

Modeliranje istosmjernog nezavisno uzbuđenog motora SIEMENS GM85 snage 6,5 kW

Marjanović, Eugen

Undergraduate thesis / Završni rad

2024

Degree Grantor / Ustanova koja je dodijelila akademski / stručni stupanj: **Josip Juraj Strossmayer University of Osijek, Faculty of Electrical Engineering, Computer Science and Information Technology Osijek / Sveučilište Josipa Jurja Strossmayera u Osijeku, Fakultet elektrotehnike, računarstva i informacijskih tehnologija Osijek**

Permanent link / Trajna poveznica: <https://um.nsk.hr/um:nbn:hr:200:678934>

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

Download date / Datum preuzimanja: **2025-03-16**

Repository / Repozitorij:

[Faculty of Electrical Engineering, Computer Science and Information Technology Osijek](#)



**SVEUČILIŠTE JOSIPA JURJA STROSSMAYERA U OSIJEKU
FAKULTET ELEKTROTEHNIKE, RAČUNARSTVA I
INFORMACIJSKIH TEHNOLOGIJA OSIJEK**

Stručni prijediplomski studij Elektrotehnika

Servopogoni u industrijskim sustavima (SMC)

Završni rad

Eugen Marjanović

Osijek, 2024

Obrazac Z1S: Obrazac za ocjenu završnog rada na stručnom prijediplomskom studiju

Ocjena završnog rada na stručnom prijediplomskom studiju

Ime i prezime pristupnika:	Eugen Marjanović
Studij, smjer:	Stručni prijediplomski studij Elektrotehnika, smjer Automatika
Mat. br. pristupnika, god.	A4683, 27.07.2021.
JMBAG:	0165088904
Mentor:	dr. sc. Željko Špoljarić
Sumentor:	
Sumentor iz tvrtke:	
Predsjednik Povjerenstva:	dr. sc. Krešimir Miklošević
Član Povjerenstva 1:	dr. sc. Željko Špoljarić
Član Povjerenstva 2:	Zorislav Kraus, dipl. ing. el.
Naslov završnog rada:	Servopogoni u industrijskim sustavima (SMC)
Znanstvena grana završnog rada:	Elektrostrojarstvo (zn. polje elektrotehnika)
Zadatak završnog rada:	Objasniti primjenu servopogona u industrijskim sustavima te dati primjere različitih servosustava u primjeni. Osvrnuti se na primjenu industrijskih računala u svrhu upravljanja servopogonima kao i načine komunikacije i komunikacijske mreže. (REZERVIRANO ZA STUDENTA: Eugen Marjanović)
Datum ocjene pismenog dijela završnog rada od strane mentora:	02.09.2024.
Ocjena pismenog dijela završnog rada od strane mentora:	Izvrstan (5)
Datum obrane završnog rada:	27.09.2024.
Ocjena usmenog dijela završnog rada (obrane):	Izvrstan (5)
Ukupna ocjena završnog rada:	Izvrstan (5)
Datum potvrde mentora o predaji konačne verzije završnog rada čime je pristupnik završio stručni prijediplomski studij:	27.09.2024.



FERIT

FAKULTET ELEKTROTEHNIKE, RAČUNARSTVA
I INFORMACIJSKIH TEHNOLOGIJA OSIJEK

IZJAVA O IZVORNOSTI RADA

Osijek, 27.09.2024.

Ime i prezime Pristupnika:

Eugen Marjanović

Studij:

Stručni prijediplomski studij Elektrotehnika, smjer Automatika

Mat. br. Pristupnika, godina upisa:

A4683, 27.07.2021.

Turnitin podudaranje [%]:

2

Ovom izjavom izjavljujem da je rad pod nazivom: **Servopogoni u industrijskim sustavima (SMC)**

izrađen pod vodstvom mentora dr. sc. Željko Špoljarić

i sumentora

moj vlastiti rad i prema mom najboljem znanju ne sadrži prethodno objavljene ili neobjavljene pisane materijale drugih osoba, osim onih koji su izričito priznati navođenjem literature i drugih izvora informacija.

Izjavljujem da je intelektualni sadržaj navedenog rada proizvod mog vlastitog rada, osim u onom dijelu za koji mi je bila potrebna pomoć mentora, sumentora i drugih osoba, a što je izričito navedeno u radu.

Potpis pristupnika:

SADRŽAJ

1. UVOD	1
2. INDUSTRIJSKA RAČUNALA	2
2.1. Vrste industrijskih računala	3
2.1.1. Industrijske matične ploče.....	3
2.1.2. Single-board računalo.....	4
2.1.3. Industrijska ugrađena računala.....	5
2.1.4. Industrijska osobna računala i radne stanice.....	5
2.2. Konfiguracija inudstrijskih računala	7
3. OSNOVE SERVOPOGONA	9
3.1. Osnovni elementi servo upravljačkog sustava	9
3.2. Servo upravljač	10
3.3. Servo pogon	11
3.4. Servo motor	11
3.4.1. Istosmjerni servo motori.....	12
3.4.2. Izmjenični servo motori.....	12
3.5. Senzori u servo pogonima	13
3.5.1. Digitalni optički enkoder.....	14
3.5.2. Hallov senzor.....	15
3.5.3. Rezolver.....	15
4. SERVO UPRAVLJANJE	17
4.1. Osnovne tehnike upravljanja	18
4.1.1. Upravljanje unaprijednom regulacijom.....	18
4.1.2. Meko upravljanje.....	19
4.1.3. Modelsko prediktivno upravljanje.....	20
4.1.4. Adaptivno upravljanje.....	21
4.2. Primjena servopogona u industriji	22
4.2.1. Industrijski robot.....	22
4.2.2. Elektro-hidraulički servo pogon.....	24
4.2.3. CNC altani strojevi.....	25
5. ZAKLJUČAK	27
LITERATURA	28

1. UVOD

Povijest izraza “servo motor” može se pratiti još od 19. stoljeće, kada su se koristili hidraulički i parni sustavi za upravljanje kormilima brodova. Danas, servo mehanizam se može predstaviti kao naprava koja ulaznu silu pojača u mnogo veću izlaznu silu, što znači da se po toj općoj definiciji govori o mehaničkom pojačalu koje načelno obuhvaća strojarske (hidraulične i pneumatičke) izvedbe. Servo motor predstavlja konačni upravljački sklop u servo sustavu. Pritom se motor ne može promatrati odvojeno, već uvijek u kontekstu nekog pogonskog sustava. U skladu s tim, može se reći da su za suvremene servo pogone i sustave koji su smješteni u industrijske procese, neizostavni brzi i precizni odzivi u širokom području brzina, uz sposobnost brzog odziva na promjene opterećenja. Od suvremenih servo pogona se očekuje visoka preciznost pozicioniranja, kontrolu brzine, široko područje regulacije brzine, mogućnost preopterećenja te visoka dinamika. Ove zahtjeve moguće je zadovoljiti samo uz pomoć opsežnog znanja iz elektrotehnike i strojarstva. Kada se područje suzi na određene aplikacije, može se reći da se ta znanja podudaraju s pojmom mehatronike.

U okviru ovog završnog rada opisana je struktura i važnost pojedinih komponenti servo sustava, njihovo upravljanje, odnosno tehnike i načini upravljanja servopogonima, te način na koji se oni koriste u industrijskim primjenama. Također, unutar rada su opisana industrijska računala, njihove osnovne vrste te način konfiguracije. Razumijevanje detalja funkcioniranja servo sustava i njihovih aplikacija može značajno doprinijeti optimizaciji proizvodnih procesa i poboljšanju ukupne učinkovitosti industrijskog sustava.

2. INDUSTRIJSKA RAČUNALA

Za početak da pojasnimo što je to računalo. Jednostavno rečeno, računalo je složeni elektronički uređaj koji prihvaća ulazne podatke, izvršava unaprijed definirane upute, obavlja matematičke i logičke operacije i proizvodi izlazne rezultate. Za razliku od običnog računala, industrijsko računalo (Slika 2.1.) je robustan računalni uređaj dizajniran za upotrebu u industrijskom okruženju. Koriste se u proizvodnji i industrijskim primjenama gdje moraju izdržati ekstremne temperature, udarce, elektromagnetske smetnje i druge teške uvjete. Obično imaju čvrstu konstrukciju i posebne značajke koje ih čine otpornima na oštećenja od udaraca, vibracije i prašine. Neka industrijska računala također imaju zatvorena kućišta koja ih štite od tekućine i kontaminanata. Prema tome, ovakva računala zahtijevaju prilagođeni softver i hardver, kao i mehaničke komponente izrađene od posebnih materijala kako bi dobro funkcionirala u teškim uvjetima [1].

Industrijska računala su napravljena za posebne industrijske primjene koje uključuju kontrolu i automatizaciju, poslovno i proizvodno upravljanje, logistiku i slično. Kako se industrijska automatizacija i proizvodnja nastavljaju razvijati paralelno uz računalno baziranu kontrolu i proizvodnju, industrijska računala postaju sve važnija [2].



Slika 2.1. Industrijsko računalo [3]

Industrijska računala se međusobno razlikuju od kućnih ili uredskih računala, a te razlike određuju njihove funkcije. Uredska i kućna računala su namijenjena za obavljanje manjih zadataka i obradu manjih količina informacija, dok se od industrijskih računala očekuje da su dizajnirana za obavljanje masovne obrade podataka ili drugih operacija velikog opsega. U većini slučajeva, industrijska računala imaju visoke brzine obrade, veće

kapacitete pohrane, veće zaslone i višefunkcionalna HMI (engl. *Human - Machine interfaces*) sučelja [2].

2.1. Vrste industrijskih računala

Industrijska računala su podijeljena u nekoliko osnovnih klasa s obzirom na vrstu procesora, zaslona, I/O sučelja te kućišta. Mogu biti: industrijske matične ploče, single-board računala, industrijski ugrađena računala te industrijska osobna računala i radne stanice [2].

2.1.1. Industrijske matične ploče

Matična ploča (Slika 2.2.) integrira funkcije komponenti računala i igra glavnu ulogu u rada računala. Kritične komponente poput CPU-a (engl. *Central processing unit*) i memorije montirane su na matičnoj ploči, dok se vanjski I/O uređaji poput napajanja i uređaja za pohranu povezuju s matičnom pločom kako bi omogućili rad računala. Omogućuju provođenje analize podataka, povezivanje s internetom te korištenje aplikacija s funkcijama umjetne inteligencije, što je u posljednje vrijeme privuklo značajnu pažnju [4].

Industrijske matične ploče se razlikuju u odnosu na standardne matične ploče. Industrijske matične ploče su robusnije od standardnih, budući da se koriste u težim uvjetima, gdje moraju izdržati povišene temperature i biti otporni na udarce. Također, moraju biti u stanju lako obraditi ogromne količine informacija koje su ključne za industrijske operacije i kontrole. Koriste se u mnogim kritičnim primjenama, uključujući industrijsku kontrolu, vojsku, zrakoplovnu industriju i medicinsko područje [2].



Slika 2.2. Industrijska matična ploča [5]

2.1.2. Single-board računalo

Single-board računalo (Slika 2.3.) predstavlja potpuno funkcionalno računalo gdje su sve njegove funkcije ugrađene na jednu tiskanu ploču PCB (engl. *Printed circuit board*). Dolaze s unaprijed određenom količinom RAM-a (engl. *Random Access Memory*), te mikroprocesorom, memorijom, ulazno-izlaznim funkcijama i drugim značajkama. Iako neki SBC-ovi sada imaju proširene utore, oni obično nisu predviđeni za periferne uređaje, jer su te dodatne funkcije već sadržane na ploči. SBC je povezan sa svojim aplikacijama putem sabirnice, koja osigurava fizičke veze za podatke i napajanje. Podaci se obično pohranjuju na prijenosni uređaj kao što je SD kartica [6].

Zbog vrlo visokih razina integracije, smanjenog broja komponenti i smanjenog broja konektora, SBC-ovi su često manji, lakši, energetske učinkovitiji i pouzdaniji u usporedbi s multiple-board računalima. Dizajnirani su da se integriraju s drugim elektroničkim komponentama kako bi formirali industrijski stoj za procesnu kontrolu ili se ugrađuju unutar drugih uređaja kako bi osigurali kontrolu i sučelje. Nalaze se u mnogim uređajima koje koristimo, poput prijenosnih računala i notebooka, ili služe kao matične ploče za sustave instrumentacije. Najčešće se koriste u industrijskim primjenama [2].



Slika 2.3. Single-board računalo [7]

Odabir SBC-a se temelji na njegovoj veličini, vrsti i brzini procesora, specifikacijama I/O sabirnice, minimalnim i maksimalnim radnim temperaturama i mnogim drugim okolišnim parametrima i značajkama. Moderni SBC-ovi postaju sve snažniji i pristupačniji, tako da sada cijelo računalo može stati na vrlo malu tiskanu ploču. Kao što je i uobičajeno, njihova cijena je s vremenom pala, dok su njihove mogućnosti postale veće [6].

2.1.3. Industrijska ugrađena računala

Općenito ugrađeni računalni sustav možemo opisati kao sustav koji se koristi za kreiranje bilo kakvog automatiziranog uređaja, a sastoji se od sklopovlja (hardvera) i programske podrške. Industrijska ugrađena računala (Slika 2.4.) su računala koja su ugrađena u neki sustav ili uređaj koji sami po sebi ne zahtijevaju ova računala za osnovne operacije. Ovakva računala se uglavnom koriste za poboljšanje i proširenje proizvodnih procesa ili upravljanje operacijama [2].

Primjena ugrađenih računalnih sustava se može najbolje objasniti primjerima u automobilskoj industriji. Danas tipični automobili sadrže oko 25 do 35 mikrokontrolera, a neka modernija vozila sadrže otprilike 60 do 70 mikrokontrolera po vozilu. Ugrađena računala više nisu integrirana samo u vidljive uređaje automobila poput uređaja za navigaciju, već se koriste i za osnovne zadaće automobila poput sustava za kočenje [2].



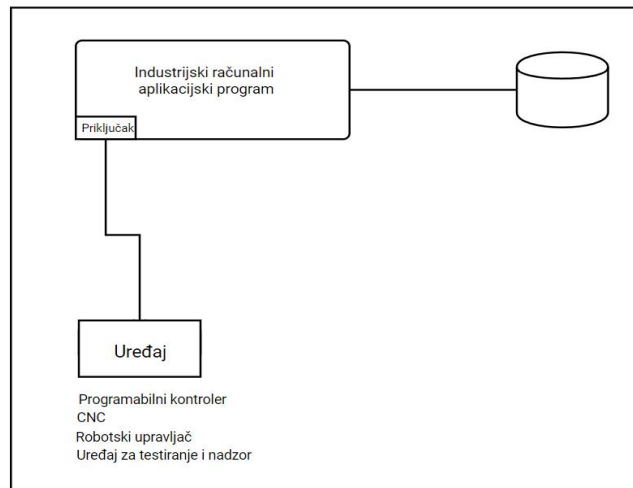
Slika 2.4. Industrijski ugrađeno računalo [8]

Standardizacijom hardvera i softvera oko PC (engl. *Personal computer*) arhitekture, dizajneri ugrađenih sustava mogu smanjiti troškove razvoja, rizike i vrijeme. To rezultira bržim izlaskom na tržište i nižim troškovima proizvoda. Također, postoji i potreba za prilagodbom PC sabirnice koja bi zadovoljila ograničenja prostora i potrošnje energije u ugrađenim sustavima. Pri tome ovi ciljevi moraju biti ostvareni bez žrtvovanja hardverske i softverske kompatibilnosti [9].

2.1.4. Industrijska osobna računala i radne stanice

Industrijska osobna računala, kao i sve ostale vrste industrijskih računala koja su opisana u ovom radu, su robusna računala namijenjena za uporabu u ekstremnim i teškim uvjetima. Dostupni su u mnogim vrstama i konfiguracijama s različitim procesorima, zaslonima, memorijom, I/O sučeljima i raznim načinima montaže [2].

Industrijska osobna računala su obično proizvedena u manjim količinama nego kućna ili uredska računala i koštaju znatno više od usporedivih potrošačkih računala sličnih performansi [9].



Slika 2.5. Sučelje industrijskog osobnog računala s vanjskim svijetom [9]

Industrijska osobna računala mogu se povezati s vanjskim svijetom (Slika 2.5.), kao i bilo koje drugo računalo, putem I/O portova. Uređaj na slici može biti bilo koji kontroler, ulazni modul za prikupljanje podataka ili bilo koji ispitni i mjerni uređaj. Ova vrsta sučelja omogućava sustavu rad u stvarnom vremenu [9].

Industrijske radne stanice (Slika 2.6.) se koriste kao klijent/poslužitelj računala koja se povezuju na industrijsku mrežu radi dijeljenja podataka s drugim strojevima. Međusobno se razlikuju po broju utora i priključaka. Ulazno-izlazni (I/O) portovi mogu biti serijski, paralelni, bežični ili mrežni. Univerzalna serijska sabirница (USB) je standardna serijska sabirница za periferne uređaje niske do srednje brzine. Mrežni protokoli uključuju Ethernet i Token Ring, dok neke radne stanice integriraju i tehnologiju bežične lokalne mreže (WLAN) [2].

Računalne radne stanice pružaju radnu memoriju (RAM) s odvojenim internim i vanjskim predmemorijama, a mogu uključivati i Flash memoriju, vrstu RAM-a koja može zadržati informaciju kada je računalo isključeno [2].



Slika 2.6. Industrijska radna stanica [10]

Koriste se u aplikacijama poput računalno upravljanje proizvodnje, računalno potpomognute automatizacije, unosa podataka u baze podataka, prikaza grafova i prikaza proizvoda [2].

2.2. Konfiguracija inudstrijskih računala

Industrijska računala moraju biti konfigurirana tako da zadovoljavaju specifične zahtjeve proizvodnih pogona, laboratorija i drugih zahtjevnih okruženja. Konfiguracija uključuje opremanje različitim računalnim kućištem, nosačima, zaslonima, te postavljanjem odgovarajućeg operativnog sustava. Dva uobičajena tipa kućišta za industrijska računala su stalak-kućišta i panel-kućišta [2].

Industrijska računala smještena u stalak (engl. *rackmount*)-kućišta (Slika 2.7.) su široko korištena u proizvodnim pogonima i laboratorijima, zbog svoje pouzdanosti, stabilnosti i jednostavnog održavanja. Instaliraju se u ormariće i sadrže najveći broj I/O utora. Podržavaju različite konfiguracije procesora, kao i PCI i ISA sabirnice. Opremljeni su bočnim serijskim i paralelnim portovima, USB portovima, I/O vezama i Ethernet portovima. Podržavaju različite ugrađene operacijske sustave uključujući Windows i ugrađeni Linux [2]



Slika 2.7. Industrijska računala u rack-kućištima [11]

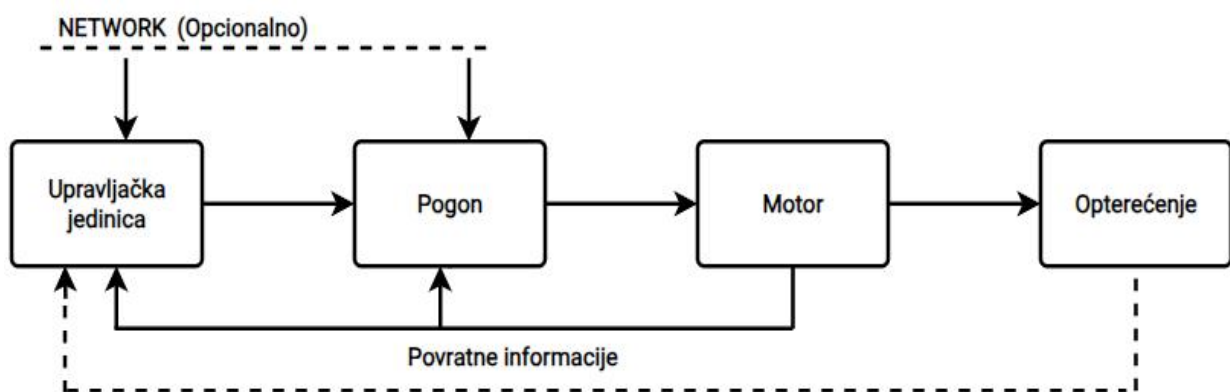
Industrijska računala u panel-kućištima (Slika 2.8.) predstavljaju učinkovito rješenje koje štedi prostor za područja gdje više operatera koristi jedno računalo. Ova konfiguracija je ekonomičan i pouzdan proizvod visokih performansi dizajniran za rad u zahtjevnim okruženjima. Ugrađuju se u upravljačke ploče ili druga industrijska sučelja, omogućujući operaterima pristup svim potrebnim funkcijama s jednog mjesta. Također, podržavaju ugrađene operacijske sustave Windows i Linux [2].



Slika 2.8. Industrijska računala u panel-kućištima [12]

3. OSNOVE SERVOPOGONA

Izraz “servo” odnosi se na upravljački mehanizam i dolazi od latinske riječi “servus”, što znači rob. Kao što sam naziv sugerira, to znači da sustav slijedi vanjske upute kako bi izvršio željeni pokret. Servo motori su nazvani po činjenici da se na njih može osloniti da rade “točno kako je naređeno”. Servo mehanizam je sustav za ostvarenje mehaničkog gibanja s negativnom povratnom vezom. Definicija obično vrijedi za sustave u kojima je regulirana veličina (izlaz) mehanička pozicija (zakretni kut), ili jedna od njezinih derivacija (brzina, ubrzanje). Servo motor konačni je upravljački element servo mehanizma [13].



Slika 3.1. Shema servo upravljačkog sustava [2]

Slika 3.1. je grafički prikaz tipičnog servo upravljačkog sustava. Upravljački sklop (controller) i industrijski digitalni pogon (engl. *drive*) sadrže algoritme za zatvaranje željene petlje (obično položaja ili brzine) i također upravljaju sučeljem stroja s ulaznim uređajima. Povratni elementi poput tahometra, enkodera i resolvera postavljaju se na motor i/ili opterećenje kako bi zatvorili različite servo petlje [2].

Ove postavke omogućuju sustavu da stalno prilagođava svoje akcije na temelju primljenih povratnih informacija, osiguravajući da je izlaz usko usklađen s ulaznom naredbom. U daljnjem djelu rada detaljno će se objasniti osnovni elementi servo sustava.

3.1. Osnovni elementi servo upravljačkog sustava

Servo sustav radi slično kao ljudsko tijelo - izvanredan sustav koji koordinira pokrete stotina mišića, koristi razne povratne uređaje i upravljački sustav koji čini brze prilagodbe. U svom osnovnom obliku, servo sustav se sastoji od aktuatora (mišića), upravljačkog uređaja (mozga) i povratnog elementa (osjetila). U svijetu automatizacije, aktuator može biti različiti mehanizam,

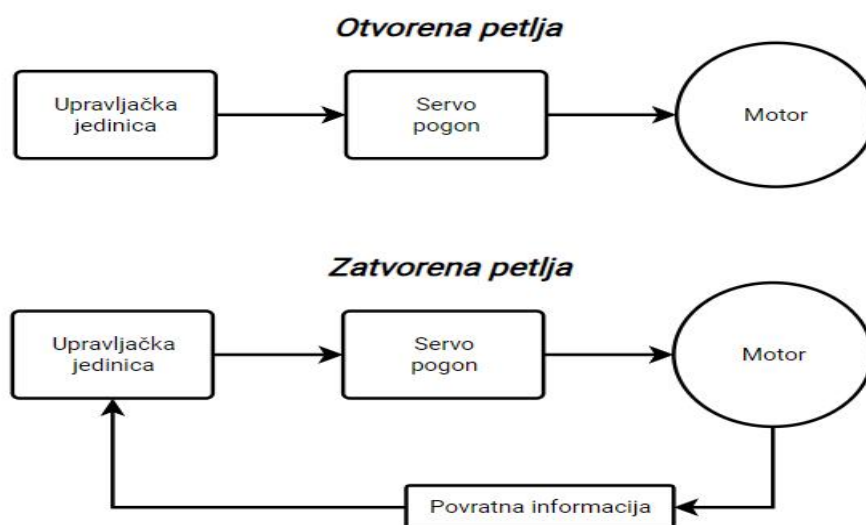
ali najčešće je predstavljen servo motorom. Upravljački uređaj (mozak) može također imati različite oblike, ali obično je to upravljač pokreta ili servo pogon (engl. *drive*). Povratni element pruža povratnu informaciju upravljačkom uređaju putem senzora struje, enkodera, resolvera ili čak sustava za vizualizaciju [14].

Kada upravljački uređaj pošalje signal aktuatoru da se pomakne na određeni položaj, aktuator se počinje kretati. Povratni uređaj tada šalje signal natrag upravljačkog uređaju o trenutnom položaju i brzini aktuatora. Upravljački uređaj pregledava povratnu informaciju i određuje je li aktuator dosegao zadani položaj. Ako nije, upravljački uređaj nastavlja slati signale aktuatoru dok ne dobije potvrdu od povratnog uređaja da je motor dosegao željeni položaj [14].

Moderni industrijski servo sustav značajno je napredovao i sada uključuje složene kontrolere s više povratnih uređaja i brze procesore koji donose odluke u nanosekundama kako bi izvršili željeni pokret [14].

3.2. Servo upravljač

Servo upravljač predstavlja “mozak” servo upravljačkog sustava. Njegova glavna uloga je generiranje putanja kretanja i reagiranje na promjene u vanjskom okruženju. Servo upravljač šalje naredbene signale pogonu, koji potom upravlja motorom. Povratne informacije iz motora i opterećenja vraćaju se kontroleru, omogućujući mu da analizira signal i ispravi eventualne greške. Kontroler zatvara petlje brzine i/ili položaja, dok pojačalo zatvara petlju struje. Ovi uređaji dolaze u različitim oblicima, uključujući mikrokontrolere, PLC-ove i kontrolere pokreta [2].



Slika 3.2. Prikaz otvorene i zatvorene petlje u servo sustavu

Servo sustavi mogu raditi u otvorenoj ili zatvorenoj petlji (Slika 3.2.), iako se obično koristi upravljanje u zatvorenoj petlji. U sustavima otvorene petlje, signal ide samo od upravljačke jedinice do motora, bez povratnih informacija, što nije idealno rješenje za aplikacije sa promjenjivim opterećenjima. S druge strane, sustav upravljanja zatvorene petlje koristi povratnu informaciju za usporedbu rezultata s željenim vrijednostima i prilagodbu upravljačkih radnji na temelju odstupanja. Upravljanje zatvorenog kruga omogućuje preciznu kontrolu i prilagodbu sustava, što je ključno za mnoge industrijske primjene koje zahtijevaju visoku razinu točnosti i učinkovitosti [15].

3.3. Servo pogon

Servo pogon, ili servo pojačalo, povezuje servo upravljač (kontroler) s motorom tako što pretvara niskoenergetske signale iz kontrolera u visokoučinkovite signale za motor. Servo pogon dobiva naredbeni signal od upravljača i prilagođava ga ili pojačava za prijenos specifične količine napona i struje potrebne za postizanje potrebnog gibanja na motoru. Drugim riječima, servo pogoni predstavljaju živčani sustav servo sustava. Njihov je zadatak prenijeti motoru što više detalja o tome što treba učiniti, kako to učiniti i kada to učiniti [2,16].

Prvobitno, pogoni su bili jednostavni energetske stupnjevi za motore s četkicama. Razvojem tehnologije, pogoni su dobili mogućnost rada u četiri kvadranta, omogućavajući upravljanje i regeneraciju motora u oba smjera, te podršku za motore bez četkica [2].

Moderni servo pogoni igraju ključnu ulogu u preciznom upravljanju položajem i brzinom. Osim prevođenja signala, današnji pogoni mogu upravljati povratnim informacijama sustava. Također, zatvaraju petlje momenta, brzine i položaja te generiraju putanju, preuzimajući mnoge funkcije koje su nekada bile domena kontrolera. Ovaj razvoj vodi ka sve većoj integraciji funkcija kontrolera i pogona, što omogućuje naprednije upravljanje motornim sustavima [2].

3.4. Servo motor

Motor koji može kontrolirati parametre poput položaja i brzine naziva se servo motor. Servo motor je samostalni električni uređaj koji rotira dijelove stroja s visokom učinkovitošću i velikom preciznošću. Izlazno vratilo ovog motora može se pomaknuti na određeni kut, položaj i brzinu koje obični motor nema. Servo motor koristi običan motor i povezuje ga sa senzorom za povratne informacije o položaju. Motor pretvara struje i napon iz pogona u mehaničko gibanje. Većina motora su rotacijski, ali dostupni su i linearni motori. Servo motori mogu biti podijeljeni na izmjenične i istosmjerne servo motore [17].

3.4.1. Istosmjerni servo motori

Istosmjerni servo motori (Slika 3.3.) su vrsta servo motora koji koriste četkice i istosmjernu struju za svoje djelovanje. Oni se široko koriste zbog svoje male veličine i niskih troškova. Ključne prednosti ovih motora su njihov brz odziv i visoki okretni moment pri niskim brzinama. Brzina motora je izravno proporcionalna naponu napajanja pri konstantnom opterećenju, što omogućava preciznu kontrolu brzine motora jednostavnim promjenom napona [18].

Magnetsko polje statora proizvodi se pomoću uzbuđnog namota ili permanentnog magneta. Na rotoru je smješten armaturni namot čiji su vodiči postavljeni okomito na magnetsko polje uzbuđnog namota. Kolektorski sklop brine za pretvorbu iz istosmjerne struje na strani izvora, u izmjeničnu struju koja teče kroz rotorski namot [13].



Slika 3.3. Istosmjerni servo motor [19]

Istosmjerni motori uključuju motore s paralelnom uzbuđom, gdje su uzbuđni i armaturni namot vezani paralelno, motore sa serijskom uzbuđom, gdje su namoti vezani u seriju, te motore s kompaudnom uzbuđom, gdje je dio uzbuđnog namota vezan paralelno, a preostali dio u seriju s armaturnim namotom. Zbog napretka u tehnologijama upravljanja, istosmjerni motori se sve više zamjenjuju izmjeničnim motorima [13].

3.4.2. Izmjenični servo motori

Izmjenični servo motori su motori pokretani izmjeničnom strujom. Iako su složeniji za upravljanje od istosmjernih motora, napredak u tehnologiji učinio ih je najčešćim tipom servo motora. Brzina izmjeničnih motora određena je frekvencijom primijenjenog napona (f i brojem magnetskih polova). Ovisno o njihovom mehanizmu pogona, mogu biti podijeljeni na sinkrone motore (SM) i indukcijske motore (IM). Razlikuju se na temelju prisutnosti ili odsutnosti trajnog magneta [2,17].

Indukcijski motori su električni motori koji koriste izmjeničnu struju i pokreću se rotirajućim magnetskim poljem. Rad motora se temelji na principu elektromagnetske indukcije. Na statoru

se nalazi jednofazni ili trofazni namot, dok se rotor formira u obliku kaveza. Dovođenjem napona na statorski namot dolazi do protoka struje i indukcije struje u rotorskom namotaju. Jedno magnetsko polje postavlja se u statoru, a drugo se inducira u rotoru. Ova dva magnetska toka međusobno djeluju i zbog toga rotor osjeti moment koji ga prisiljava da se okreće. Rotor će nastojati pratiti rotirajuće magnetsko polje statora, ali će zbog prisutnosti opterećenja doći do pojave klizanja. Zbog tog klizanja, indukcijski motori se uvijek okreću nešto sporije od brzine rotirajućeg polja statora [20].

Sinkroni motor se razlikuje od indukcijskog motora po konstrukciji rotora, što omogućava ovom tipu motora da rotira istom brzinom (u sinkronizaciji) kao i polje statora. Postoje dva osnovna tipa sinkronih motora: samopobudni (kao indukcijski motor) i izravno pobudni (s permanentnim magnetima) [2].

Izravno pobudni sinkroni motori, također poznati kao sinkroni motori s histerezom, imaju rotor izrađen od legure permanentno magnetna. Sjeverni i južni polovi magnetna djeluju kao izbočeni zubi, sprječavajući klizanje i osiguravajući sinkroniziranu rotaciju rotora s poljem statora [2].

3.5. Senzori u servo pogonima

Mjerenje fizikalnih veličina omogućava ne samo uvid u mehaniku, nego i u stanje pogona, što je ključno za postizanje optimalnog radnog stanja i dinamike modernih servo pogona. Mjerenja su neophodna u cijelom lancu pretvorbe energije - kako u učinkom pretvaraču, tako i u električnom stroju [13].

Suvremeni servo pogoni temelje se na regulacijskim petljama koje koriste informacije o trenutnim ili srednjim vrijednostima struja, napona, brzine vrtnje, pozicije (zakretnog kuta) i ubrzanju rotora i tereta. Senzori ne samo da vode stroj i nadziru energijski protok između izvora i motora, nego također štite stroj od kvarova i osiguravaju sigurnost operatera. Zato su u sustav ugrađene brojne senzorske sklopke koje detektiraju granične pozicije pogona i pristup operatera [13].

Odabir senzora ili mjerača podvrgnut je sljedećim zahtjevima:

- točnost, rezolucija i stabilnost mjerenih vrijednosti
- širina frekvencijskog pojasa (dinamika)
- komunikacijske mogućnosti
- mjesto i način ugradnje (atmosferski utjecaju, vibracije ...)

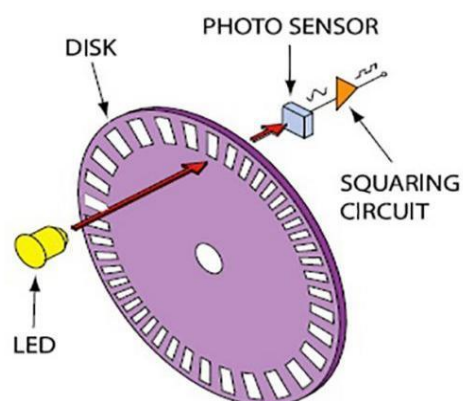
- cijena [13].

Osjetila sustava obično su integrirana u servo motor. Povratni element može se sastojati od enkodera, resolvera, linearnih povratnih uređaja, tahometra, hallovog senzora itd. Sofisticirani upravljački sustavi mogu uključivati naprednije oblike povratnih informacija, poput sustava za vizualizaciju. U nastavku će se definirati neki od ovih uređaja i objasniti osnove [14].

3.5.1. Digitalni optički enkoder

Digitalni optički enkoder je uređaj koji pretvara pokret u niz digitalnih impulsa. Brojanjem jednog bita ili dekodiranjem skupa bitova, impulsi se mogu pretvoriti u relativna ili apsolutna mjerenja položaja. Enkoderi dolaze u linearnim i rotacijskim konfiguracijama, ali najčešći tip je rotacijski. Rotacijski enkoderi proizvode se u dvije osnovne forme: apsolutni enkoder gdje svakom položaju osovine odgovara jedinstvena digitalna riječ, te inkrementalni enkoder koji proizvodi digitalne impulse kako se osovina okreće, omogućavajući mjerenje relativnog položaja osovine [21].

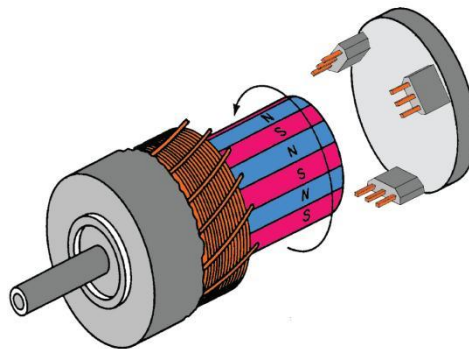
Većina rotacijskih enkodera sastoji se od staklene ili plastične kodne ploče s fotografirano deponiranim radijalnim uzorkom organiziranim u tragove. Ovaj uzorak obično sadrži proreze ili linije koje se nalaze na pravilnim udaljenostima. Kada se enkoder okreće, ovi prorezi prolaze između para fotoemitera i detektora. Kada svjetlosni snop bude prekinut, odnosno kada prorezi blokiraju svjetlost, to rezultira stvaranjem digitalnih impulsa. Svaki impuls predstavlja jednu jedinicu informacije o položaju enkodera, omogućujući precizno mjerenje relativnog položaja osovine [21].



Slika 3.4. Prikaz optičkog enkodera [22]

3.5.2. Hallov senzor

Hallov senzori (Slika 3.5.) koriste se za mjerenje zakretnog kuta u elektronički komutiranim motorima, gdje služe za detekciju položaja rotora s trajnim magnetima. Nalaze se u zračnom rasporu između rotora i statora, zatvarajući magnetsko polje rotora, ili uz čelo rotora, gdje detektiraju rasipno rotorsko polje. Bez obzira na mjesto ugradnje, njihov izlazni napon proporcionalan je upravljačkoj struji senzora (obično konstantnoj) te trenutnom smjeru i veličini rotorskog polja. Veličina izlaznog napona ne ovisi o kutnoj brzini rotora [13].



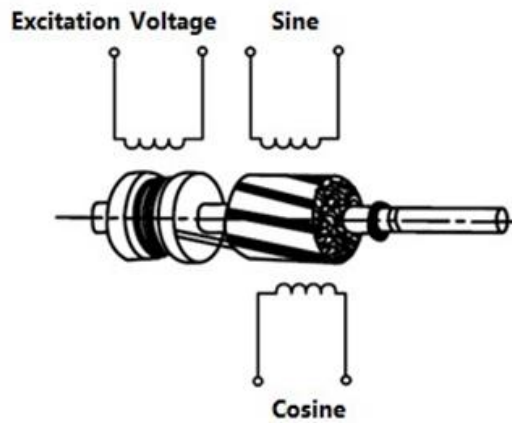
Slika 3.5. Elektronički komutirani motor s tri Hall senzora za detekciju položaja [23]

3.5.3. Rezolver

Rezolveri izgledaju slično malim motorima - sastoje se od cilindričnog rotora i statora. Rotor i stator imaju lamelirane utore s dva skupa namotaja. Ovi namoti su dizajnirani i raspoređeni u lamelama s konstantnim ili promjenjivim nagibom i brojem zavoja, tvoreći sinusoidalni uzorak.

Primarni namotaj statora povezan je s visokofrekventnim sinusoidalnim signalom, koji se prenosi na rotor zbog transformatorskog djelovanja između namotaja statora i rotora. Namotaj rotora, poznat kao referentni namotaj, inducira izmjenični napon u sinusnim i kosinusnim mjernim namotajima ovisno o kutnom položaju rotora. Kada su namotaj rotora i mjerni namotaj paralelni, magnetsko polje rotora maksimalno prolazi kroz mjernu zavojnicu, inducirajući najveći napon. Ako su pod pravim kutom, nema induciranog napona [24].

Sastavni dijelovi rezolvera (Slika 3.6.) uključuju ekscitacijske, kosinusne i sinusne namotaje. Pri odabiru rezolvera važno je usporediti transformacijski omjer, ulazni napon i potrošnju struje sa specifikacijama kontrolne jedinice, jer veća potrošnja smanjuje osjetljivost na elektromagnetske smetnje [24].



Slika 3.6. Sastavni dijelovi rezolvera [25]

Položaj ili kut rotora određuje se računanjem omjera izlaznog napona sinusnog namotaja i kosinusnog namotaja, prema formuli [13]:

$$\epsilon_m = \tan^{-1} \frac{U_{sin}}{U_{cos}} \quad (3-1)$$

gdje je:

- ϵ_m — kut između magnetnih osi rotora i statorskog namota,
- U_{sin} — izlazni napon sinusnog namota,
- U_{cos} — izlazni napon kosinusnog namota.

4. SERVO UPRAVLJANJE

Razvoj servo pogona pratili su ili poticali napredci na različitim područjima: teorije i tehnologije izrade električnih strojeva, učinske i upravljačke elektronike (mikroprocesorske tehnike), sensorike itd. Naravno da je pritom, sukladno osnovnoj definiciji servo pogona, koja pretpostavlja zatvorene regulacijske petlje za mehaničke i električne veličine, i upravljačka tehnika igrala i igra važnu ulogu [13].

Servo upravljanje općenito se može podijeliti u dvije osnovne kategorije problema. Prvi se bavi praćenjem naredbi, tj. koliko dobro stvarno gibanje prati ono što je zadano. Druga opća kategorija servo upravljanja se odnosi na karakteristike odbacivanja smetnji sustava. Tipične naredbe za rotacijsku kontrolu gibanja su položaj, brzina, ubrzanje i moment, dok se za linearno gibanje koristi sila umjesto momenta. Dio servo upravljanja koji se izravno bavi ovim aspektima često se naziva unaprijedno upravljanje (engl. *Feedforward control*). Unaprijedno upravljanje ima za cilj predvidjeti interne naredbe potrebne za postizanje nulte pogreške.

Servo upravljanje se bavi regulacijom brzine i položaja motora na temelju povratne informacije. Najosnovnija forma servo upravljanja je petlja brzine, koja generira naredbu za moment kako bi smanjila razliku između željene i stvarne brzine. Većina servo sustava također zahtijeva kontrolu položaja, koja se obično postiže dodavanjem petlje položaja u “kaskadu” s petljom brzine. U nekim slučajevima, jedna PID petlja može upravljati i položajem i brzinom bez potrebe za zasebnom petljom brzine.

Servo petlje moraju biti podešene za svaku primjenu. Proces podešavanja uključuje postavljanje servo pojačanja, pri čemu veća pojačanja pružaju višu razinu performansi, ali također približavaju sustav nestabilnosti. Niskopropusni filteri se često koriste u seriji s petljom brzine kako bi smanjili probleme stabilnosti na visokim frekvencijama. Ovi filteri se moraju uskladiti s podešavanjem servo petlji. Neki proizvođači pogona nude napredne algoritme upravljanja za složene primjene koje ne mogu biti adekvatno riješene standardnim servo petljama, ili za one koji zahtijevaju performanse koje standardne petlje ne mogu pružiti.

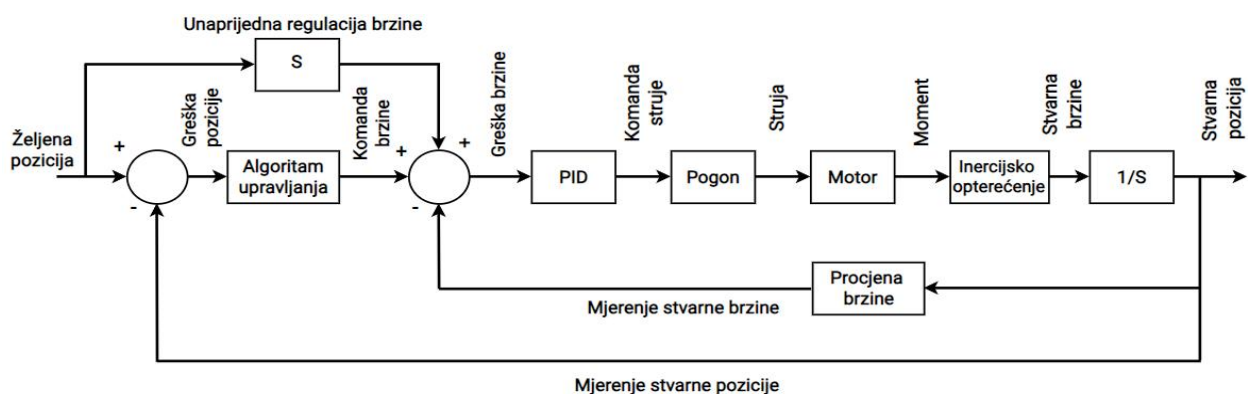
U nastavku će biti opisane neke od osnovnih tehnika, odnosno načina upravljanja servo sustavima.

4.1. Osnovne tehnike upravljanja

4.1.1. Upravljanje unaprijednom regulacijom

Svrha servo upravljačke petlje je minimizirati pogrešku, što se često postiže pomoću PID (proporcionalno-integralno-derivativnih) pojačanja koja ispravljaju pogreške između željene i stvarne vrijednosti. Međutim, PID algoritam je reaktivan i treba mu vremena da reagira. Na primjer, proporcionalni član zahtijeva postojanje pogreške kako bi generirao izlaz, dok integralni član zahtijeva i pogrešku i vrijeme. Također, nije uvijek moguće povećati PID pojačanja na razinu koja rezultira prihvatljivom pogreškom bez uzrokovanja nestabilnosti u sustavu. Kako bi se prevladali ovi nedostaci PID algoritma, koristi se unaprijedna regulacija (engl. *Feedforward*) koja omogućava proaktivnu prilagodbu upravljačkih signala prije nego što pogreške postanu značajne, čime se poboljšava brzina i preciznost sustava [26].

Feedforward kontrola procjenjuje idealni izlaz iz PID algoritma, a zatim dodaje pomoćne signale u servo petlju, što omogućuje brži odziv izlaza, a budući da djeluje izvan petlje povratne veze, ne uzrokuje nestabilnost. Za ovu vrstu kontrole potrebno je imati dostupne naredbe za brzinu, ili ubrzanje, koje su sinkronizirane s naredbama za položaj [27].



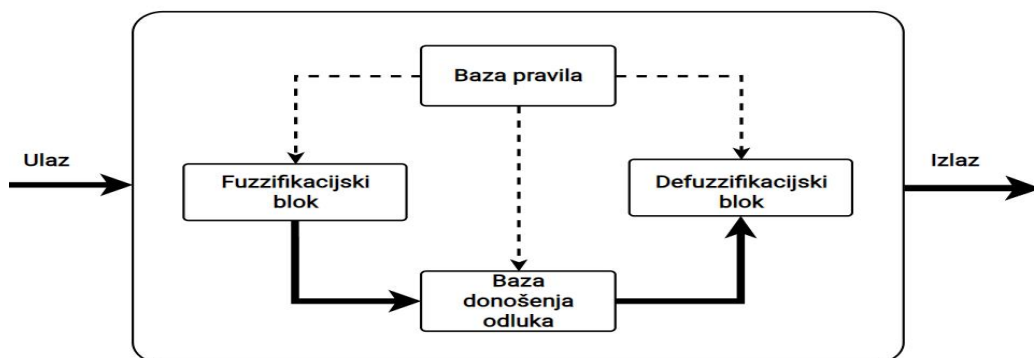
Slika 4.1. Blok dijagram upravljanja unaprijednom regulacijom [26]

Slika 4.1. prikazuje kako unaprijedna regulacija, zajedno s povratnom spregom, optimizira rad servo sustava. Komponente unaprijedne regulacije djeluju paralelno s povratnim signalima koji se temelje na stvarnim mjerenjima brzine i pozicije. Željena pozicija predstavlja ciljnu vrijednost koju motor treba dosegnuti. Kako bi se smanjila greška pozicije, feedforward regulacija unaprijed izračunava potrebnu brzinu i moment te dobivene vrijednosti odmah koristi za generiranje komandi za brzinu i struju. Ovi unaprijed izračunati signali omogućuju motoru da se brže prilagodi promjenama u željenoj poziciji, smanjujući kašnjenje u reakciji.

4.1.2. Meko upravljanje

Upravljanje pomoću meke ili zamućene logike (engl. *Fuzzy logic*) uvodi element ljudskog razmišljanja u precizan svijet upravljanja servopogonima. Za razliku od konvencionalnih metoda upravljanja koje se oslanjaju na binarnu logiku, meka logika radi s razinama istine. Ovaj pristup je posebno koristan u složenim ili slabo definiranim sustavima gdje tradicionalni matematički modeli ne daju zadovoljavajuće rezultate. Meka logika interpretira i djeluje na temelju različitih razina ulaznih podataka, nudeći fleksibilan i intuitivan način za upravljanje složenim zadacima kontrole servomotora.

U osnovi, meka logika je viševrijedna logika koja omogućuje definiranje međuvrijednosti između konvencionalnih procesa kao što su istinito/lažno, da/ne, visoko/nisko itd. Pojmovi poput “prilično visok” ili “vrlo brz” mogu se matematički formulirati i obrađivati računalima kako bi se primijenio način razmišljanja sličniji ljudskom u programiranju računala [28].



Slika 4.2. Struktura Fuzzy kontrolera [29]

Struktura fuzzy kontrolera (Slika 4.2.) opisuje kako se informacije obrađuju i koriste unutar sistema fuzzy logike za upravljanje i donošenje odluka. Ova struktura uključuje nekoliko ključnih komponenti koje zajedno omogućuju učinkovitu kontrolu i prilagodbu sustava. Baza pravila predstavlja osnovu fuzzy kontrolera. Ova pravila, izrađena od strane stručnjaka, imaju oblik “ako, onda” (engl. “*If, then*”) i služe kao temelj za donošenje odluka. Svako pravilo opisuje odnos između ulaznih i izlaznih varijabli, definirajući kako sustav treba reagirati na određene uvjete [29].

Fuzzifikacijski blok ima funkciju pretvorbe točnih (krutih) ulaznih vrijednosti u fuzzy informacije. Ovaj blok koristi jezične varijable koje kategoriziraju ulaze, kao što su “visoko”, “srednje” i “nisko” stanje. S druge strane, defuzzifikacijski blok pretvara fuzzy rezultate natrag u

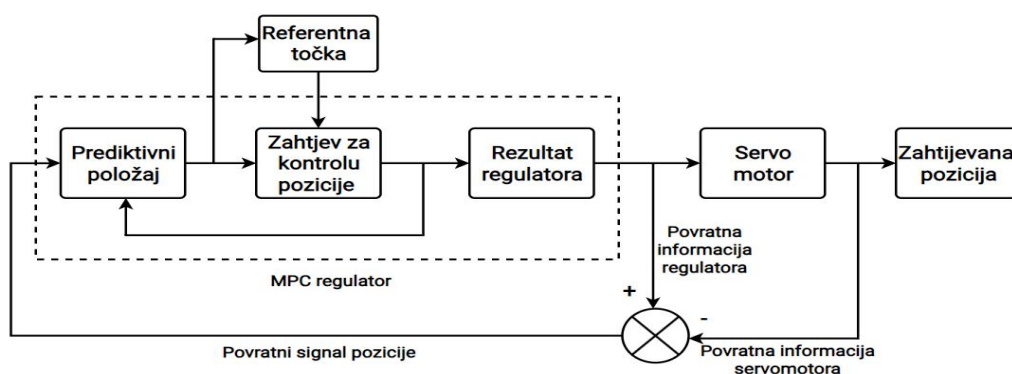
točne (krute) vrijednosti koje se mogu koristiti za upravljanje stvarnim sustavima. Blok za donošenje odluka odgovoran je za interpretaciju i primjenu fuzzy pravila. Ovaj blok koristi logičke operatore kao što su AND, OR i NOT za kombiniranje i interpretiranje zadanih pravila. Izlazni blok prenosi konačnu vrijednost iz defuzzifikacijskog bloka na kontrolirani proces ili izvršni element [29].

4.1.3. Modelsko prediktivno upravljanje

U posljednje vrijeme postaje sve popularnije modelsko prediktivno upravljanje (engl. *Model predictive control* - MPC) koje se zasniva na diskretizaciji modela stroja u mikroracunalu i posljedičnom izboru optimalnih narinutih napona na osnovi predviđanja ponašanja veličina stroja [13].

Modelsko prediktivno upravljanje (MPC), također poznato kao upravljanje s pomičnim horizontom je optimalni pristup upravljanja koji koristi matematički model sustava za predviđanje njegovog budućeg ponašanja unutar određenog horizonta predikcije. Ključna karakteristika MPC-a u usporedbi s drugim upravljačkim tehnikama su njegova eksplicitna razmatranja ograničenja sustava i sposobnost optimizacije upravljačkih akcija preko horizonta predikcije na temelju matematičkog modela sustava.

S razvojem računalnih sposobnosti i algoritama, MPC se sve više primjenjuje u stvarnom vremenu za brze dinamičke sustave kao što su pretvarači energije i pogoni motora. Svestranost MPC-a čini ga idealnim za različite aplikacije u elektroničkoj obradi energije, uključujući DC-DC pretvarače, AC-DC ispravljače, inverterske uređaje i kontrolu motora [30].



Slika 4.3. Blok dijagram MPC regulatora servomotora [31]

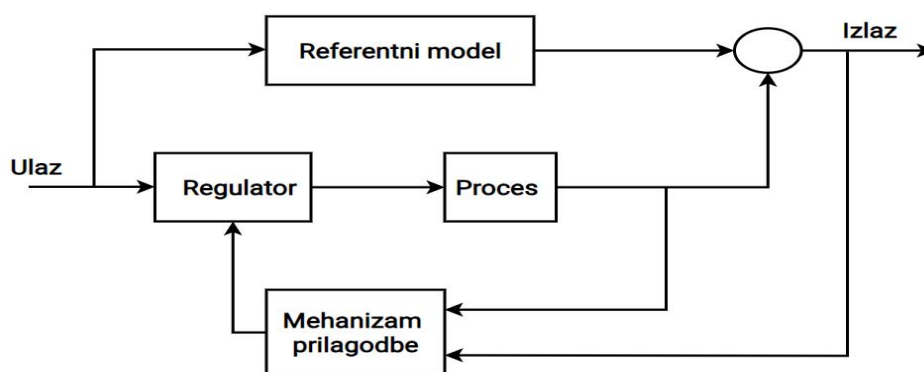
Modelsko prediktivni regulator upravlja servo motorom prema primijenjenom naponu, horizontu predviđanja, horizontu kontrole i težini regulatora. Glavna ideja MPC-a je korištenje

predikcijskog i kontrolnog horizonta za precizno upravljanje položajem ili brzinom servo motora. Prvo se izračunavaju specifikacije servomotora, koje se zatim pretvaraju u model stanja prostora i prilagođavaju diskretnom sustavu kako bi se osigurala stabilnost. Na slici (Slika 4.3.) je prikazan blok dijagram MPC regulatora koji prikazuje osnovne elemente sustava: referentnu vrijednost (setpoint) koja predstavlja željeni položaj, MPC regulator koji minimizira razliku između zadane i stvarne pozicije, te servomotor koji odgovara na upravljačke signale. Povratni signal iz servomotora šalje se natrag u regulator kako bi se kontinuirano prilagođavao izlaz, osiguravajući minimalnu pogrešku u položaju. Ovakav sustav omogućuje učinkovito upravljanje servomotorom u različitim primjenama, gdje je preciznost ključna.

4.1.4. Adaptivno upravljanje

Adaptivno upravljanje predstavlja značajan napredak u razvoju servo sustava, nudeći dinamičko rješenje koje se prilagođava promjenama u sustavu ili njegovom okruženju. Ova tehnika u stvarnom vremenu prilagođava svoje parametre kako bi nadoknadila habanje, varijacije opterećenja ili bilo kakve nepredviđene smetnje. Adaptivno upravljanje osigurava da servo sustav ostane robustan i učinkovit, čak i kada se uvjeti mijenjaju, što ga čini neophodnim za primjene gdje je dosljednost ključna unatoč promjenjivoj dinamici [32].

Adaptivno upravljanje je kombinacija povratnog upravljanja i teorije identifikacije. Ono omogućava sveukupnu prilagodbu upravljanog objekta traženjem najboljih pokazatelja performansi. Trenutno postoje dvije vrste adaptivnog upravljanja: samopodešavajuće i modelsko - referentno adaptivno upravljanje. Kroz dizajn zakona za prilagodbu parametara, adaptivno upravljanje smanjuje signal pogreške na nulu uz istovremeno osiguravanje stabilnosti sustava. Prednost adaptivnog upravljanja je njegova učinkovitost i jednostavna implementacija u slučajevima promjene parametara te unutarnjih i vanjskih poremećaja. Ipak, njegova učinkovitost može biti ograničena točnošću mjerenja [33].



Slika 4.4. Blok dijagram adaptivnog regulatora [34]

Slika 4.4. prikazuje shematski dijagram, koji ilustrira ključne komponente i njihovu međusobnu povezanost u adaptivnom kontrolnom sustavu. U ovom dijagramu “proces” predstavlja stvarni kontrolirani sustav, kao što je servo motor, čiju se izvedbu nastoji poboljšati. Referentni model služi kao idealizirani cilj, čija izlazna svojstva sustav treba pratiti. Povratna sprega koristi informacije iz stvarnog sustava kako bi prilagodila parametre regulatora, dok mehanizam prilagodbe automatski ažurira te parametre na temelju razlika između izlaza stvarnog sustava i referentnog modela. Ovaj pristup omogućuje sustavu da se dinamički prilagođava promjenama i neizvjesnostima u sustavu, osiguravajući tako bolju usklađenost s referentnim modelom.

4.2. Primjena servopogona u industriji

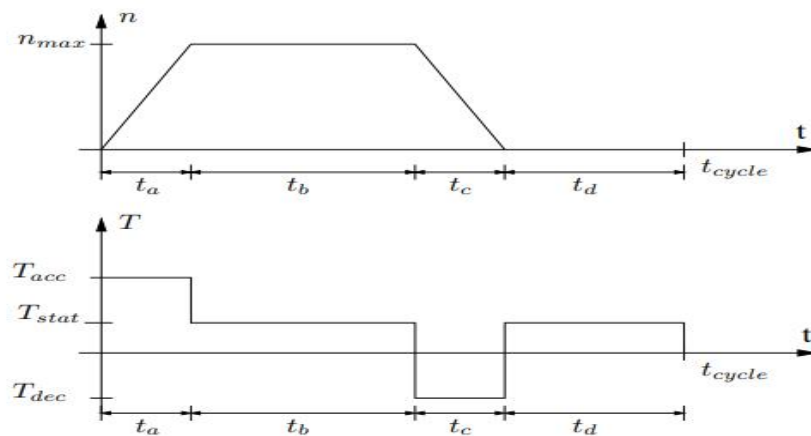
4.2.1. Industrijski robot

U primjeni industrijskog robota, servo motor mora ispunjavati nekoliko ključnih zahtjeva kako bi osigurao optimalni rad. Prije svega, motor mora imati visoku kvalitetu zakretnog momenta i nisku cijenu. Kvaliteta momenta se odnosi na glatkoću i preciznost zakretnog momenta, bez obzira na temperaturu ili radnu točku, dok niska cijena podrazumijeva visoki zakretni moment po jedinici cijene (Nm/€). Također, motor mora biti sposoban isporučiti vršni zakretni moment koje je 2 do 4 puta veći od nominalnog, uz zadržavanje kvalitete momenta, što je ključno za zahtjevne zadatke u industriji. Dodatno, od motora se očekuje minimalna potreba za održavanjem, što smanjuje troškove rada i povećava pouzdanost sustava [35].



Slika 4.5. Industrijski robot IRB4400 [36]

Specifičan primjer primjene ovih zahtjeva može se vidjeti u ABB-ovom industrijskom robotu IRB4400 (Slika 4.5.). Ovaj robot srednje veličine koristi se uglavnom za rukovanje materijalima i može podnijeti teret do 60 kg. Robot ima ukupno 6 osi, a os 5 je nagibna os zgloba ruke. Motor koji pokreće os 5 nalazi se u stražnjem dijelu robotske ruke, a zakretni moment i rotacijsko kretanje prenose se na os putem osovina i zupčanika unutar ruke robota.



Slika 4.6. Tipičan ciklus servo motora u industrijskom robotu [35]

Radni ciklus servo motora u industrijskom robotu (Slika 4.6.) tipično se sastoji od faze ubrzanja, razdoblja konstantne brzine, te faze kočenja do zaustavljanja, s kratkim razdobljem mirovanja između za otpuštanje predmeta i/ili hvatanje novog predmeta. U početnoj fazi ciklusa, motor mora isporučiti visoki moment ubrzanja (T_{acc}) kako bi ubrzao os do maksimalne brzine. Kada se postigne maksimalna brzina, motor održava konstantni moment (T_{stat}) tijekom razdoblja konstantne brzine. U fazi kočenja, motor mora isporučiti visoki moment kočenja (T_{dec}) kako bi os zaustavio. Ovaj ciklus traje samo nekoliko sekundi, što je znatno kraće od toplinske vremenske konstantne stroja, omogućujući motoru da ispuni zahtjeve bez pregrijavanja.

Pri dizajnu i primjeni motora u industrijskom robotu, bitno je uzeti u obzir inerciju motora i opterećenja. Inercija opterećenja, uključuje i nosivost i samu strukturu robota. Ako je inercija motora zanemariva, maksimalno dopušteni zakretni moment zupčanika postavlja gornju granicu zakretnog momenta koji motor mora isporučiti. Međutim, ako inercija motora nije zanemariva, motor mora isporučiti ne samo maksimalni zakretni moment zupčanika, već i potreban zakretni moment kako bi ubrzao sam sebe s maksimalnim ubrzanjem $(\frac{dw}{dt})_{max}$. Motor s manjom inercijom stoga mora proizvesti manji zakretni moment za isto ubrzanje.

Izračun momenta ubrzanja i momenta kočenja temelji se na sljedećim jednadžbama [35]:

gdje je:

$$T_{acc} = T_{zupčanika} + T_{tr} + J_{motor} \left(\frac{dw}{dt} \right)_{max} \quad (4-1)$$

$$T_{acc} = T_{zupčanika} - T_{tr} + J_{motor} \left(\frac{dw}{dt} \right)_{max} \quad (4-2)$$

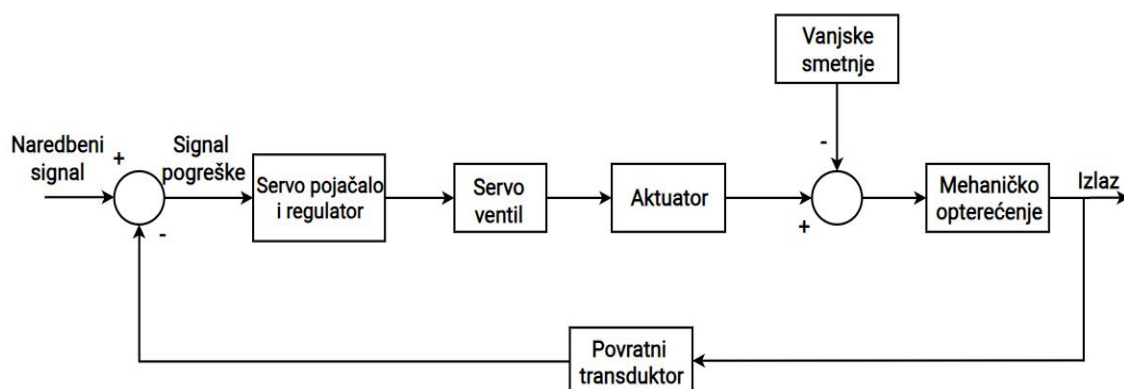
gdje je:

- T_{acc} — moment ubrzanja,
- T_{dec} — moment kočenja,
- $T_{zupčanika}$ — maksimalni moment koji zupčanik može prenijeti,
- T_{tr} — moment trenja,
- J_{motor} — inercija motora.

4.2.2. Elektro-hidraulički servo pogon

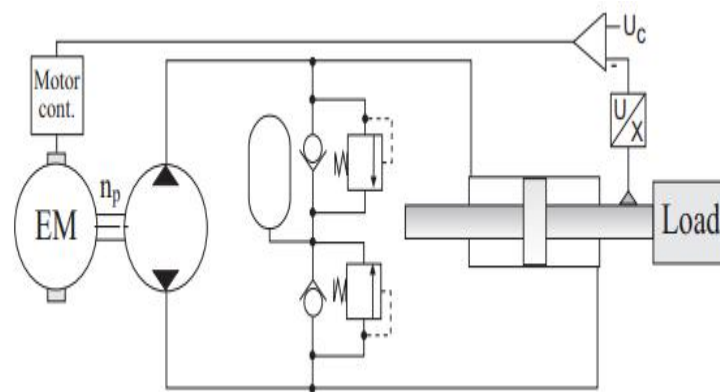
Hidraulički sustavi pogonjeni servo ventilima pružaju visoko preciznu kontrolu nad ogromnim silama. Većinom se koriste kao sustavi za pozicioniranje, gdje im je osnovni cilj pomicanje hidrauličkog aktuatora u željeni položaj i njegovo zaustavljanje.

Osnovni elementi elektro-hidrauličkog servo pogona su prikazani na slici 4.7. Izlaz iz sustava mjeri se pomoću senzorskog uređaja, transduktora, koji ga pretvara u električni signal. Ovaj povratni signal uspoređuje se s naredbenim signalom. Rezultantni signal pogreške zatim se pojačava regulatorom i električnim pojačalom te se koristi kao ulazni kontrolni signal za servo ventil. Servo ventil kontrolira protok tekućine prema aktuatoru proporcionalno struji pogona iz pojačala. Aktuator potom pokreće opterećenje. Tako, promjena naredbenog signala generira signal pogreške, koji uzrokuje kretanje opterećenja u pokušaju da se signal pogreške svede na nulu. Ako je pojačanje iz pojačala visoko, izlaz će se brzo i precizno prilagoditi naredbenom signalu.



Slika 4.7. Komponente u elektro-hidrauličkom servomehanizmu [37]

Ovakvi sustavi, zahvaljujući hidrauličkim aktuatorima, omogućuju brzu reakciju, visoku snagu, preciznu kontrolu pozicije i brzine te imaju odlične karakteristike krutosti. Dodatno, hidraulički pogoni nude nekoliko prednosti u odnosu na električne motore, poput višeg odnosa snage i težine, veće krutosti, boljeg frekvencijskog odziva, glađeg rada pri niskim brzinama. U primjenama gdje je smanjenje težine ključno, poput zrakoplovnih sustava, koristi se elektrohidraulički aktuator (EHA) s kontrolom električnog motora (Slika 4.8.), dok tradicionalniji sustavi koriste kontrolu pomoću pumpe ili ventila. Sustavi s kontrolom brzine pumpe obično pokazuju bolju ukupnu učinkovitost, ali zahtijevaju posebne dizajne pumpe zbog izazova s pulsacijama protoka pri niskim brzinama, što se može uspješno riješiti primjenom koncepta unutarnjeg zupčanika [37].



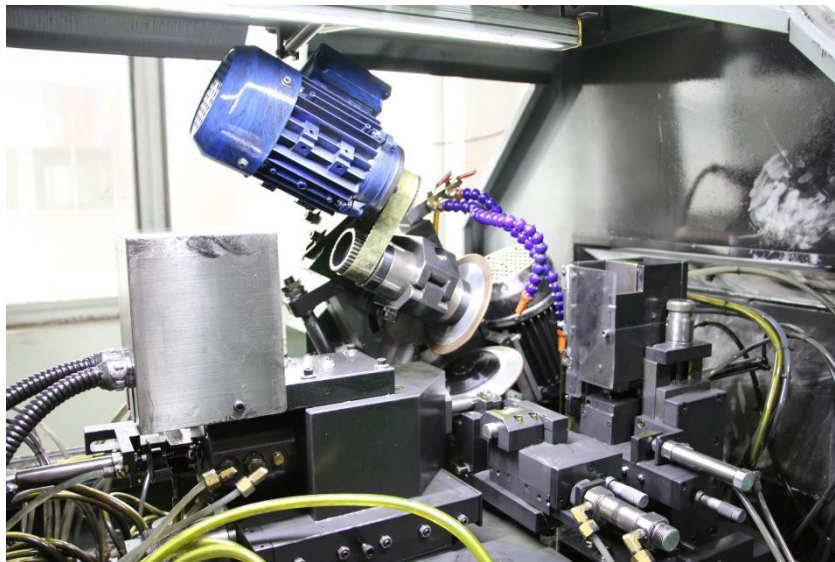
Slika 4.8. Elektrohidraulički aktuator s kontrolom električnog motora [37]

4.2.3. CNC alatni strojevi

Servo sustav posmaka alatnih strojeva (Slika 4.9.) definira se kao upravljački sustav čija je svrha omogućiti da položaj i brzina radnog stroja slijede naredbe iz jedinice za numeričko upravljanje. Servo sustav uspoređuje stvarni signal položaja koristeći povratne informacije senzora s željenim informacijama iz naredbe, a zatim pokreće pogonske jedinice kako bi se radni stol pomaknuo u smjeru smanjenja pogrešaka s ciljem postizanja preciznijeg obratka u pogledu dimenzija. Stoga je dizajn servo regulatora ključan za visoku izvedbu alatnih strojeva. Dizajn sustava upravljanja visokih performansi za posmak zahtijeva točno poznavanje dinamike osi [38].

Ako se dublje prouči dizajn, iako su danas dostupne mnoge suvremene tehnike dizajna upravljanja, većina dizajna servo sustava alatnih strojeva još uvijek se temelji na dobro poznatoj PID arhitekturi upravljanja, uzimajući u obzir osjetljivije faktore za eliminaciju utjecaja zračnosti, trenja i slično. Povratni regulatori moraju biti dizajnirani tako da nametnu isti odziv zatvorene petlje na svim osima, kako bi se izbjegle konturirane pogreške u linearnom kretanju.

U praksi, servo sustavi omogućuju precizno upravljanje kutnim i linearnim pomacima u realnom vremenu, što je od ključne važnosti za proizvodnju složenih dijelova i komponenti. Na primjer, u strojevima za tokarenje, servo sustavi omogućuju točno usklađivanje alata s rotirajućim obratkom, što rezultira visokom kvalitetom površine. Također, servo sustavi omogućuju dinamičko prilagođavanje brzine i momenta tijekom obrade, što je ključno za rad s različitim materijalima i složenim oblicima.



Slika 4.9. Servo sustav za CNC stroj [38]

Posebne prednosti servo motora u CNC obradi uključuju simultanu kontrolu više osi, što omogućuje složene i usklađene operacije. Integracija mehanizma povratne veze omogućava detekciju neuobičajenih pokreta, osiguravajući precizno pridržavanje ulaznih naredbi. Također, servo motori omogućuju dosljednu i ravnomjernu izvedbu zadataka kao što su okretanje, rezanje i obrezivanje, čime se jamče pouzdani rezultati [39].

5. ZAKLJUČAK

Na temelju provedenog istraživanja servopogona, može se zaključiti da su oni ključni elementi u modernim industrijskim sustavima zbog svoje sposobnosti da osiguraju visoku preciznost, pouzdanost i fleksibilnost u upravljanju različitim mehaničkim sustavima. U radu su obuhvaćeni ključni aspekti servopogona, uključujući servo motore, senzore i upravljačke algoritme, pri čemu su istaknute njihove funkcije i međusobna interakcija u postizanju optimalnih performansi sustava. Rezultati istraživanja pokazuju da su senzori od vitalnog značaja za prikupljanje preciznih podataka o položaju, brzini i sili, što omogućava sustavu da se prilagodi promjenama u stvarnom vremenu i osigura stabilan rad. Osim toga, naglašena je uloga industrijskih računala, koja, kao središnji dio upravljačke arhitekture, omogućuju obradu velikih količina podataka u stvarnom vremenu, što je ključno za brzo i precizno upravljanje sustavima. Njihova povezanost s naprednim sensorima i motorima omogućava visoku razinu automatizacije i optimizacije proizvodnih procesa. Također, valja istaknuti da razvoj naprednih servopogona i njihova integracija s industrijskim računalima pridonose širenju koncepta kao što su pametne tvornice i industrija 4.0. Ova sinergija između hardverskih komponenti i softverskih rješenja otvara nove mogućnosti za prilagodbu proizvodnih sustava, omogućujući industrijama da brzo odgovore na promjenjive zahtjeve tržišta. U budućnosti će daljnji razvoj servopogona i industrijskih računala biti ključan za unaprjeđenje automatizacije, smanjenje energetske potrošnje, te povećanje sigurnosti i održivosti u industrijskim postrojenjima. U konačnici, ovakvi sustavi predstavljaju temelj modernih proizvodnih linija i imaju presudnu ulogu u povećanju globalne konkurentnosti i tehnološkog napretka industrije.

LITERATURA

- [1] DSL Industrial Computing, *What is an industrial PC ?* [online], DSL Industrial Computing, 2024, dostupno na: <https://www.dsl-industrialcomputing.co.uk/what-is-an-industrial-pc/> [8.7.2024]
- [2] P., Zhang, *Advanced Industrial Control Technology*, Elsevier Inc., Oxford, 2010.
- [3] Rockwell Automation, *Industrial Computers* [online], Rockwell Automation, 2024, dostupno na: <https://www.rockwellautomation.com/en-us/products/hardware/allen-bradley/industrial-computers-monitors/industrial-computers.html> [8.7.2024.]
- [4] Contec, *What Is a Motherboard?* [online], Contec, 2023, dostupno na: https://www.contec.com/support/blog/2023/230802_motherboard/#anc-01 [8.7.2024.]
- [5] AAEON, *Industrial Motherboards ATX H310A* [online], AAEON, 2024, dostupno na: <https://www.aaeon.com/en/p/industrial-motherboards-atx-h310a> [9.7.2024.]
- [6] Rowse, *What Are Single Board Computers?* [online], Rowse, 2024, dostupno na: <https://www.rowse.co.uk/blog/post/what-are-single-board-computers> [9.7.2024.]
- [7] GateWorks, *GW7200 Rugged Industrial Single Board Computer* [online], GateWorks, 2024, dostupno na: <https://www.gateworks.com/products/industrial-single-board-computers/imx8-single-board-computers-gateworks-venice/gw7200-rugged-industrial-single-board-computer/> [9.7.2024.]
- [8] WinSystems, *What is an Industrial Embedded Computer?* [online], WinSystems, 2024, dostupno na: <https://winsystems.com/what-is-an-industrial-embedded-computer/> [10.7.2024.]
- [9] K., Kant, *Computer-based industrial control*, 2 edition, PHI Learning, New Delhi, 2010.
- [10] ACD Group, *Industrial Computer Workstations* [online], ACD Group, 2024, dostupno na: <https://www.acd-group.com/industrial-computer-workstations/> [10.7.2024.]
- [11] Geshem Technology, *8U Rackmount PC* [online], Geshem Technology, 2024, dostupno na: <https://www.geshemtech.com/products/8u-rackmount-pc/> [11.7.2024.]
- [12] Irontech Group, *Industrial Panel PC* [online], Irontech Group, 2023, dostupno na: <https://irontech-group.com/en/industrial-panel-pc/> [11.7.2024.]
- [13] V., Ambrožič, P., Zajec, *Električni servo pogoni*, Graphis, Zagreb, 2019.

- [14] Kollmorgen, *What are the basic elements of a servo system?* [online], Kollmorgen, 2023, dostupno na: <https://www.kollmorgen.com/en-us/blogs/what-are-basic-elements-servo-system> [15.07.2024.]
- [15] StepperOnline, *What is a Servo System - Brief Introduction* [online], Medium, 2023, dostupno na: <https://medium.com/@m.stepperonline/what-is-a-servo-system-brief-introduction-19c055b68709> [15.07.2024]
- [16] ESA Automation, *What is a Servo Drive and How Does It Work?* [online], ESA Automation, 2024, dostupno na: <https://www.esa-automation.com/en/what-is-a-servo-drive-and-how-does-it-work/> [16.7.2024.]
- [17] OMC-Stepperonline, *Servo Motor* [online], OMC-Stepperonline, 2024, dostupno na: <https://www.omc-stepp4eronline.com/servo-motor> [17.7.2024.]
- [18] Advanced Motion Controls, *What is Servomechanism: Servo System Definition, History, Components & Applications* [online], Advanced Motion Controls, Camarillo, 2024, dostupno na: <https://www.a-m-c.com/servomechanism/> [17.07.2024.]
- [19] ElProCus, *DC Servo Motor: Construction, Working, Interface with Arduino & Its Applications* [online], ElProCus, 2024, dostupno na: <https://www.elprocus.com/dc-servo-motor/> [17.7.2024.]
- [20] Tutorials Point, *Introduction to Induction Motor* [online], Tutorials Point, 2024, dostupno na: https://www.tutorialspoint.com/electrical_machines/electrical_machines_introduction_to_induction_motor.htm [17.7.2024.]
- [21] G. C., Onwubolu, *Mechatronics: Principles and Applications*, Elsevier / Butterworth-Heinemann, Oxford, 2005.
- [22] Analog IC Tips, *Rotary Encoders Part 1: Optical Encoders* [online], Analog IC Tips, 2024, dostupno na: <https://www.analogictips.com/rotary-encoders-part-1-optical-encoders/> [22.7.2024.]
- [23] Motion Control Tips, *FAQ: What are Hall-Effect Sensors and What is Their Role in DC Motors?* [online], Motion Control Tips, 2024, dostupno na: <https://www.motioncontroltips.com/faq-what-are-hall-effect-sensors-and-what-is-their-role-in-dc-motors/> [18.7.2024.]
- [24] Servo Motors Adjust, *What is a resolver and how does it work?* [online], Servo Motors Adjust, 2024, dostupno na: <https://www.servomotorsadjust.com/en/resolver/> [22.7.2024.]

- [25] Advanced Motion Controls, Resolver [online], Advanced Motion Controls, 2024, dostupno na: <https://www.a-m-c.com/experience/technologies/other-feedback/resolver/> [23.7.2024.].
- [26] Motion Control Tips, FAQ: How to Tune Servo Systems for High Dynamic Response [online], Motion Control Tips, 21. lipnja 2016, dostupno na: <https://www.motioncontroltips.com/faq-tune-servo-system-high-dynamic-response/> [14.08.2024.]
- [27] Automation.com, Fundamentals of Servo Motion Control [online], Automation.com, 2003, dostupno na: <https://www.automation.com/en-us/articles/2003-1/fundamentals-of-servo-motion-control> [14.08.2024.]
- [28] A., Chennakesava R., *Fuzzy logic and neural networks basic concepts and application*, New Age International (P) Limited, Publishers, New Delhi, 2009.
- [29] C. Dumitrescu, P. Ciotirnae, C. Vizitiu, *Fuzzy Logic for Intelligent Control System Using Soft Computing Applications* [online], ResearchGate, dostupno na: https://www.researchgate.net/publication/350762704_Fuzzy_Logic_for_Intelligent_Control_System_Using_Soft_Computing_Applications [12.8.2024.]
- [30] Monolithic Power Systems, *Model Predictive Control (MPC) in Power Electronic Systems* [online], Monolithic Power Systems, 2024, dostupno na : https://www.monolithicpower.com/en/learning/mpscholar/power-electronics/control-of-power-electronic-systems/model-predictive-control-mpc?srsId=AfmBOoot7pRX8UxDA3CM7_EVVYKsxTfanYmF7ltEYGkAdpR70ewwaJOI [13.8.2024.]
- [31] T. Aung, "Servo Motor Control System Based On Model Predictive Controller (MPC)", IRE Journals, sv. 3, br. 2, str. 572-576, kolovoz 2019.
- [32] AMC, What is Servo Control: Definition of Servo Controller, Benefits & Applications [online], AMC, 12. lipnja 2024, dostupno na: <https://www.a-m-c.com/servo-control/> [13.08.2024.]
- [33] Y. Qiao, T. Zhao, X. Gui, "Overview of Position Servo Control Technology and Development of Voice Coil Motor", CES Transactions on Electrical Machines and Systems, sv. 6, br. 3, str. 269-278, rujan 2022

- [34] B. Pillai, K. T. Nair, "*Intelligent Adaptive Controller for DC Servo Motor Position Control in LabVIEW*," Zbornik radova sa 2017 International Conference on Intelligent Computing, Instrumentation and Control Technologies (ICICICT), str. 981-985, srpanj 2017
- [35] S. Andersson, *Optimization of a Servo Motor for an Industrial Robot Application*, Lund Institute of Technology, Lund, 2000.
- [36] Höchsmann, *ABB IRB 4400* [online], Höchsmann, 2023, dostupno na: https://www.hoechsmann.com/en/article/12351/abb_irb_4400 [16.08.2024.]
- [37] K. E. Rydberg , *Hydraulic servo systems* [online],2008, https://web.fs.uni-lj.si/lasim/uploads/Predmeti/PiPS_Erasmus/Hydraulic%20Servo%20Systems%20%E2%80%93%20Theory%20and%20Applications.pdf [16.08.2024.]
- [38] Veichi, *Servo System for CNC Machine* [online], Veichi, 2019, dostupno na: <https://www.veichi.com/knowledge/talking-about-the-cnc-lathe-servo-system.html> [19.08.2024]
- [39] Karkhana.io, *Usage of Servo motors in Robotics and CNC machining* [online], Karkhana.io, dostupno na: <https://karkhana.io/servo-motor-robotics/> [19.08.2024]

SAŽETAK

Ovaj rad analizira značaj servopogona u modernim industrijskim sustavima i njihovu interakciju s industrijskim računalima. Servopogoni, koji se sastoje od servo motora, senzora i upravljačkih algoritama, igraju ključnu ulogu u preciznom upravljanju brzinom i momentom u različitim industrijskim primjenama. Servo motori, sa svojim sposobnostima za točno podešavanje brzine i momenta, omogućuju visoku razinu kontrole, dok senzori pružaju neophodne informacije o položaju, brzini i sili, što je ključno za prilagodbu i stabilnost sustava u stvarnom vremenu. Upravljački algoritmi, uključujući PID kontrolu i druge napredne metode, poboljšavaju učinkovitost i preciznost sustava. Industrijska računala su dizajnirana za rad u zahtjevnim okruženjima, gdje moraju izdržati visoke temperature, udarce i elektromagnetske smetnje. Za razliku od kućnih računala, koja su namijenjena za manju obradu podataka, industrijska računala omogućavaju obradu velikih količina podataka, veću pohranu i robusna HMI-sučelja. Podijeljena su na nekoliko glavnih tipova: industrijske matične ploče, single-board računala, industrijska ugrađena računala, te industrijska osobna računala i radne stanice.

Ključne riječi: industrijska računala, servo sustav, upravljanje, servo motor, servopogon

ABSTRACT

Servo motion controllers in industrial systems

This paper analyzes the significance of servo system in modern industrial systems and their interaction with industrial computers. Servo system, consisting of servo motors, sensors, and control algorithms, play a crucial role in precise speed and torque control across various industrial applications. Servo motors, with their ability to finely adjust speed and torque, enable a high level of control, while sensors provide essential data on position, speed, and force, which is critical for system adaptation and stability in real-time. Control algorithms, including PID control and other advanced methods, enhance the efficiency and precision of the system. Industrial computers are designed to operate in demanding environments, where they must withstand high temperatures, impacts, and electromagnetic interference. Unlike personal computers, which are intended for less intensive data processing tasks, industrial computers facilitate the handling of large data volumes, offer increased storage capacity, and feature robust HMI interfaces. They are categorized into several main types: industrial motherboards, single-board computers, embedded industrial computers, and industrial personal computers and workstations.

Keywords: industrial computers, servo systems, control, servo motor, servo drive