

Факултет инжењерских наука Универзитета у Крагујевцу



Назив студијског програма: Машинско инжењерство

Ниво студија: Основне академске студије

Модул: Производно машинство

Предмет: Машине алатке

Број индекса: 53/2016

Ивана В. Николић

Погон корачним и ДЦ моторима CNC машина

Завршни рад

Комисија за преглед и одбрану:

1. Др Богдан Недић, ред. проф.

2. _____

3. _____

Датум одбране: _____

Оцена: _____



Универзитет у Крагујевцу
Факултет инжењерских наука



Основне студије: **Машинско инжењерство**

Студијско подручје (усмерење): **Производно машинство**

Име и презиме: **Ивана Николић**

Број индекса: **53/2016**

ПРИЈАВА ЗАВРШНОГ РАДА

Тема рада: **Погони корачним и DC моторима CNC машина**

Задатак: У оквиру завршног рада потребно је да кандидат изврши прикупљање и систематизацију података о електричним погонима - корачним и DC моторима, који се користе за погон CNC машина алатки. Потребно је описати карактеристике мотора и начине њиховог управљањем.

Завршни рад треба да садржи следеће целине:

1. Уводна разматрања,
2. Погони машина алатки,
3. Корачни и DC мотори за погон CNC машина алатки,
4. Управљање погоном код CNC машина,
5. Закључци,
6. Литература.

Ментор:

Др. Богдан Недић, редовни професор

Крагујевац, 13.05.2019.

Резиме:

У раду је извршено прикупљање и систематизација података о електричним погонима – електромоторима, који се користе за погон CNC машина алатки. Описане су основне карактеристике електромотора, са освртом на корачне и DC моторе. На почетку рада приказана је функција и подела погона машина алатки, описан је електромоторни погонски систем, степ мотори, као и погон за главно и помоћно кретање. У наставку рада приказане су основе CNC машина, извршено је поређење класичне и CNC машине, као и електромотор као погон CNC машина. Након кратког описа корачног и DC мотора, који су изабрани за управљање машине, направљен је прорачун потребан за одабир мотора потребног за руковање CNC машином. На крају рада описани су DC мотори, као и драјвери и управљачке јединице мотора који су неопходни за управљање серво и корачног мотора.

Кључне речи: CNC машине, погон машина, електромотор, корачни мотор, DC мотор

Abstract:

The paper collects and systematizes data on electric drives - electric motors, which are used to drive CNC machine tools. The basic characteristics of electric motors are described, with reference to stepper and DC motors. At the beginning of the work, the function and division of the drive of the machine tools are presented, the electric motor drive system, the step motors, as well as the drive for the main and auxiliary movements are described. The basics of CNC machines are presented below, a comparison of classic and CNC machines is made, as well as an electric motor as a CNC machine drive. After a brief description of the stepper and DC motors selected to operate the machine, a calculation was made to select the motor required to operate the CNC machine. At the end of the paper, DC motors are described, as well as the drivers and motor control units necessary to operate the servo and stepper motors.

Key words: CNC machines, drive machines, electric motor, stepper motor, DC motor

Садржај

1. Увод.....	4
2. Погон машина алатки.....	7
2.1 Електромоторни погонски систем.....	9
2.2 Степ мотори.....	12
2.3 Погони главног вратила.....	13
2.4 Погонски систем помоћног кретања.....	17
3. Електромотори за погон CNC машина алатки.....	21
3.1 CNC машине.....	21
3.2 Електромеханички погонски систем са корачним моторима.....	28
3.2.1 Основе корачних мотора.....	28
3.2.2 Пример прорачуна корачних мотора.....	32
3.3 Електромеханички погонски систем са DC моторима.....	35
3.3.1 Моделирање једносмерног мотора.....	36
4. Управљање погоном код CNC машина.....	41
4.1 Драјвери и управљачке јединице за DC серво моторе.....	41
4.2 Драјвери и управљачке јединице за корачне моторе.....	51
5. Закључак.....	54
6. Литература.....	55

1. Увод

Електрични погони (електромоторни погони, електропогони, електрично покретање, *electrical drives* (енглески), *elektrische antriebe* (немачки), *azionamenti elettrici* (италијански)) имају важну улогу у свакодневном животу и у напретку човечанства.

Довољно је рећи да се преко половине производне електричне енергије у индустријски развијеној земљи претвара у механичку, било за потребе транспорта, било производне процесе.

У односу на друге врсте погона електрични погони имају низ предности:

- Обухватају широк дијапазон снага, почев од снага испод једног вата (нпр. у електронским сатовима), па до више стотина мегавата (нпр. за пумпу у реверсибилним хидроелектранама)
- Обухватају широк дијапазон обртних момената (преко једног милиона Nm у ваљаницама) и брзина (преко 100000 об/мин за центрифуге)
- Могу се прилагодити било каквим радним условима (принудно хлађени, потпуно затворени, потопљени у експлозивној атмосфери и др.),
- Еколошки су позитивни (нема запаљивог горива, нема гасова, производе релативно малу буку)
- Спремни су за рад одмах и то на пуно оптерећење
- Веома мало захтевају одржавање
- Имају веома мале губитке празног хода
- Имају веома висок степен корисности
- Имају способност високе краткотрајне преоптеретљивости
- Лакше се управља и то у широком опсегу брзина без потребе за механичким мењањем преносног односа
- При управљању могу имати веома брз динамички одзив
- Лако се мења смер обртања (реверсирање без механичких преносника)
- Имају могућност кочења са рекуперацијом (регенерацијом) енергије натраг у извор напајања
- Имају равномеран обртни момент и миран ход без вибрација
- Не раде под нарочито високим температурама, па имају дуг живот

- Могући су разни облици, прилагођени различитим потребама монтаже у радним машинама (нпр. више мањих мотора монтираних на местима директне употребе, уместо једног већег са механичким преносницима, затим мотор са ротором са спољашње стране, линеарни мотор уместо ротационог итд.)

Овом низу значајних предности електричних погона супротстављају се само два већа недостатка, али су у одређеним случајевима и она довољна да спрече или бар ограниче њихову употребу:

- Зависност од електричног напајања и
- Мали однос снаге према тежини.

Први недостатак ограничава примену електричних погона у транспорту. Економски прихватљива акумулаторска батерија је још увек око 50 пута тежа него одговарајућа количина горива за мотор са унутрашњим сагоревањем.

Најзначајнији елемент електричног погона је наравно електрични мотор. Међутим, у савременим електричним погонима велику улогу игра и електроника и то две њене гране:

- Енергетска електроника (енгл.: *power electronics*), са својим тиристорима и снажним транзисторима, уз помоћ које се врши претварање електричне енергије из једног облика у други (нпр. претварање трофазних наизменичних струја у једносмерну и обрнуто) уз истовремено контролисање количине претворене енергије (нпр. ради подешавања брзине)
- Управљачка електроника (енг.: *control electronics*), са својим транзисторима, интегрисаним колима, операционим појачивачима, логичким колима, микропроцесорима, микрокомпјутерима, уз помоћ које се врши управљање и регулација појединих физичких величина (нпр. брзине, момента, положаја и др.), делујући на енергетске претвараче или побудне системе електричних машина

На слици 1.1 приказане су разне врсте и величине електромотора.



Слика 1.1 Разне врсте и величине електромотора

У другом поглављу овог рада, описан је погон CNC машина алатки, његова функција и врсте. Описан је електромоторни погонски систем, корачни мотори као и погони за главно и помоћно кретање. На одговарајућим примерима илустрован је начин управљања и конструкција мотора. Дати су примери CNC машина, код којих се користе неки од електромотора.

У трећем поглављу, дате су основне карактеристике CNC машина, као и разлика између класичних и CNC машина. Даље, описан је електромеханички погонски систем са корачним моторима, за управљање CNC глодалицом мање снаге. Као и електромеханички погонски систем са DC моторима. Њихове карактеристике, подела, функција, начин управљања као и прорачун неопходан за одабир мотора за погон помоћним кретањима CNC машине.

У четвртом поглављу реч је о функцији погонског система код CNC машина алатки, као и о томе од чега се он састоји. Дате су основне карактеристике серво мотора, као и њихова подела (DC и AC). Описане су карактеристике и управљање DC серво драјвера (DCS-3010, DCS-3010-HV), моторске кочнице (MB-2), као и драјвер за корачне моторе MST – 107, који су неопходни за управљање серво и корачним моторима.

На крају је дат закључак и преглед литературе.

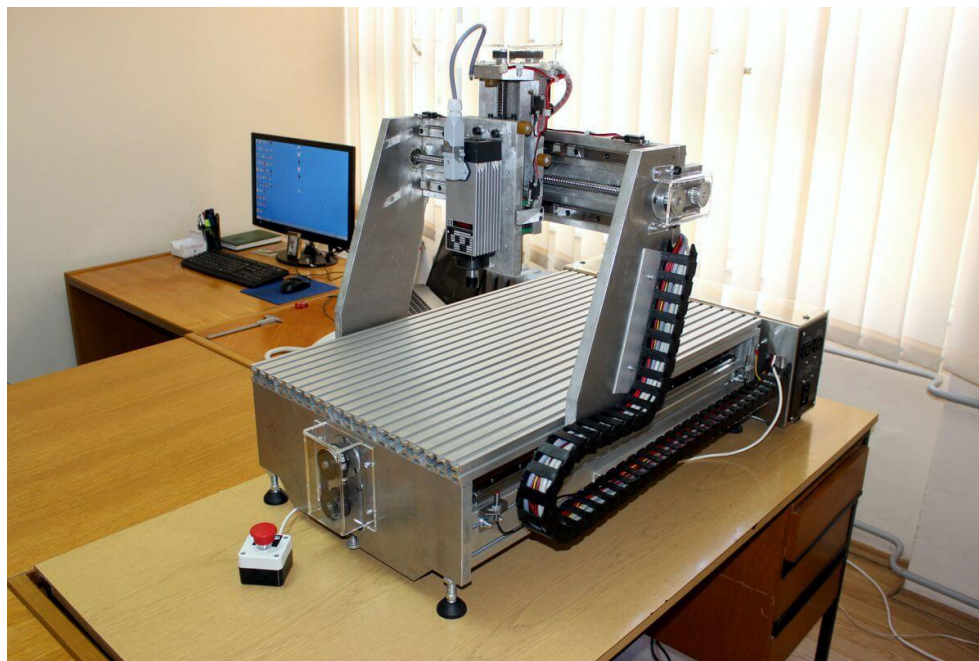
2. Погони машина алатки

Погонски системи алатних машина имају задатак да реализују наредбе добијене од непосредног радника, или управљачке јединице. Погонски системи покрећу извршне органе машине одговарајућим брзинама, на одговарајућим тракама, према програму, воде их и доводе у задате позиције. Погонски системи су због тога кључне компоненте алатних машина и од њих зависи читав низ излазних параметара процеса обраде. Генерално, погонски системи алатних машина деле се на погонске системе главног кретања, помоћног кретања и помоћних функција као што је приказано на слици 2.1. С аспекта погонских система, главна разлика између класичних и нумерички управљаних алатних машина је чињеница да ове друге имају посебне погонске системе за главно и за помоћно кретање. Ова разлика је логична и произилази из карактера нумеричког управљања.



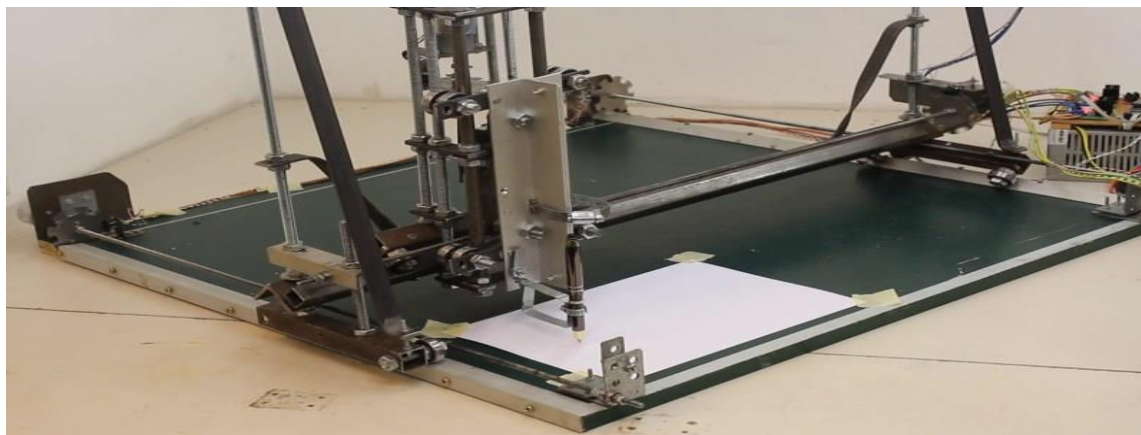
Слика 2.1 Подела погонских система [3]

На слици 2.2 је приказана копјутерски управљана стона 3 – осна CNC машина. Намењена је за обраду материјала попут пластике, дрвета, медијапана, али и за мекше металне материјале као што су алуминијум, месинг и други обојени метали и за гравирање. Код ове глодалице, за погон по x и z – осе користе се корачни мотори, са обртним моментом од 2,2 Nm, док се за y – осу употребљава корачни мотор од 4,5 Nm. Иначе, корачни мотори се користи за мале силе. За обраду се користи висококвалитетни трофазни асинхрони мотор максималне брзине 21600 min^{-1} с могућношћу прихватања чаура ER16 и резних алата пречника до 10 mm.



Слика 2.2 CNCстона глодалица [4]

На слици 2.3 приказан је пример кретања код CNC машина са корачним мотором.



Слика 2.3 Пример кретања код CNC машине са корачним мотором [4]

Брзина, тачност и прецизност CNC машине су у директној вези са величином и врстом мотора. Две основне врсте мотора које се користе на CNC машинама су степ и серво мотори.

Оба типа мотора имају неколико варијанти, када је у питању величина и снага. Предности и недостаци корачних и серво мотора заснивају се на поређењима при чему су оба мотора једнаке снаге. Оба мотора код CNC машина су у стању да дају одговарајућу снагу када се исправно инсталирају.

Што се тиче економичности - оба мотора су веома повољна, међутим, степ мотори се више користе. Чак и када серво мотори и степ мотори имају исту снагу, примена степ мотора је знатно већа. Степ моторису веома лако доступни на тржишту по приступачним ценама.

Када је свестраност у питању - степ мотори су веома свестрани, што их чини врло популарним за самоградњу као и за индустријску примену. Степ мотори се могу наћи у веома великом броју производа, од личних рачунара до аутомобила.

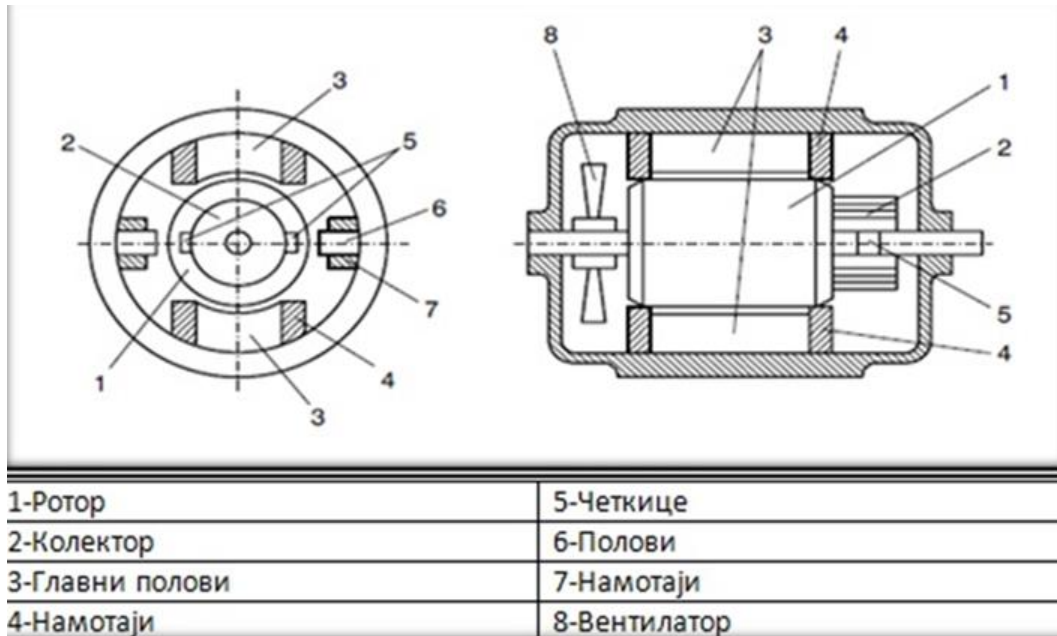
Животни век - степ мотор је мотор без четкица, за разлику од серво који има четкице. Четкице се морају мењати на сваких 2000 сати након рада, док су једини делови који се могу трошити на степ мотору лежјеви.

2.1 Електромоторни погонски системи

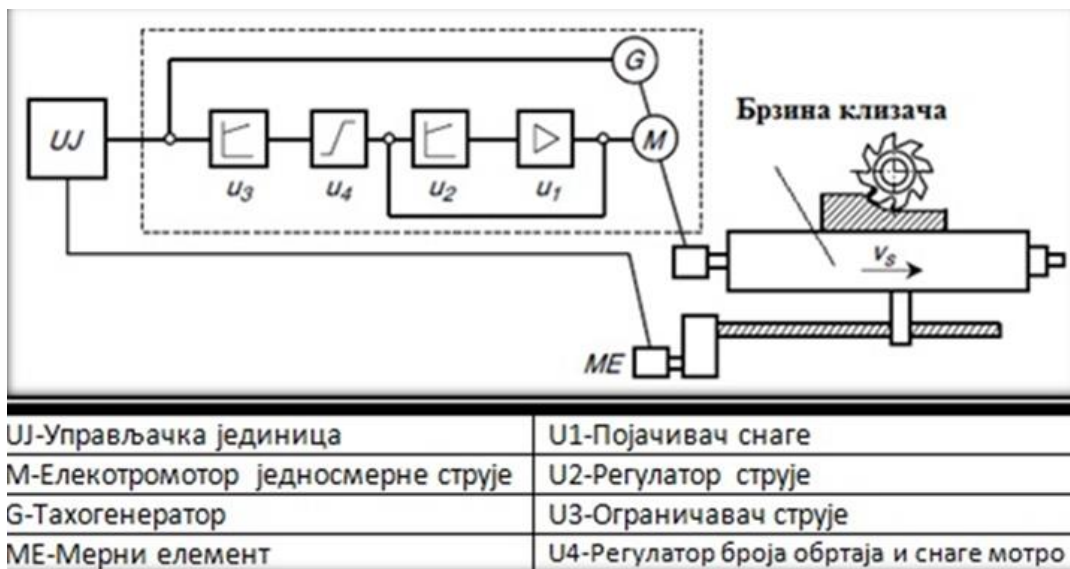
Електромотори једносмерне струје (*DC* мотори, *Direct Current*) су погодни за алатне машине малих и средњих снага. Омогућују веома laku регулацију брзине, имају велики обртни момент и висок степен искоришћења. На слици 2.4 приказани су основни елементи електромотора једносмерне струје, а на слици 2.5 функционална шема управљања помоћним кретањем радног стола алатне машине (на пример, глодалице), где је као погон употребљен електромотор једносмерне струје.

Карактеристика електромотора једносмерне струје је да омогућују прецизно управљање брзином у широком интервалу. То се остварује променом напона напајања мотора. Ови мотори се користе за погон главног и помоћног кретања нумеричких машина, нарочито у случајевима када се захтева континуално управљање брзином кретања. Принцип рада електромотора једносмерне струје заснован је на чињеници да ће на проводник који се налази у магнетном пољу и кроз који пролази струја, деловати сила. Овде долази до обртања ротора у магнетном пољу које је формирано од стране статора. Намотај ротора је повезан са комутатором (колектором) као што је и приказано на слици 2.4. Он представља цилиндар од изолованих бакарних прстенова постављених на рукавцу ротора. Непокретне графитне четкице (контакти) додирују површину комутатора и омогућавају пренос једносмерне струје до обртног намотаја ротора. До недавно ови мотори су имали значајно место код NC алатних машина. Сада су их углавном заменили асинхрони електромотори (AC мотори). Снага мотора (P) је производ обртног момента

(M) и броја обртаја (n) и линеарно расте са повећањем напона ротора. Након постизања номиналног напона ротора број обртаја мотора могуће је повећати променом магнетног тока а да при томе снага остане константна уз смањење момента ротора.

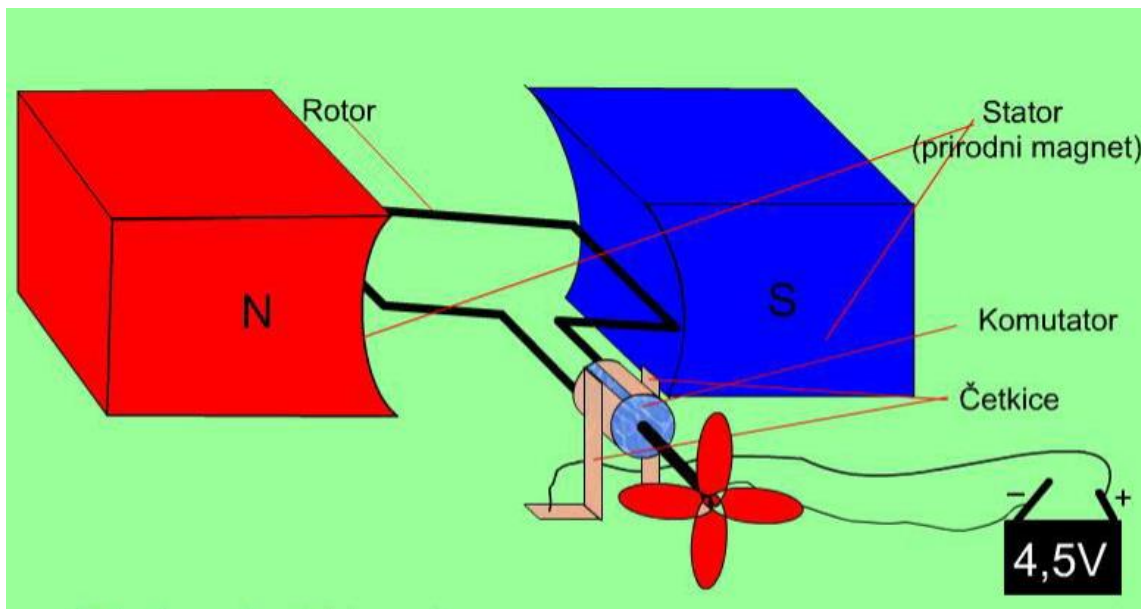


Слика 2.4 Основни елементи електромотора једносмерне струје [3]

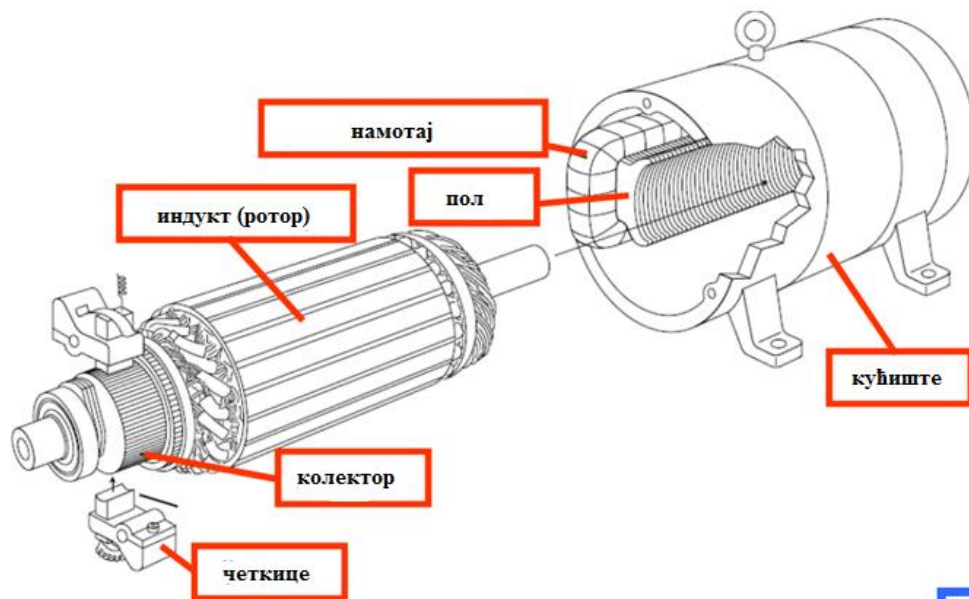


Слика 2.5 Шема управљања помоћним кретањем радног стола [3]

На слици 2.6 приказан је принцип рада електромотора једносмерне струје



Слика 2.6 Принцип рада електромотора једносмерне струје [3]



Слика 2.7 Конструкција електромотора једносмерне струје [3]

На слици 2.7 приказана је конструкција електромотора једносмерне струје.

Електромотори наизменичне струје (АС мотори, *Alternate Current*), за разлику од мотора једносмерне струје, немају клизне прстенове. Тиме је елиминисан главни проблем, а то је одржавање. Ови електромотори имају повољан однос снаге и масе, мањи момент

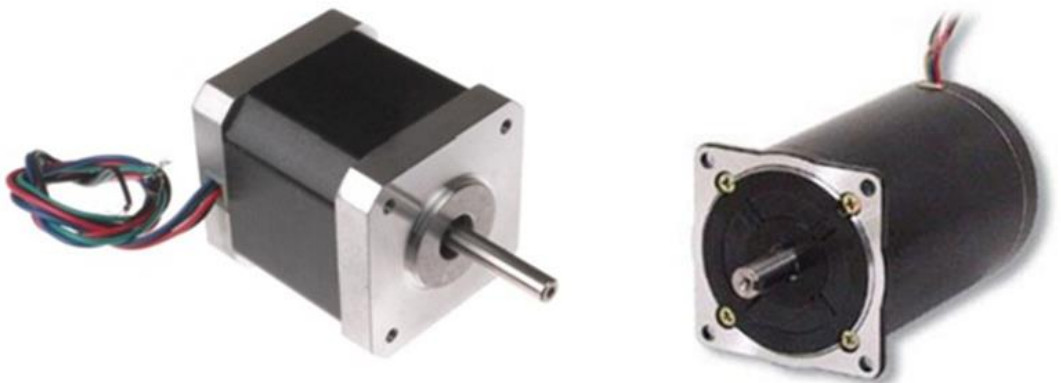
инерције покретних делова, већу брзину, константан момент који не зависи од брзине. Контрола брзине код електромотора наизменичне струје врши се преко фреквенције наизменичне струје којом се мотор напаја. За промену фреквенције користе се електрични - фреквентни претварачи. Овај вид регулације се назива фреквентна регулација.

2.2 Степ мотори

Са развојем рачунара и дигиталне технологије јавила се потреба за развојем мотора којима се управља непосредно помоћу дигиталног рачунара. То значи да се дигитални излазни сигнали рачунара могу користити за управљање мотором без сложених D/A и A/D конвертора, већ само помоћу прекидачких кола (дигитални излази рачунара се користе за активирање елемената који укључују и искључују напајање појединих намотаја мотора). Као резултат, јавља се корачни (степ) мотор (енг. *Stepper Motor*) који је приказан на слици 2.8. У неким случајевима се јављају и у транслаторном решењу, али је ротациона далеко заступљеније у пракси.

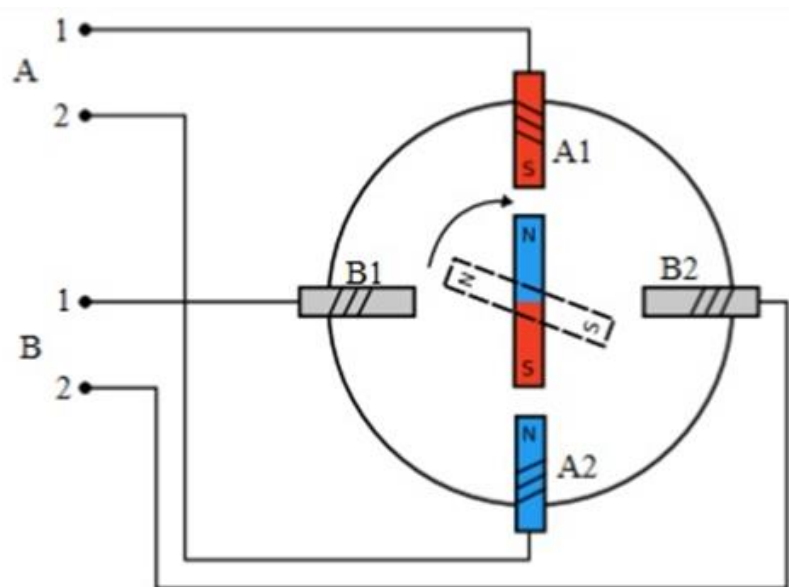
Дакле, корачни мотори су електромеханички конвертори енергије који пулсну односно корачну електричну побуду претварају у корачни механички померај. Обртни момент и снага корачних мотора су ограничени, тако да се користе за мање и средње алатне машине. Распон фреквенција улазних сигнала је 200 до 8000 imp./s , при чему су јединична заокретања вратила мотора од 5 до 10 $\mu\text{m/imp.}$, па и мање.

Принцип рада степ мотора се заснива на чињеници да се различити магнетни полови привлаче, односно на чињеници да феромагнетни материјал тежи да буде што ближи магнетном полу. На слици 2.9 види се ротор у облику плочице који је намагнетисан и на коме су означени магнетни полови и четири статорска намотаја који су повезани у парове по 2 (A1-A2 и B1-B2).



Слика 2.8 Степ мотор [3]

Ако се претпостави да се у почетном тренутку ротор налазио на положају означеном испрекиданом линијом, односно да је његов северни пол био окренут намотају Б1, јужни пол је тада окренут ка намотају Б2. Оног тренутка када струја почне да тече кроз проводник А у смеру од 1 ка 2, због различитог смера намотаја А1 и А2, стварају се различити магнетни полови означени као на слици 2.9. Тада северни магнетни пол ротора тежи да се приближи јужном магнетном полу статора, а јужни магнетни пол ротора тежи да се приближи северном магнетном полу статора. Помоћу овог начина ротор се закреће у десно за одређен угао који је одређен бројем полова ротора и бројем парова намотаја статора. У случају да је потребно окренути ротор у супротном смеру, потребна је струја која се креће од краја 2 ка крају 1 намотаја А. На овај начин би намотаји А1 и А2 имали супротне магнетне половине него што је приказано на слици и ротор би се из почетног положаја заокренуо на лево за исти угао. Даље кретање се наставља тако што се једно за другим укључују намотаји А и Б.



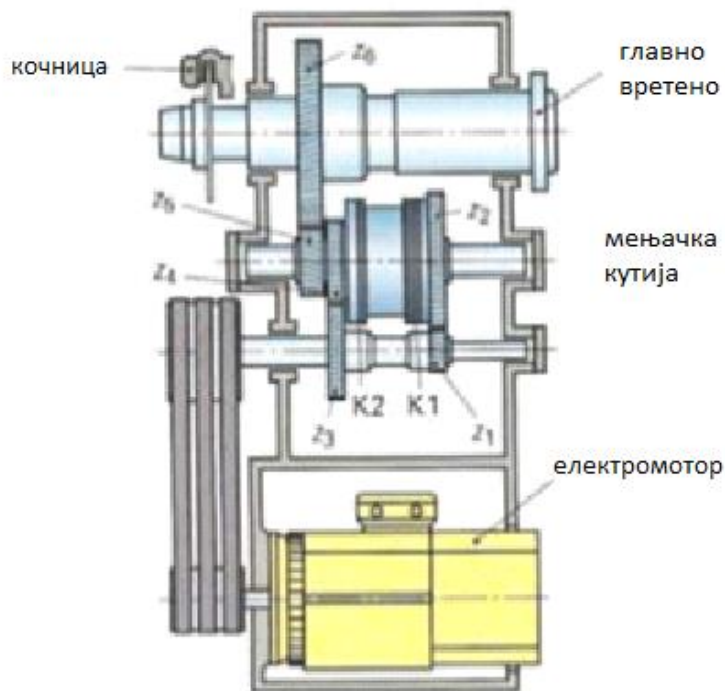
Слика 2.9 Шематски приказ рада степ мотора [3]

2.3 Погон главног вратила

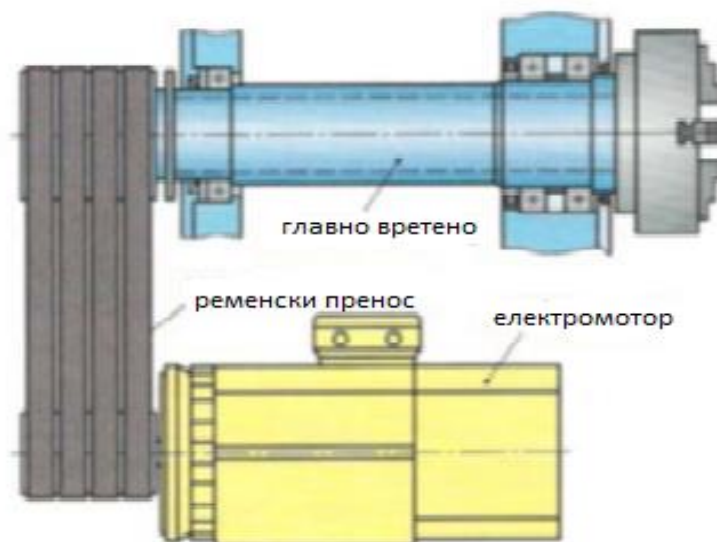
Код класичних алатних машина са спољним погоном обртни момент од погонског електромотора до главног вратила иде преко система каишног и зупчастог преноса. За регулацију броја обртаја главног вратила користе се различити парови зупчаника чијим међусобним комбинацијама на излазу главног вратила се добија степенаста промена (12,16) броја обртаја (450, 560, 710, 900, 1120, 1400). Овај начин регулације броја обртаја главног вратила не користи се више јер има доста недостатака, као што су масивна и

некомпактна конструкција, степенаста промена броја обртаја, немогућност прецизне регулације кретања, велика бука, губици у преносу.

Наведени недостаци класичног система (који је приказан на слици 2.10) са спољним погоном и немогућност његове примене у савременим процесима обраде довели су до развоја директног погона главног вретена и приказан је на слици 2.11, који је у све више у употреби данас.



Слика 2.10 Класичан пример система погона преко зупчаника [3]



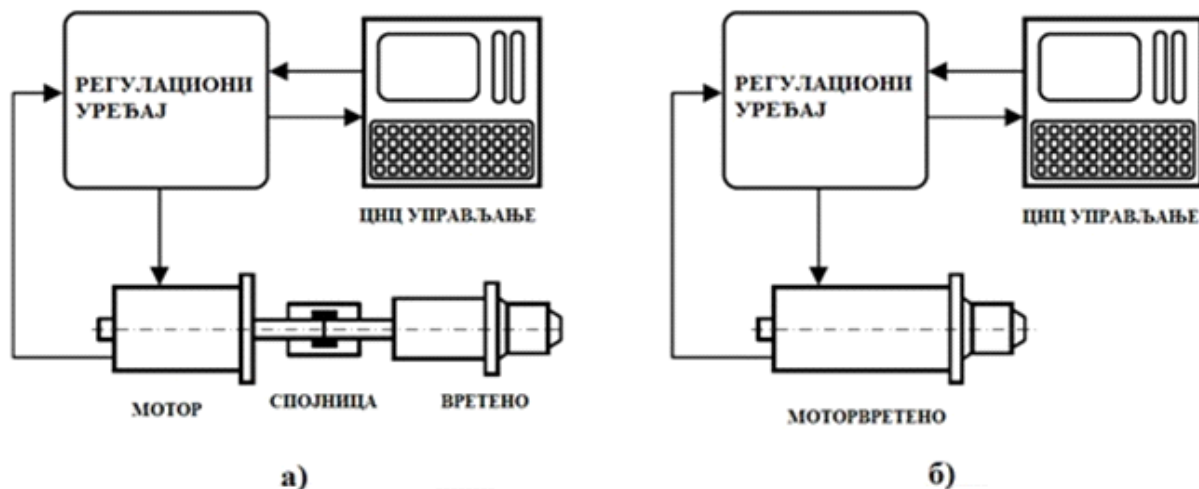
Слика 2.11 Директан погон главног вретена [3]

Компактна форма (нема спољних механичких јединица) и директан погон имају низ предности у однос на класичан систем. Предности су:

- Континуирана промена броја обртаја.
- Компактнија израда машине (уштеда на простору).
- Краће време залета и кочења.
- Повећана продуктивност обраде, квалитета и тачности.
- Мања бука и вибрације.
- Већи степен искоришћења.

Због потребе још бољих карактеристика алатних машина, последњих десетак година примењују се главна вратила са интегрисаним електромотором која се називају мотор-вратила. Мотор-вратило (или електровратило) представља електромотор чије је вратило (ротор) уједно и главно вретено алатне машине. То су најчешће перманентно побуђени синхрони мотори. Овде је ротор снабдевен перманентним магнетима који су смештени у одговарајућем кућишту. У статорском намотају добија се константна снага у високом распону бројева обртаја. С обзиром да се у ротору налазе перманентни магнети, дакле нема протицања струје, то се ротор мање загрева што је велика предност ових електромотора. Осим класичног погонског система којег чине електромотор и преносник, у градњи алатних машина са нумеричким управљањем, а са карактеристикама високодинамичких машина, користе се решења директног погона главног вретена. Ту постоје два случаја:

- Директни погон где су електромотор и вратилоалатне машине повезани спојницом (слика 2.12 а).
- Директни погон где су електромотор и вратило алатне машине састављени у један систем –мотор-вратило, односно електровратило (слика 2.12 б).



Слика 2.12 Шематски приказ директног погона алатних машина [3]

У случају приказаном на слици 2.12 а) ради се најчешће о асинхроним електромоторима са регулацијом броја обртаја променом фреквенције и напона напајања. Директни погон остварује се преко зупчасте спојнице што целом систему даје велику крутост, али такође и могућност постизања великих бројева обртаја главног вратила, уз могућност постепене промене броја обртаја. Целокупни систем је компактан, нема буке и генерално, рад система је миран, без вибрација. Наравно, избегнути су сви губици који се јављају у уграђеним међупреносницима.

У случају приказаном на слици под 2.12 б) електромотор и главно вратило машине су израђени заједно. То је мотор-вретено (електровратило) и данас се све више користи. Распони бројева обртаја су од двадесетхиљада до стохиљада обртаја у минути, па чак и више.

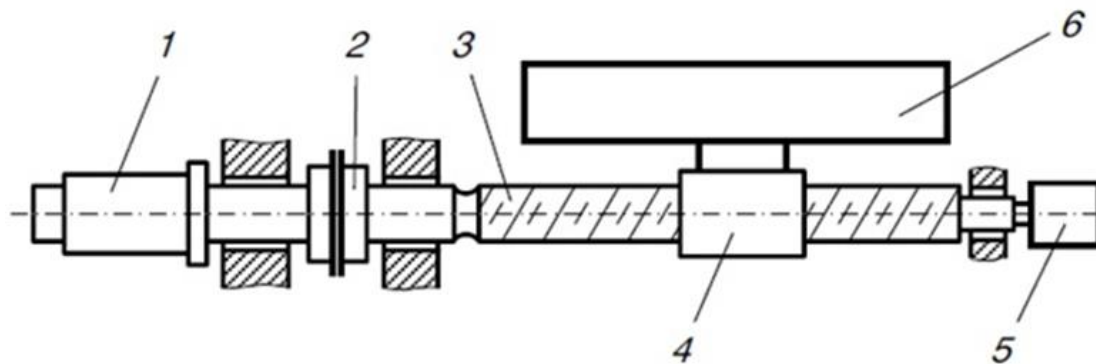
Електровратило са основним деловима приказано је на слици 2.13. Додатни делови неопходни су за захтевнији рад моторвретенa, за сваки случај посебно, прилагођени су посебним захтевима као што су: максималан број обртаја, тачност, крутост и снага. Електровратила су веома прецизна, па се користе за високобрзинске обраде, високопрецизне обраде алатима дефинисане резне геометрије, чак и тешкообрадивих материјала; код каљених челика постиже се храпавост обрађене површине од 0,1 до 0,3 μm , код алуминијума и месинга постиже се храпавост као и грешке кружности испод 0,5 μm . Међутим, недостаци мотор-вретенa се огледају у следећем: мања крутост целог система и додатна топлота у главном вратилу. Због тога се електровратила обавезно обилно и интензивно хладе ваздухом, водом или уљем.



Слика 2.13 Електровратило у пресеку [3]

2.4 Погонски систем помоћног кретања

С обзиром на карактер и улогу главног и помоћног кретања, а то је да главно кретање преко обртног момента савладава главни отпор резања при чему настаје струготина, помоћно кретање које обезбјеђује континуитет обраде као временске функције процеса резања, то су и одговарајуће улоге погонских система за главно и помоћно кретање. На нумеричким машинама сваки извршни орган машине располаже сопственим погоном са могућношћу регулације, преко којег се у спрези са осталим системима (на пример, мерни систем) одвија нумеричко управљање. Тако на пример, код машине типа глодалице постоје: главно обртно кретање главног вратила са својим погоном, а затим засебни погони помоћних праволинијских кретања у правцима координатних оса X, Y и Z, и коначно, засебни погони за, нпр. још два ротациона кретања око две координатне осе. Под извршним органима машина подразумијевају се уређаји који омогућавају кретања у правцима координатних оса и сва друга кретања на машини, као што су: носачи главних вратила, носачи алата, радни столови, уређаји за измену алата и обрадака, обртање радних столова и остало, слика 2.14.



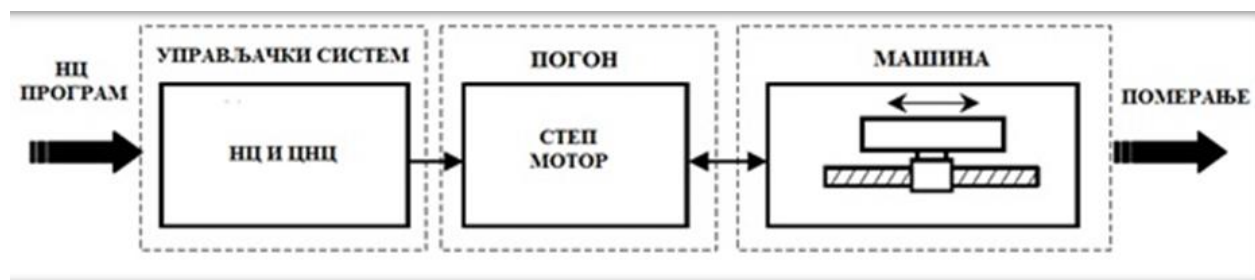
Ознаке : 1 – Серво мотор, 2 – Спојница, 3 – Навојно вретено
4 – Навртка клизача, 5 – Клизач, 6 – Мерни уређај

Слика 2.14. Систем помоћног кретања [3]

Неколико врста погонских система за помоћна кретања код нумеричких алатних машина је највише у употреби. То су :

- Степенасти погони са електромагнетним спојницама.
- Хидраулични системи са хидростатичким моторима.
- Сервомотори једносмерне струје.
- Степ електромотори.
- Електрохидраулични степ мотори.

За нумеричке алатне машине са конвенционалним брзинама резања највише се користе сервомотори једносмерне струје и електрохидраулични корачни мотори. Први се користе за мање и средње снаге, а други за веће снаге. Критеријуми за избор погонског система помоћног кретања су: стални обртни момент, обртни момент при трајном погону и максимално убрзање. Сервомотори једносмерне струје, као и степ електрохидраулични мотори погодни су за директну уградњу на извршне органе машина. Обртни момент мотора помоћног кретања треба да савлада моменте који су резултат процеса резања, моменте инерције покретних маса (динамички момент) и моменте отпора трења у систему. За погон помоћних кретања користе се две групе система: системи без повратне спреге (отворени погонски системи) и системи са повратном спрегом (затворени погонски системи).

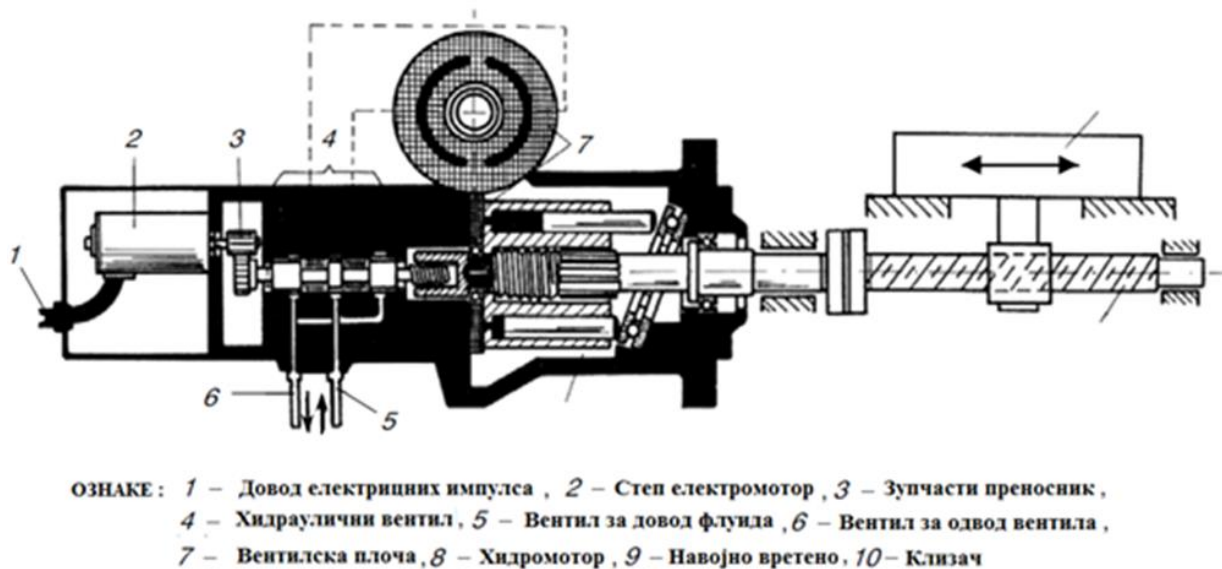


Слика 2.15 Принципи управљања помоћног кретања [3]

У прву групу спадају системи са, најчешће степ електромоторима. Принципи управљања помоћним кретањем помоћу степ електромотора приказан је на слици 2.15. Преко управљачког система, степ мотор добија управљачки сигнал што резултира закретањем ротора мотора, а затим и навојног вретена клизача и коначно, праволинијског кретања клизача, односно стола машине. Степ електромотори су мање снаге што ограничава њихову употребу. Данашњи степ мотори се израђују са осетљивошћу од најмање 500 до 1000 корака за један обртај ротора, што задовољава захтевану тачност кретања.

Степ електромотори са хидрауличним појачивачима, имају много веће снаге од претходних, те због тога имају много ширу примену. На слици 2.16 шематски је приказан електрохидраулични степ мотор. Овај погонски систем састоји се од степ електромотора (2), зупчастог преносника (3), хидрауличног разводника (4), вентила за довод (5) и одвод флуида (6), вентилске плоче (7) и хидромотора (8) као појачивач обртног момента. Обртни момент са осовине степ електромотора преноси се преко зупчастог преносника на клип хидрауличног разводника. Овај клип, на својој десној страни има навојни завршетак који са навртком осовине хидромотора чини завојни пар. Обртањем хидрауличног клипа, врши се аксијално померање навртке и осовине хидромотора, чиме се отвара улаз флуиду под притиском, који преко вентилске плоче врши погон хидромотора. Даље се обртање осовине хидромотора преноси на завојно вратило клизача алатне машине, чиме се остварује помоћно кретање. Основна карактеристика погонских система помоћног кретања без повратне спреге (отворени погонски системи) је непостојање мерног система којим би се добила повратна информација о стварном положају извршног органа

помоћног кретања. Због тога се ови системи користе код алатних машина мање тачности, јер не могу задовољити захтеве високе тачности. Код погонских система код којих се путем мерног система шаље повратни сигнал у регулационом кругу, могуће је остварити високу тачности помоћног кретања. Ово су системи са повратном спрегом или затворени погонски системи. За ове системе се највише користе хидраулични сервомотори и електрични сервомотори. Од електричних сервомотора углавном се користе сервомотори једносмерне струје који покривају широк опсег снага, од малих до великих (односи се на машине са малим снагама мотора главног кретања). Могу бити са спољном побудом и са сталним магнетима. Брзина помоћних кретања са овим погонима се крећу до 10 до 15 m/mm.

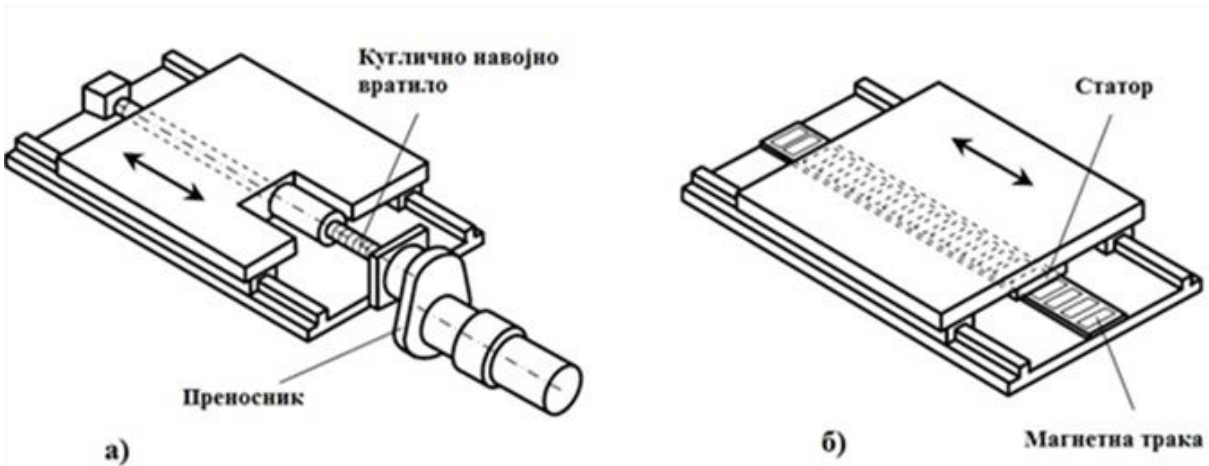


Слика 2.16 Основни делови електрохидрауличног степ мотора [3]

Системи помоћног кретања код високодинамичких алатних машина на којима се реализују високобрзинске обраде, морају задовољити посебне захтеве. Тачност позиционирања нумерички управљаних оса код ових алатних машина мора бити у интервалу 2 до 10 μm . Услед повећаних брзина резања код високобрзинских обрада, неопходно је остварити и велике брзине. Тиме се остварују високи учинци обраде (односе се велике количине струготине у јединици времена), али и висок квалитет обрађене површине. Тако на пример, при обради сложених просторних површина, неопходно је управљати променом брзине ради одржања одговарајућег квалитета обраде. За остваривање високе продуктивности, која се постиже високобрзинским обрадама, неопходна су осим високих брзина главног вратила машине, такође и адекватна решења погонских система помоћних кретања, пре свега решења која обезбеђују високе брзине ових кретања.

Код ових алатних машина за помоћна кретања користе се најчешће следећа два решења:

- Електромеханички ротациони сервосистем и
- Директни линеарни сервосистем.



Слика 2.15а) Електромеханички ротациони сервосистем

б) Директни линеарни сервосистем [3]

Како би се остварио помак радног стола алатне машине за одређену величину потребно је проследити инструкцију (сигнал) од управљачке јединице до сервомотора (једносмерни, наизменични) који ће деловањем властитог обртног момента окренути вратило клизача радног стола што ће резултирати померањем истог за програмирану величину помака. Електромеханички погони се данас још увек највише примењују и обезбеђују брзине до 40 m/mm. Овај погон се састоји од сервомотора (дигитални уређај), механизма кугличног завојног вратила и навртке, мерног система за позиционирање. Линеарни мотор се састоји од магнетне траке, или цеви по којој, или у којој се креће клизач (статор). Ова врста погона нема практичног ограничења у погледу дужине, али снага је ограничена. Због тога се линеарни погони користе за мање и средње оптерећене машине.

Неке од предности ових погона су:

- Велика ширина регулације (већа него код електромеханичких погона са ротационим сервосистемима).
- Одсуство трошења механичких преносника.
- Врло висока тачност позиционирања и тачност понављања положаја.
- Велике брзине (до 100 м/мин).
- Велика убрзања
- Висока поузданост.

3. CNC машина алатке са корачним и DC моторима

3.1 CNC машине

CNC машине (*computer numerical control*) су машине управљане помоћу рачунара, односно одговарајућег рачунарског програма. Састоје се од машина (глодалица, струг, рутер), одговарајућих мотора, драјвера, РС рачунара и софтверског пакета. Област њихове примене је веома широка. Могу се користити за обраду метала, дрвета, пластике, камена, стакла, гравирања, израду алата, модела и др.

Компјутерски управљани стругови су најчешће примењене алатне машине у индустрији обраде метала резањем поред ЦНЦ глодалица, и као такви, сврставају се у машине за основне обраде. На основу података, године 1980. од укупно произведених алатних машина са нумеричким управљањем 45% су били CNC стругови.

Прве управљачке јединице биле су без рачунара и називале су се NC управљачке јединице (*Numerical Control*). Будући да се програм састоји од бројева и слова, то је и добијен назив Нумеричко управљање. Данашње управљачке јединице прављене су на принципу коришћења микропроцесора тј. малог рачунара који може програмирати и тиме остварити процес нумеричког управљања. Због тога се такве управљачке јединице зову CNC (*Computer Numerical Control*) управљачке јединице.

Повећање обима производње допринео је паду и нестабилности квалитета израде делова чему је у највећој мери допринео људски фактор. Смањење утицаја људи на извођење производних операција могло се остварити једино подизањем нивоа аутоматизације, а у том периоду је примена рачунара у те сврхе све више узимала маха.

Развојем NC машина постигнути су основни циљеви:

- повећање продуктивности и
- подизање нивоа квалитета и тачности израде делова,

Микропроцесор у свакој машини чита програм, написан у Г-коду, који креира корисник и задаке извршним органима машине извођење одговарајућих операција. Рачунар се користи и за дизајн делова и за писање програма за управљање машином. Програми се пишуручним укуцавањем Г-кода или коришћењем САМ софтвера (*Computer Aided Manufacturing*).

На слици 3.1 је приказана разлика између класичне и CNC машине.

Као што се на слици може видети основне разлике између ових машина су следеће:

- Погон машине - код класичних машина ради се о заједничком погону, тј. један мотор најчешће погони и главно вретено и остала кретања радног стола и алата, док код CNC машина постоји мотор за погон главног вретена, а померање по осам остварују посебни истосмерни мотори,
- Управљање машином - изводи се код класичних машина ручно или машински преко ручица за управљање, док CNC машине имају управљачку јединицу(тастатура и екран) и раде аутоматски захваљујући програму,
- Мерни систем класичне машине се састоји од скале са нонијусом, а код CNC машина то сунајчешће прецизни линеарни система мерења,
- Помак радног стола - остварује се трапезним навојем код класичних машина, док код CNC машина се врши применом кугличних навојних вретена.



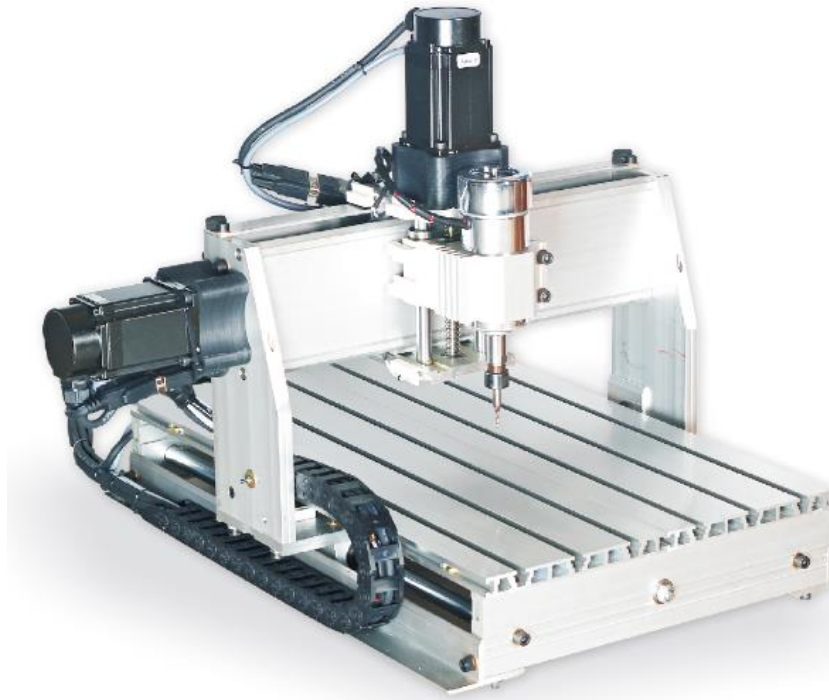
Слика 3.1 Разлика између класичне и CNC машине [5]

Ниво управљања:

- Управљање по тачки(истовремено кретање само по једној оси, нпр. операција бушења),
- Управљање по кривој у равни(истовремено кретање по два осам) и
- Управљање по кривој у простору (истовремено кретање по најмање 3 осе, нпр. просторно закривљење плоча, нпр. лопатике турбине).

CNC систем-систем нумеричког управљања поседује управљачки систем базиран на software-у, а представља систем са флексибилном логиком. То практично значи да се програм може изменити у току његове реализације, ако за то постоји потреба. Овакав режим рада алатних машина је условљен развојем микроелектронике и рачунарства, почевши од 70-их година 20.века.

У наставку рада даћу пример неких од CNC машина, које користе корачне и DC моторе, као и њихове карактеристике.



Слика 3.2 CNC рутер [6]

На слици 3.2 је приказан CNC рутер са степ мотором

Карактеристике:

- Доступно у две главне варијанте – 300x400mm и 600x400mm
- Лаган дизајн са 12 mm/16 mm кугличним вијцима и очврснутим линеарним осовинама и лежајем
- Направљен је од специјалних екструзија легуре 6061 и 6063
- Хибридни степ – серво мотор се користи за управљање у затвореном кругу, велика убрзања и брзине
- Тачност 0,05 mm са поновљивошћу од 0,02mm и брзинама 10000mm/min на свакој појединачној оси
- Управљачка плоча са 3 осе CNC контролера, SMPS, VFD/DC погоном, серво контролерима и прекидачима
- Сече и гравира дрво, бамбус, PCB, PVC, PMMA, пластику, ABC итд.
- Гравирано злато, сребро, бакар, алуминијум итд.

Величина оквира	CNC 300x400
Димензије машине	610x485x395 mm
Радна површина (X,Y,Z)	390x290x65 mm
Вретено	ER11
Шина	16 mm линеарни лежај осовине
Кугласти вијак	SFU 1204
Поновљивост	0.02 mm
Вретено и погон	48V DC 12,000RPM 300 W са DC погоном
Кретање Z осе	60 mm
Максимална висина	70 mm
Гравирање и резање материјала	Дрво, MDF, PCB, PVC, PMMA, ABS...



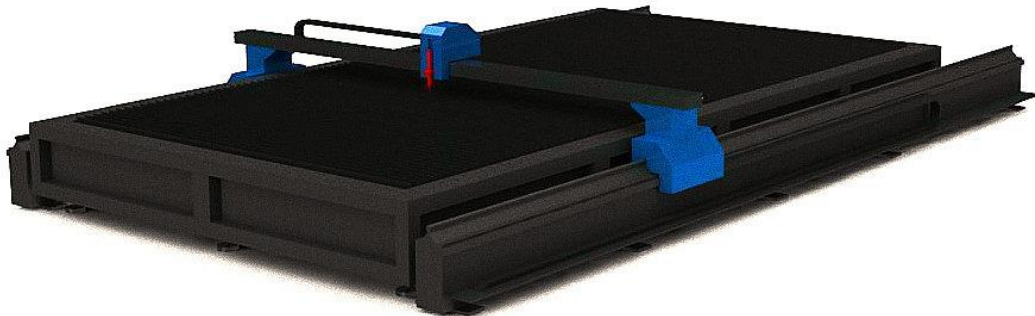
Слика 3.3 Серво моторна бушилица TDG60B [5]

На слици 3.3 је приказана моторна бушилица TDG60B са серво мотором

Карактеристике:

- Имактна структура, једноставна за руковање, постављање и демонтажу

- Шипка од легуре челика велике чврстоће и прецизна структура преноса могу гарантовати тачност и ефикасност обраде
- Веома прецизан сферни ваљкасти лежај користи се у потпорном седишту, што омогућава брзу уградњу и подешавање машине пре машинске обраде
- Вертикална, хоризонтална или нагибна инсталација
- Напајање обухвата електричну и хидрауличну струју, опремљено кутијом за даљинско управљање, што чини много већу удобност
- Многе врсте обраде могу се постићи одговарајућим деловима, као што су бушење, обрада крајњих површина, бушење, проширивање рупа, бушење слепих рупа...
- Нето тежина главне опреме – 50kg
- Бруто тежина – 200 kg



Слика 3.4 CNC плазма 1500x3000 mm [7]

На слици је приказана CNC плазма са серво мотором

Карактеристике:

- Машина CNC плазма за сечење 1500x3000 mm
 - Скелетни оквир
 - Дигитални степ мотор
 - Систем за контролу висине – THS
 - Линеарно кретање
 - До 15 m/min
 - Рачунар за рад на CNC
 - Софтвер за контролу CNC
 - Изградња у Грчкој
-
- Радни материјал – гвожђе, алуминијум, поцинковано гвожђе, титанијум
 - Радна површина – 1500x3000 mm

- Дебљина обраде – 0,5 - 10mm
- Брзина сечења – 0 – 15000 mm/min
- Снага фреквенције – 50 Hz
- Систем за аутоматско подешавање лука



Слика 3.5 CNC ласер 5000x4000 mm 120W [8]

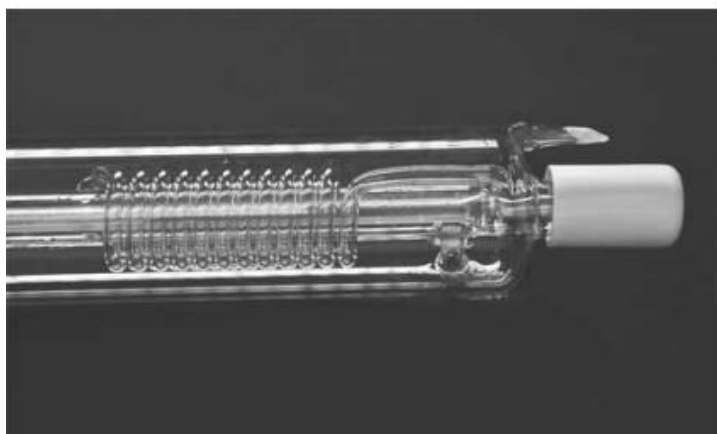
На слици 3.5 је приказана Грчка конструкција ласера, погодног за сечење и гравирање делова у облику листа.

Чврста конструкција погодна за сечење и гравирање. Има ласерски извор снаге од 120 W, који преноси сноп кроз покретни систем огледала. Радни простор је затворен, а руковалац може да га посматра посебним прозирним заштитним поклопцем.

Пролаз X осе (уздужно)	4000 mm
Пролаз Y осе (попречно)	5000 mm
Пролаз Z осе (вертикално)	100 mm
Димензије стола	6000x5000 mm
Површина стола	Метална сечива
Максимални погон сечења на X оси	1 - 30000 mm/min
Максимални погон сечења на Y оси	1 - 10000 mm/min

Брзо померање на оси X	30000 mm/min
Брзо померање на Y оси	10000 mm/min
Тип ласера	CO2/тип заптивке
Снага ласерског снопа	8-120 W
Очекивано трајање ласера	8000-10000 h
Напајање	220 V 50 Hz 5%
Инсталирана снага	2600 W
Тачност уградње	0,01 mm
Поновљива тачност	0,01 mm
Напајање	AC 220 V 50 Hz 5%

Карактеристике извора ласера од 120 W



Слика 3.6 Ласер

Модер	Снага	Максимална снага	Дужина mm	Ф mm	Цатализе	Животни век h
Z6	120W	130W	1650	80	Да	10000

3.2 Електромеханички погонски систем са корачним моторима



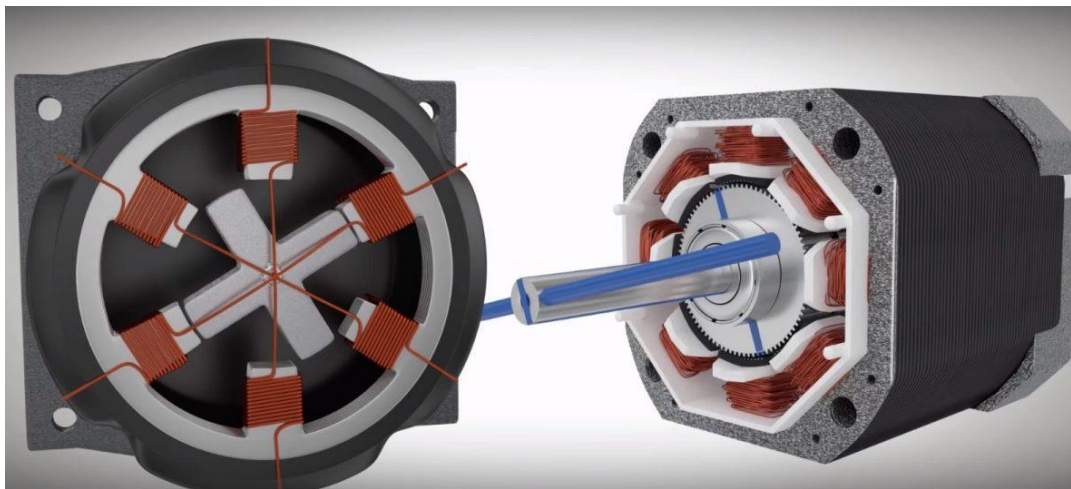
Слика 3.7 CNC глодалица [10]

Како се CNC глодалице намењене за израда делова од дрвета и пластичних маса, за чију обраду је потребна знатно мања снага у односу на обраде метала, за погон X, Y, Z осе се најчешће користе **корачни мотори**. Интензивни развој рачунара и дигиталних технологија допринео је настанку и развоју мотора којима се управља непосредно помоћу рачунара. Дигитални излазни сигнали из рачунара се сада користе з управљање моторима применом прекидачких кола (нису потребни сложени Д/А и А/Д конвертори). Корачни мотор (*енгл. Stepper Motor*) означава да мотор омогућује обртање у корацима, односно у дискретним угаоним померајима.

3.2.1 Основе корачних мотора

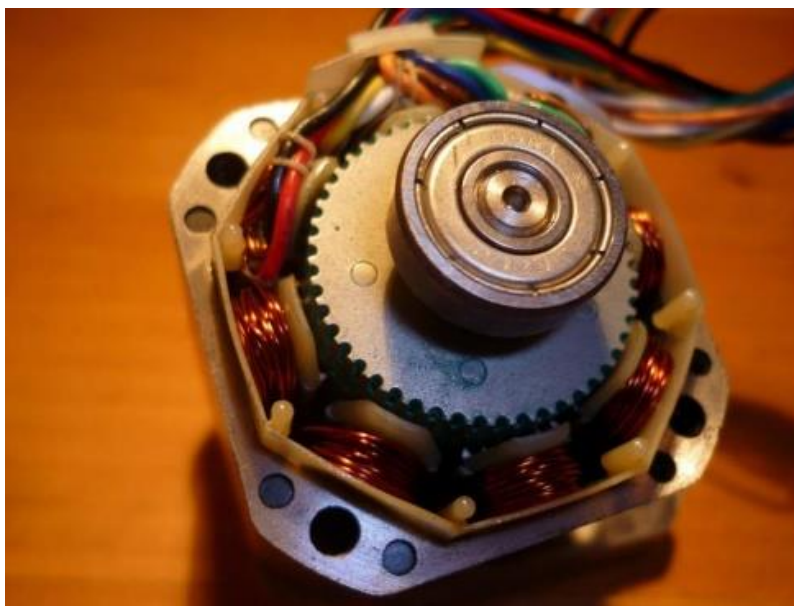
Корачни мотор при малим силама оптерећења и ниским брзинама даје довољну тачност, а има знатно нижу цену од серво мотора, а што га чини погодним за примену и управљање CNC машина. Корачни мотор је истосмерни електрични мотор без четкица који целу ротацију мотора дели на велики број једнаких делова. Мотором се може тачновршити померање у жељени положај или задржати се у жељеном положају без потребе за повратном спрегом, помоћу сензора положаја, што значи да ради у отвореном управљачком колу. Таква тачност позиционирања може се постићи ако је мотор добро димензионисан за примену. Корачни мотори су специфични по томе што претварају низ улазних импулса (обично квадратни улазни сигнал) у прецизан положај вратила мотора. Сваки сигнал окреће вратило за тачно одређени угао. Корачни мотори имају неколико

електромагнета распоређених у круг око средишњег вратила облика зупчаника направљеног од гвожђа.



На слици 3.8 корачни мотор [10]

На слици 3.9 приказана је унутрашњост једног корачног мотора.



Слика 3.9 Унутрашњост корачног мотора [10]

Електромагнете активира екстерни регулатор. Како би се вратило мотора окретало, прво један од електромагнета прима снагу, коју привлачи магнетно својство један од зуба вратила мотора. Тада се зуби вратила поравнавају са зубима електромагнета који га привлачи, али они одступају у односу на зубе следећег електромагнета, што значи и када

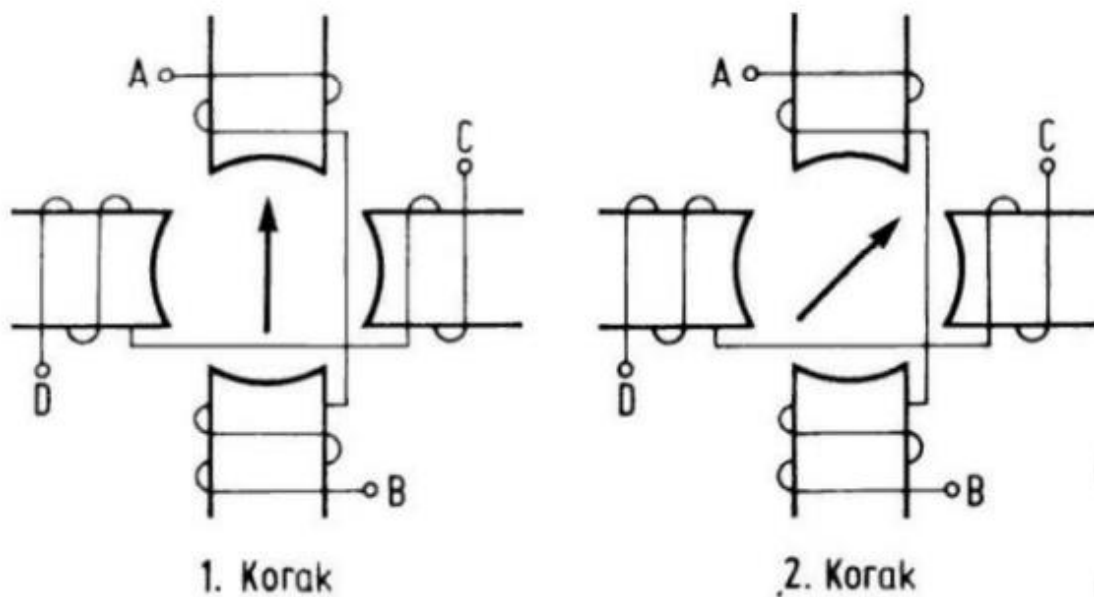
се следећи електромагнет напаја, а претходни више није, вратило мотора се окреће како би се поравнали зуби вратила са зубима следећег електромагнета. Свака од ових ротација назива се корак и сваки корак мотора има цео број обртаја.

На слици 3.10 приказан је принцип рада корачног мотора.

Постоје три врсте корачних мотора:

- Корачни мотор са сталним - перманентним магнетима,
- Хибридни синхрони корачни мотор
- Променљиви степенасти мотор

Електромагнети унутар корачног мотора подељени су у групе, а свака група се назива фаза и увек мора бити једнак број електромагнета по фази. Конструктор мотора бира број група. Електромагнети су распоређени наизменично, сваки у једној фази, нпр. ако је мотор са две групе (фазе), нпр. А и Б, а свака група има четири електромагнета, распоред ће бити следећи АБАБАБАБ.

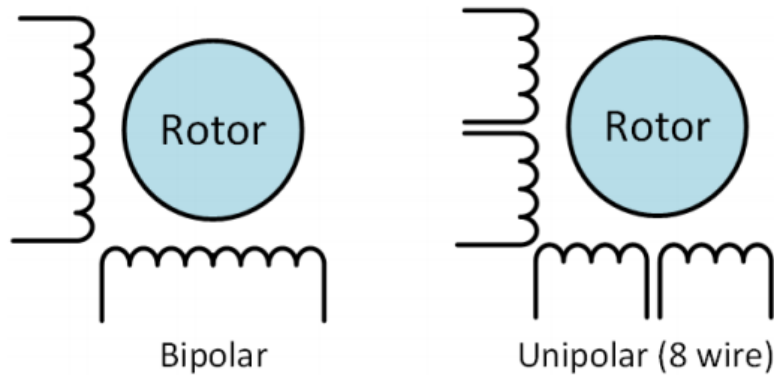


Слика 3.10 Принцип рада корачног мотора [10]

У зависности од фаза, постоје двофазни и вишефазни корачни мотори. Вишефазни су познати по раду са мање вибрације, али су зато много скупљи. Двофазни корачни мотори се деле на:

- Униполарне
- Биполарне

На слици 3.11 је приказана шема униполарног и биполарног корачног мотора.



Слика 3.11 Шема биполарног и униполарног корачног мотора [10]

Својства корачног мотора су:

- Резолуција
- Одговор једног корака
- Тачност
- (*Detent torque*)
- Статички момент (*Holding torque*)
- Динамички момент (*Pull-out torque*)
- Стар стоп момент (*Pull-in torque*)

Резолуција:

За ротацијски степенести мотор

Nk [кор/окр] – Број корака по потезу

$$k = \frac{360^\circ}{Nk} [^\circ]$$

k -број корака по ступњевима

Одговор у једном кораку:

- 1. фаза укључена (остале искључене)
- 1. фаза се искључи, 2. фаза се укључи
помак ротора за 1 корак
јављају се осцилације због инерције
- из одговора једног корака видимо следеће карактеристике мотора
 - брзина одговора
 - осцилације
 - тачност

Detent torque

Означава обртни момент потребан за окретање мотора када није укључен

Статички момент (Holding torque)

Означава укупну количину обртног момента потребног да мотор направи један корак, док вратило мирује, а мотор је под напоном

Динамички момент (Pull-out torque)

Максимална вредност обртног момента коју корачни мотор може учитати у мировању на одређеној брзини, а да ротор не изгуби корак са управљачким импулсима

Стар стоп момент (Pull-in torque)

Момент терета облика трења са којим мотор при задатој фреквенцији корачних импулса може кренути, а да не изгуби корак

Након кратког описа корачног мотора, мора се направити прорачун за одабир мотора потребног за руковање CNC глодалицом. Одлучила сам да ће се за све три осе користити мотор истих спецификација, због тога ћу извршити прорачун за X осу, јер је мотор који погони ту осу под највећим радним оптерећењем.

3.2.2 Пример прорачуна корачног мотора

Пошто је прецизан прорачун одабира мотора веома сложен процес, ради поједностављења направљене су неке претпоставке и апроксимације.

Код одабира мотора један од најважнијих фактора је обртни момент који мотор мора да савлада. Тај обртни момент се може поделити на два дела: момент при константној брзини и обртни момент на убрзању/успорењу

- Момент при константној брзини

$$Td + Tp + Tf = Tc$$

Где су:

Tc – момент при константној брзини, Nm

Td - обртни момент потребан за савладавање оптерећења, Nm

Tp - обртни момент узрокован преоптерећењем вретена, Nm

Tf - обртни момент изазван губицима у лежајевима и заптивачима, Nm

Tf се обично добија од произвођача делова. Због тога ови подаци нису доступни, те их је немогуће очитати због недостатка мерних уређаја, они се занемарују, па се касније компензују при повећању фактора сигурности S.

Момент потребан за савладавање оптерећења рачуна се:

$$Td = \frac{FP_B}{2\pi\eta}$$

Где су:

F – сила у смеру кретања, N

P_B – корак кугличног вретена, m

η – ефикасност кугличног вретена, $\approx 0,85-0,95$

Сила у правцу кретања је збир сила сечења и трења укупне масе коју мотор покреће. Израчунавање силе резања је компликован процес и зависи од великог броја параметара, врсте резног алата, брзина сечења, брзина алата, врста обратка итд. Како би се олакшало израчунавање искусно се претпоставља да су силе сечења за дрво око 5N, а за алуминијум 20N. Како бих била што сигурнији при избору мотора, рачунаћу са резним силама за алуминијум, иако је глодалица за обраду дрвета и пластике. Укупна маса коју мотор покреће претпоставља систем линеарних лежајева са шипкама, па је оптерећење мотора само сила трења тог терета.

$$F_A + mg\mu = F$$

Где су:

F_A - спољна оптерећења, N

m - укупна покретна маса, kg

μ - коефицијент трења за линеарне лежајеве, $\approx 0,05$

Момент узрокован предоптерећењем вретена T_p рачунамо према формули:

$$T_p = \frac{\mu_0 F_0 P_B}{2\pi}$$

Где су:

μ_0 – унутрашњи момент трења предоптерећења матице вретена, $\approx 0,1-0,3$

F_0 – предоптерећење матице узимамо да је $F_0 \approx 1/3F$, N

Укупна маса склопа Y и Z осе те глодалице мотора износи 29.8 kg. Корак навоја кугличног вретена је 5mm. Замењивањем вредности добијамо следеће:

$$F=34,62 \text{ N}$$

$$F_0=11,54 \text{ N}$$

$$T_d=0,0324 \text{ Nm}$$

$$T_p=0,00275 \text{ Nm}$$

$$T_c=0,0352 \text{ Nm}$$

- Момент убрзања (укупни момент)

Момент убрзања је збир момента при константној брзини и момента који се јавља при убрзању/успоредњу терета.

Рачунамо га према формули:

$$T_{\alpha} = (T_c + T_{acc})S$$

$$T_{acc} = J\omega,$$

Где су:

S – фактор сигурности ($\approx 1,5$)

J – момент инерције система, kgm^2

ω – кутна акцелерација, rad/s^2

Кутну акцелерацију рачунамо преко:

$$\omega = \frac{2\pi N}{60t}$$

Где су:

N – кутна брзина, rpm

t – време трајања акцелерације, s

Момент инерције је збир момента терета, вретена и мотора:

$$J_m + J_s + J_l = J$$

Где су:

J_m - момент инерције мотора

J_s - момент инерције вретена

J_l - момент инерције терета

Момент инерције терета рачунамо према формули:

$$J_s = \frac{\pi}{32} \rho_v L D_v^4$$

Где су:

ρ_v - густоћа материјала од којег је израђено вретено, kg/m^3

L – укупна дубљина вретена, m

D_v - пречник вретена, m

Ако узмем да је густина челика од којег је израђено вретено 7780 kg/m^3 , пречник вретена 16mm и укупна дебљина 0.6m , добијамо следеће податке:

$$J_s = 3 \cdot 10^{-5} \text{ kgm}^2$$

$$J_l = 1,887 \cdot 10^{-5} \text{ kg m}^2$$

Како не знам тачан модел мотора, не могу ни знати момент инерције мотора, он је свеједно урачунат за претпостављени модел мотора који би се користио те износи:

$$J_l = 8 \cdot 10^{-5} \text{ kgm}^2$$

Када збројимо све моменте инерције добијамо:

$$J = 1,289 \cdot 10^{-4} \text{ kgm}^2$$

Следеће што треба одлучити је коликом брзином желимо померати глодалицу док је под оптерећењем. За дрво се те вредности крећу од 500 до 1000 mm/min. За кутну акцелерацију ω треба знати брзину окретања мотора N и време трајања акцелерације t , како су ти подаци непознати, узима се искуствена вредност за ω која износи 2300 rad/s^2 (за резање дрвета при брзини 1000 mm/min)

Уврставањем наведених вредности добијамо следећи резултат:

$$T_{acc}=0,297 \text{ Nm}$$

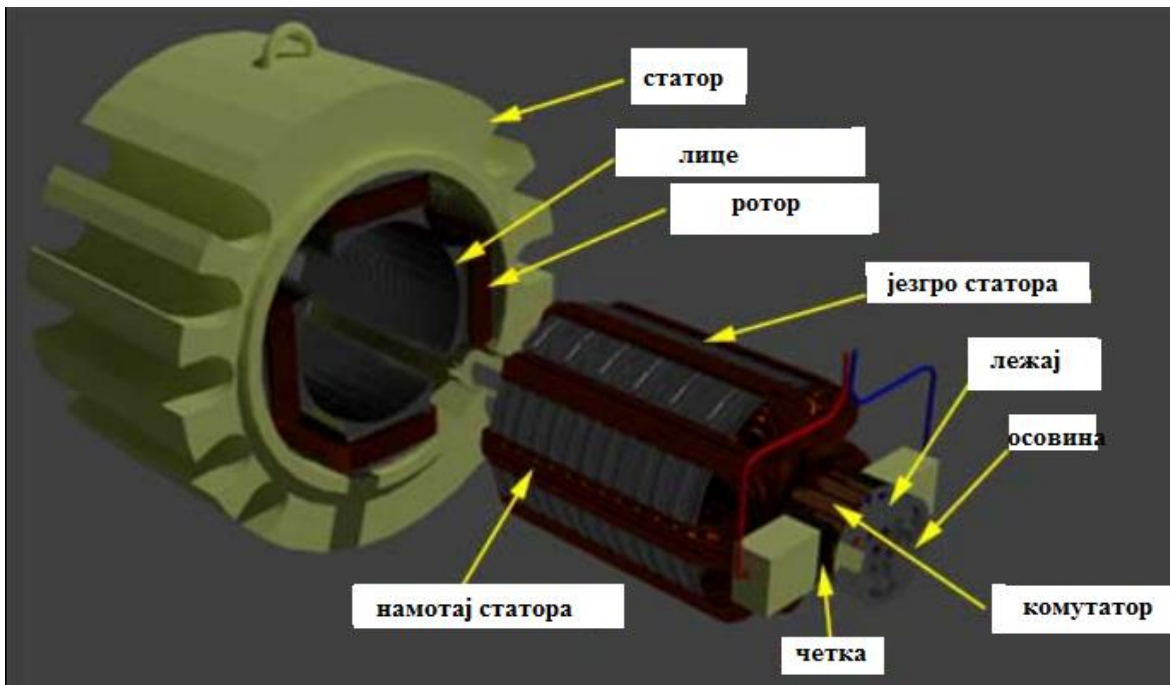
Те укупан момент инерције:

$$T_a=0,498 \text{ N}$$

3.3 Електромеханички погонски систем са DC моторима

Главна предност једносмерних мотора у односу на оне који се напајају наизменичним величинама је лакше управљање брзином, моментом и смером обртања. DC мотори се углавном праве за мање снаге, јер би за веће снаге они морали да имају веће и јаче изворе једносмерне струје.

На слици 3.12 је приказана конструкција DC мотора.



Слика 3.12 DC мотор [11]

Мотор једносмерне струје је састављен од три главна дела. То су: статор (поље), ротор (арматура), колектор (комутатор).

Врсте мотора према начину побуђивања

- Са независном побудом, најчешће са перманентним магнетом
- Са сопственом побудом или аутоексикацијом

Друга група се састоји од три врсте машина:

- Са паралелном или побудом (паралелни мотори)
- Са редном или серијском побудом (редни мотори)
- Са сложенom побудом или компаудацијом (сложени мотори)

3.3.1 Моделирање једносмерног мотора

Једносмерни мотори спадају у ротационе електричне машине код којих се врши претварање електричне у механичку енергију ротационог кретања. Припадају двопобудним системима, јер имају два намотаја, статорски и роторски. Када се намотаји прикључе на извор напајања кроз њих ће се успоставити ток струје.

Код машина једносмерне струје са по једним намотајем на статору и ротору, математички модел је изражен једначином:

$$1) u_a = R_a * i_a * L_a * \frac{di_a}{dt} + e$$

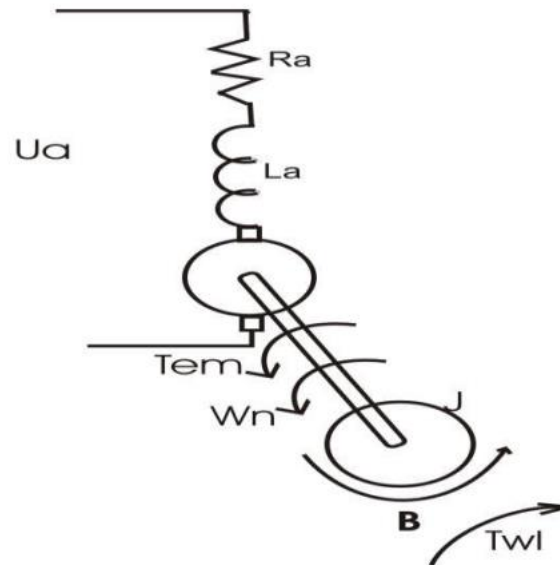
$$2) u_s = R_s * i_s * L_s * \frac{di_s}{dt}$$

Где су:

u_s, u_a — напони статорског и роторског намотаја

i_s, i_a — струје статорског и роторског намотаја

R_s, R_a — отпорности намотаја



Слика 3.13 [11]

На слици 3.13 приказана је шема, која се добија када се узму у обзир електромеханички момент мотора, момент оптерећења, трење и момент инерције и када се они укључе у разматрање модела DC мотора.

$$3) T_{em} = k_1 * i_a$$

Где су:

T_{em} — електромеханички момент мотора

k_1 — константа момента

Константа момента k_1 пропорционална је флуксу побуде (који зависи од струје побуде), па се електромеханички момент мотора може представити и у облику:

$$T_{em} = K_t \Phi_f i_d$$

Где су:

K_t — константа поља

Φ_f — побудни флукс

$$4) e = k_2 * \omega$$

k_2 — константа напона, која представља везу између индуковане EMS у намотајима и угаоне брзине вратила мотора. Пропорционална је флуксу побуде.

$$\omega = \frac{e}{k_2} = \frac{1}{k_2} (U_a - i_a R_a - L \frac{di_a}{dt})$$

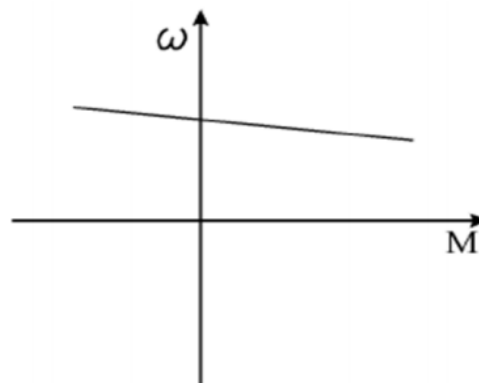
У уобичајеном стању брзина промене струје i_a је једнака нули, на основу тога се добија једначина:

$$\omega = \frac{1}{k_2} (U_a - i_a R_a)$$

$$\omega = \frac{1}{k_2} (U_a - R_a \frac{T_{em}}{k_1})$$

Из једначине се може видети једноставна линеарна веза између брзине и напона на ротору. То значи да се регулација брзине у опсегу од нулте до номиналне вредности постиже једноставно променом напона на ротору.

На слици 3.14 приказана је зависност мотора од електромеханичког момента



Слика 3.14 Зависност мотора од електромеханичког момента [11]

Њутнова једначина кретања (обртања) вратила мотора гласи:

$$5) T_{em} = T_{wl} + Bw_n + J \frac{dw_n}{dt}$$

Где су:

T_{wl} – момент оптерећења

w_n – угаона брзина

J – момент унерције ротора

B – коефицијент трења

Снага DC мотора

Једначина за електричну снагу гласи:

$$P_e = e_a * i_a = K_e \Phi_f W_n i_a$$

При чему су:

$$\Phi_f = K_f * i_f$$

$e_a = k_2 \Phi_f W_n$ – електромоторна сила која се индукује у намотајима ротора

$$P_m = W_n T_{em} = K_1 \Phi_f i_a W_n - \text{једначина за механичку снагу}$$

$$T_{em} = K_1 \Phi_f i_a$$

Ако се сва електрична снага претвори у механичку добија се $P_m = P_e$

Графички модел ДС мотора

Ако математички модел једносмерног мотора представимо у режиму малих сигнала добијамо следеће једначине:

$$\Delta U_a = \Delta e_a + R_a * i_a + L_a * \frac{d}{dt} (\Delta i_a)$$

$$\Delta e_a = k_2 * \Delta w_n$$

$$\Delta T_{em} = k_1 * \Delta i_a$$

$$\Delta T_{em} = \Delta T_{wl} + B \Delta w_n + J \frac{d}{dt} (\Delta w_n)$$

Када се једначине пребаце у S домен:

$$U_a(s) = E_a(s) + (R_a + sL_a)I_a(s)$$

$$E_a(s) = k_2 * w_n(s)$$

$$T_{em}(s) = k_1 * I_a(s)$$

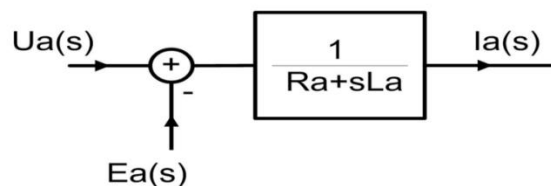
$$T_{em}(s) = T_{wl}(s) + (B + sJ)w_n(s)$$

Ове једначине се могу искористити да се мотор представи у облику блок дијаграма. У овом случају је то систем са затвореном спрегом. Тиме се симулира утицај величина са излаза на улазне величине. Када повећамо оптерећење на излазу, тачније на ротору, смањиће се брзина, па ће се због тога повећати струја јер ће мотор хтети да задржи исту брзину.

Из прве једначине се добија:

$$U_a(s) - E_a(s) = (R_a + sL_a) * I_a(s)$$

$$I_a(s) = \frac{U_a(s) - E_a(s)}{R_a + sL_a}$$



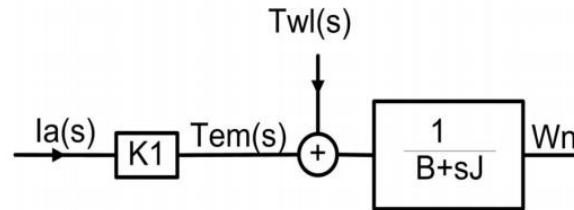
Слика 3.15 Струја I_a представљена помоћу блок дијаграма [11]

На слици 3.15 је приказан блок дијаграм, на коме струја I_a представља струју мотора.

Из моментне једначине се трансформацијом добија:

$$T_{em}(s) - T_{wl}(s) = (B + sJ)W_n(s)$$

$$W_n(s) = \frac{T_{em}(s) - T_{wl}(s)}{B + sJ}$$

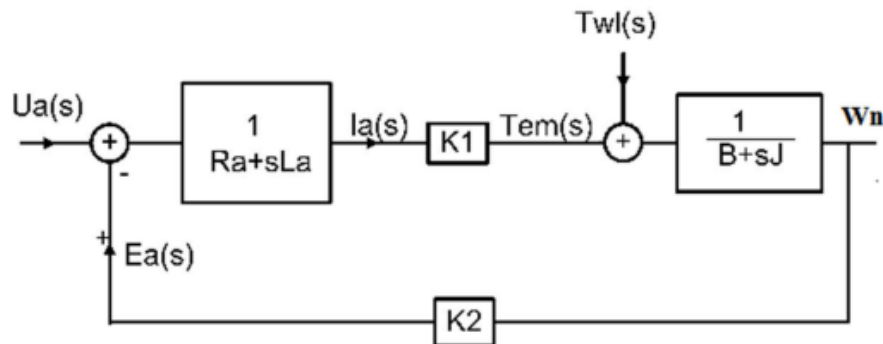


Слика 3.16 Утицај електромеханичког момента и момента оптерећења на угаону брзину мотора [11]

На слици 3.16 је приказан блок дијаграм добијен утицајем момената

Веза између излаза и улаза приказана је једначином помоћу константе k_2 , која повезује угаону брзину на излазу са индукованом EMS на ротору. Када се горе наведена два блока повежу у целину заједно са повратном спрегом, добија се комплетан математички модел мотора.

На слици 3.17 приказан је комплетан блок дијаграм.



Слика 3.17 Блок дијаграм мотора [11]

Јасно се види утицај промене брзине обртања мотора на струји I_a , као и утицај спољашњег момента на брзину обртања мотора.

4. Управљање погоном код CNC машина

Функција погонског дела код CNC машина је да обезбеди кретање клизача преко наредби за кретање. Ако је степен препоручене тачности висок, погонски део треба да има високу ефикасност и одзив. Погонски део се састоји од:

- Корачног или DC сервомотора
- Механичког преносног система

Мотори који се користе за погонски део CNC машина су сервомотори једносмерне струје (DC) и наизменичне струје (AC).

Синхрони AC серво мотори са перманентним роторским магнетом дизајнирани су за апликације са високим захтевима по питању брзине и прецизности. Мали моменти инерције у поређењу са осталим AC моторима заједно са могућношћу високих предоптерећења момента гарантују велика убрзања и смањују потрошњу енергије и проблеме загревања мотора. Обртни момент добија се као резултат синусоидалне трофазне струје побуде статора у комбинацији са магнетним пољем роторских перманентних магнета. Да би се побуда статорских намотаја могла ускладити са положајем ротора сви серво мотори опремљени су са енкодером који прати положај роторске осовине.

Управљање серво мотором врши серво драјвер. За разлику од фреквентног регулатора серво драјвер користи информацију о тренутном положају ротора мотора при генерисању побуде статора. Ову информацију регулатор добија са енкодера серво мотора. Драјвер може бити контролисан дигиталним и аналогним сигнаlima, али је већ доста распрострањена пракса да драјвер буде вођен од стране мастер контролера преко *CAN open* или неке друге комуникације.

У оквиру овог рада дат је детаљан опис и карактеристике о два типа драјвера који се користе за серво и корачне моторе, које производи фирма „Prizma“ из Крагујевца.

Највећи део текста је преузет из документације фирме „Prizma“.

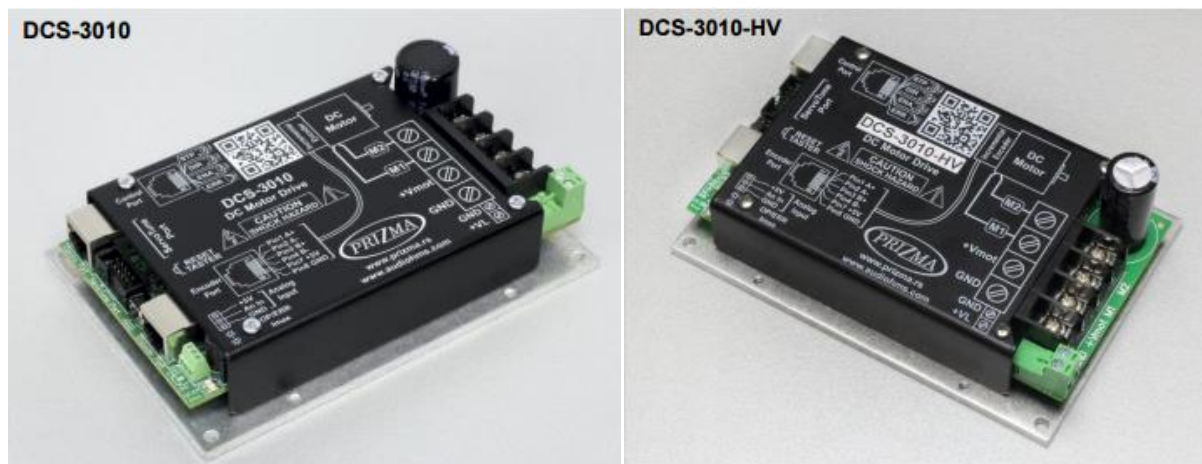
4.1 Драјвери и управљачке јединице за DC серво моторе

DCS-3010 је микроконтролерски PWM драјвер намењен за управљање DC моторима са перманентним магнетом напона напајања до 115VDC (односно 180VDC за верзију DCS-3010-HV) и максималне струје до 30А. Драјвер је базиран на 16-то битном

микроконтролеру у који је уграђен PID управљачки алгоритам. Као повратна спрега по позицији користи се инкрементални енкодер са фазно помереним квадратним сигналом. Интерфејс за енкодер омогућава $x1$, $x2$, и $x4$ мултипликацију резолуције инкременталног енкодера. Подешавање свих параметара DC серво драјвера DCS-3010 (-HV) врши се помоћу бесплатног конфигурационог софтвера *ServoTune3*. *ServoTune3* има уграђен алгоритам за аутоматско подешавање DCS-3010-HV је подржан од верзије софтвера *ServoTune V3.10*. Улазни интерфејс омогућава управљање преко опто-изолованих линија у следећим модovima:

- STEP/DIR/ENABLE
- CW/CCW/ENABLE
- Помоћу управљачког инкременталног енкодера (*Encoder followe*) у $1x$, $2x$, $3x$ декодовању,

као и преко аналогног улаза у опсегу $0-5\text{ V}$ са и без повратне спреге (на драјверу се налази конектор за повезивање екстерног потенциометра). Уграђен *soft start* укључује DC мотор 1 након доласка напона за напајање, чиме се смањује струјни удар при укључењу. Драјвер има и опто-изоловани излаз *Tracking Error* који се активира ако се прекорачи подешена вредност *tracking error offset-a*. Тај излаз се може искористити за активирање кола за искључење напајања DC мотора. Драјвер има преко напонску и преко температурну заштиту. За веће струје по потреби драјвер поставити на додатни хладњак. У случају да се за погон DC серво мотора користе напони напајања изнад 70 VDC препоручује се употребомоторске кочнице MB-2.

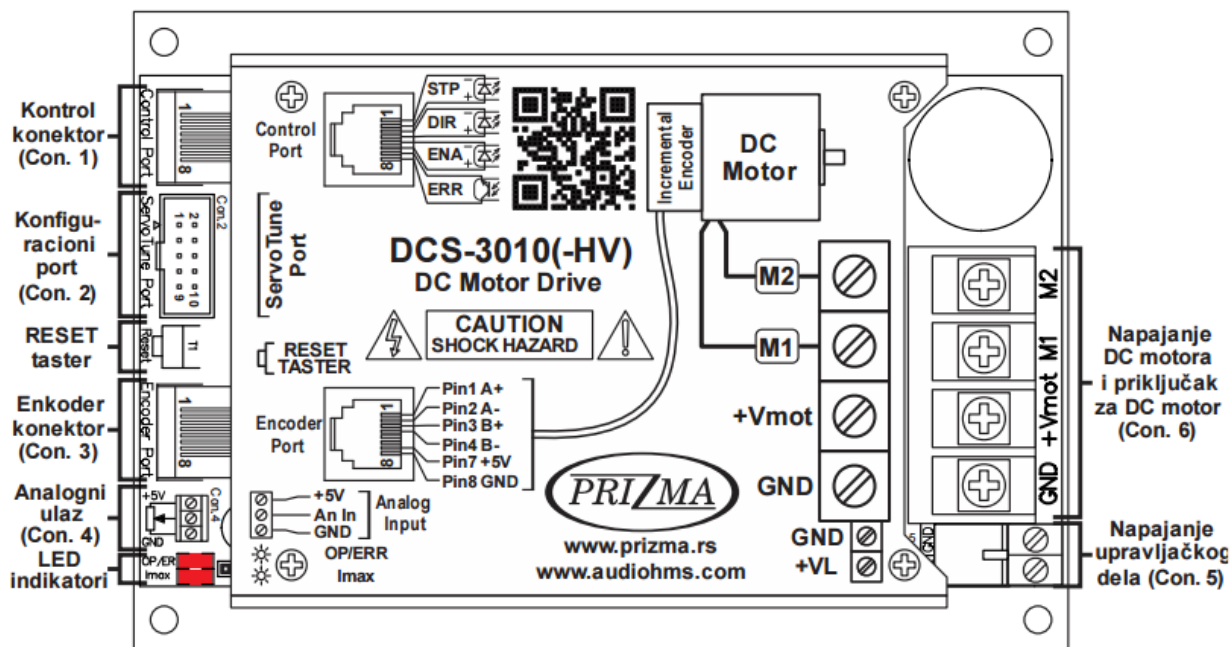


Слика 4.1 Приказ драјвера DCS-3010 и DCS-3010-HV из фирме „Призма“ Крагујевац [12]

На слици 4.1 је приказани драјвери DCS-3010 и DCS-3010-HV

Изглед драјвера

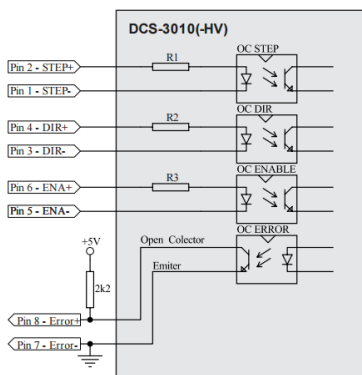
Драјвер DCS-3010-HV има на себи 6 конектора (од Con. 1 до Con. 6) као што се види на слици 4.2, која приказује изглед драјвера.



Слика 4.2 изглед драјвера [12]

Контрол конектор

Преко осмо пинског RJ45 конектора (контрол конектор-Con. 1) доводе се дигиталне управљачке линије (*STEP/DIR/ENA*, *CW/CCW/ENA* или Енкодер). Поред тога на овом конектору се налази *Tracking Error* излаз који се активира када се прекорачи вредност *tracking error offset-a*. Контрол конектор је пројектован тако да се са USB-MC контролером кретања на коме се налази USB-UIO1 улазно-излазна картица, односно са улазно-излазном картицом IO3-RC повезује преко 1 на 1 мрежног кабла (*Ethernet* кабла). Шематски приказ ових пинова је приказан на слици 4.3.



Слика 4.3 Шематски приказ опто-изолованих улаза и излаза [12]

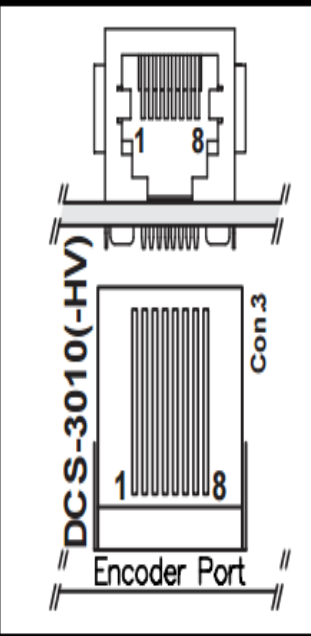
На улазу оптокаплера за *STEP*, *DIR* и *ENABLE* команду налази се отпорник од 330Ω (отпорници R1, R2 и R3 са слике 4.3) који ограничава струју на $\approx 10\text{ mA}$ на командном напону од 5V (TTL логички ниво). Ако је напон логичких команди на улазима већи, тада је на линији 2, 4 и 6 на конектору Con. 1 потребно поставити додатне отпорнике како би се обезбедило да струја не пређе 15mA. На линији *Tracking Error* потребно је поставити *eksterni pull-up* отпорник. Оптоизолациони размак између улазно-излазних командних линија контрол конектора и управљачке електронике на штампаној плочици драјвера (PCB-y) је око 5 mm.

Конфигурациони port

Подешавање параметара (константе PID контролера, резолуција енкодера, *tracking error offset-a* и др.) врши се помоћу изолационог интерфејса за програмирање IPI-USB и конфигурационог софтвера *ServoTune3*. Интерфејс за програмирање IPI-USB се повезује на DC серво драјвер DCS-3010(-HV) преко конфигурационог порта означен као Con. 2 на слици 4.2 (10-то пински DC конектор).

Енкодер конектор

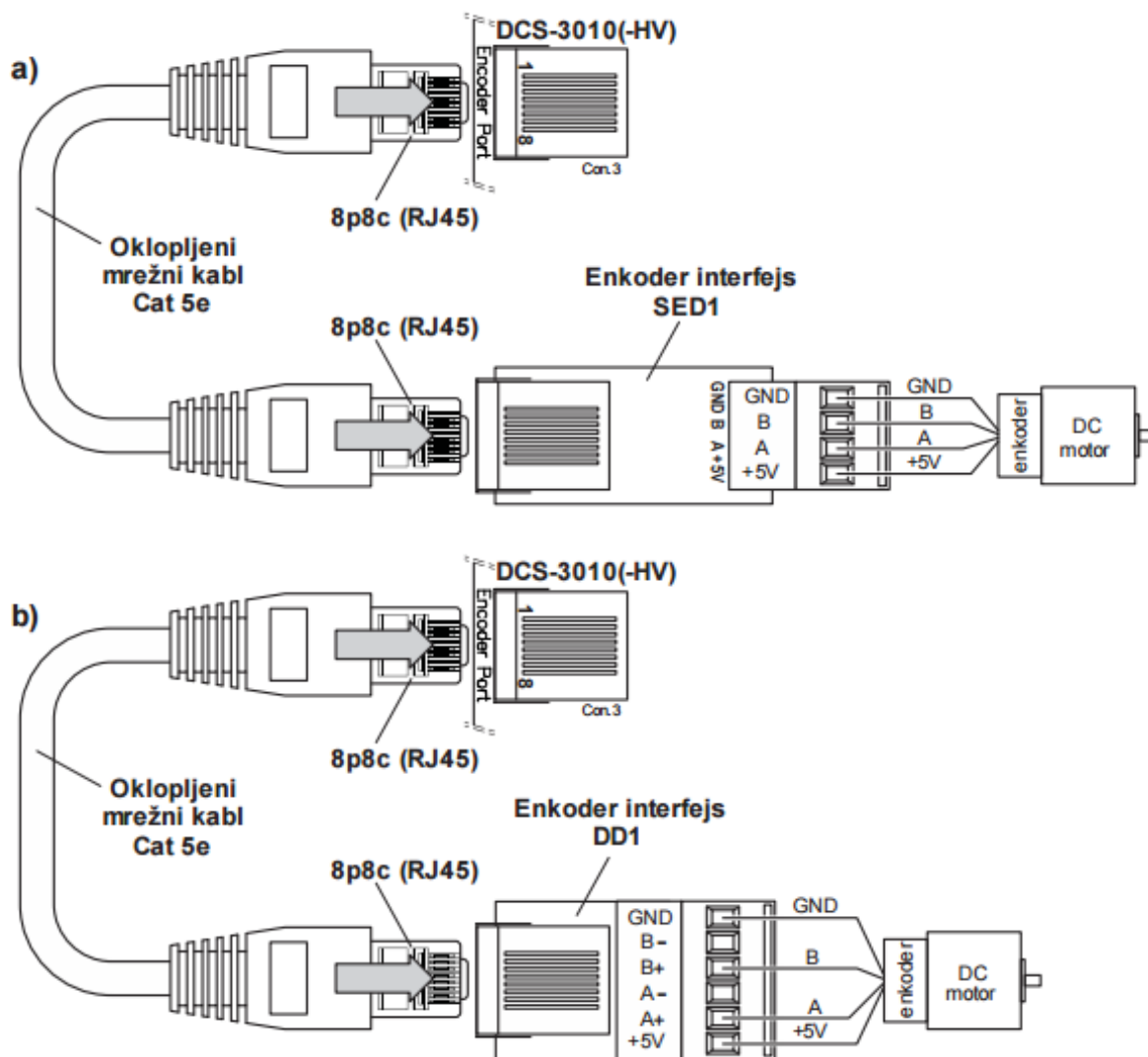
За повратну спрегу по позицији користи се инкрементални енкодер који се на DC серво драјвер DCS-3010(-HV) повезује преко енкодер конектора (конектор Con. 3 на слици 4.2). Функције пинова осмо пинског RJ45 конектора дате су у табели

	Пин.бр	Назив	Опис	Функција
	1	A+	A канал енкодера (pull-up otpornik 4k7)	Повезивање инкременталног енкодера
	2	A-	A\канал енкодера	
	3	B+	B канал енкодера (pull-up otpornik 4k7)	
	4	B-	B\канал енкодера	
	5	NC	-	
	6	NC	-	
	7	+Ve	Извор напајања енкодера 5V/250mA max	
	8	GND	GND-Енкодер	

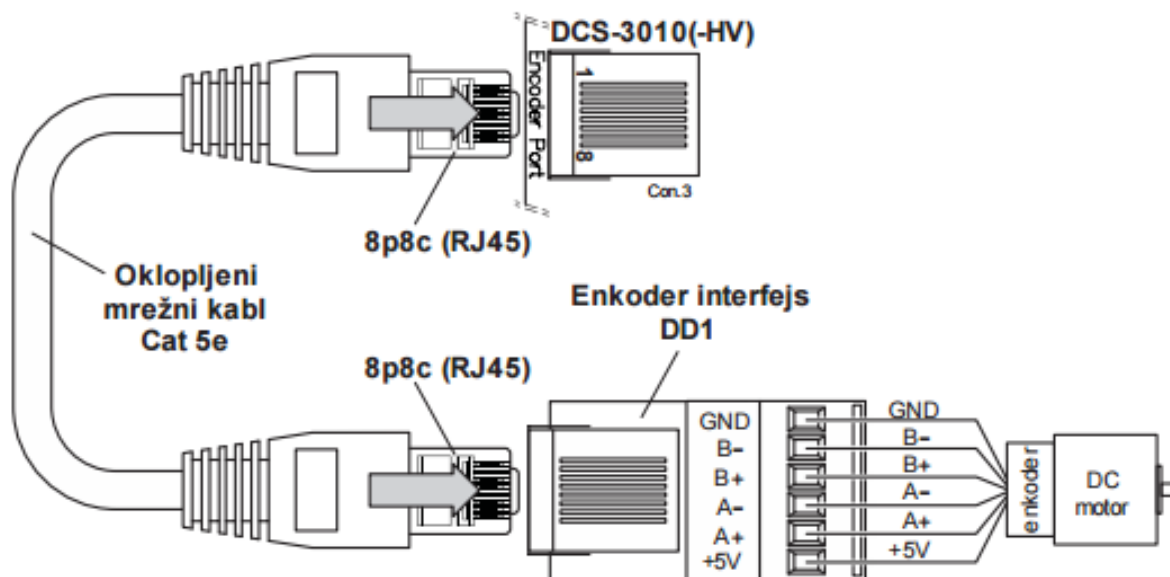
Опис пинова енкодера конектора осмо пинског RJ45 конектора (Con.3) [12]

Користити инкрементални енкодер са квадратним фазно помереним TTL излазима. Препорука је да резолуција инкременталног енкодера буде 200-2500 PPR. На драјверу се налази извор напајања за инкрементални енкодер +5 V / mA max.

На DC серво драјвер DCS-3010(-HV) може да се прикључи инкрементални енкодер са несиметричним (*single-ended*) излазима (А и В слика 4.4) или инкрементални енкодер са диференцијалним (комплементарним) излазима (А+, А-, В+ и В- излазима слика 4.5). Енкодер интерфејс SED1 на улазима А и В има *pull-up* отпорнике од 4,7 k Ω



Слика 4.4 Повезивање инкременталног енкодера са несиметричним (*single-ended*) излазима на DC серво драјвер DCS-3010(-HV) преко а) SED1 енкодер интерфејс и б) DD1 енкодер интерфејс [12]

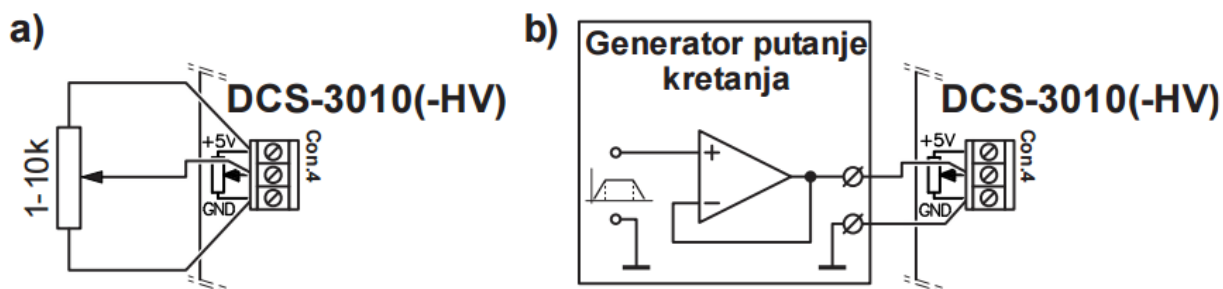


Слика 4.5. Повезивање инкременталног енкодера са диференцијалним излазима преко DD1 енкодер интерфејса DC серво драјвера DCS-3010(-HV) [12]

Да би се смањио или елиминисао утицај високо-фреквентних електричних сметњи препоручује се коришћење оклопљеног (шилдованог) мрежног кабла Cat 5е за везу енкодер интерфејса SED1 и DD1 са DC серво драјвером. Кабл за повезивање енкодера не би требало да буде дужи него што конкретна апликација захтева.

Аналогни улаз

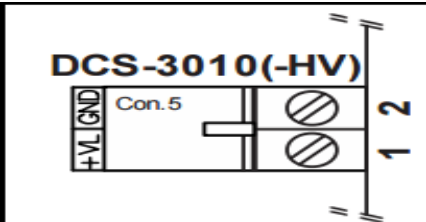
DC серво драјвер DCS-3010(-HV) има могућност управљања DC мотором преко напонске референце од 0-5V која се доводи на аналогни улаз (Con. 4). На аналогни улаз је могуће директно повезати потенциометар називне отпорности 1–10 k Ω као што је то приказано на слици 4.6 а. На слици 4.6 б је приказано генерисање профила промене броја обртања DC мотора путем екстерног генератора путање кретања. Напон на излазу генератора кретања не сме да пређе 5 V DC.



Слика 4.6 Генерисање напонске референце на аналогном улазу DC серво драјвера DCS-3010(-HV) преко, а) екстерног потенциометра и б) генератора путање кретања [12]

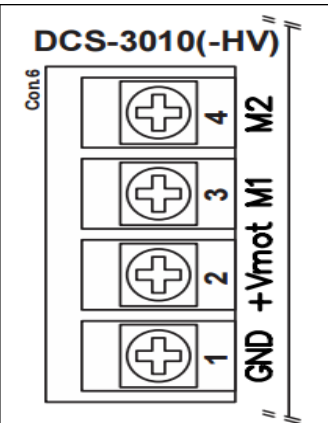
Напајање управљачког дела

Напајање управљачке електронике драјвера DCS-3010(-HV) врши се преко конектора Con. 5 са слике 4.2. Напон напајања логичког дела треба да буде од 18-28 V DC/200 mA. Није потребно да овај извор буде стабилисан, већ је довољно да је након исправљања филтриран електронским кондензатором минималне капацитивности од 470 µF.

	Пин бр.	Назив	Опис	Функција
	1	+VL	Напајање+18-28V DC/200 mA	Напајање управљачке електронике
	2	GND	GND	

Напајање DC мотора и прикључак DC мотора

Везивање напајања за DC мотор, као и прикључак за DC мотор налази се на конектору Con. 6 (слика 4.2)

	Пин бр.	Назив	Опис	Функција
	1	GND	GND напајање DC мотора	Напајање DC мотора
	2	+Vmot	+10-115VDC (DCS-3010) +20-180VDC (DCS-3010-HV)	
	3	M1	Прикључак DC мотора	Везивање DC мотора
	4	M2	Прикључак DC мотора	

Напон напајања DC мотора V_{mot} треба да буде 10-15% већи од називног напона DC мотора, односно:

$$V_{mot}=1,15*U_n$$

Напон напајања DC мотора V_{mot} не сме да пређе максимално дозвољену вредност напона драјвера DCS-3010(-HV). Ако након повезивања DC мотора на прикључку M1 и M2 и доласка напона напајања, мотор почне да се обрће, затим стане и OP/ER LED индикатор почне 2 пута да блинка (*Tracking error* индикација), потребно је заменити прикључке M1 и M2 (прикључак DC мотора са M1 пребацити на M2 и прикључак DC мотора са M2 пребацити на M1).

Рачунање напона секундарног намотаја U_{sek} трансформатора који се користи за напајање DC мотора рачуна се помоћу израза:

$$U_{sek} = 1,2 + \frac{V_{mot}}{1,41}$$

Струја секундарног намотаја зависи од карактеристика прикљученог DC мотора и требала би да буде од 50-100% већа од његове називне струје. При томе је потребно знати да DC мотор у неким радним режимима може повући знатно већу струју од називне.

Моторска кочница MB-2

Када DC серво мотор успорава покретне масе машине, он се понаша као генератор електричне струје. Кинетичка енергија покретних маса које DC серво мотор успорава претвара се у електричну енергију, што доводи до повећања једносмерног напајања драјвера DC мотора. У случајевима великих покретних маса и јаких успорења повећање једносмерног напајања драјвера DC мотора може довести до трајног оштећења исправљача или драјвера мотора. Моторска кочница MB-2 прати амплитуду улазног наизменичног напона и излазни једносмерни напон исправљача за напајање погона DC мотора. Ако напон који генерише DC мотор порасте више од 5 V у односу на амплитуду улазног наизменичног напона, активираће се кочионо коло које електричну енергију генерисану кочењем троши на кочионом отпорнику. На тај начин се спречава неконтролисано повећање напона напајања услед кочења DC мотора. Светљење LED диоде уграђене на моторску кочницу MB-2 сигнализира када је кочионо коло активно. Моторска кочница служи и за брзо пражњење електролитских кондензатора у исправљачу након нестанка напона напајања. Моторска кочница има на себи уграђено коло за напајање управљачке електронике саме моторске кочнице MB-2. Кочиони отпорник се споља спаја на моторску кочницу MB-2 преко клеме, а постоји и опциона могућност уградње кочионих отпорника на саму моторску кочницу MB-2.

На слици 4.7 приказана је моторска кочница MB-2



Слика 4.7 Моторска кочница MB-2 [12]

Техничке карактеристике

Опис	Моторска кочница са пливајућим напоном активирања кочења
Напон напајања	$U_m = 50 + 150 \text{ V DC}$
Максимална струја кочења	15 A
Напон активирања кочења	$U_m + 5 \text{ V DC}$
Начин кочења	Преко додатног кочионог отпорника (спољашњег или опционо уграђеног на моторској кочници MB-2)
Димензије (Š x D x V)	102 mm x 77 mm x 30 mm
Маса	~150 g

Безбедносна упозорења

Повезивање моторске кочнице могу да врше само лица која имају потребна знања из електротехнике или електронике.

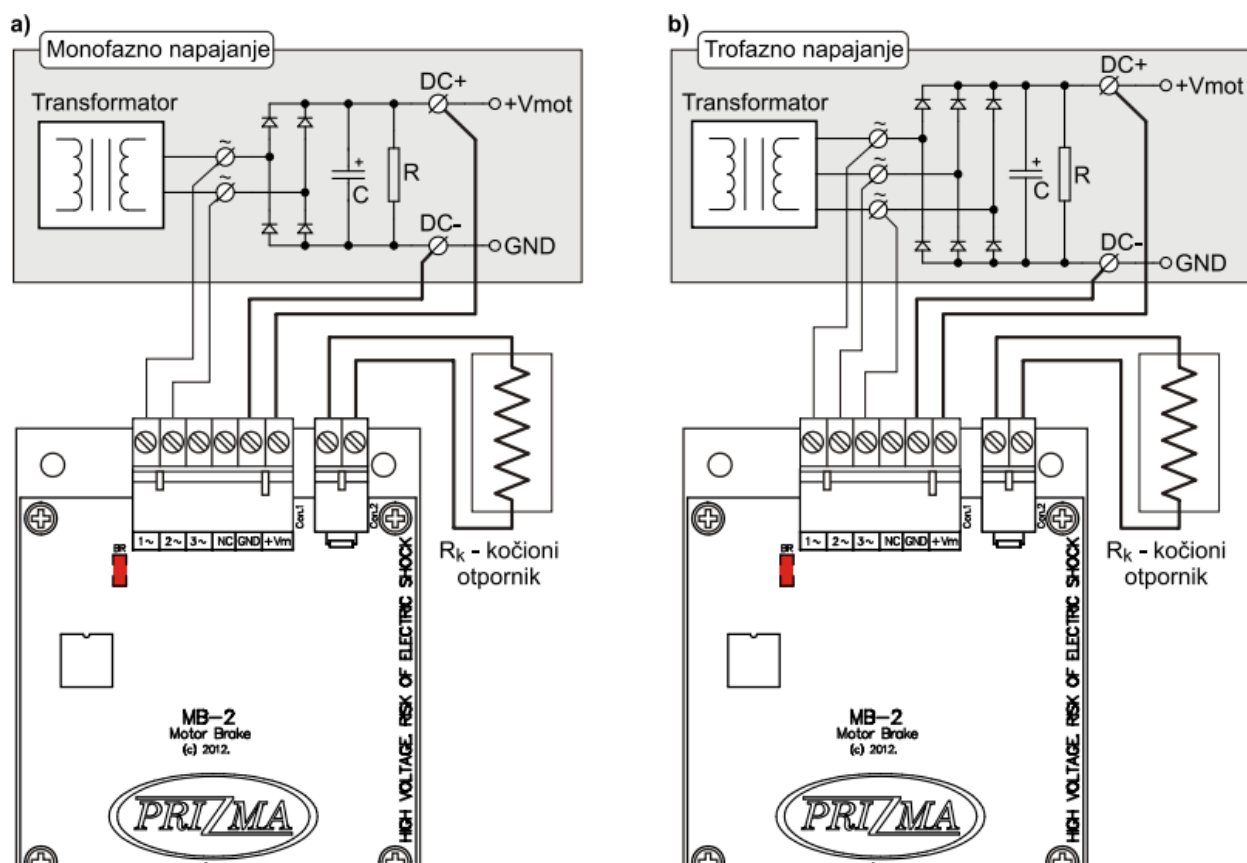
Напони преко 50 V DC могу бити опасни по живот. Ако моторска кочница ради са напоном напајања преко 50 V DC, алуминијумски носач мора бити прописно уземљен. За напајање моторске кочнице MB-2 користити искључиво галвански изолована напајања.

Температура моторске кочнице не би требало да пређе 70°C . Препоручује се да моторска кочница буде смештена у кућиште са добром вентилацијом и да се по потреби обезбеди додатно хлађење. У случају да се користе вентилатори за хлађење препоручује се коришћење филтера за прашину.

Моторску кочницу не треба користити на местима где би њен отказ могао да доведе до опасности по безбедности људи, великих финансијских губитака или било којих других губитака. При раду са моторском кочницом користити све потребне мере предострожности.

Везивање моторске кочнице

На слици 4.8 дат је приказ моторске кочнице MB-2 у склопу са монофазним напајањем и трофазним напајањем



Слика 4.8 Моторска кочница MB-2 а) у склопу са монофазним напајањем и б) у склопу са трофазним напајањем [12]

Када DC серво мотор успорава, понаша се као генератор електричне струје. Кинетичка енергија покретних маса које DC серво мотор успорава претвара се у електричну енергију, што доводи до повећања напона на линији +Vmot. Моторска кочница MB-2 прати амплитуду улазног наизменичног напона (преко клем 1~ и 2~ код монофазног односно клем 1~ 2~ и 3~ у случају трофазног напајања) и излазни једносмерни напон исправљача за напајање погона мотора. Ако напон на линији +Vmot порасте више од 5 V у односу на

амплитуду улазног наизменичног напона, доћи ће до активирања кочионог кола и спајања кочионог отпорника R_k између линија једносмерног напајања $+V_{mot}$ и GND. Тада се део електричне енергије настале кочењем мотора дисипира (троши претварањем у топлоту) на кочионом отпорнику R_k . Чим се она утроши, напон на линији $+V_{mot}$ враћа се на уобичајену вредност и кочиони отпорник се искључује из кола. Светљење LED диоде BR сигнализира када је кочионо коло активно.

Прорачун кочионог отпорника

Отпорност кочионог отпорника R_k одредити тако да струја која тече кроз њега (струја кочења I_k) не прекорачи 15 А. На пример, ако је напон $V_{mot}=90\text{ V}$, тада бирати вредност кочионог отпорника тако да је:

$$R_k > 90\text{ V} / 15\text{ A}$$

Односно $R_k > 6\ \Omega$. За усвојену вредност $R_k=10\ \Omega$ максимална струја кроз кочиони отпорник ће бити:

$$I_{max} = V_{mot} / R_k = 90 / 10 = 10\text{ A}$$

Снага, која би се у овом случају, на отпорнику претварала у топлоту би износила:

$$P_d = V_{mot}^2 / I_{max} = 90^2 / 10 = 810\text{ W}$$

Кочиони отпорник је, по правилу, врло кратко активан, тако да снага овог отпорника може бити 3 до 5 пута мања од снаге која се на њему дисипира. У овом примеру снага кочионог отпорника може да се израчуна коришћењем израза $R_k > P_d / 5 = 810 / 5$, односно $R_k > 162\text{ W}$. Усвојена снага кочионог отпорника би била $P_k = 200\text{ W}$. При томе је важно напоменути да кочиони отпорник мора да издржи претходно израчунату максималну струју кочења I_{max} .

Енергија која се на кочионом отпорнику претвара у топлотну енергију зависи од масе покретних делова машине, као и радних режима, тако да је приказан прорачун снаге кочионог отпорника јако оквиран. Уколико се кочиони отпорник превише греје, повећати његову снагу или обезбедити боље одвођење топлоте.

4.2 Драјвери и управљачке јединице за корачне моторе

MST-107

Је микростеп драјвер за корачне моторе са максималним напонем напајања 40 V и за максималну струју од 7,5 А по фази. Управљање корачним мотором се врши преко опто – изолованих STEP/DIR/ENA линија. PWM начина рада са учесталошћу од 19 kHz обезбеђује тих рад корачних мотора. Избор микрокорака (1/1, 1/2, 1/4, 1/6) врши се помоћу DIP микропрекидача који се налазе на плочици драјвера. То значи да је потребно 200, 400,

800 или 3200 импулса на STEP линији, у зависности од избраног микрокорака, да би корачни мотор са $1,8^\circ/\text{кор.}$ направио један круг.

На слици 4.9 је приказан драјвер MST-107 који се користи за корачне моторе

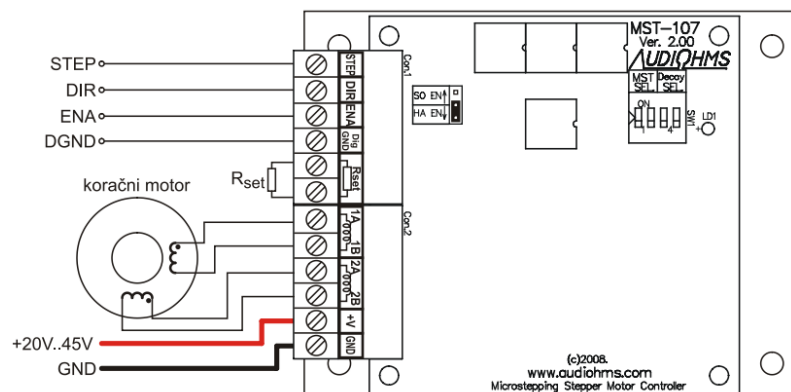


Слика 4.9 MST-107 драјвер за корачне моторе [14]

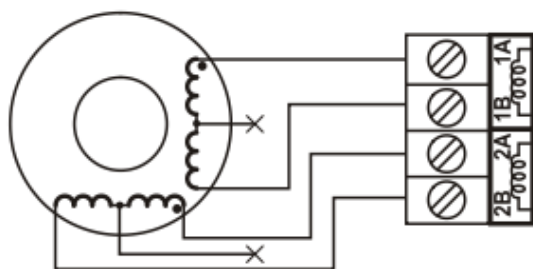
За погон корачних мотора користе се снажни MOSFET транзистори у TO220 кућишту. Управљање корачним моторима се врши преко три линије, односно STEP, DIR, ENA командама. То значи да се за вишеосно управљање могу користити већ развијени софтвери као што су: Mach2, Mach3, Turbo CNC, Kcam и слични.

За напајање драјвера потребно је једноструко напајање (20 – 40 V DC). Драјвер поседује додатно коло за стабилизацију напона неопходног за напајање управљачке електронике. Драјвер има аутоматску редукацију струје која протиче кроз намотаје корачног мотора. Ако на STEP линији нема сигнала дуже од 2с, струја кроз намотаје ће се смањити на 50% од подешене вредности. Тиме се смањује непотребно грејање корачних мотора.

На слици 4.10 приказана је шема везивања корачних мотора који имају 4 извода на драјвер

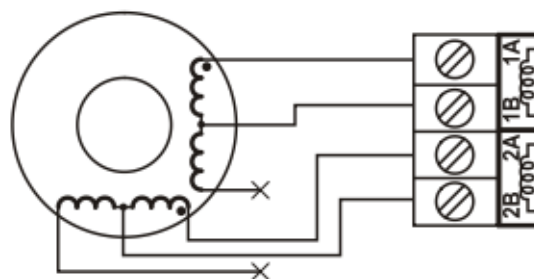


Слика 4.10 Шема везивања [14]

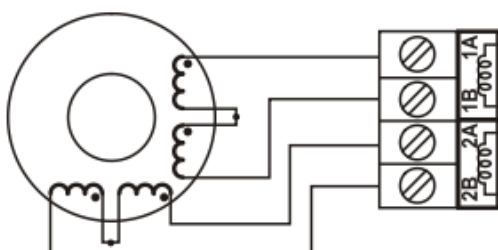


а) Везивање корачног мотора са 6 извода

$$I_{max} = 0,7 * I_{nom}$$

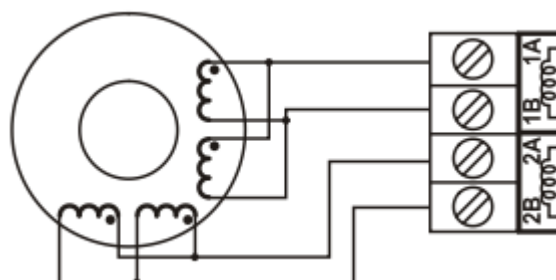
б) Везивање корачног мотора са 6 извода
(други начин)

$$I_{max} = I_{nom}$$

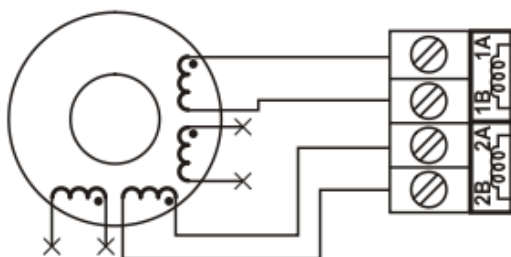


с) Везивање корачног мотора са 8 извода

$$I_{max} = 0,7 * I_{nom}$$

д) Везивање корачног мотора са 8 извода
(други начин)

$$I_{max} = 1,4 * I_{nom}$$



е) Везивање корачног мотора са 8 извода (трећи начин)

$$I_{max} = I_{nom}$$

На сликама је приказано везивање корачних мотора са 6 и 8 извода. На свакој од могућих шема везивање корачних мотора дата је вредност максималне подешене струје по фази I_{max} у односу на номиналну струју I_{nom} (I_{nom} је вредност струје по фази која је дата у карактеристикама за тај корачни мотор)

5. Закључак

Избор између серво мотора и корачног мотора може представљати велики изазов, који укључује балансирање неколико фактора дизајна. Разматрање трошкова, обртног момента, брзине, убрзања и струјног кола играју улогу у одабиру најбољег мотора.

Разлика између серво и степ мотора се огледа на два кључна начина, у њиховој основној конструкцији и како се они контролишу. Корачни мотори имају велики број полова, магнетне парове северног и јужног пола који се генеришу перманентним магнетом или електричном струјом, обично од 500 до 100 полова. За разлику од тога, серво мотори имају врло мало полова, често 4 до 12 укупно. Сваки стуб нуди природну тачку за заустављање мотора. Већи број полова омогућава корачне моторе да се прецизно крећу између сваког пола и омогућава кораку да се управља без повратне спреге за многе примене.

Серво мотори често захтевају да кодер положаја прати положај осовине мотора, посебно ако су потребна прецизна кретања. Управљање корачним мотором је много једноставнији него управљање серво мотором. Са корачним мотором импулс једног импулса помера осовину мотора за један корак, од једног пола ка другом. Пошто је величина корака датог мотора фиксирана на одређеној количини ротације, прелазак на прецизан положај је једноставно питање стања стварног броја импулса.

У оквиру свог рада детаљно сам описала погонски систем машина алатки. С обзиром да се тема односи конкретно на корачне и DC моторе, дате су њихове основне карактеристике, подела, као и конструкција. Приказано је поређење класичне и CNC машине, као и предности CNC машина у односу на класичне. Дати су примери CNC машина код којих се користе корачни и мотори једносмерне струје, као и њихове техничке карактеристике. Такође је приказан пример прорачуна за избор мотора, уз објашњење сваког приказаног израза. На крају рада сам описала драјвер DCS-3010 који се корист за управљање DC моторима, са приказаним сликама и начинима везивања, и моторску кочницу MB-2. Као и драјвер MST-107 који се користи за управљање корачним моторима.

Литература

- [1] Машине алатке – Ђорђе Чича, Бања Лука 2016 године.
- [2] Електромоторни погон (pdf)
- [3] Машине алатке – погонски систем машина алатки (pdf)
- [4] <http://m.ba.hybridservos.com/news/ac-servo-motor-and-servo-drive-in-cnc-machine-14883157.html> (приступљено 15.07.2019).
- [5] <https://www.ebay.co.uk/itm/Servo-Motor-Drive-Portable-Line-Boring-Machine-TDG60B-line-boring-machine-/262670766781> (приступљено 15.07.2019).
- [6] http://www.servo.gr/pdf/06_%20MINICNC_6040_CLOSE_LOOP_MOTOR_1.pdf (приступљено 15.07.2019).
- [7] http://www.servo.gr/cnc_plasma_1500_3000.html (приступљено 16.07.2019).
- [8] http://www.servo.gr/pdf/05_LASER_5x4_120W_1.pdf (приступљено 16.07.2019).
- [9] <http://www.audiohms.com/sr/iskustva/drajveri-i-upravljacke-jedinice-za-dc-servo-motore/item/192-cnc-plasma-prom-metal> (приступљено 16.07.2019).
- [10] http://repozitorij.fsb.hr/8398/1/Bozic_2018_zavrzni_preddiplomski.pdf (приступљено 18.07.2019).
- [11] <file:///E:/%D0%97%D0%B0%D0%B2%D1%80%D1%81%D0%BD%D0%B8/Industrijska-elektronika-20-mart-2018.pdf> (приступљено 28.07.2019).
- [12] <http://www.audiohms.com/sr/cnc-elektronika-proizvodi/drajveri-i-upravljacke-jedinice-za-dc-servo-motore> (приступљено 18.07.2019).
- [13] <http://ba.hybridservos.com/news/ac-servo-motor-and-servo-drive-for-shrink-tool-14572053.html> (приступљено 18.07.2019).
- [14] file:///E:/%D0%97%D0%B0%D0%B2%D1%80%D1%81%D0%BD%D0%B8/mst107_uputstvo_za_upotrebu.pdf (приступљено 18.07.2019).