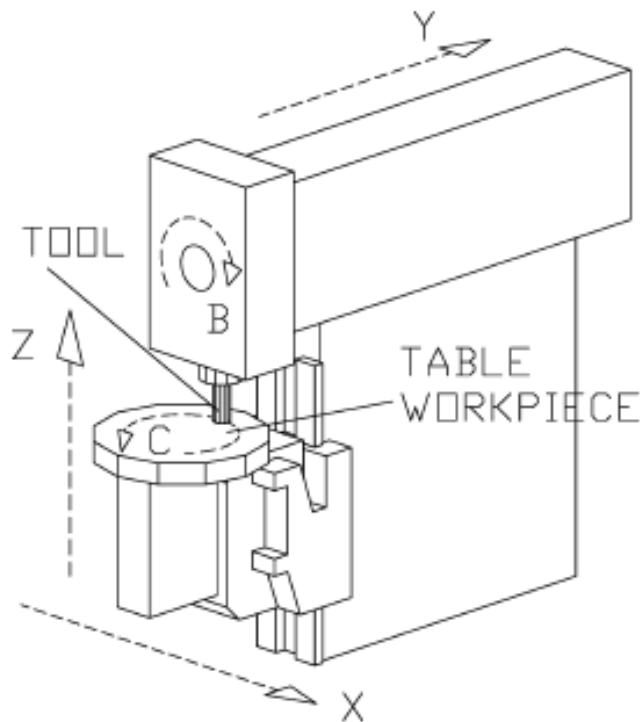
- Kompleksnost pogona glavnog vretena
- Smanjena krutost stroja zato što rotacijska os vretena ograničava prijenos sile
- Pri brzinama vrtnje većim od 5000 o/min dolazi do djelovanja kontra momenta izazvanog žiroskopskim efektom
- Često nisu mogući procesi bušenja u proizvoljno odabranoj ravni
- Promjena duljine alata ne može se kompenzirati translacijom koordinatnog sustava već je potrebno ponovo generirati NC kod.



Slika 4.3 dvostruko rotirajući alat [10]

#### 4.2.3. Rotirajući stol + rotirajući alat

Stol i glavno vreteno imaju po jednu rotacijsku os (slika 4.4). Iako postoji vrlo velik broj ovakvih strojeva na tržištu, oni sadrže nedostatke obiju spomenutih konstrukcija. Uglavnom se koriste za obradu pozicija manjih dimenzija.



Slika 4.4 rotirajući alat i rotirajući stol [10]

## 5. Primjena petoosne obrade

Petoosna obrada se danas koristi u gotovo svim proizvodnim granama tehnike kako bi se postigla što bolja proizvodnost te dimenzijska točnost obradaka. Velika prednost petoosnih strojeva u odnosu na troosne nalazi se u činjenici da petoosnom obradom možemo obrađivati predmete kompleksne geometrije u jako malom broju stezanja. Smanjenjem broja stezanja smanjuje se mogućnost pogreške i vrijeme obrade te se povećava točnost obrade. Prilikom obrade možemo koristiti alate s kraćom oštricom što nam omogućava brže režime obrade, a da pritom ne narušavamo točnost. Korištenjem alata s kraćom oštricom i jačih režima obrade produljuje se vrijeme trajanja alata. Svoju primjenu petoosni strojevi su pronašli u gotovo svim granama tehnike, a posebno u industrijama gdje se traži vrlo visoka točnost i preciznost obrade. Neke od tih industrija su:

- Automobilska industrija
- Zrakoplovna industrija
- Brodogradnja
- Industrija izrade kalupa i alata
- Svemirska industrija
- Medicina

Kao primjer proizvoda možemo navesti:

- Kalupi za metalne i polimerne proizvode
- Jezgre kalupa
- Propeleri i turbine
- Alati
- Trupovi brodova
- Razna kućišta



## 5.1. Suvremeni procesi obrade

Zbog velikih zahtjeva tržišta za bržom i fleksibilnijom proizvodnjom te sve većom točnošću izrade potrebno je osim višeosnih strojeva pažnju posvetiti i tehnologiji obrade. Tehnologija obrade nije univerzalna te ju je potrebno svakom proizvodu prilagoditi. Osim navedenog u današnje vrijeme se sve više pažnje posvećuje zaštiti okoliša što nas prisiljava da uvodimo nove tehnologije obrade koje koriste jako malo ili ne koriste SHIP. Zbog takvih zahtjeva tržišta nastali su suvremeni procesi obrade, a neki od njih su [11]:

- Visokobrzinska obrada (eng. High speed machining)
- Suha i polusuha obrada (eng. Dry and semi-dry machining)
- Tvrdra obrada (eng. Hard part machining)
- Obrada visokih performansi i učinkovitosti (eng. High performance and high efficiency machining)
- Obrada u jednom prolazu (eng. Multitasking and one-pass machining)
- Ultrazvučno i termalno potpomognuta obrada (eng. Ultrasonically assisted and thermally assisted machining)

### 5.1.1. Visokobrzinska obrada

Visokobrzinska obrada nam omogućava manje troškove obrade, kraće vrijeme isporuke te izradu kompleksnih visokokvalitetnih proizvoda. Četiri su glavna čimbenika koja se promatraju i koja direktno utječu na spomenutu obradu: način rezanja, materijal koji se obrađuje, stabilnost procesa i snaga rezanja. Brzina vrtnje alata jedan je od najbitnijih čimbenika za ovu tehnologiju obrade. Kako bi bolje shvatili ovaj parametar uzmimo za primjer glodalo promjera 25 mm, brzina vrtnje takvog glodala se normalno kreće od 2300 o/min do 7500 o/min. Kod visokobrzinske obrade brzine vrtnje takvog glodala su od 7500 o/min do približno 45000 o/min. Visokobrzinska obrada nam omogućava povećanje kvalitete površine i smanjenje sile rezanja, a pritom i smanjenje trošenja alata. Danas postoje strojevi napravljeni prvenstveno za visokobrzinsku obradu. Primjer takvog stroja prikazan je na slici 5.1. Brzina vrtnje vratila doseže brzine i do 40 000 o/min. U autoindustriji najčešće se koriste strojevi s brzinom alata 16000-24000 o/min, posmakom 100-120 m/min i ubrzanjem od 2-3g. Polja primjene visokobrzinske obrade prikazana su u tablici 2.



Slika 5.1 Obradni centar za visokobrzinsku obradu [12]

<b>Tehnološka prednost</b>	<b>Polje primjene</b>	<b>Primjer primjene</b>
Veliki volumen obrade	Legure lakih materijala, čelik i željezni lijev	Proizvodnja zrakoplova, proizvodnja alata i kalupa
Visoka kvaliteta površine	Precizna obrada	Proizvodnja leća i fino mehanički dijelovi
Mala sila rezanja	Obrada tankostjenih obradaka	Industrija zrakoplova i autoindustrija
Odvodnja topline pomoću strugotine	Strojna obrada bez savijanja	Magnezijske legure i fino mehanički dijelovi

Tablica 2 Polja primjene visokobrzinske obrade [11]

### 5.1.2. Suha i polusuha obrada

Troškovi nabave, održavanja i odlaganja sredstva za hlađenje i podmazivanje iznose 7-17% ukupnih troškova proizvodnje proizvoda. Kako bi se smanjili troškovi proizvodnje, ali i zadovoljili standardi očuvanja okoliša moralo se drastično smanjiti korištenje SHIP-a, a ako je to moguće izbaciti ga u potpunosti. Kako bi se zadovoljili dati zahtjevi nastala je polusuha i suha obrada. SHIP u strojnoj obradi ima tri temeljne funkcije: odvođenje topline, odvođenje strugotine i smanjenje trenja između alata i obratka. Uklanjanje sredstva za hlađenje i podmazivanje ima brojne negativne posljedice na alat i obradak kao što su: manja dimenzijska točnost, niža kvaliteta površine, dodatna čišćenja pozicije od strugotine, smanjenje vijeka trajanja alata, lijepljenje strugotine na alat, itd. Prema svemu spomenutom možemo zaključiti da nije moguće izbaciti SHIP iz proizvodnje, a da ne mijenjamo tehnologiju obrade. Rješenje problema nalazi se u geometriji i svojstvima alata koja nam omogućavaju obradu uz vrlo malu potrošnju SHIP-a (MQL), a u nekim slučajevima i suhu obradu. Kako je uloga sredstva za hlađenje i podmazivanje još uvijek vrlo bitna za obradu većine strojarskih materijala napravljeni su sistemi za podmazivanje kombiniranjem SHIP-a i stlačenog zraka. Za koje materijale je moguća suha obrada, a za koje je potrebno koristiti sredstvo za hlađenje i podmazivanje vidljivo je u tablici 3.

Materijal	Aluminij		Čelik		Lijevano željezo
	Lijewane legure	Kovane legure	Visoko legirani čelik i čelik za ležajeve	Ugljični čelik i kaljeni čelik	
Operacija	Lijewane legure	Kovane legure	Visoko legirani čelik i čelik za ležajeve	Ugljični čelik i kaljeni čelik	GG20- GGG70
Bušenje	MQL	MQL	MQL	MQL/suho	MQL/suho
Urezivanje navoja	MQL	MQL	MQL	MQL	MQL
Duboko bušenje	MQL	MQL		MQL	MQL
Glodanje	MQL/suho	MQL	Suho	Suho	Suho
Tokarenje	MQL/suho	MQL/suho	Suho	Suho	Suho
Glodanje zupčanika			suho	Suho	Suho
Piljenje	MQL	MQL	MQL	MQL	MQL
provlačenje			MQL	MQL/suho	suho

Tablica 3 Mogućnosti polusuhe ili suhe obrade za pojedini materijal i obradu [11]

### 5.1.3. Tvrda obrada

Tvrda obrada se u velikoj mjeri koristi kao završna obrada komada nakon kaljenja. Nekada se završna obrada toplinski obrađenih pozicija radila isključivo brušenjem, međutim napredak tehnologije nam je omogućio da danas tvrde materijale možemo glodati, tokariti, itd. Posebno je važna u autoindustriji za obradu ležajeva, zupčanika, osovina, vratila, prstenova i ostalih dijelova prijenosa. Materijali koji se najčešće obrađuju su lijevano željezo, brzorezni čelik, alatni čelik, čelik za ležajeve, čelik za poboljšavanje, itd. Tvrda obrada materijala najčešće se izvodi pomoću alata s reznom oštricom od kubičnog bor nitrida (CBN). Korištenjem spomenutog alata smanjuju se proizvodni troškovi, smanjuje se vrijeme obrade, povećava se kvaliteta površine, a omogućena je i suha obrada.

### 5.1.4. Obrada visokih performansi i učinkovitosti

U zadnja dva desetljeća intenzivno se razvijaju načini obrade kojima je glavni cilj smanjenje vremena proizvodnje i vrlo visoka produktivnost. Neki od ciljeva obrade visokih performansi su:

1. Smanjenje neproduktivnog vremena tijekom strojne obrade
2. Smanjenje vremena trajanja operacije optimiziranjem parametara obrade i alata (npr. izbjegavanjem nepotrebnih izmjena alata)
3. Uvođenjem polusuhe ili suhe obrade (kriogenim hlađenje ili ispiranjem pod visokim tlakom)
4. Optimiziranjem uklanjanja strugotine

Kako bi se postigli zadani ciljevi uvodi se hibridna obrada. Cilj hibridne obrade je da se na

obradu jedne pozicije, smanjuje se vrijeme izrade i povećava produktivnost. Hibridna obrada se temelji na smanjenju trajanja jednog ciklusa, a vrijeme trajanja jednog ciklusa može biti znatno smanjeno optimizacijom pet parametara: parametri obrade, alat, vrijeme pozicioniranja, raspored alata u magazinu stroja i vrijeme izmjene alata. Dobar primjer stroja za hibridnu obradu su CNC obradni centri s dva vretena gdje se simultano mogu obrađivati dva obratka. Učinkovitost takvih strojeva je visoka, a može se dodatno povećati uvođenjem paletnog sustava.

Kako bi se povećanje performansi obrade nastavilo potrebno je uzeti u obzir sljedeće:

- Obrada u jednom prolazu
- Višenamjenski alati
- Isključiti naknadne obrade
- Modularni sistemi alata
- Visoka ponovljivost i preciznost
- Visoke brzine rezanja
- Jednostavni i pouzdani prihvatni za alat
- Smanjiti vrijeme obrade
- Standardizacija i upravljanje alatima
- Koristiti alate s najboljim performansama

### 5.1.5. Obrada u jednom prolazu

Obrada u jednom prolazu je specijalan slučaj obrade kod koje se u jednom prolazu alata iz priprema dobiva gotov proizvod. Tri bitna kriterija obrade u jednom prolazu su vrijeme obrade, kvaliteta površine i cijena. Za takvu vrstu obrade koriste se višenamjenski i stupnjeviti alati (slika 5.2).

Obrada u jednom prolazu dijeli se na:

- Obradu cijelog priprema jednim alatom u jednom prolazu (npr. tokarenje)
- Obradu svih površina priprema u jednom prolazu (kombinirani alat)
- Obrada pomoću jednog alata koji obavlja više funkcija u jednom prolazu

Primjer takve obrade bio bi glodanje kompleksnog komada koje uključuje glodanje utora, bušenje, glodanje površine i glodanje radijusa pomoću samo jednog alata u jednom prolazu. Rezultat optimalno izvedene obrade u jednom prolazu je eliminiranje vremena izmjene alata u procesu obrade, smanjenje pripremno-završnog vremena, smanjenje vremena za proračun tolerancija zato što nema obrade u više prolaza, smanjenje troškova alata.



Slika 5.2 Višenamjenski i stupnjeviti alati [11]

### 5.1.6. Ultrazvučno i termalno potpomognuta hibridna obrada

Ultrazvučno i termalno potpomognuta obrada je hibridna obrada nastala spajanjem petoosnih CNC sustava s ultrazvukom, laserom ili plazmom.

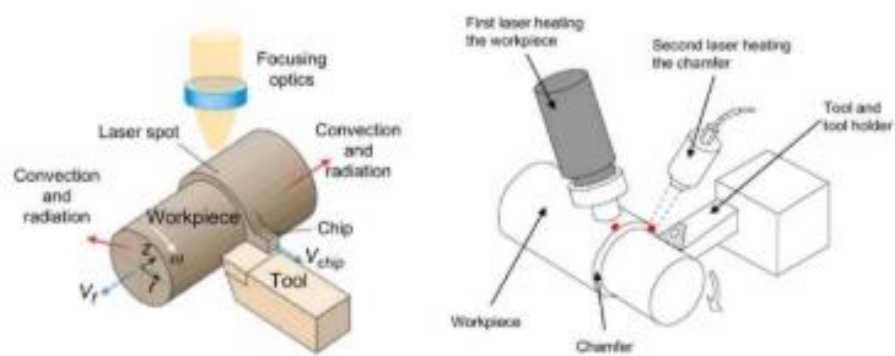
Ultrazvučna obrada (slika 5.3) je proces strojne obrade koji objedinjuje vrtnju alata s vibracijom frekvencije 20-40 kHz. Najčešće se koristi za vrlo preciznu obradu tvrdih i krhkih materijala. Za takvu vrstu obrade koriste se alati od relativno duktilnog materijala (nehrđajući čelik, mesing ili meki čelik), najčešće su zalemljeni za držač alata kako bi se izbjegao umor materijala. Ultrazvučna obrada je najefektivnija za materijale koji imaju tvrdoću veću od 50 HRC (može se obrađivati i drago kamenje, kao na primjer safir ili rubin). Obrada je relativno spora (manje od  $1.5 \text{ cm}^3/\text{min}$ ), a penetracija alata se kreće od 0,2 do 6 mm/min. Moguća je obrada do dubine od 50 mm pa čak i više, ali u praksi je ta vrijednost uglavnom manja od 5 mm. Ovim postupkom moguće je bušenje rupa iznimno malih promjera (oko 0,1 mm).



Slika 5.3 Ultrazvučna hibridna obrada [11]

Poznata je činjenica da s povećanjem temperature materijala njegova čvrstoća opada te je samim time materijal lakše obradiv. Upravo se na toj činjenici temelji hibridna petoosna obrada potpomognuta laserom (slika 5.4). Kako bi se materijal tijekom obrade zagrijao na temperaturu od 800-1000 °C i to neposredno prije prolaska alata potreban nam je kontrolirani i koncentrirani izvor energije velike snage. Zadane kriterije zadovoljavaju samo plazma i neke vrste lasera. Prednosti zagrijavanja tvrdih materijala neposredno prije prolaska alata su mnogobrojne: nema intenzivnog trošenja alata i pucanja alata, nema pucanja materijala, nema savijanja alata. Korištenjem dva lasera od kojih jedan grije površinu koja nije obrađena, a drugi zagrijava

materijal neposredno prije prolaska alata smanjuje se ohlađivanje materijala između laserske zrake i prolaska alata. Time se značajno produkuje vrijeme trajanja alata. Kombiniranjem CNC stroja s laserom se mogu izvoditi i druge operacije kao što je strojna obrada i kaljenje, gdje kaljenje može biti neposredno prije obrade ili nakon obrade.



*Slika 5.4 Termalna hibridna obrada [11]*

## 6. CAD/CAM sustavi

Kako bi današnja industrija uspjela zadovoljiti zahtjeve kupaca mora kontinuirano predstavljati proizvode sve bolje kvalitete i niže cijene i to sve u što kraćem vremenu. U ostvarivanju tog cilja nam uvelike pomažu računala i CAD/CAM. CAD/CAM sustavi omogućavaju projektiranje, i analizu proizvoda, redizajn, programiranje strojnih obrada i simuliranje strojnih obrada kako bi se uvjerali da je program napravljen korektno. Drugim riječima, CAD/CAM sustavi skraćuju vrijeme razvoja proizvoda te smanjuju mogućnost pogreške u proizvodnji.

### 6.1. CAD

CAD (Computer-aided design) je računalni program koji nam pomaže pri stvaranju, modificiranju, analiziranju, optimiziranju proizvoda te stvaranju dokumentacije. Korištenjem takvog programa u razvoju proizvoda povećava se kvaliteta proizvoda, točnost proračuna, produktivnost te se smanjuje vrijeme potrebno za razvoj proizvoda. Pomoću CAD programa moguće je razviti proizvode vrlo kompleksne geometrije. Današnji softveri omogućavaju i simuliranje rada proizvoda kako bi se otkrile i ispravile greške na proizvodu prije proizvodnje.

Najčešće korišteni 2D i 3D CAD programi:

- SolidWorks
- CATIA
- AutoCad
- SketchUp
- Inventor
- Fusion 360
- Creo

CAD sustavi se najčešće koriste u elektrotehnici i strojarstvu, ali i u ostalim granama tehnike koje se bave dizajnom, projektiranjem i razvojem proizvoda. Danas je korištenje CAD programa u strojarstvu normalna praksa.



## 6.2. CAM

CAM (Computer-aided manufacturing) je računalni program namijenjen planiranju i upravljanju proizvodnim procesima. Prethodnik CAM sustava je numerička kontrola (NC) kod koje se ručno pisao NC kod pomoću definiranih instrukcija za kontrolu strojeva. Računala danas mogu generirati značajnu količinu NC koda prema geometriji 3D modela proizvoda iz CAD programa i dodatnim instrukcijama programera. U CAM programima se mogu programirati i roboti što nam uvelike pomaže u proizvodnji. U CAM sustavima možemo postaviti robota u radnu okolinu stroja te ga programirati da odrađuje određene zadatke (izmjena pozicija, zavarivanje, sastavljanje). Važno je napomenuti da većina proizvođača programa danas ujedinjuju CAD i CAM sustave u jedan program zbog lakšeg korištenja, čineći tako integrirane CAD/CAM sustave.

Poznatiji CAM programi:

- SolidCam (CAM)
- CATIA (CAD/CAM)
- Fusion 360 (CAD/CAM)
- Mastercam (CAD/CAM)
- PowerMILL (CAM)

## 7. Sinutrain

SinuTrain je softver napravljen od strane tvrtke Siemens. Napravljen je kako bi obuka programera i operatera za Sinumerik CNC strojeve bila efikasnija i isplativija. Baziran je na stvarnom sučelju Sinumerik CNC strojeva (slika 6.1 ). Koristi se za sve vrste obuka, od osnova do najnaprednijih funkcija ovih strojeva. U Sinutrain-u se mogu programirati tokarilice, glodalice, kao i 4 i 5-osni strojevi, a omogućene su i simulacije procesa obrade kako bi se program provjerio prije odlaska u proizvodnju. Zahvaljujući Sinutrain-u obuka operatera postala je jednostavnija i isplativija zbog činjenice da se ne provodi na stvarnom stroju.

Prednosti Sinutrain-a:

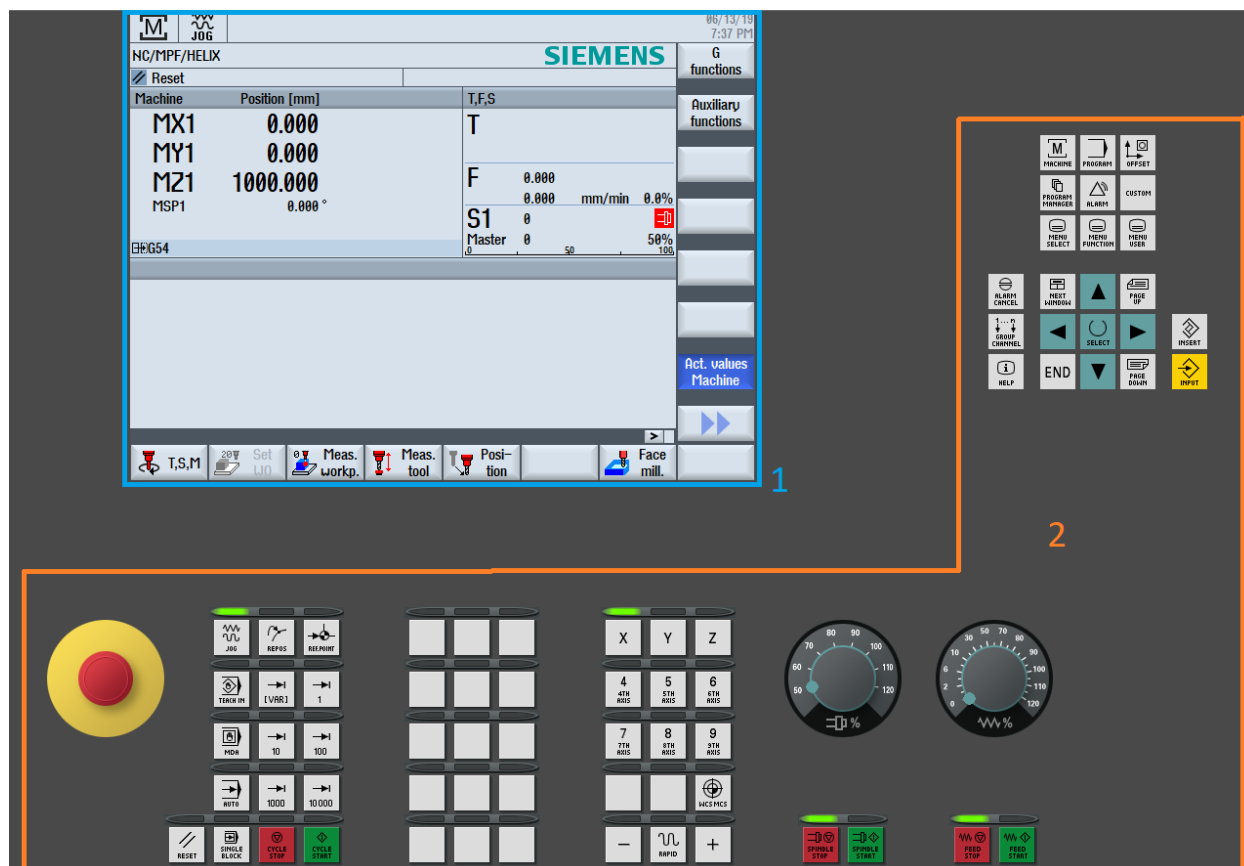
- Sučelje programa je jednako sučelju stroja
- Može se programirati u DIN, ShopMill i ShopTurn programskim jezicima
- Programiranje je jednostavnije
- Mogućnost povezivanja s CAD programima
- Moguće je umrežiti više radnih stanica kako bi obuka bila jednostavnija



Slika 7.1 Upravljačka jedinica CNC stroja Sinumerik 840D [13]















## 7.1. Opis sučelja

Sučelje programa Sinutrain (slika 7.2) sastoji se od dva osnovna djela. Programskog sučelja (1) i upravljačke jedinice (2).



Slika 7.2 Sučelje programa Sinutrain

Upravljačka jedinica omogućava nam kontrolu stroja, učitavanje programa, izmjene u programu, kontrolu pojedinih osi, odabir alata te još mnogo funkcija. Sastoji se od dva dijela: adresno-numeričke upravljačke jedinice i strojno-upravljačke jedinice. U tablici su prikazane neke od bitnijih kontrola. Gumbi prikazani pod rednim brojevima od 1-7 dio su strojno-upravljačke jedinice i na stroju se nalaze ispod monitora. Svi ostali gumbi iz tablice dio su adresno-numeričke upravljačke jedinice i nalaze se desno od monitora.

Redni broj	Izgled gumba	funkcija
1		Zaustavljanje stroja u slučaju nužde
2		Različiti načini rada stroja
3		RESET
4		Način rada blok po blok
5		Zaustavljanje/ pokretanje programa
6		Paljenje/ gašenje i podešavanje brzine vrtnje alata
7		Paljenje/ gašenje i podešavanje posmaka
8		Strelice predstavljaju navigacijske tipke Selekt- potvrda izbora End- završetak radnje Page up/ page down- promjena stranice Next window- sljedeći prozor
9		Direktni skok u područje rada stroja
10		Prikaz programa
11		Otkazivanje alarma
12		
13		Otvaranje datoteka, otvaranje/ zatvaranje direktorija
14		Odabir izbornika

Tablica 4 Izgled i funkcija tipki

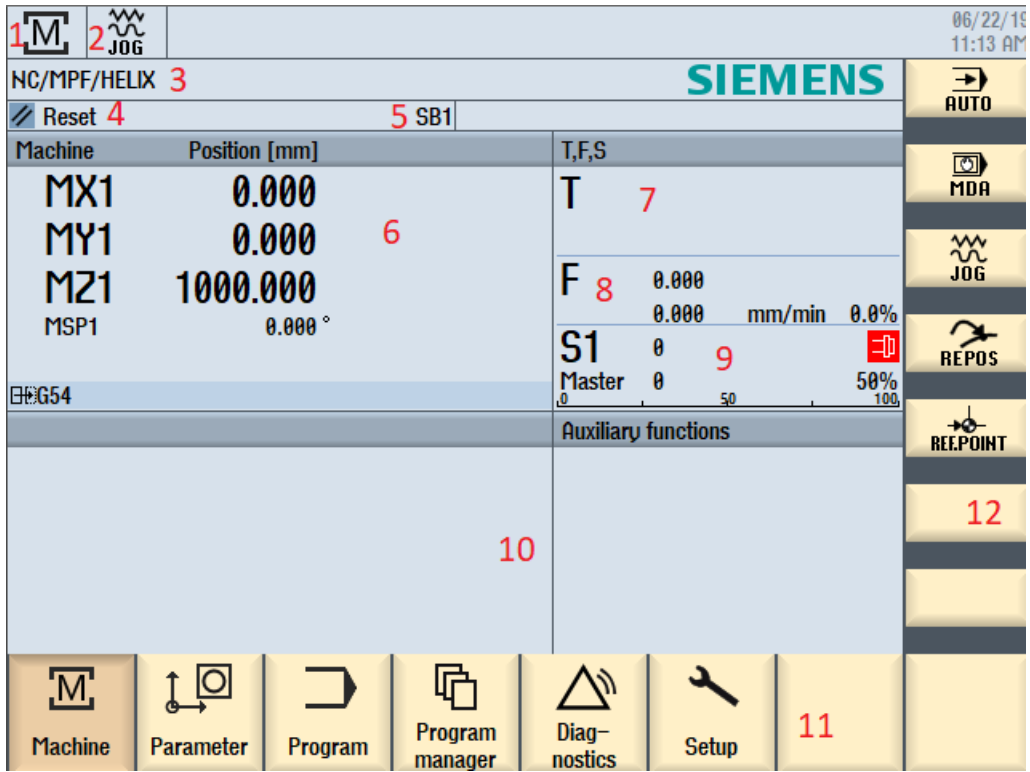
Osim pomoću upravljačke jedinice, kontrola i programiranje stroja može se raditi pomoću računalne tipkovnice. U tom slučaju su funkcije tipki kako je prikazano na slici 7.3.



Slika 7.3 Raspored tipki na standardnoj tipkovnici [18]

Programsko sučelje je vrlo dobro organizirano i jednostavno za korištenje. Sastoji se od 12 osnovnih prozora prikazanih na slici 7.4:

1. Trenutno aktivno radno područje
2. Način rada
3. Ime i direktorij odabranog programa
4. Status programa
5. Način rada blok po blok
6. Pozicija pojedine osi
7. Odabrani alat
8. Posmak osi
9. Brzina vrtnje alata
10. Dodatni radni prozori
11. Horizontalne tipke (radno područje)
12. Vertikalne tipke (način rada)



Slika 7.4 Programsko sučelje

## 8. Programiranje petoosne obrade u Solidcam-u

U ovom poglavlju govorit će se o programiranju petoosne obrade u CAM programu. Preciznije u SolidCam-u uz primjer programiranja simultane petoosne obrade svrdla promjera 10 mm.

### 8.1. SolidCam 2016

SolidCam je osnovao Dr. Emil Somekh 1984. godine. Glavna obilježja SolidCam-a su napredne CAM funkcije i prilagođeni postprocesori, a jedno od najvećih postignuća je modul „iMachining“ kojim se drastično skraćuje vrijeme obrade i produljuje vijek trajanja alata. Danas je SolidCam jedan od najčešće korištenih integriranih CAM softvera. Instalira se kao dodatak, a može raditi unutar Solidworks-a. i Autodesk Inventor-a (InventorCam). U SolidCam je moguće programiranje svih tipova CNC strojeva za obrade odvajanjem čestica.

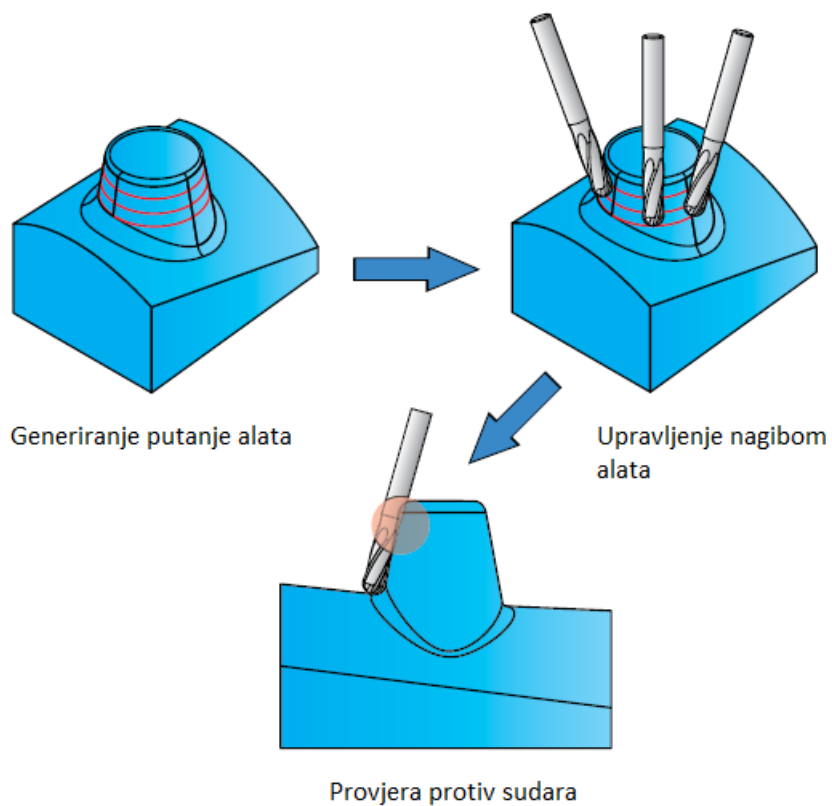
Proizvodni moduli SolidCam-a:

- iMachining 2D
- iMachining 3D
- 2.5D glodanje
- Prepoznavanje rupa
- ToolBox ciklusi
- HSS (eng. High speed surfacing)
- 3D glodanje
- HSR-HSM (eng. high speed milling)
- 4/5 osno indeksirano glodanje
- Simultano 5 osno glodanje
- Tokarenje
- Glodanje-tokarenje
- Mjerenje

## 8.2. Definiranje Simultanog 5-osnog glodanja

Simultano 5-osno glodanje u SolidCam-u uključuje mnoštvo opcija koje pomažu programeru, uključujući i opcije za specifične proizvode kao što su propeleri i turbine. Definiranje operacije petoosnog glodanja podijeljeno je u tri koraka (slika 8.1):

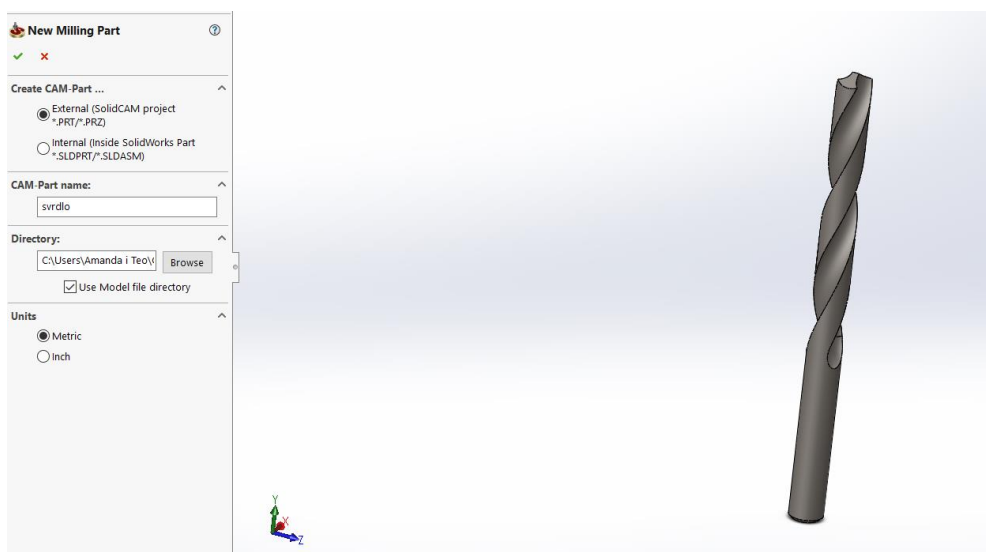
1. Generiranje putanje alata
2. Upravljanje nagibom alata
3. Provjera protiv sudara



Slika 8.1 Definiranje petoosne obrade [22]

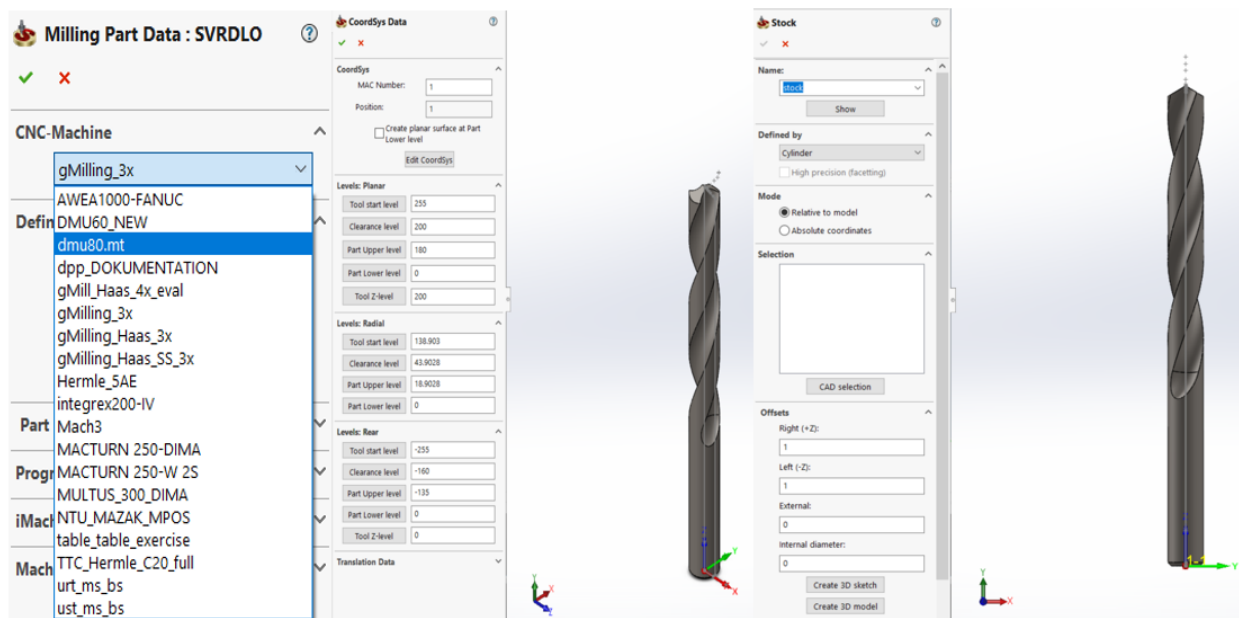


Kako bi lakše objasnili simultano 5-osno glodanje uzeti ćemo kao primjer model svrdla za metal promjera 10 mm. Model svrdla prikazan je slikom 8.2. Ovdje se neće objašnjavati konstruiranje 3D modela svrdla već samo programiranje strojne obrade.



Slika 8.2 Model svrdla

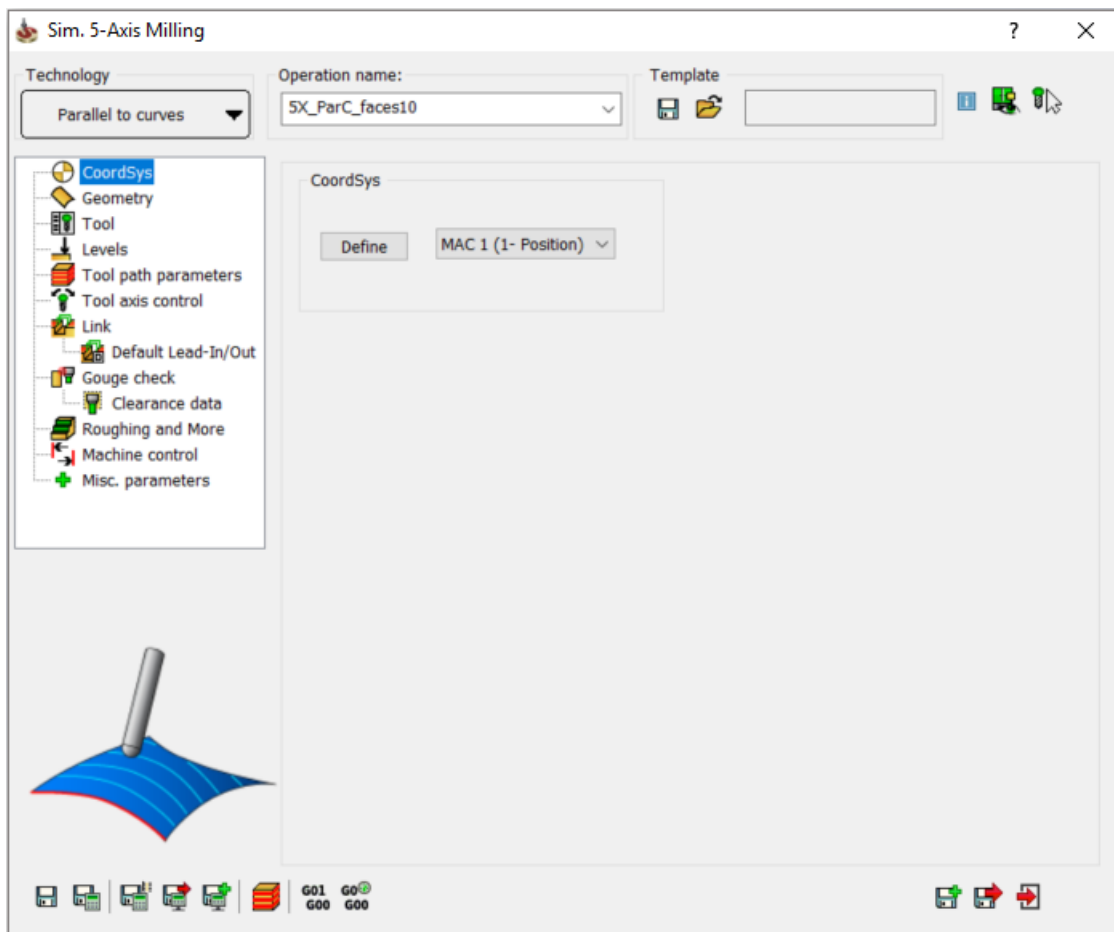
Nakon kreiranja novog CAM programa potrebno je definirati na kojem stroju će se obrada vršiti, postaviti koordinatni sustav na model i definirati dimenzije sirovca iz kojeg se pozicija izrađuje (slika 8.3).



Slika 8.3 Definiranje stroja, sirovca i koordinatnog sustava

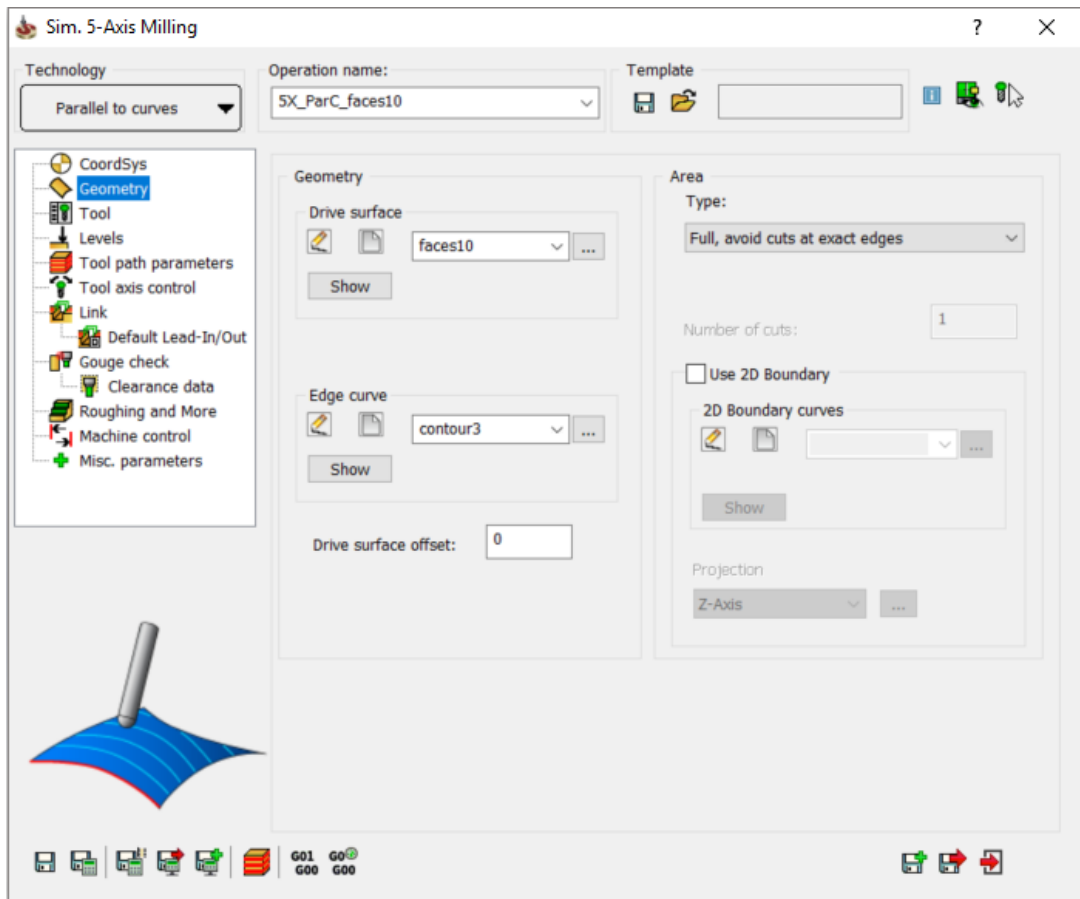
## 8.2.1. Glodanje žljebova

Za glodanje žljebova za izlaz strugotine koristimo petoosno simultano glodanje. Takva vrsta glodanja omogućava simultano kretanje i orijentiranje alata na takav način da je vrh alata uvijek u dodiru s pozicijom koja se obrađuje. Slika 8.4 prikazuje prozor simultanog petoosnog glodanja. Kao način obrade (eng. Pattern) odabiremo glodanje paralelno s krivuljom (alat se tijekom obrade kreće po krivuljama koje su paralelne sa zadanom krivuljom).

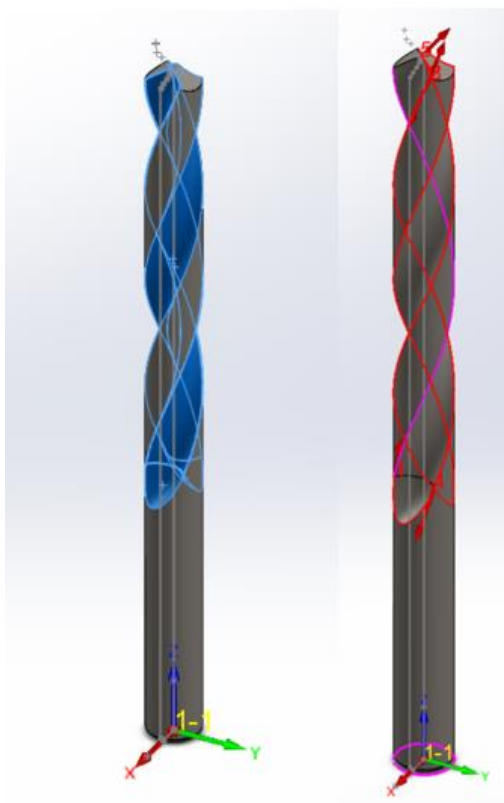


Slika 8.4 Prozor simultanog petoosnog glodanja

Nakon toga u postavkama geometrije (slika 8.5) moramo definirati površinu koju obrađujemo (eng. Drive surface) i krivulju po kojoj se giba alat (eng. Edge curve). Slika 8.6 prikazuje površinu koja se obrađuje (lijevo) i krivulju po kojoj se giba alat (desno).

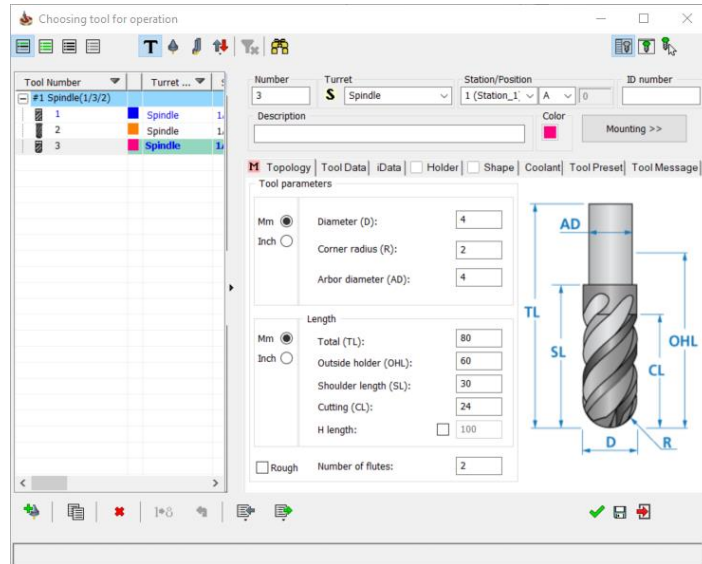


Slika 8.5 Definiranje geometrije



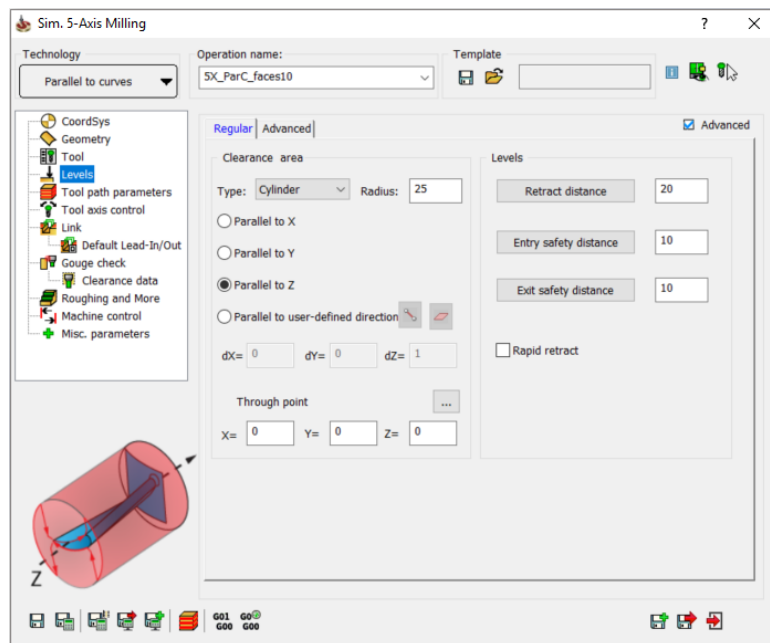
Slika 8.6 Odabir radne površine i krivulje gibanja alata

Obzirom da je površina koju obrađujemo zaobljena ne možemo koristiti klasično glodalo s ravnim vrhom već moramo uzeti glodalo sa zaobljenim vrhom kako bi mogli dobiti zadanu površinu. U ovom slučaju korišteno je glodalo promjera 4 mm (slika 8.7).



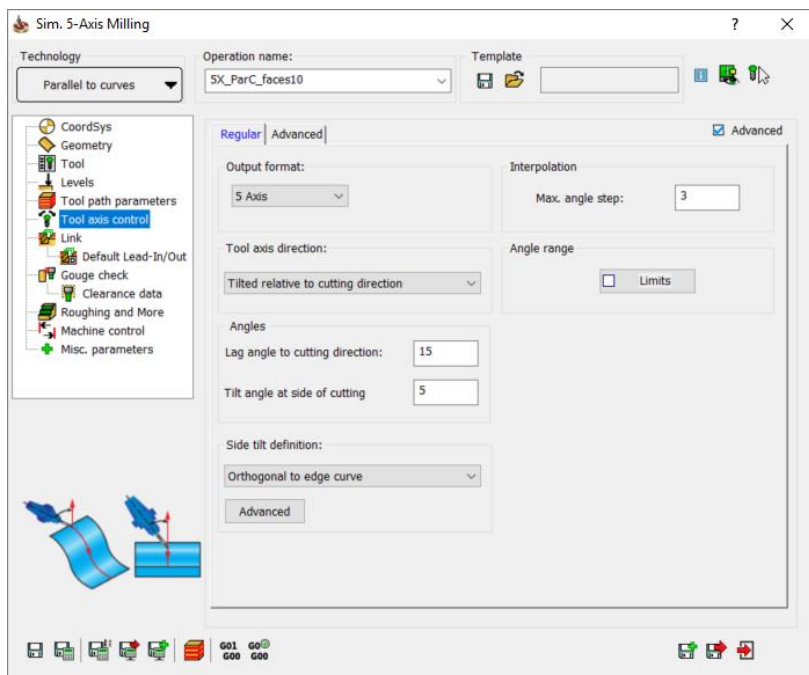
Slika 8.7 Odabir glodala

Vrlo je važno odrediti sigurnosnu udaljenost od pozicije koja se obrađuje. Pošto je naša pozicija cilindričnog oblika, kao sigurnosni volumen odabrali smo cilindar promjera 25 mm. Time smo osigurali da se alat unutar definiranog promjera giba samo radnom brzinom (slika 8.8).



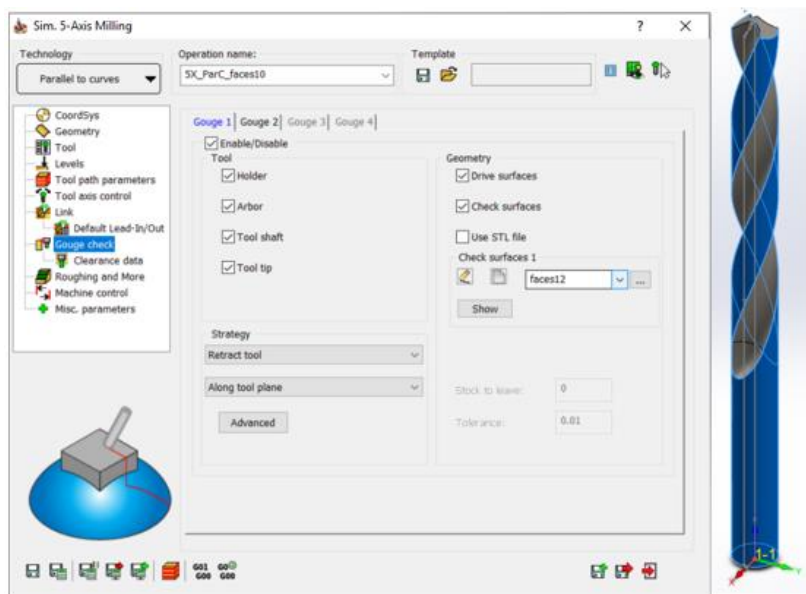
Slika 8.8 Definiranje sigurnosnog volumena

Kontroliranje nagiba alata (slika 8.9) vrlo je bitno kako bi se izbjegli sudari alata s dijelom pozicije koji se ne obrađuje, ali i za kvalitetu obrađene površine. Nagib alata može se definirati i u smjeru gibanja alata i okomito na njega.



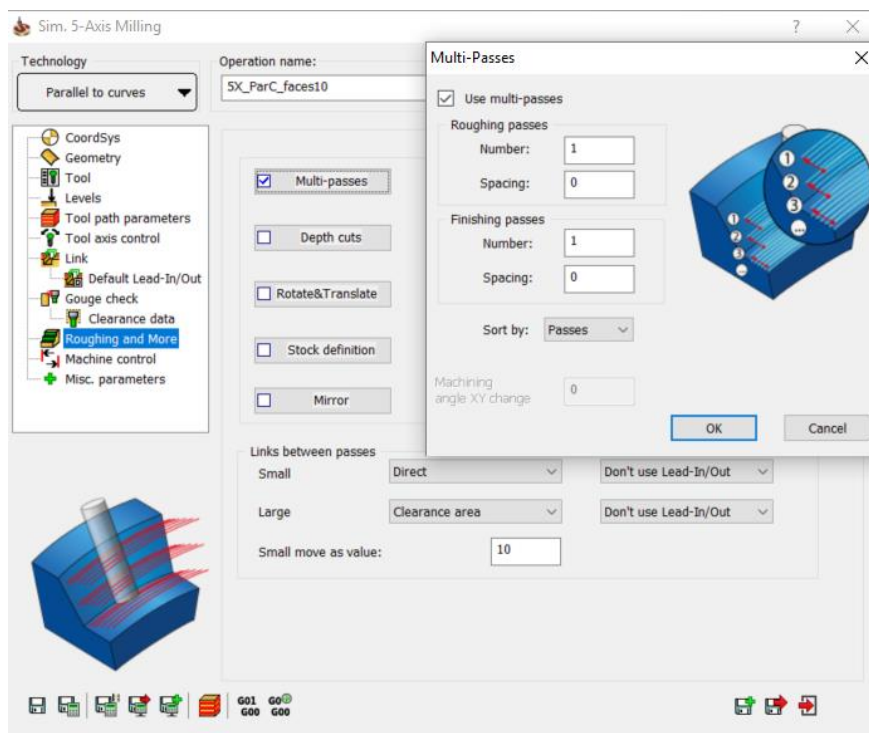
Slika 8.9 Kontrola nagiba alata

Kako bi se dodatno zaštitili dijelovi koji se ne obrađuju i alat, SolidCam ima integriranu zaštitu za provjeru protiv sudara. Sve što mi moramo napraviti je odabrati koje površine se provjeravaju i na koje dijelove alata želimo paziti (slika 8.10). Kada su definirani svi potrebni parametri SolidCam proračunava putanju alata kako ne bi došlo do sudara.



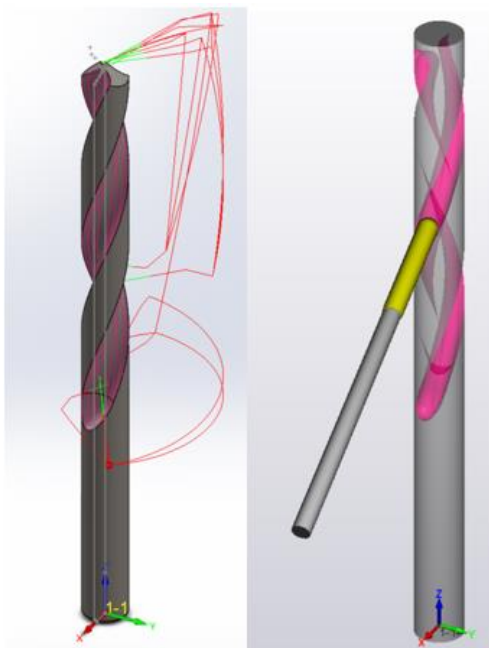
Slika 8.10 Postavke kolizije alata i obratka

U posljednjem koraku definiramo broj grubih i finih prolaza (slika 8.11). Ova opcija nam omogućava da odredimo koliko će od ukupnog broja prolaza biti grubih, a koliko finih prolaza.



Slika 8.11 Definiranje broja grubih i finih prolaza

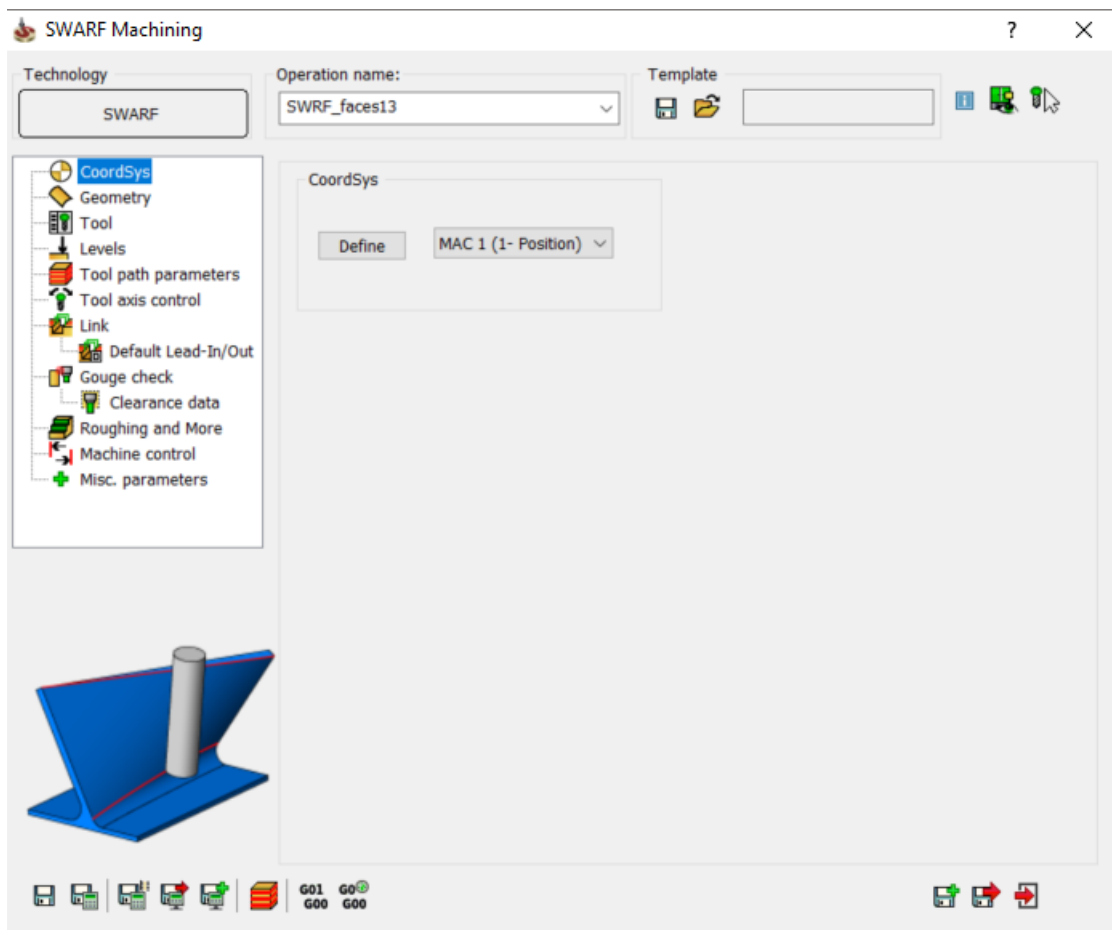
Po završetku programiranja operacije SolidCam kalkuliра putanju alata te istu prikazuje na modelu. Nakon toga možemo simulirati operaciju kako bismo utvrdili uspješnost programiranja operacije [23]. Putanja alata i simulacija prikazane su slikom 8.12.



Slika 8.12 Putanja alata i simulacija obrade

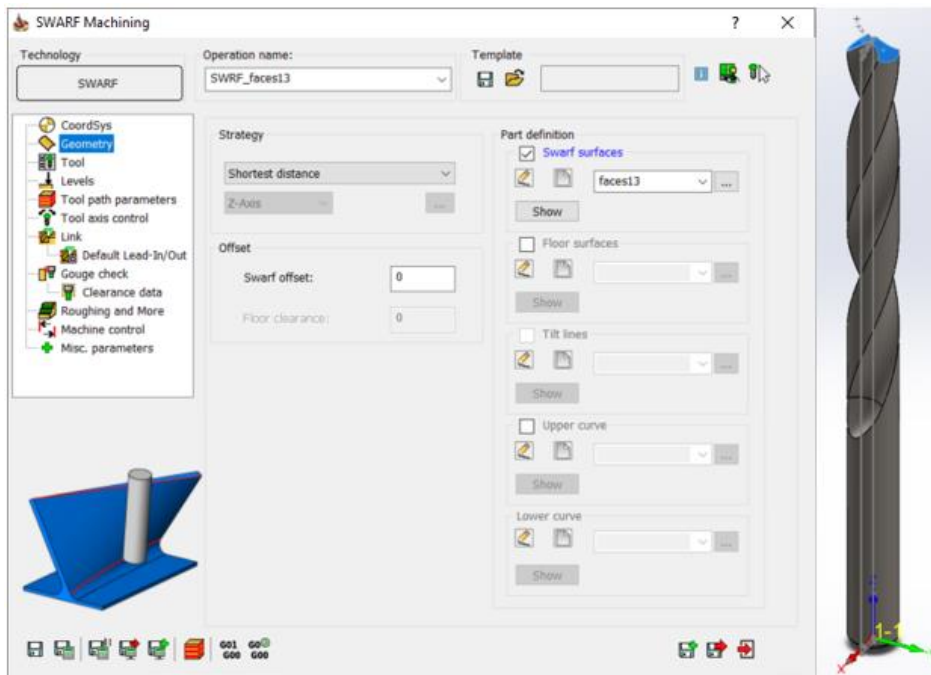
## 8.2.2. Glodanje vrha alata

Pri glodanju vrha alata koristit ćemo petoosnu simultanu obradu bočnom stranom glodala (eng. Swarf Milling). Za razliku od prethodne obrade, sada je bočna strana glodala uvijek u dodiru s obratkom. Time mjesto dodira alata i obratka čini liniju, a kvaliteta obrađene površine je vrlo visoka. Na slici 8.13 prikazan je prozor namijenjen programiranju takve vrste obrade.



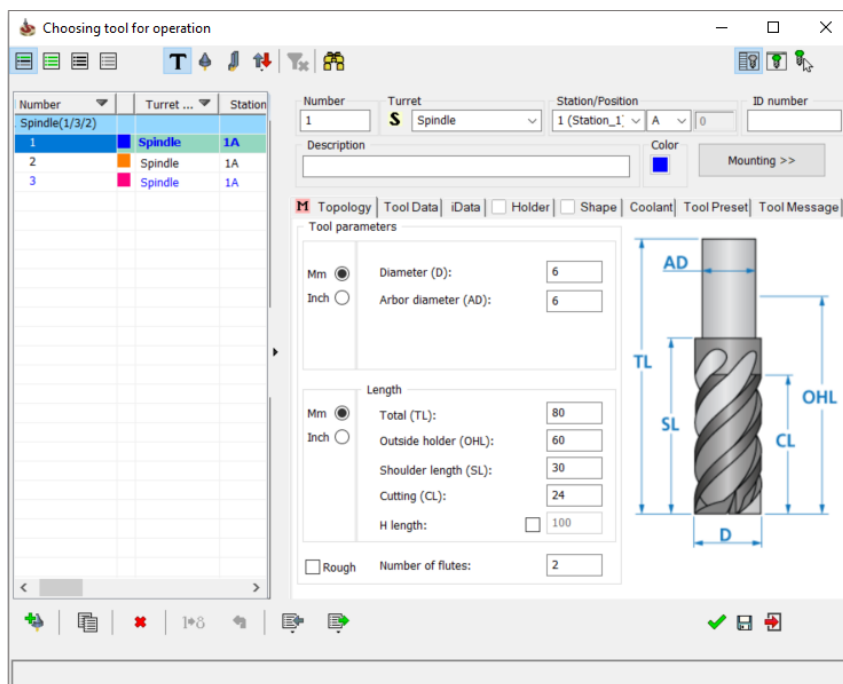
Slika 8.13 Prozor SWARF machining

Definiranje obrade takvom tehnologijom za površine koje obrađujemo je jednostavno. U prvom koraku odabiremo površine koje želimo obrađivati (slika 8.14).



Slika 8.14 Definiranje obrađivane površine

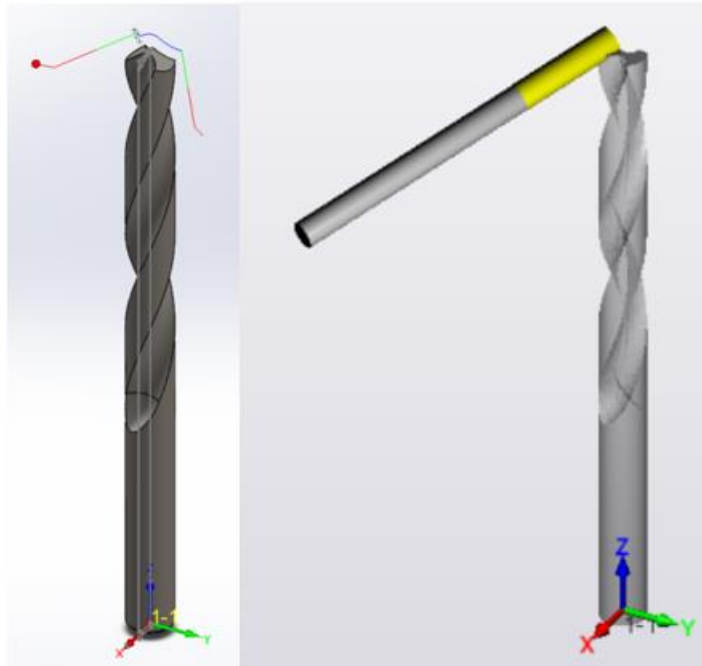
Nakon toga odabiremo alat kojim ćemo vršiti strojnu obradu (slika 8.15). Odabrali smo glodalo s ravnom glavom promjera 6 mm.



Slika 8.15 Odabir glodala

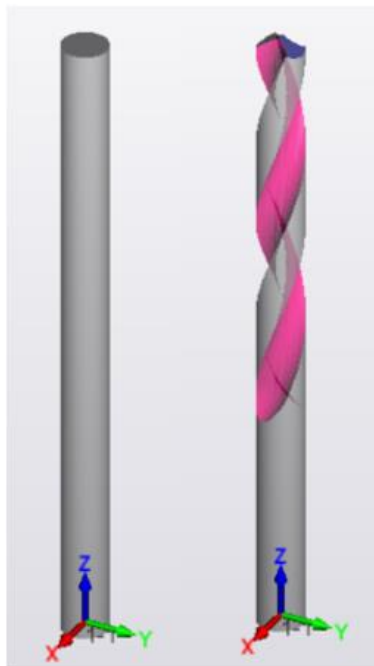


Sve ostale postavke kao što su sigurnosna udaljenost, provjera protiv sudara te broj grubih i finih prolaza mogu ostati iste. Međutim, nagib alata u ovom slučaju ostaje  $0^\circ$  kako bi osigurali da mjesto dodira alata i obratka bude linija. Nakon kalkuliranja obrade vidljiva je putanja alata te možemo provesti simuliranje obrade (slika 8.16). Simulacija obrade prikazana je u izvoru broj 23.



*Slika 8.16 Putanja alata i simulacija obrade*

Slika 8.17 prikazuje poziciju prije i nakon obrade.



*Slika 8.17 Početna šipka i završni proizvod*

## 9. Zaključak

Zahvaljujući stalnom razvoju CNC alatnih strojeva, a time i CAD/ CAM sustava danas smo u mogućnosti proizvesti pozicije vrlo složene geometrije, u vrlo uskim tolerancijama i u kratkom vremenu. Suvremeni strojevi raspolažu sa sve više osi i sve većom preciznošću obrade. Čini se vrlo jasno da je daljnji napredak strojne obrade neizbježan, te da će se u budućnosti razvijati sve više različitih tehnologija obrade odvajanjem čestica. Dokaz tome je da se već danas pokušavaju integrirati petosni obradni centri s drugim tehnologijama. Kao primjer možemo navesti obradu potpomognutu laserom. Samim time programiranje strojeva će biti sve kompleksnije pa će prema tome sve veći dio programiranja odrađivati CAD/ CAM sustavi.

U Varaždinu 9. rujna 2019. \_\_\_\_\_



IZJAVA O AUTORSTVU  
I  
SUGLASNOST ZA JAVNU OBJAVU

Završni/diplomski rad isključivo je autorsko djelo studenta koji je isti izradio te student odgovara za istinitost, izvornost i ispravnost teksta rada. U radu se ne smiju koristiti dijelovi tuđih radova (knjiga, članaka, doktorskih disertacija, magistarskih radova, izvora s interneta, i drugih izvora) bez navođenja izvora i autora navedenih radova. Svi dijelovi tuđih radova moraju biti pravilno navedeni i citirani. Dijelovi tuđih radova koji nisu pravilno citirani, smatraju se plagijatom, odnosno nezakonitim prisvajanjem tuđeg znanstvenog ili stručnoga rada. Sukladno navedenom studenti su dužni potpisati izjavu o autorstvu rada.

Ja, Teo Kolmanić pod punom moralnom, materijalnom i kaznenom odgovornošću, izjavljujem da sam isključivi autor završnog rada pod naslovom Kinematika i primjena 5-osnih CNC strojeva te da u navedenom radu nisu na nedozvoljeni način (bez pravilnog citiranja) korišteni dijelovi tuđih radova.

Student:  
*Teo Kolmanić*

  
(vlastoručni potpis)

Sukladno Zakonu o znanstvenoj djelatnosti i visokom obrazovanju završne/diplomske radove sveučilišta su dužna trajno objaviti na javnoj internetskoj bazi sveučilišne knjižnice u sastavu sveučilišta te kopirati u javnu internetsku bazu završnih/diplomskih radova Nacionalne i sveučilišne knjižnice. Završni radovi istovrsnih umjetničkih studija koji se realiziraju kroz umjetnička ostvarenja objavljuju se na odgovarajući način.

Ja, Teo Kolmanić neopozivo izjavljujem da sam suglasan s javnom objavom završnog rada pod naslovom Kinematika i primjena 5-osnih CNC strojeva čiji sam autor.

Student:  
*Teo Kolmanić*

  
(vlastoručni potpis)

## Literatura

- [1] <http://struna.ihjj.hr/naziv/cnc-stroj/38731/>, dostupno 01.04.2019.
- [2] [https://hr.wikipedia.org/wiki/CNC\\_upravljanje](https://hr.wikipedia.org/wiki/CNC_upravljanje), dostupno 02.04.2019.
- [3] Z. Blažević: Programiranje CNC tokarilice i glodalice, Virovitica, 2004.
- [4] M. Bošnjaković: Programiranje NC strojeva i robota, predavanje, Veleučilište u Slavonskom Brodu
- [5] Graham T. Smith: CNC machining technology, Southampton Institute, 1993.
- [6] Kovačević Antonio, Postprocesori za petoosne obradne centre, diplomski rad, FSB, Zagreb, 2011.
- [7] Saša Franić, Značajke petoosnih obrada, završni rad, FSB, 2010.
- [8] <https://www.teximp.com/hr/CNC-glodanje>, dostupno 23.06.2019.
- [9] <http://www.fanchmachinery.com/cnc-machine-center/5-axis-machine-center/5-axis-machining-center-for-mold-making.html>, dostupno 23.06.2019.
- [10] E. LJ. Bohez: Five-axis milling machine tool kinematic chain design and analysis, International Journal of Machine Tools and Manufacture, 2002, str. 505-520
- [11] Wit Grzesik: Advanced machining processes of metallic materials, Poland, 2016.
- [12] <https://en.dmgmori.com/products/machines/milling/5-axis-milling/hsc>, dostupno 23.06.2019.
- [13] <https://www.volmatec.de/fraesmaschinen/steuerung-siemens-sinumerik-840d-sl.html>, dostupno 29.06.2019.
- [14] Aleš Stančić: Programiranje petoosnih CNC alatnih strojeva, završni rad, Sveučilište Sjever, 2017.
- [15] Kunwoo Lee: Principles of CAD/ CAM/ CAE systems, Seoul National University, 1999.
- [16] Alan Overby: CNC machining handbook, United States of Amerika, 2011.
- [17] Milling with Sinumerik, 5-axis machining: priručnik, 2009.
- [18] EMCO WinNC Sinumerik 810D/840D milling, Software description, priručnik, 2007.
- [19] Sinumerik 810D/ 840D powerline milling with shopmill, priručnik, 2007.
- [20] Nikola Pavlic: Postupak retrofita CNC glodalice i analiza rada, završni rad, Sveučilište Sjever, 2018.
- [21] Valentin Farkaš: CNC stroj, završni rad, Sveučilište Josipa Jurja Stroosmayera u Osijeku, 2018.
- [22] SolidCAM User Guide: Simultaneous 5-Axis, priručnik, 2016.
- [23] <https://youtu.be/0lccbJx9x4Y>, dostupno 07.07.2019.

## Popis slika

Slika 2.1 Prva NC glodalica [3].....	4
Slika 3.1 Koordinatni sustav stroja [3] .....	6
Slika 3.2 Upravljanje točka po točka [5] .....	8
Slika 3.3 Upravljanje po pravcu [5].....	9
Slika 3.4 Konturno upravljanje [5] .....	10
Slika 3.5 Vrste sustava upravljanja [5] .....	12
Slika 3.6 EM K 3612 štanca .....	13
Slika 3.7 Haas UMC-750 obradni centar [8].....	14
Slika 4.1 5-osni obradni centar za izradu kalupa [9] .....	15
Slika 4.2 dvostruko rotirajući stol [10].....	19
Slika 4.3 dvostruko rotirajući alat [10].....	20
Slika 4.4 rotirajući alat i rotirajući stol [10] .....	20
Slika 5.1 Obradni centar za visokobrzinsku obradu [12] .....	23
Slika 5.2 Višenamjenski i stupnjeviti alati [11].....	26
Slika 5.3 Ultrazvučna hibridna obrada [11].....	27
Slika 5.4 Termalna hibridna obrada [11].....	28
Slika 7.1 Upravljačka jedinica CNC stroja Sinumerik 840D [13] .....	31
Slika 7.2 Sučelje programa Sinutrain .....	32
Slika 7.3 Raspored tipki na standardnoj tipkovnici [18] .....	34
Slika 7.4 Programsko sučelje.....	35
Slika 8.1 Definiranje petoosne obrade [22] .....	37
Slika 8.2 Model svrdla.....	38
Slika 8.3 Definiranje stroja, sirovca i koordinatnog sustava .....	38
Slika 8.4 Prozor simultanog petoosnog glodanja .....	39
Slika 8.5 Definiranje geometrije.....	40
Slika 8.6 Odabir radne površine i krivulje gibanja alata .....	40
Slika 8.7 Odabir glodala .....	41
Slika 8.8 Definiranje sigurnosnog volumena .....	41
Slika 8.9 Kontrola nagiba alata.....	42
Slika 8.10 Postavke kolizije alata i obratka .....	42
Slika 8.11 Definiranje broja grubih i finih prolaza.....	43
Slika 8.12 Putanja alata i simulacija obrade .....	43
Slika 8.13 Prozor SWARF machining.....	44

Slika 8.14 Definiranje obrađivane površine .....	45
Slika 8.15 Odabir glodala .....	45
Slika 8.16 Putanja alata i simulacija obrade .....	46
Slika 8.17 Početna šipka i završni proizvod .....	46

## **Popis tablica**

Tablica 1 Podjela konturnog upravljanja [6] .....	9
Tablica 2 Polja primjene visokobrzinske obrade [11] .....	23
Tablica 3 Mogućnosti polusuhe ili suhe obrade za pojedini materijal i obradu [11] .....	24
Tablica 4 Izgled i funkcija tipki.....	33

