

# Simulacija servo-pneumatskog sustava za pozicioniranje

---

**Kršanović, Luka**

**Undergraduate thesis / Završni rad**

**2021**

*Degree Grantor / Ustanova koja je dodijelila akademski / stručni stupanj:* **Istrian University of applied sciences / Istarsko veleučilište - Università Istriana di scienze applicate**

*Permanent link / Trajna poveznica:* <https://um.nsk.hr/um:nbn:hr:212:658733>

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

*Download date / Datum preuzimanja:* **2025-03-26**



*Repository / Repozitorij:*

[Digital repository of Istrian University of applied sciences](#)





**Istarsko veleučilište**  
Università Istriana  
di scienze applicate

**PREDDIPLOMSKI STRUČNI STUDIJ POLITEHNIKE**

**SIMULACIJA SERVO-PNEUMATSKOG SUSTAVA ZA POZICIONIRANJE**  
**ZAVRŠNI RAD**

Predmet: Osnove automatskog upravljanja

Mentor: doc.dr.sc. Goran Gregov

Student: Luka Kršanović

**PULA, RUJAN 2021.**

## SADRŽAJ

1. SAŽETAK .....	4
2. UVOD .....	4
3. CILJEVI RADA.....	5
4. OSNOVNI POJMOVI AUTOMATIZACIJE.....	6
4.1. Osnovni regulacijski krug .....	7
4.2. Sustavi automatske regulacije (SAR) i sustavi automatskog upravljanja (SAU) .....	9
4.2.1. Sustav upravljanja otvorenom petljom- automatsko upravljanje .....	9
4.2.1.1. Upravljanje .....	10
4.2.1.2. Unaprijedno upravljanje .....	11
4.2.2. Sustav regulacije zatvorenom petljom- automatska regulacija .....	11
5. PID REGULATOR.....	14
5.1. Povijest PID regulatora .....	14
5.2. Upotreba PID regulatora .....	14
5.3. PID regulator blok dijagram.....	15
6. PID REGULATOR TEORIJA.....	19
6.1. Proporcionalno djelovanje .....	21
6.2. Integralno djelovanje.....	22
6.3. Derivacijsko djelovanje.....	23
6.4. Način podešavanja parametara PID regulatora .....	25
7. PREGLED METODA PODEŠAVANJA.....	26
7.1. Metoda otvorene petlje.....	27
7.2. Ziegler-Nichols metoda podešavanja u otvorenoj petlji .....	27
7.3. Cohen-Coon metoda podešavanja .....	30
7.4. Ziegler-Nichols metoda podešavanja u zatvorenoj petlji.....	32
7.5. Softverske metode podešavanja .....	34
8. PNEUMATSKI SUSTAVI.....	35
9. GLAVNE PNEUMATSKE KOMPONENTE.....	36
9.1. Komponente koje proizvode i distribuiraju stlačeni zrak.....	37
9.1.1. Kompresor .....	37
9.1.2. Komponenta za pripremu zraka.....	37
9.2. Pneumatski aktuatori .....	38
9.2.1. Jednoradni cilindar .....	38

9.2.2. Dvoradni cilindri.....	39
9.2.3. Razvodni ventili.....	40
9.3. Osnovni principi i odnos cilindar-ventil.....	41
9.3.1. Energetski sklop s jednoradnim cilindrom .....	42
9.3.2. Energetski sklop s dvoradnim cilindrom .....	43
9.3.3. Upravljački dio .....	44
10. PRORAČUN CILINDAR VENTIL .....	45
11. PID UPRAVLJANJE SUSTAVOM ZA POZICIONIRANJE.....	47
12. PODEŠAVANJE PARAMETRA POMOĆU ZIEGLER-NICHOLS METODE .....	54
13. ZAKLJUČAK.....	60
14. LITERATURA .....	61
15. IZVOR SLIKA.....	62
16. POPIS SLIKA I TABLICA .....	66

## 1. SAŽETAK

Ovaj rad bavi se izradom simulacijskog modela servo-pneumatskog sustava za pozicioniranje. U radu je obrađena tematika automatskog upravljanja, PID regulacije i proračuna pneumatskog sustava cilindar- ventil. Nadalje je izrađen simulacijskog model servo-pneumatskog sustava za pozicioniranje.

## 2. UVOD

Automatsko upravljanje je znanost o stanju ili promjenama nekog sustava bez obzira na djelovanje smetnje.

Kako navodi Vrhovski (2013.) ono zahtjeva dobro poznavanje matematike, signala i sustava, fizike i drugih tehničkih nauka. Sustavi koji su automatski upravljani služe za realizaciju željene radnje bez prisustva čovjeka. Kao što je premještanje ruke robota iz jednog mjesta na drugi, regulacija temperature u prostoriji, itd. Upravljanje sustavima donosi mnoge prednosti, a neke od njih su: kvalitetniji proizvodi, smanjeni trošci energije, smanjena emisija štetnih plinova, veća sigurnost osoblja, itd. Osnovni razlozi za uvođenje regulacije općenito su gospodarski usmjereni, ali također mnogi su sustavi previše kompleksni ili komplicirani tako da čovjek više nije u stanju pratiti i kontrolirati njima. Također veliki dio sustava je previše opasan po život, zato je automatizacija opasnih postrojenja i više nego potrebna kako bi se osiguralo zdravlje radnika.

„PID regulator ima sva neophodna dinamička ponašanja za potrebe kvalitetne regulacije: brzu reakciju na naglu promjenu pogreške (P dio), povećanje upravljačkog signala kako bi se smanjila pogreška u stacionarnom stanju (I dio), te odgovarajući energetska sadržaj unutar određenog područja regulacijskog odstupanja, kako bi se eliminirale vlastite oscilacije (D dio).“ (Kućiš, 2011, str. 17)

PID regulatori su se našli u širokoj primjeni u procesnoj industriji zbog njihove jednostavne konstrukcije i implementacije u praksi. Zbog toga su u praktičnoj upotrebi u velikoj prednosti u usporedbi sa sadašnjim rješenjima regulatora, samo u slučajevima gdje rezultati prikazu da nisu u mogućnosti zadovoljiti zadane zahtjeve.

### **3. CILJEVI RADA**

Obraditi temu automatskog upravljanja i PID regulatora.

Proračunati pneumatski sustav cilindra-ventil.

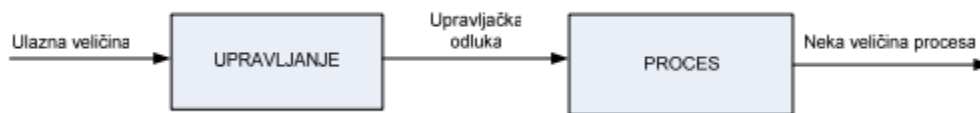
Izraditi simulacijski model pneumatskog sustava za pozicioniranje pneumatskog cilindra.

#### 4. OSNOVNI POJMOVI AUTOMATIZACIJE

**Automatizacija** je znanost koja opisuje širok raspon tehnologija koje smanjuju ljudsko sudjelovanje u procesima. Ljudska se uključenost smanjuje unaprijed određenim kriterijima odlučivanja, odnosima pod procesa i povezanim radnjama- tako što se ova predodređenja utjelovljuju u strojeve.

„**Upravljanje** je postupak pri kojem jedna ili više ulaznih veličina utječu na jednu ili više izlaznih veličina nekog procesa prema zakonitostima svojstvenim upravljanoj procesu.“ (Petrić, 2012, str. 5)

Kako navodi Petrić (2012.) upravljanje se odvija u „otvorenoj petlji“ (open loop control). To implicira da se razlikuje od regulacije, ne posjeduje povratne informacije u kontroli za usporedbu željene i stvarne vrijednosti, te proces se neće voditi na temelju njihovih razlika. Tako da nema sposobnost ispravljanja odluka na temelju promatranja napretka procesa.



*Slika 1. Upravljanje ili otvoreni krug*

(Petrić, 2012)

**Vođenje** procesa je izraz koji u sebi sadržava i upravljanje i regulaciju. Povezan je za upravljanje i regulaciju mnogo kompleksnijih sustava preko računala. Kako je suvremena tehnologija čini relativno jednostavnom, tako ona postaje sve složenija. Uobičajene su različite kombinacije upravljanja, nadzora i dosta raznovrsnih naprednih sustava upravljanja i reguliranja na temelju računalnih algoritama. Zbog toga su imena poput vođenja vrlo popularna.

U automatizaciji vrlo redoviti pojmovi su signali, sustavi i procesi:

„**Signal** je funkcija koja opisuje vremensku promjenu fizičke veličine nekog fizičkog procesa. Ili još kraće, signal je fizička veličina koja se mijenja s vremenom.“ (Petrić, 2012, str. 6)

„**Sustav** na zadanu pobudu, ili signal ulaza, generira odziv, ili signal izlaza.“ (Petrić, 2012, str. 6). Znači, sustav se može gledati i kao uzročno-posljedičnom vezom koja se nalazi među dva ili više signala. Isto tako, sustav je skup elemenata spojenih veza koje djeluju jedna na drugu.

Signal u nekom sustavu koji je prepoznat po uzroku nekih promjena zove se ulaz ili pobuda, a signal u nekom sustavu koji je prepoznat kao posljedica zove se izlaz ili odziv. Sustav u većini slučaja prikazuje fizički proces, međusobnu vezu uređaja ili uređaj.

„Sustavi se prikazuju **blok-dijagramima**, gdje pravokutni ili kvadratni okvir predstavlja sustav, strijelica koja ulazi u okvir predstavlja ulazni signal, dok strelica koja izlazi iz okvira predstavlja izlazni signal.“ (Petrić, 2012, str. 6)

Proučavanje kako se odnose ulaz i izlaz međusobno, odnosno njihove uzroke i posljedice, temeljni je dio proučavanja teorije sustava i automatske regulacije.

„**Proces** je općenito skup aktivnosti kojima se ulazni elementi transformiraju u izlazne elemente sa specifičnim svojstvima, a sama transformacija određena je parametrima i ograničenjima.“ (Petrić, 2012, str. 6)

#### **4.1. Osnovni regulacijski krug**

Kako navodi Petrić (2012.) grafički simboli blok dijagrama koriste se za prikaz sustava automatske regulacije, odnosno cijele automatizacije. Prikaz sustava pomoću blok dijagrama koristi se za matematičku analizu tog sustava. Blok dijagram služi za pokazivanje sustava na slikovit način, tako što se pojedini elementi ili dijelovi sustava povezuju međusobno. Razlikujemo dvije vrste blok dijagrama: funkcionalni i strukturni. Ako je riječ o funkcionalnom dijagramu on je vrlo jednostavan gdje se mogu prikazati funkcionalni odnosi između elemenata



sustava, bez upotrebe složenih matematičkih pravila. Kod strukturnih blok dijagrama prikazuju se prijenosne funkcije dijelova sustava, gdje se tijekom signala označava pripadnom varijablom, te cijeli dijagram predstavlja model sustava.

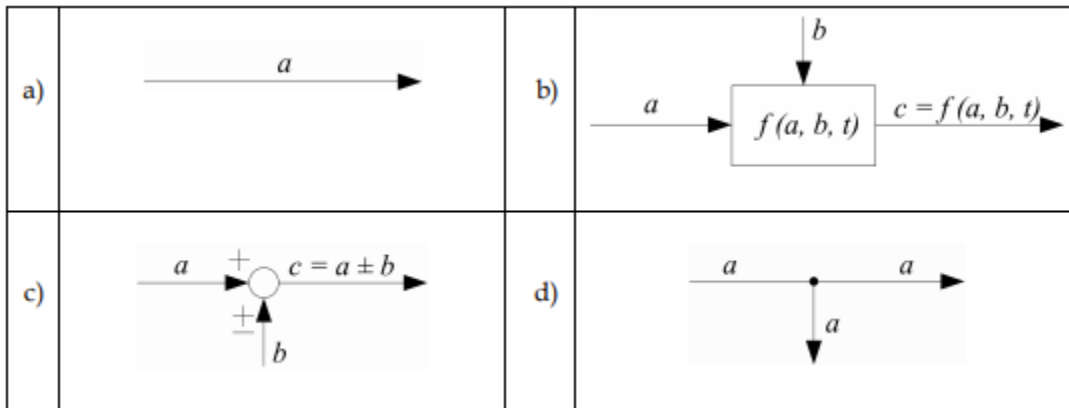
„Četiri su osnovna simbola sačinjavaju blok dijagram. To su:

a) strjelica, predstavlja signal, fizikalnu veličinu koja se mijenja s vremenom u naznačenom smjeru.

b) blok, predstavlja funkcionalni odnos između signala koji ulaze u blok (uzroka) i signala koji iz bloka izlaze (posljedica). Signali koji ulaze u blok su ulazi (ili ulazne varijable, pobude), dok su signali koji izlaze iz bloka izlazi (izlazne varijable, odzivi);

c) krug, predstavlja točku zbrajanja ili komparator;

d) čvorište, predstavlja točku račvanja signala (signal je jednak u svakom ogranku).“ (Petrić, 2012, str. 19)



Slika 2. Osnovni simboli koji sačinjavaju blok dijagram

(Petrić, 2012)

## **4.2. Sustavi automatske regulacije (SAR) i sustavi automatskog upravljanja (SAU)**

Kako navode Tomas, Šegulja i Valčić (2010.) automatsko reguliranje započinje s početkom automatizacije gdje su se koristili prvi regulatori i automatski uređaji koji su u to vrijeme bili jednostavni elementi i koji su mogli služiti samo za jedan dio automatizacije. „Automatsko reguliranje znači automatsko održavanje konstantne vrijednosti neke fizikalne veličine ili njezino mijenjanje po unaprijed određenom programu. Fizikalna veličina koju reguliramo zove se regulirana veličina, a uređaj pomoću kojega vršimo automatsku regulaciju- regulator.“ (Tomas i drugi, 2010, str. 3) Jedan sustav automatskog reguliranja čine objekt regulacije, mjerni član, usporednik (komparator), regulator i izvršni član.

„Postoje dva tipa automatskih sustava:

-sustav upravljanja otvorenom petljom, kraće- automatsko upravljanje

-sustav upravljanja zatvorenom petljom, kraće- automatsko reguliranje“ (Tomas i drugi, 2010, str. 3)

Automatsko upravljanje (vođenje procesa) započinje s početkom složene automatizacije gdje se raspolaže složenim procesima i postrojenjima. Automatsko vođenje procesa se sastoji od više automatskih sustava bili oni sustavi upravljanja i/ili reguliranja i složenih algoritama, koje se postiže pomoću uporabe računala, točnije računalnih sustava. Sve algoritamske potrebe, kao što su nadređene funkcije vođenja procesa, obavljaju računala.

### **4.2.1. Sustav upravljanja otvorenom petljom- automatsko upravljanje**

Kako navode Tomas i drugi (2010.) automatsko upravljanje ili sustavi s otvorenom petljom nazivaju se tako zbog toga što izlazna veličina se mijenja po prije određenim veličinama i ne uspoređuje se sa zahtjevima sustava ili referentnom veličinom. Sustavi otvorene petlje koriste se u automatskog signalizaciji, blokadi, zaštiti i drugo zbog toga što su ti sustavi vrlo jednostavni i

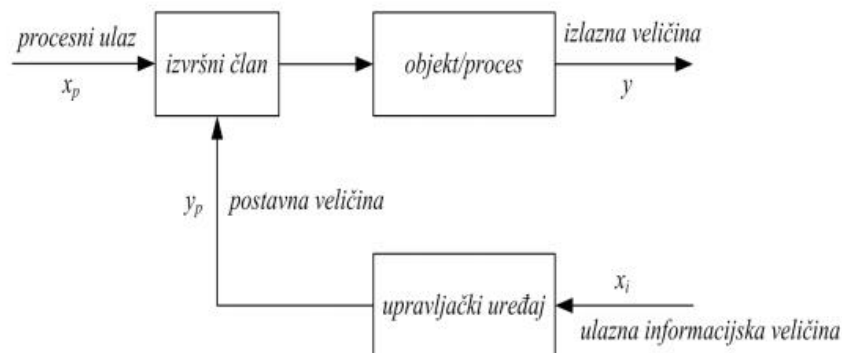
ne zahtijevaju veliku točnosti i nemaju velike i česte poremećaje ili oscilacije. Također, podrazumijeva se da smjer signala uvijek ide u jednom smjeru.

„Razlikujemo dva oblika sustava s otvorenom petljom:

1. Upravljanje
2. Upravljanje u unaprijednoj vezi“ (Tomas i drugi, 2010, str. 4)

#### 4.2.1.1. Upravljanje

„Upravljački uređaj/sustav prima isključivo ulaznu informacijsku veličinu  $x_i$  iz okoline, a nema informaciju o stanju ulazne procesne  $x_p$  niti izlazne veličine  $y$ .“ (Tomas i drugi, 2010, str. 4). Kako navode Tomas i drugi (2010.) svi poremećaji koji djeluju na sustav bili oni vanjski čimbenici ili poremećaju koji su nastali u određenom procesu, ne dolaze kao informacija do upravljačkog uređaja. Mijenjanje veličine upravljačkog uređaja je jedino moguće promjenom algoritama koji se upisuju u njega.

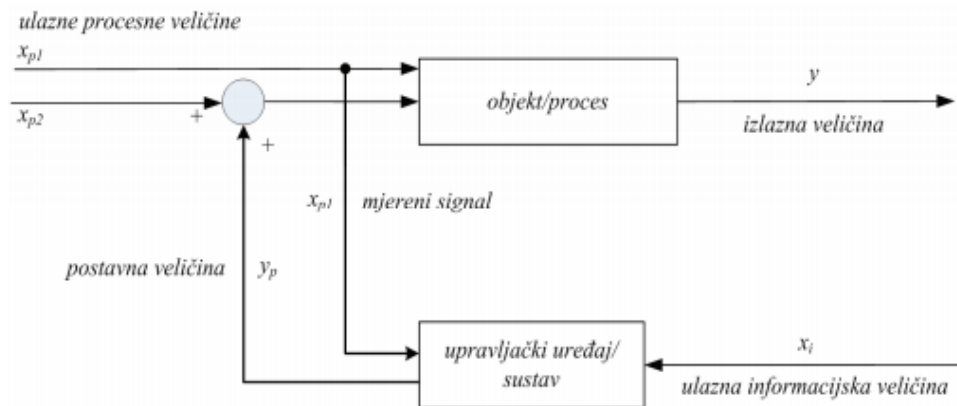


Slika 3. Blok dijagram upravljanja

(Tomas i drugi, 2010)

### 4.2.1.2. Unaprijedno upravljanje

Kako navode Tomas i drugi (2010.) Unaprijedno upravljanje ima zadaću mjerenja poremećaja koji se događa u ulazu procesne veličine. Znači, upravljački uređaj mora kompenzirati mjereni poremećaj ulazne procesne veličine.



Slika 4. Blok dijagram unaprijednog upravljanja

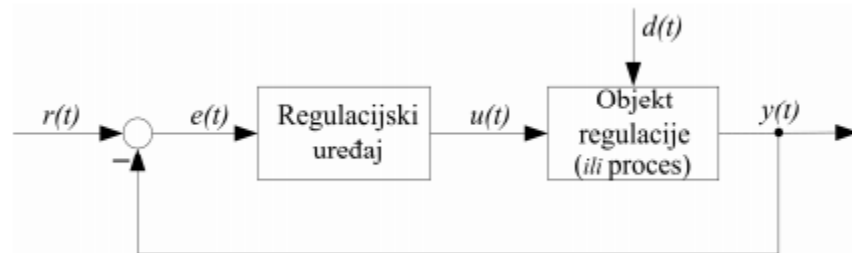
(Tomas i drugi, 2010)

### 4.2.2. Sustav regulacije zatvorenom petljom- automatska regulacija

Sustav upravljanja s otvorenom petljom nije uvijek najprikladniji, zbog nedostatka povratne veze vanjsko djelovanje (poremećajno djelovanje) može imati veliki utjecaj na sustav. U slučaju da su te smetnje varijabilne te ih nije moguće predvidjeti, nastaju velike greške i odstupanja, te dolazi do narušavanja kvalitete regulacije do točke gdje sustav postaje nefunkcionalan.

Kako navode Tomas i drugi (2010.) ako sustav s otvorenom petljom ne ispunjava zahtjeve, treba izmjeriti izlaznu veličinu, te zatim je potrebno usporediti izmjerenu veličinu s željenom. Ishod ove usporedbe naziva se regulacijsko odstupanje  $\varepsilon$ . Ako je potrebno napraviti promjenu, onda to izvršava regulacijski uređaj ( vremenski član) tako što zadaje postavljenu veličinu izvršnom

članu koji onda mijenja količinu energije/materija koja zatim ulazi u objekt. Ta radnja se konstanto ponavlja sve dok izmjerena veličina ne bude ista s željenom veličinom pomoću proračuna za određivanje smjera i stupnja korekcije.



Slika 5. Osnovni blok dijagram automatske regulacije

(Petrić, 2012)

Kako navode Tomas i drugi (2010.) Veličine automatske regulacije ovog blok dijagrama su:

$r(t)$  – referentna veličina, ili referencija

$y(t)$  – regulirana veličina

$e(t)$  – regulacijsko odstupanje, ili regulacijska pogreška

$u(t)$  – postavna veličina

$d(t)$  – poremećajna veličina

Izmjene koje je potrebno napraviti da bi se otvoreni sustav, znači sustav bez povratne veze, pretvorio u zatvoreni sustav, sustav koji ima povratnu vezu su sljedeće:

1. Prvo treba izmjeriti izlaznu veličinu, te ukoliko je neophodno razraditi dobiveni signal. Mjernim članom mjeri se željena veličina. Mjerni se član sastoji od mjernog osjetila, mjernog pretvornika, signalnog pretvornika, mjernog pojačala i sklopa za prilagodbu signala zbog prijenosa na daljinu. Kako bi odstupanje bilo što manje preporuča se mjerenje odraditi što bliže izlaznoj veličini .
2. Dalje slijedi usporedba signala referentne (željene) vrijednosti kojeg je oblikovao davač referentne vrijednosti  $y_r$  s izlaznim signalom  $y_m$  iz mjernog člana. Komparaciju obavlja usporednik (komparator) koji kao izlaznu veličinu daje regulacijsko odstupanje  $\varepsilon$ .
3. Signal odstupanja razrađuje se u "vremenskom korekcijskom članu" regulatora na način da je moguće djelovati na tok energije/materije koja prolazi kroz objekt upravljanja, te ostvariti željenu veličinu. Obradivanje signala potrebno je izvršiti što brže, preciznije, te sa što manje oscilacija.“ (Tomas i drugi, 2010, str. 8)

„Prednosti sustava s povratnom vezom su:

- Proces s povratnom vezom može postati neosjetljiv na vanjske poremećaje i promjene vlastitih svojstava.
- Proces koji je sastavljen od lošijih sastavnica može davati dobre rezultate.
- Proces koji je nestabilan može postati stabilan.
- Može se stvoriti neko poželjno ponašanje procesa koje nije moguće bez povratne veze.“ (Petrić, 2012, str. 8)

„Nedostaci sustava s povratnom vezom su:

- Proces njenim djelovanjem može postati nestabilan, oscilirajući.
- Primjena regulacije u pravilu je skuplja i složenija.
- Unapređenja koja mehanizam povratne veze donosi poboljšanjem stabilnosti i ostalih svojstava reguliranog sustava su ograničene.“ (Petrić, 2012, str. 8)

## **5. PID REGULATOR**

### **5.1. Povijest PID regulatora**

Kako navodi O'Dwyer (2005.) povijest PID regulatora je, prvi proporcionalno-integracijsko-derivacijski regulator, ili kraće PID regulator razvio je Elmer Sperry 1911. godine. Nakon toga, TIC (Taylor Instrumental Company) implementirao je bivši pneumatski regulator koji je bio potpuno podesiv 1933. godine. Nakon nekoliko godina, nadzorni inženjeri uspjeli su ukloniti pogrešku stacionarnog stanja koja se nalazi unutar proporcionalnog regulatora tako što su kraj vratili na neku lažnu vrijednost sve dok pogreška nije bila ista nuli.

Ovo podešavanje koje je uključivalo pogrešku poznato je kao proporcionalno-integralni regulator (PI regulator). Nakon toga, 1940. godine, prvi pneumatski PID regulator razvijen je izvedbom derivacijske funkcije kako bi se smanjili problemi s prekoračenjem.

1942. godine Ziegler i Nichols uveli su pravila podešavanja kako bi inženjeri mogli otkriti i postaviti odgovarajuće parametre PID regulatora. Konačno, sredinom 1950. godine automatski PID regulatori su se naširoko koristili u industriji.

### **5.2. Upotreba PID regulatora**

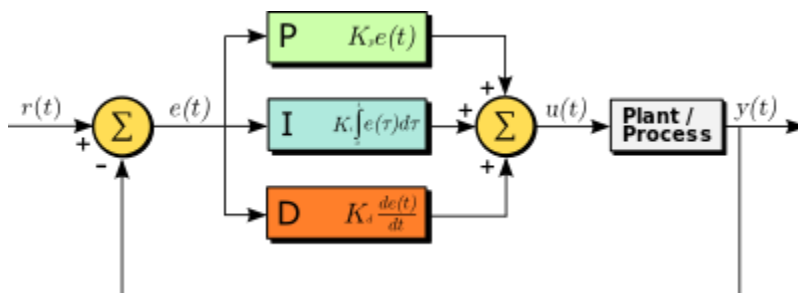
Kako navodi El-Pro-Cus (2013.) PID regulator ili PID kontroler je najčešći oblik povratne informacije. Postao je standardni alat kada se je pojavila kontrola procesa 1940-ih. Danas u kontroli procesa je u upotrebi više od 95% kontrolnih petlji PID tipa, većina petlji je zapravo PI kontrola. PID regulatori danas se nalaze u gotovo svim područjima gdje se koristi kontrola nekog procesa. Regulatori dolaze u mnogo različitih oblika. Postoje samostalni sustavi u kutijama za jednu ili nekoliko petlji, koji se proizvode stotina tisuća godišnje. PID kontrola važan je dio svakog distribuiranog sustava upravljanja. Kontroleri su također ugrađeni u mnoge sustave upravljanja posebnih namjena. PID kontrola često se kombinira s logikom, sekvencijalnim

funkcijama, biračima i jednostavnim blokovima za izgradnju kompliciranih sustava automatizacije koji se koriste za proizvodnju, transport, proizvodnju energije, itd. Mnoge sofisticirane strategije upravljanja, kao što su model predvidljive kontrole također su organizirani hijerarhijski. PID kontrola koristi se najnižoj razini; više varijabilni regulator daje zadane vrijednosti kontrolerima na nižoj razini. Tako možemo reći da je PID regulator osnovno sredstvo kontrolnog inženjeringa. On je važna komponenta u kutiji s alatom svakog nadzornog inženjera.

PID regulatori preživjeli su mnoge tehnološke promjene, od mehanike i pneumatike do mikroprocesora putem elektroničkih cijevi, tranzistora i integriranih krugova. Mikroprocesor je imao dramatičan utjecaj na PID kontrolu. Praktički svi današnji PID regulatori su bazirani na mikroprocesorima. To je dalo mogućnost pružanja dodatnih usluga poput automatskog podešavanja, raspoređivanja pojačanja i stalne prilagodbe.

### 5.3. PID regulator blok dijagram

Kako navode Tomas i drugi (2010.) PID regulator je linearni dinamički regulator koji izračunava vrijednost pogreške kao razliku između izmjerene varijable procesa i željene zadane vrijednosti pomoću tri matematičke operacije: množenje, integriranje i deriviranje. Regulator pokušava smanjiti grešku tako što prilagođava proces korištenjem manipuliranih varijabli.



Slika 6. PID regulator blok dijagram

(Wikipedia, 2021)



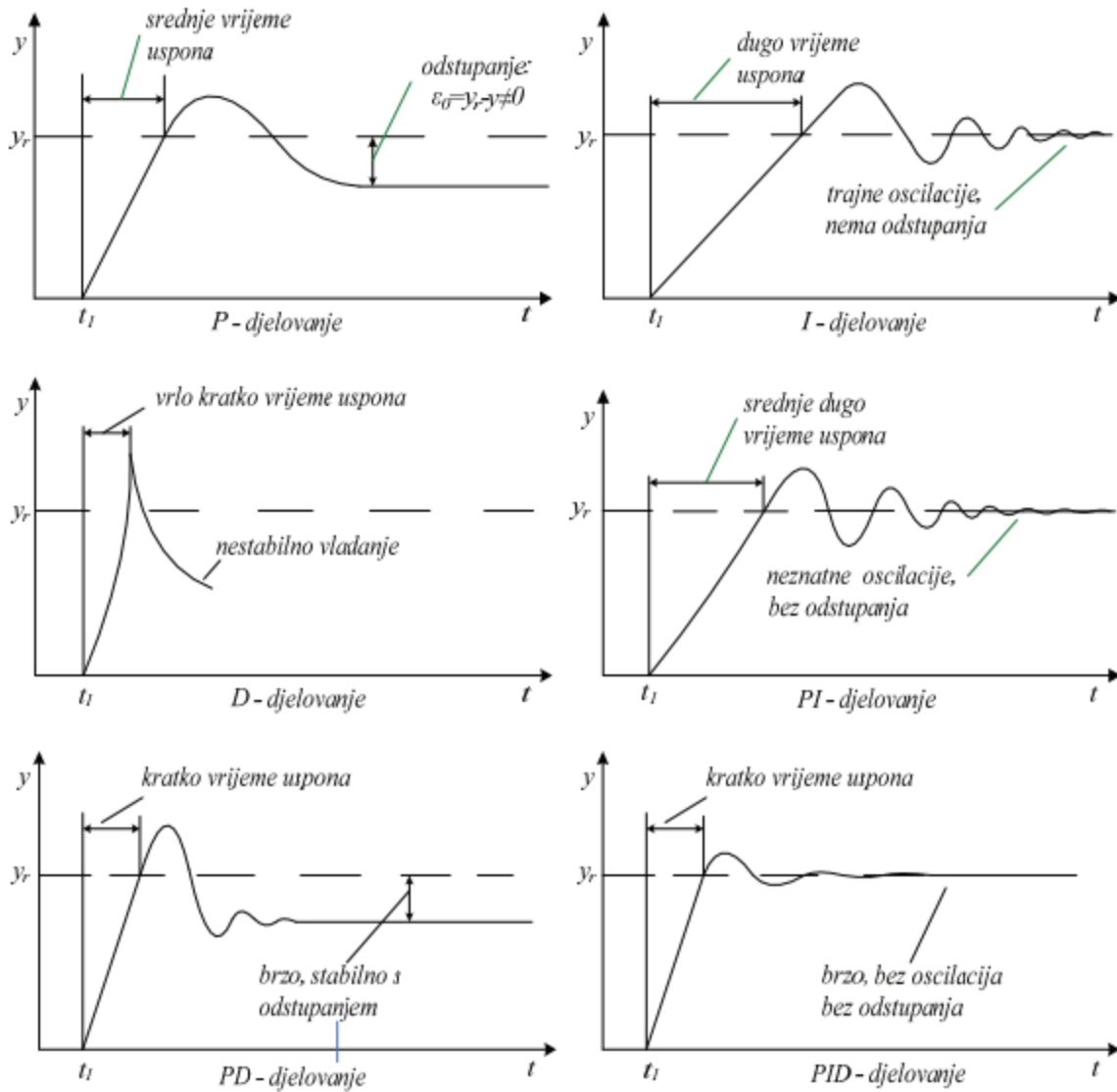
Kako navode Tomas i drugi (2010.) algoritam PID regulatora uključuje tri odvojena konstanta parametra, pa se prema tome ponekad naziva troručnom kontrolom: proporcionalna, integralna i derivacijska vrijednost, označene sa P, I i D. Jednostavno rečeno, ove se vrijednosti mogu tumačiti u vremenskom smislu: P ovisi o sadašnjoj pogrešci, I o akumulaciji prošlih pogrešaka, dok D ovisi o predviđanju budućih grešaka, na temelju trenutne stope promjena. Zbroj ove tri radnje se koristi za podešavanje procesa putem upravljačkog elementa, poput promjene položaja upravljačkog ventila, prigušivača, ili promjena napajanja grijaćeg elementa.

Podešavanjem tri parametra u algoritmu PID regulatora, regulator može pružiti kontrolnu radnju dizajniranu za određene procesne zahtjeve. Odgovor koji regulator daje može se objasniti kao odziv regulatora na pogrešku, nivo do kojeg regulator prelazi vrijednost koja je zadana i nivo osciliranja sustava.

Neke aplikacije mogu zahtijevati korištenje samo jedne ili dvije radnje za osiguravanje odgovarajućeg sustava kontrole. To se ostvaruje definiranjem ostalih parametara na nulu. Onda će PID regulator biti nazvan PI, PD, P ili I regulator u odsustvu ostalih aktivnosti kontrole. PI regulatori su prilično uobičajeni, budući da je derivacijski dio osjetljiv na mjernu buku, dok odsustvo integralnog djela može spriječiti sustav da postigne svoju ciljnu vrijednost zbog kontrole radnje.

„Razlikujemo šest vrsta djelovanja vremenskog člana, odnosno regulatora i to:

- Proporcionalno djelovanje (P),
- Integracijsko djelovanje (I),
- Derivacijsko djelovanje (D),
- Proporcionalno-integralno djelovanje (PI),
- Proporcionalno-derivacijsko djelovanje (PD),
- Proporcionalno-integralno-derivacijsko djelovanje (PID).“ (Tomas i drugi, 2010, str. 51.)

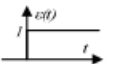

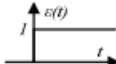
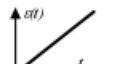

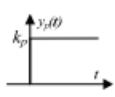
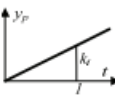
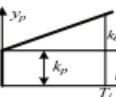
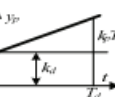
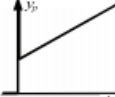


Slika 7. karakteristike reguliranja različitim regulatorima

(Tomas i drugi, 2010)

Iz slike karakteristike reguliranja različitim regulatorima možemo vidjeti da:

1. P regulator ima srednje vrijeme uspona do zadane vrijednosti te zbog nedostatka ostalih funkcija ima odstupanja između zadane i izmjerene vrijednosti.
2. I regulator ima dugo vrijeme uspona do zadane vrijednosti, nema odstupanja ali zbog nedostatka ostalih funkcija ima trajne oscilacije izmjerene vrijednosti od zadane.
3. D regulator ima vrlo kratko vrijeme uspona do zadane vrijednosti te zbog nedostatka ostalih funkcija ima nestabilno vladanje izmjerene vrijednosti.
4. PI regulator, kad spojimo P i I djelovanje dobijemo regulator koji ima srednje dugo vrijeme uspona do zadane vrijednosti te zbog nedostatka D djelovanja imamo regulator koji ima neznatne oscilacije izmjerene vrijednosti od zadane, te bez odstupanja.
5. PD regulator, kad spojimo P i D djelovanje dobijemo regulator koji ima kratko vrijeme uspona do zadane vrijednosti te zbog nedostatka I djelovanja imamo regulator koji je brz, stabilan s odstupanjem izmjerene vrijednosti od zadane.
6. PID regulator, kad spojimo P, I i D djelovanje dobijemo regulator koji ima kratko vrijeme uspona do zadane vrijednosti, te on je brz bez osciliranja i bez odstupanja.

	P	I	PI	PD	PID
Matematički opis	$y_p = k_p \varepsilon(t)$	$y_p = k_i \int \varepsilon(t) dt$	$y_p = k_p \left( \varepsilon + \frac{1}{T_i} \int \varepsilon \cdot dt \right)$	$y_p = k_p \left( \varepsilon + T_d \frac{d\varepsilon}{dt} \right)$	$y_p = k_p \left( \varepsilon + \frac{1}{T_i} \int \varepsilon dt + T_d \frac{d\varepsilon}{dt} \right)$
Prijenosna funkcija	$G_R(s) = k_p$	$G(s) = \frac{k_i}{s}$	$G_R = k_p \left( 1 + \frac{1}{T_i s} \right)$	$G_R = k_p (1 + T_d s)$	$G_R = k_p \left( 1 + \frac{1}{T_i s} + T_d s \right)$
Ulazna pobuda					
Prijelazna funkcija					
Svojstva	djeluje brzo, ali ne otklanja trajno reg. odstup., tj. $\varepsilon_0 \neq 0$	djeluje sporo, otklanja trajno reg. odstup., tj. $\varepsilon_0 = 0$	dobra svojstva od P i I regulatora	P: osigurava stabilnost D: se suprotstavlja brzim promjenama regulirane veličine koje nastaju pri djelovanju poremećaja, ali ne otklanja trajno reg. odstup., tj. $\varepsilon_0 \neq 0$	P: osigurava stabilnost I: otklanja odstupanje, D: daje brzinu odziva i prigušuje sklonost sustava k osciliranju.
Primjena	za reg. I – proc.	za reg. P – proc.	najčešće se koristi	eliminiranje kašnjenja	za brze procese

Slika 8. Smanjeni prikaz značajki elemenata s P, PI, PD i PID djelovanjem

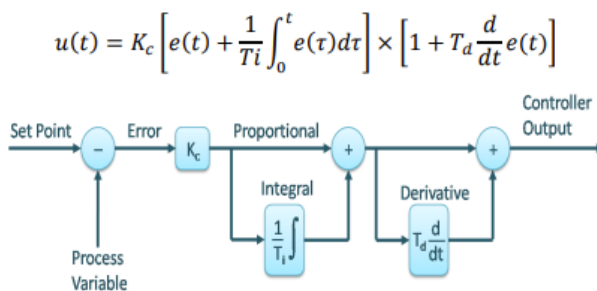
(Tomas i drugi, 2010)

## 6. PID REGULATOR TEORIJA

Kako navodi Control Notes (2021.) shema PID regulatora dobila je ime po svoja tri ispravljjuća izraza, čiji zbroj čini manipuliranu varijablu. Proporcionalni, integralni i derivacijski izrazi zbrajaju se za izračunati izlaz PID regulatora. Definirajući  $u(t)$  kao izlaz regulatora.

Proizvođači regulatora raspoređuju proporcionalni, integralni i derivacijski način rada u tri različita algoritma ili strukture regulatora. Zovu se interaktivni, ne interaktivni i paralelni algoritmi. Neki proizvođači regulatora dozvoljavaju za odabir između različitih algoritama regulatora kao opcije konfiguracije u softveru regulatora. PID algoritmi su:

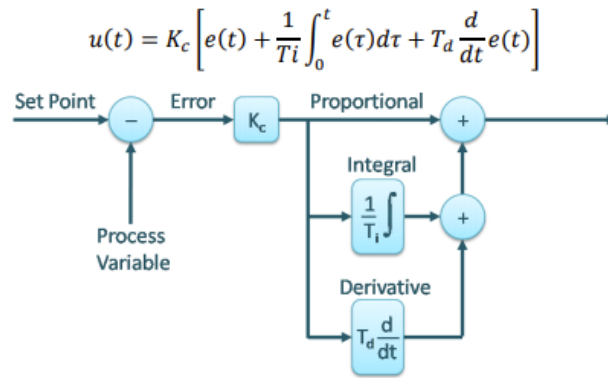
### 1. Interaktivni algoritam



Slika 9. Interaktivni algoritam

(Control Notes, 2021)

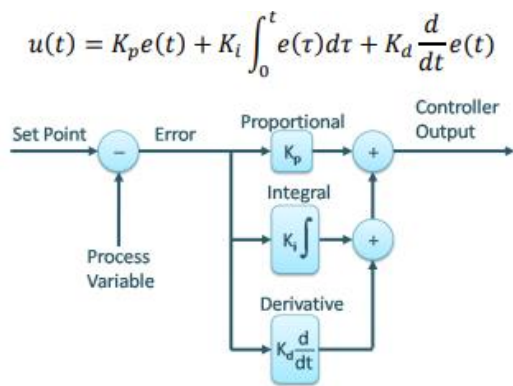
## 2. Ne interaktivni algoritam



Slika 10. Ne interaktivni algoritam

(Control Notes, 2021)

## 3. Paralelni algoritam



Slika 11. Paralelni algoritam

(Control Notes, 2021)

Gdje je:

$K_p = K_c$  : proporcionalni dobitak

$K_i = K_c T_i$  : integralni dobitak

$K_d = K_c T_d$ : derivacijski dobitak

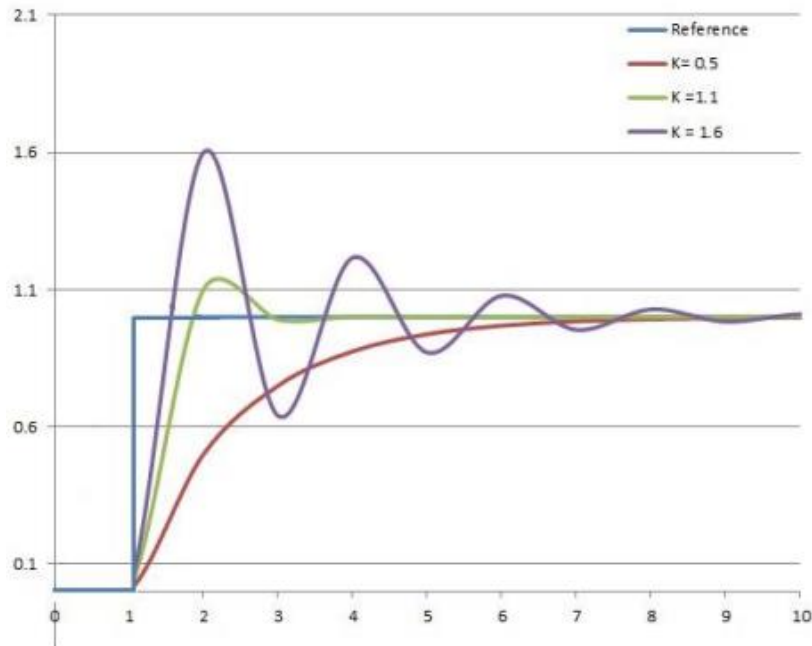
$e(t) = r(t) - y(t)$

## 6.1. Proporcionalno djelovanje

Kako navodi J. Costa (2011.) proporcionalni dio proizvodi izlaznu vrijednost koja je proporcionalna momentalnoj vrijednosti greške. Proporcionalni odziv smije se podesiti množenjem greške s konstantom  $K_p$ , tzv. konstanta proporcionalnog dobitka. Proporcionalni pojam dan je:

$$P_{out} = K_p e(t)$$

Visoko proporcionalno djelovanje rezultira velikom promjenom izlaza za datu promjenu pogreške. Ako je proporcionalni dobitak previsok, može doći do nestabilnosti sustava. U suprotnosti s time, mali dobitak rezultira malim izlaznim odzivom na veliku ulaznu pogrešku, i manje uzvratnim ili osjetljivim regulatorom. Ukoliko je proporcionalni dobitak prenizak, upravljačko djelovanje može biti premalo kada reagira na smetnje u sustavu. Teorija podešavanja i industrijska praksa pokazuju da proporcionalni pojam ima najveći utjecaj na promjenu izlaza.



Slika 12. Efekt dodavanja  $K_p$  ( $K_i$  i  $K_d$  zadržani konstantnim)

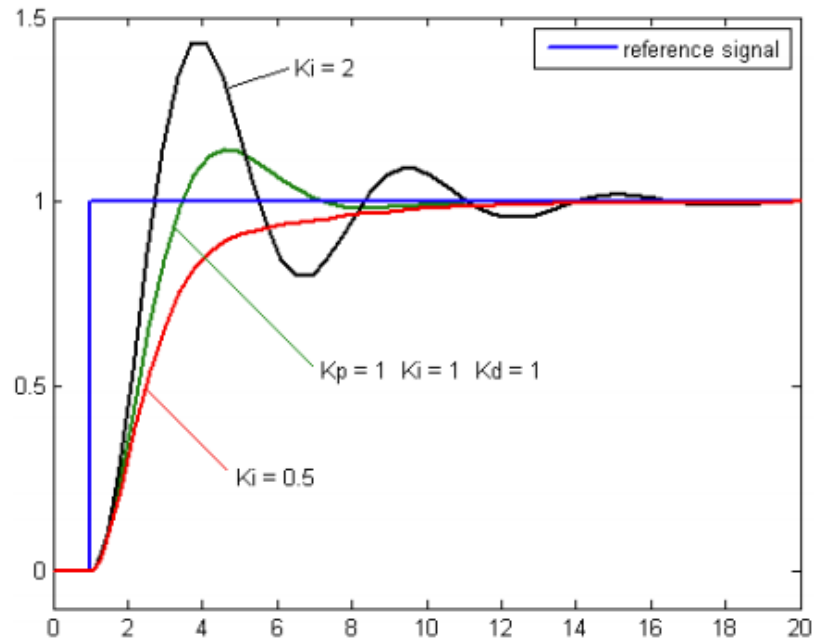
(J. Costa, 2011)

## 6.2. Integralno djelovanje

Kako navodi J. Costa (2011.) Doprinos integralnog djela proporcionalan je i veličini pogreške i vremenu trajanja pogreške. Integralni dio u PID regulatoru je zbroj trenutne pogreške tijekom vremena i daje akumulirani pomak koji je prethodno trebao biti ispravljen. Akumulirana pogreška tada se množi s integralnim dobitkom  $K_i$  i dodaje se izlazu regulatora.

$$I_{out} = K_i \int_0^t e(\tau) d\tau$$

Integralni dio ubrzava kretanje procesa prema zadanoj vrijednosti i eliminira trajna regulacijska odstupanja koja se javljaju kod čistog proporcionalnog regulatora. Unatoč činjenici da integralni dio reagira na akumulirane greške iz prošlosti, može uzrokovati da momentalna vrijednost prekorači zadanu vrijednost.



Slika 13. Efekt dodavanja  $K_i$  ( $K_p$ , i  $K_d$  zadržani konstantnim)

(J. Costa, 2011)

### 6.3. Derivacijsko djelovanje

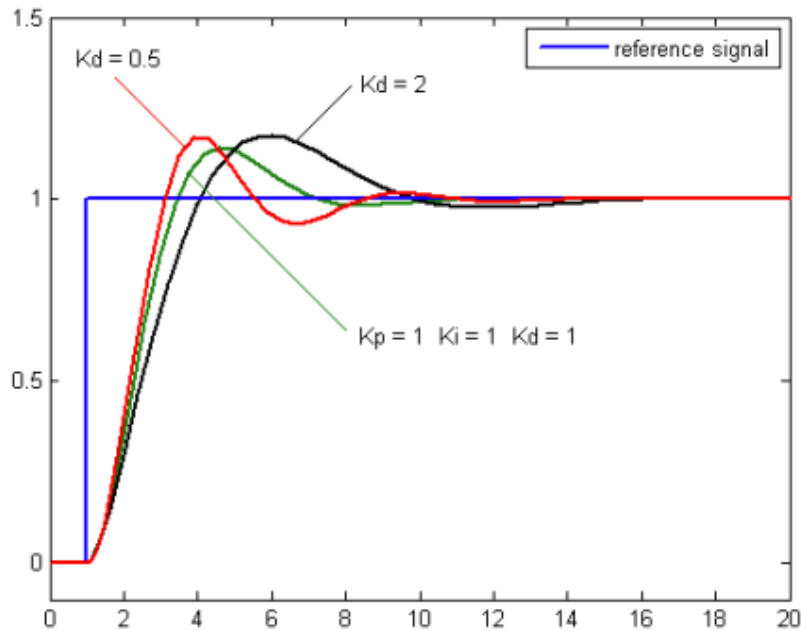
Kako navodi J. Costa (2011.) Derivacija greške procesa izračunava se određivanjem nagiba greške tijekom vremena i množenjem ove stope promjena s derivacijskim dobitkom  $K_d$ . Veličina doprinosa derivacijskog djela za ukupnu kontrolnu radnju naziva se derivacijski dobitak,  $K_d$ . Derivacijski pojam dan je sa:

$$D_{out} = K_d \frac{d}{dt} e(t)$$

Derivacijsko djelovanje previđa ponašanje sustava i tako poboljšava vrijeme rješavanja i stabilnost sustava. Idealni derivat nije uzročan, tako da implementacija PID regulatora uključuje dodatno nisko prolazno filtriranje za derivacijski izraz, kako bi ograničili visoku frekvenciju i



buku. Derivacijsko djelovanje je rijetko korišteno u praksi (po nekoj procjeni u samo 20% korištenih regulatora) zbog njegovog promjenjivog utjecaja na stabilnost sustava u stvarnim aplikacijama.



Slika 14. Efekt dodavanja  $K_d$  ( $K_p$ , i  $K_i$  zadržani konstantnim)

(J. Costa, 2011)

„Kombiniranjem sva tri osnovna zakona upravljanja dobiva se idealni PID regulator čije se ponašanje može opisati sljedećom jednačinom:“ (Univerzitet u Novom Sadu, str. 16)

$$u(t) = K_p e(t) + K_I \int_0^t e(t) dt + K_D \frac{de}{dt} = K_p \left[ e(t) + \frac{1}{T_I} \int_0^t e(t) dt + T_D \frac{de}{dt} \right]$$

#### 6.4. Način podešavanja parametara PID regulatora

„Za simulaciju jednostavnih slučajeva mogu se slijediti ove smjernice:

1. Iz odziva u otvorenom krugu odrediti što treba popraviti
2. Dodaje se P djelovanje radi poboljšanja brzine odziva (vremena porasta)
3. Dodaje se D djelovanje radi smanjenja oscilacija odziva (max. prebačaj)
4. Dodaje se I djelovanje radi uklanjanja trajnog regulacijskog odstupanja
5. Poboljšavaju se parametri regulatora dok se ne dobije željeni odziv zatvorenog kruga“  
(Gregov, 2021, str 34.)

Parametar	Vrijeme porasta	Prebačaj	Vrijeme smirivanja	Trajno reg. odstupanje	stabilnost
Kp	Smanjuje se	Povećava se	Mali utjecaj	Smanjuje se	Snižena
Ki	Smanjuje se	Povećava se	Povećava se	Uklanja se	Snižena
Kd	Mali utjecaj	Smanjuje se	Smanjuje se	Nema efekta	Poboljšana ako je Kd mali

*Slika 15. Efekt povećavanja parametra nezavisno*

(Gregov, 2021)

## 7. PREGLED METODA PODEŠAVANJA

Postoji nekoliko metoda za podešavanje PID petlje. Najučinkovitije metode općenito uključuju razvoj nekog oblika modela procesa, zatim odabirom P, I i D na temelju dinamike modela parametra. Metode ručnog podešavanja mogu biti relativno neučinkovite, osobito ako petlje imaju vrijeme odziva u trajanju od minute ili duže.

Izbor metode uvelike će ovisiti o tome da li se petlja može podešavati „offline“ i o vremenu odziva sustava. Ako se sustav može uzeti izvan mreže, onda najbolja metoda podešavanja često uključuje izlaganje sustava na promjene korak po korak u unosu, mjerenje izlaza kao funkciju vremena i korištenje ovog odgovora za određivanje kontrolnih parametara.

Metoda	Prednosti	Nedostaci
<b>Ručno podešavanje</b>	Nije potrebna matematika, online	Zahtjeva iskusno osoblje
<b>Ziegler-Nichols</b>	Dokazana metoda, online	Uznemiren proces, neki pokušaji i pogreške, vrlo agresivno podešavanje
<b>Cohen-Coon</b>	Dobri modeli procesa	Malo matematike: offline, dobro samo za procese prvog reda
<b>Software alati</b>	Konstantno podešavanje: online ili offline- može koristiti računalno automatizirane upravljačke tehnike projektiranja sustava (CAutoD)	Uključeni su neki troškovi i obuka

*Tablica 1. Izbor metode podešavanja*

## 7.1. Metoda otvorene petlje

U ovim metoda, PID regulator se podešava u otvorenoj petlji, izoliran od procesnog postrojenja. Prvi izmjereni ulaz se primjenjuje na postrojenje i dobiva se krivulja reakcije procesa. Pomoću procesne reakcije sa jednom od „First Order Plus Dead Time“ (FOPDT) procjenom metode dobiva se aproksimacija procesa. Poznavajući  $K_m$ ,  $T_m$  i  $t_d$  PID parametri se mogu procijenjeni iz povezane korelacije prema korištenoj metodi. „First Order Plus Dead Time“ (FOPDT) dan je sa:

$$G(s) = \frac{K_m}{\tau_m s + 1} e^{-t_d s}$$

## 7.2. Ziegler-Nichols metoda podešavanja u otvorenoj petlji

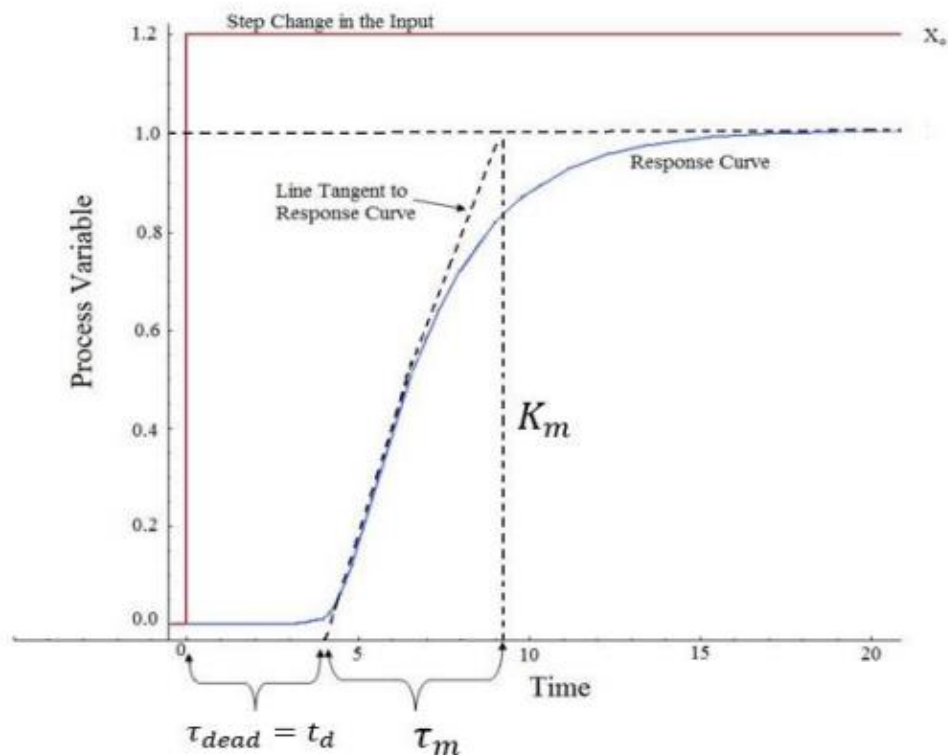
Kako navodi LibreTexts (nepoznata godina)1940.-ih, Ziegler i Nichols osmislili su dvije empirijske metode za dobivanje parametara regulatora. Njihove su se metode koristile za prve FOPDT slučajeve, a uključivale su intenzivne ručne izračune. Uz poboljšani softver za optimizaciju, većina ručnih metoda poput ovih se više ne koriste. Međutim, čak i uz računalna pomagala, sljedeće dvije metode su još uvijek danas u upotrebi, a smatraju se među najčešćim.

Kako navodi LibreTexts (nepoznata godina) ova metoda ostaje popularna tehnika za podešavanje regulatora koji koriste proporcionalne, integralne i derivacijske radnje. Ziegler-Nichols metoda s otvorenom petljom također se naziva i krivulja u obliku slova S metodom, jer testira reakciju otvorene petlje procesa na promjenu kontrolne varijable izlaza. Ovaj osnovni test zahtijeva da se odziv sustava zabilježi, po mogućnosti pomoću računala. Nakon što se pronađu određene vrijednosti odziva procesa, one se mogu uključiti u jednadžbu Ziegler-Nichols sa specifično množenim konstantama za dobitke regulatora s bilo P,PI ili PID radnjama.

Ziegler-Nichols metoda s otvorenom petljom također se naziva metodom reakcije procesa jer ona testira reakciju otvorene petlje procesa na promjenu kontrolne varijable izlaza.

Da biste koristili metodu podešavanja Ziegler-Nichols otvorene petlje, morate izvršiti sljedeće korake:

1. Napraviti korak po korak test otvorene petlje.
2. Iz krivulje reakcije procesa odrediti transportno kašnjenje ili mrtvo vrijeme,  $T_d$ , konstantno vrijeme ili vrijeme potrebno za promjenu reakcije,  $T_m$ , i krajnju vrijednost koju odziv dostigne u stanju mirovanja,  $K_m$ , za stupnjevitu promjenu  $X_o$ .
3. Odrediti konstante podešavanja petlje. Uključiti vrijednost brzine reakcije i vremena kašnjenja u Ziegler-Nichols jednadžbu za podešavanje otvorene petlje za odgovarajući regulator (P,PI ili PID) kako bi izračunali konstante regulatora. Koristi sliku 17.



Slika 16. Otvorena petlja „First Order Plus Dead Time“ (S-oblik krivulje)

(LibreTexts, 2021)

	$K_p$	$T_i$	$T_d$
<b>P- Controller</b>	$\frac{X_o \tau_m}{K_m t_d}$	$\infty$	0
<b>PI- Controller</b>	$0.9 \frac{X_o \tau_m}{K_m t_d}$	$3.3 t_d$	0
<b>PID- Controller</b>	$1.2 \frac{X_o \tau_m}{K_m t_d}$	$2 t_d$	$0.5 t_d$

Slika 17. Parametri otvorene petlje za ( $K_p$ ,  $T_i$ ,  $T_d$ )

(LibreTexts, 2021)

PID regulator podešen ovom metodom daje:

$$\begin{aligned}
 G_c(s) &= K_p \left[ 1 + \frac{1}{T_i s} + T_d s \right] \\
 &= 1.2 \frac{X_o \tau_m}{K_m t_d} \left( 1 + \frac{1}{2t_d s} + 0.5t_d s \right) \\
 &= 0.6 \tau_m \frac{(s + 1/t_d)^2}{s}
 \end{aligned}$$

To znači da regulator dodaje dvostruku nulu pri  $S = \frac{1}{td}$ ,

Prednosti Ziegler-Nichols metode podešavanja s otvorenom petljom:

1. Brži i lakši za korištenje od drugih metoda.
2. To je snažna i popularna metoda.
3. Metoda reagiranja procesa najjednostavnija je i najmanje ometajuća implementacija.

Nedostaci Ziegler-Nichols metode podešavanja s otvorenom petljom:

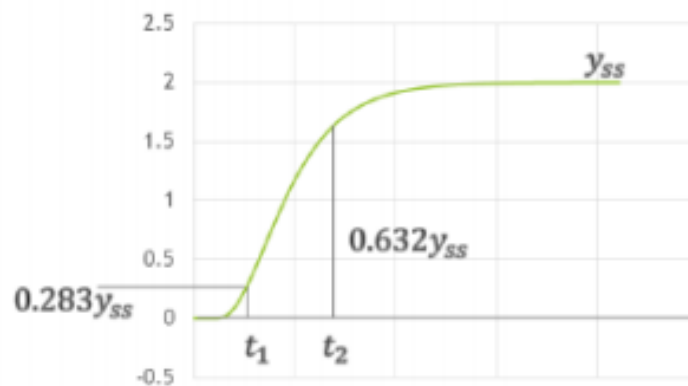
1. Čisto ovisi o  $td$  da procjeni I i D regulatore.
2. Aproksimacije za  $K_p$ ,  $T_i$  i  $T_d$  vrijednosti možda nisu sasvim točne za različite sustave.
3. Ne vrijedi za I, D i PD regulatore.

### 7.3. Cohen-Coon metoda podešavanja

Kako navodi LibreTexts (nepoznata godina) pravila podešavanja Cohen-Coon odgovaraju širem rasponu procesa od Ziegler-Nichols pravilima podešavanja. Ziegler-Nichols pravila dobro djeluju samo na procese u kojima je mrtvo vrijeme manje više od polovice duljine vremenske konstante. Pravila za podešavanje Cohen-Coona dobro funkcioniraju na procesima gdje je mrtvo vrijeme manje od dva puta duljine vremenske konstante ( i to se može rastegnuti čak i više ako je potrebno). Također pruža jedno od rijetkih skupova pravila za podešavanje koji ima pravila za PD regulatore.

Kao i Ziegler-Nichols pravila podešavanja, Cohen-Coon pravila ciljaju za prigušenja četvrtine amplitude odziva. Iako podešavanje s četvrtinom amplitude pruža vrlo brzo odbijanje smetnji, obično je vrlo oscilirajuće i često stupa u interakciju sa slično podešenim petljama. Podešavanje tipa prigušenja četvrtine amplitude također ostavlja petlju osjetljivom na nestabilnost ako se dobitak procesa ili mrtvo vrijeme udvostruči u vrijednosti.

U ovoj metodi krivulja odziva procesa dobiva se prvo, testom otvorene petlje kako je prikazano na slici 16. a zatim se dinamika procesa aproksimira modelom FOPDT, s sljedećim parametrima:



Slika 18. Test otvorene petlje procesa

(LibreTexts, 2021)

PID regulator podešen ovom metodom daje:

$$\tau_m = \frac{3}{2}(t_2 - t_1)$$

$$t_d = t_2 - \tau_m$$

Controller	$K_c$	$T_i$	$T_d$
<b>P</b>	$\frac{\tau_m}{K t_d} \left(1 + \frac{t_d}{3\tau_m}\right)$	-	-
<b>PI</b>	$\frac{\tau_m}{K t_d} \left(0.9 + \frac{t_d}{12\tau_m}\right)$	$t_d \left(\frac{30 + \frac{3t_d}{\tau_m}}{9 + \frac{20t_d}{\tau_m}}\right)$	-
<b>PD</b>	$\frac{\tau_m}{K t_d} \left(1.25 + \frac{t_d}{6\tau_m}\right)$	-	$t_d \left(\frac{6 - \frac{2t_d}{\tau_m}}{22 + \frac{3t_d}{\tau_m}}\right)$
<b>PID</b>	$\frac{\tau_m}{K t_d} \left(1.33 + \frac{t_d}{4\tau_m}\right)$	$t_d \left(\frac{32 + \frac{6t_d}{\tau_m}}{13 + \frac{8t_d}{\tau_m}}\right)$	$t_d \left(\frac{4}{11 + \frac{2t_d}{\tau_m}}\right)$

Slika 19. Parametri Cohen-Coon metode

(LibreTexts, 2021)

Prednosti Cohen-Coon metode:

1. Koristi se za sustave s vremenskim kašnjenjem.
2. Brže vrijeme odziva zatvorene petlje.

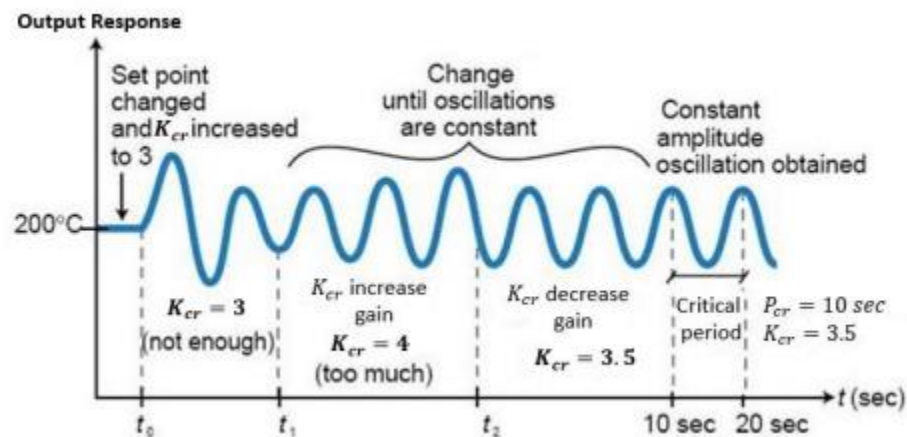
Nedostaci Cohen-Coon metode:

1. Nestabilni sustavi zatvorene petlje.
2. Može se koristiti samo za modele prve narudžbe uključujući velika kašnjenja procesa.
3. Offline metoda
4. Aproximacije za vrijednosti  $K_c$ ,  $T_i$ ,  $T_d$  možda nisu potpuno točne za različite sustave.



## 7.4. Ziegler-Nichols metoda podešavanja u zatvorenoj petlji

Kako navodi LibreTexts (nepoznata godina) Ziegler-Nichols metoda podešavanja u zatvorenoj petlji omogućava korištenje kritične vrijednosti pojačanja,  $K_{cr}$  i kritično razdoblje osciliranja,  $P_{cr}$ , za izračun  $K_p$ . To je jednostavna metoda podešavanja PID regulatora i može se poboljšavati kako bi se dobila boja aproksimacija regulatora. Može se dobiti konstante regulatora  $K_p$ ,  $T_i$  i  $T_d$  u sustavu s povratnom vezom. Ali Ziegler-Nichols metoda podešavanja u zatvorenoj petlji je ograničena na podešavanje procesa koji ne mogu raditi u okruženju otvorene petlje.



Slika 20. Sustav podešen pomoću Ziegler-Nichols metode zatvorenom petljom.

(LibreTexts, 2021)

Određivanje krajnje vrijednosti dobitka,  $K_{cr}$ , je ostvareno pronalaskom vrijednosti proporcionalnog dobitka koji uzrokuje neograničeno osciliranje upravljačke petlje u stacionarnom stanju. To znači da je dobitak I i D regulatora postavljen na nulu kako bi se utvrdio utjecaj P. To testira kvalitetu vrijednosti  $K_p$  kako bi bila optimizirana za regulator. Još jedna važna vrijednost povezana s ovom metodom proporcionalne dobiti je kritično razdoblje,  $P_{cr}$ . Krajnje razdoblje je vrijeme potrebno za završetak jedne pune oscilacije dok je sustav u stacionarnom stanju. Ova dva parametra,  $K_{cr}$  i  $P_{cr}$ , koriste se za pronalaženje konstanti podešavanja petlje regulatora (P,PI ili PID). Da bi se pronašle vrijednosti ovih parametara i izračunale konstante, koriste se ovi koraci:

1. Ukloniti integralno i derivacijsko djelovanje. Postavili integralno vrijeme ( $T_i$ ) na beskonačno ili njegovu najveću vrijednost i postaviti derivacijski dio ( $T_d$ ) na nulu.
2. Stvoriti mali poremećaj u petlji tako što promijenimo zadane vrijednosti. Podesiti proporcionalnost, povećavati i/ili smanjivati dobitak sve dok oscilacije nemaju konstantu amplitudu.
3. Zabilježiti vrijednost pojačanja ( $K_{cr}$ ) i razdoblje oscilacije ( $P_{cr}$ ).
4. Uključiti ove vrijednosti u jednadžbu zatvorene petlje Ziegler-Nichols i odrediti potrebne postavke za regulator

	$K_p$	$T_i$	$T_d$
<b>P- Controller</b>	$\frac{K_{cr}}{2}$	$\infty$	0
<b>PI- Controller</b>	$\frac{K_{cr}}{2.2}$	$\frac{P_{cr}}{1.2}$	0
<b>PID- Controller</b>	$\frac{K_{cr}}{1.7}$	$\frac{P_{cr}}{2}$	$\frac{P_{cr}}{8}$

Slika 21. Parametri zatvorene petlje za ( $K_p$ ,  $T_i$ ,  $T_d$ )

(LibreTexts, 2021)

PID regulator podešen ovom metodom daje:

$$\begin{aligned}G_c(s) &= K_p \left[ 1 + \frac{1}{T_i s} + T_d s \right] \\&= 0.6K_{cr} \left( 1 + \frac{1}{0.5P_{cr}s} + 0.125P_{cr}s \right) \\&= 0.075K_{cr}P_{cr} \frac{(s + 4/P_{cr})^2}{s}\end{aligned}$$

Prednosti Ziegler-Nichols metode podešavanja s zatvorenom petljom:

1. Lagani eksperiment: potrebno je samo promijeniti P regulator.
2. Uključuje dinamiku cijelog procesa, što daje točniju sliku o tome kako se sustav ponaša

Nedostaci Ziegler-Nichols metode podešavanja s zatvorenom petljom:

1. Eksperiment može oduzeti mnogo vremena
2. Može se upustiti u nestabilna područja tijekom testiranja P kontrolera, što bi moglo uzrokovati da sustav izmakne kontroli

## 7.5. Softverske metode podešavanja

PID podešavanje je proces pronalaženja vrijednosti proporcionalnih, integralnih i derivacijskih dobitaka PID regulatora za postizanje željenih performansi i zadovoljavanje zahtjeva dizajna.

Podešavanje PID regulatora čini se lakim, ali pronalaženje niza dobitaka koji osigurava najbolje performanse upravljačkog sustava složen je zadatak. Tradicionalno se PID regulatori podešavaju ručno ili pomoću metoda temeljenih na pravilima. Metode ručnog podešavanja uzimaju puno vremena, a ako se koriste na hardveru mogu uzrokovati oštećenja. Metode temeljene na pravilima također imaju ozbiljna ograničenja: ne podržavaju određene vrste modela, kao što su nestabilni modeli, modeli visokog reda ili modeli s malo ili nikakvim kašnjenjem. PID regulator se može automatski podesiti kako bi se postiglo optimalan dizajn sustava i zadovoljiti zahtjeve dizajna, čak i za modele postrojenja koje tradicionalno podešavanje ne može zadovoljiti. Neki od softvera koji se koriste za podešavanje regulatora su MATLAB i SIMULINK.

## 8. PNEUMATSKI SUSTAVI

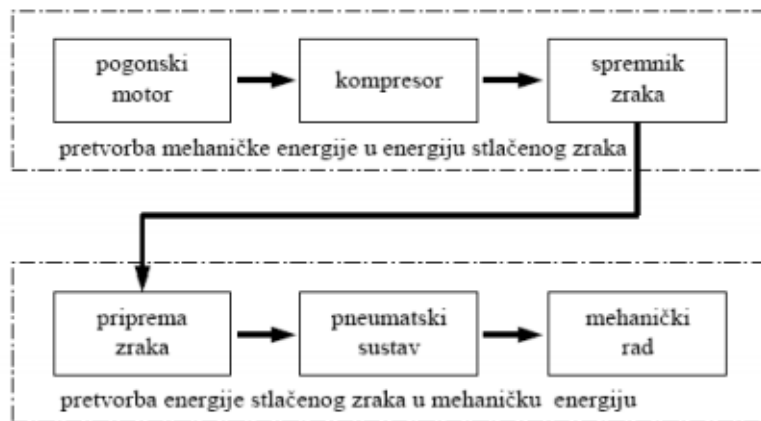
Kako navodi Dobrota (2020.) pneumatska tehnologija bavi se proučavanjem ponašanja i primjene stlačenog zraka u svakodnevnom životu, a posebno u automatizaciji proizvodnje. Pneumatski sustavi koriste zrak kao medij koji je dostupan i može biti ispušten u atmosferu nakon završetka obavljenog rada. Pneumatski sustavi upravljanja naširoko se koriste u našem društvu, osobito u industrijskim sektorima za upravljanje automatskih strojeva.

Mnoge tvornice opremile su svoje proizvodne linije opskrbom stlačenog zraka i pokretnim kompresori. U našoj atmosferi postoji neograničena količina zraka za proizvodnju stlačenog zraka. Štoviše, upotreba stlačenog zraka nije ograničena udaljenošću jer se može lako transportirati kroz cijevi. Nakon uporabe, stlačeni zrak se može ispustiti izravno u atmosferu bez potreba za obradom. Pneumatske komponente iznimno su izdržljive i ne mogu se lako oštetiti. U usporedbi sa elektromotornim komponentama, pneumatske komponente su izdržljivije i pouzdanije. Također, dizajn pneumatskih komponenata relativno je jednostavan. Stoga su prikladnije za korištenje u jednostavnim sustavima automatskog upravljanja. U usporedbi s elementima drugih sustava, na stlačeni zrak manje utječe visoka temperatura, prašina, korozija, itd.

Pneumatski sustavi su sigurniji od elektromotornih jer mogu raditi u zapaljivom okolišu bez izazivanja požara ili eksplozije. Osim toga, preopterećenje u pneumatskom sustavu samo će dovesti do klizanja ili prestanka rada. Za razliku od elektromotornih komponenti, pneumatski komponente ne izgaraju niti se pregrijavaju pri preopterećenju. Rad pneumatskih sustava ne proizvodi zagađivače. Otpušteni zrak također se obrađuje na posebne načine. Stoga pneumatski sustavi mogu raditi u okruženjima koja zahtijevaju visoke razine čistoće. Jedan primjer su proizvodne linije integriranih sklopova. Kako pneumatske komponente nisu skupe, troškovi pneumatskih sustava su prilično niski. Štoviše, budući da su pneumatski sustavi vrlo izdržljivi, troškovi popravka znatno su manji od bilo kojih drugih sustava.

Iako pneumatski sustavi imaju puno prednosti, oni su također podložni mnogim ograničenjima. Kako se pneumatski sustavi pokreću silom stlačenog zraka, njihov rad je ovisan o volumenu

stlačenog zraka. Kako se volumen zraka može promijeniti pri sabijanju ili zagrijavanju, dovod zraka u sustav možda neće biti točan, uzrokujući smanjenje ukupne točnosti sustava. Budući da cilindri pneumatskih komponenti nisu jako veliki, pneumatski sustav ne može svladavati opterećenja koja su preteška. Također, stlačeni zrak mora se prije uporabe obraditi kako bi se osiguralo odsustvo pare ili prašine. U protivnom se pokretni dijelovi pneumatskog sustava mogu brzo istrošiti zbog trenja.



*Slika 22. Princip rada pneumatskog sustava*

(Dobrota, 2020)

## 9. GLAVNE PNEUMATSKE KOMPONENTE

Pneumatske komponente mogu se podijeliti u dvije kategorije:

1. Komponente koje proizvode i distribuiraju stlačeni zrak
2. Komponente koje koriste stlačeni zrak

Sve glavne pneumatske komponente mogu biti predstavljene jednostavnim pneumatskim simbolima. Svaki simbol prikazuje samo funkciju komponente koju predstavlja, ali ne i njenu strukturu. Pneumatski simboli se mogu kombinirati u obliku pneumatskih dijagrama. Pneumatski dijagram opisuje odnos između svake pneumatske komponente, odnosno dizajn sustava.

## 9.1. Komponente koje proizvode i distribuiraju stlačeni zrak

Primjeri komponenta koje proizvode i distribuiraju stlačeni zrak uključuju kompresore i cijevovode.

### 9.1.1. Kompresor

Kompresor može stlačeni zrak stlačiti do potrebnog tlaka. Može pretvoriti mehaničku energiju iz motora u potencijalnu energiju u stlačenom zraku. Jedan centralni kompresor može opskrbljivati razne pneumatske komponente stlačenim zrakom koji se distribuira kroz cijevi od cilindra do pneumatskih komponenti.



*Slika 23. Kompresor i pneumatski simbol kompresora*

(Pevex, 2021)

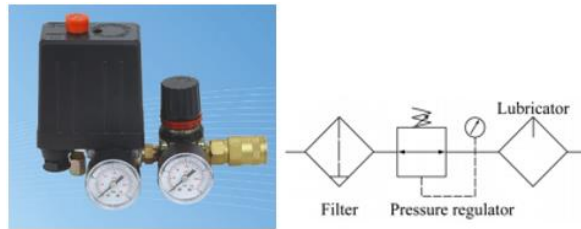
### 9.1.2. Komponenta za pripremu zraka

Komponenta za regulaciju tlaka sastoji se od različitih komponenata, od kojih svaka ima svoj pneumatski simbol:

Filter- može ukloniti nečistoće iz stlačenog zraka prije nego što se dovede u pneumatske komponente.

Regulator tlaka- služi za stabilizaciju tlaka i regulaciju rada pneumatskih komponenti

Zauljivač zraka- služi za podmazivanje pneumatskih komponenti



*Slika 24. Komponenta za regulaciju pritiska i pneumatski simbol komponenta*

(HiSupplier, 2021)

## 9.2. Pneumatski aktuatori

Primjeri komponenta koje koriste stlačeni za obavljanje korisnog rada jesu pneumatski aktuatori. Pneumatski aktuatori omogućuju pravocrtno ili rotacijsko kretanje što se ostvaruje pneumatskim cilindrima ili pneumatskim motorima. Postoji mnogo vrsta cilindara, kao što su jednoradni ili dvoradni cilindri.

### 9.2.1. Jednoradni cilindar

Cilindar s jednim djelovanjem ima samo jedan ulaz koji omogućuje protok stlačenog zraka. Stoga može svladati silu samo u jednom smjeru. Klipnjača se vraća u početni položaj unutarnjom oprugom ili vanjskom silom koju osigurava mehaničko kretanje ili težina tereta.



*Slika 25. Jednoradni cilindar i pneumatski simbol jednoradnog cilindra*

(flomax, 2021)

Potisak klipnjače je uvelike smanjen jer mora nadvladati silu opruge. Stoga, kako bi se strojevima osigurala pokretačka snaga, potrebno je povećati promjer cilindra. Kako bi odgovarala duljini opruge, duljina cilindra trebala bi se također povećati, čime se ograničava duljina hoda. Cilindri jednostrukog djelovanja koriste se za štancanje, tiskanje, premještanje materijala, itd.

### 9.2.2. Dvoradni cilindri

Kod cilindra s dvostrukog djelovanja tlak zraka primjenjuje se naizmjenično na relativnu površinu klipa, koji proizvodi pogonsku silu i povratnu silu. Kako je učinkovito područje klipa malo, sila koja nastane tijekom uvlačenja je relativno mala.



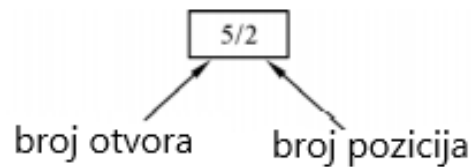
*Slika 26. Dvoradni cilindar i pneumatska shema dvoradnog cilindra*

(flomax, 2021)



### 9.2.3. Razvodni ventili

Razvodni ventili osiguravaju protok zraka između zračnih otvora otvaranjem, zatvaranjem i prebacivanje njihovih unutarnjih veza. Njihova je klasifikacija određena brojem otvora, brojem mogućih položaja, normalni položaj ventila i njegov način rada. Uobičajeni tipovi razvodnih ventila uključuju 2/2, 3/2, 5/2 konfiguraciju itd. Prvi broj predstavlja broj otvora, dok drugi broj predstavlja broj pozicija. Ventil koji ima dva ulaza i pet položaja može se prikazati crtežom na slici 27.



*Slika 27. Opisivanje 5/2 upravljačkog ventila*

(Dobrota, 2020)



*Slika 28. Pneumatski simbol 5/2 upravljačkog ventila*

(Dobrota, 2020)

### 9.3. Osnovni principi i odnos cilindar-ventil

„Pravila izrade (crtanja) pneumatskih sheme:

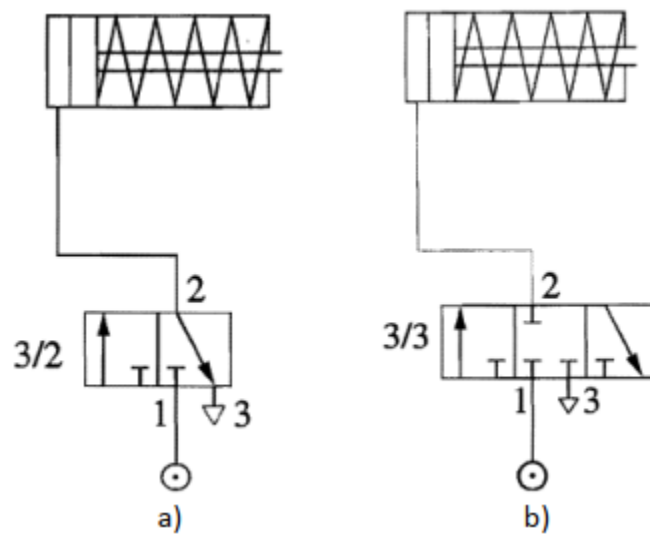
- Svi simboli moraju biti sukladni s normom ISO 1219-1
- Elementi su postavljeni s lijeva na desno, prema sljedećem rasporedu:
  - Izvor energije (kompresor), dolje lijevo
  - Upravljački elementi (ventili) prema gore i prema desno
  - Izvršni elementi (cilindri) na vrhu, prema desno
- Linije moraju imati što manje presjecišta
- Svi elementi se crtaju u neaktiviranoj poziciji
- Razvodnici koji su aktivni (npr. pritisnuti klipnjačom cilindra) crtaju se u tom aktiviranom području
- Ako je razvodnik postavljen tako da u početnom položaju usmjerava stlačeni zrak prema cilindru (komora cilindra od strane klipa), onda se taj cilindar crta s izvučenom klipnjačom“ (Gregov, 2019, str. 3)

„Svaki upravljački sustav ima dva osnovna dijela: Energetski dio i Upravljački dio

Energetski dio je sklop izvršnog elementa i pripadajućeg razvodnika.“ (Gregov, 2019, str. 8)

### 9.3.1. Energetski sklop s jednoradnim cilindrom

Kako navodi Gregov (2019) jednoradni cilindar je u mogućnosti odraditi potreban rad samo u jednom smjeru. Hod cilindra postiže se djelovanjem tlaka zraka. Tako da za rad jednoradnog cilindra dovoljan je samo jedan radni vod, koji imaju razvodnici s tri ili dva priključka. Znajući da postoje dvije pozicije u kojima cilindar može biti, uvučeno i izvučeno, te da bi razvodnik to bio u mogućnosti ostvariti od treba imati najmanje dva razvodna položaja. Kako bi jednoradni cilindar radio potreban mu je 3/2 razvodnik. U slučaju da se cilindra treba zaustaviti u bilo kojem položaju a da to nisu položaji uvučenog ili izvučenog stanja, onda se koristi 3/3 razvodnik sa srednjim (nultim) zatvorenim položajem. Razvodnik koji daje opskrbu stlačenog zraka naziva se glavnim razvodnikom.

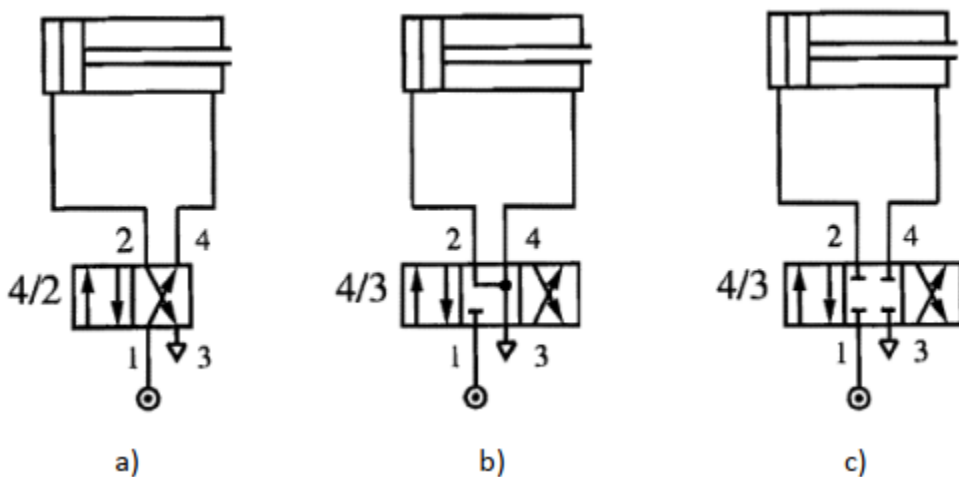


Slika 29. Energetski sklop jednoradnog cilindra s: a) 3/2 razvodnikom, b) 3/3 razvodnikom

(Gregov, 2019)

### 9.3.2. Energetski sklop s dvoradnim cilindrom

Kako navodi Gregov (2019), znajući da dvoradni cilindar obavlja potreban rad u oba smjera, za van i za unutra, te kako bi bio u stanju to obaviti potreban mu je još jedan radni vod, tj. dva radna voda. Tako da je potrebno koristiti razvodnike s četiri ili pet priključaka, a mogu biti s dva ili tri razvodna položaja. To znači da razvodnik 4/2 omogućava cilindru kretanje klipnjače prema naprijed i prema nazad, dok razvodnik 4/3 ima i srednji položaj koji omogućuje klipnjači cilindra pomak u položaj kojeg određuje vanjska sila, koja na nju djeluje. Također razvodnik 4/3 sa srednjim zatvorenim položajem omogućuje klipnjači cilindra mogućnost da ostane čvrsta u međupoložaju između dva krajnja.



Slika 30. Energetski sklop dvoradnog cilindra s: a) 4/2 razvodnikom, b) 4/3 razvodnikom s otvorenim srednjim položajem,

c) 4/3 razvodnikom s zatvorenim srednjim položajem

(Gregov, 2019)

### 9.3.3. Upravljački dio

„Upravljački dio je skup elemenata koji primaju, obrađuju i u prikladnom obliku daju informaciju izvršnim elementima, što u pneumatici podrazumijeva razvodne ventile.“ (Gregov, 2019, str. 9)

Kako navodi Gregov (2019). glavni razvodnik svoj pomak iz jednog u drugi položaj može odraditi ako direktno djelujemo na glavni razvodnik, bilo to fizički, mehanički ili na električni način te indirektno ako se to ostvaruje pomoću nekog drugog razvodnika, pomoću kojeg signal (zrak pod tlakom) aktivira glavni razvodnik.

Znajući to možemo reći da je direktno aktiviranje razvodnika mnogo rjeđe i uglavnom se koristi za najjednostavnije upravljanje cilindrom. Dok indirektno upravljanje se koristi kod svakog složenijeg upravljanja, gdje na temelju nekog programa više cilindra radi zajedno i usklađeno.

## 10. PRORAČUN CILINDAR VENTIL

Ulazni podaci:

- masa tereta  $m = 5 \text{ kg}$
- maksimalni tlak  $p_P = 6 \text{ bar}$
- hod klipa  $L = 100 \text{ mm} = 0,1 \text{ m}$
- vrijeme izvlačenja klipa  $t = 2 \text{ s}$

Sila kojom je opterećen cilindar:

$$F = G = m \cdot g$$

$$F = 5 \cdot 9,81 = 49,05 \text{ N}$$

Površina klipa cilindra:

$$p_C = \frac{F}{A}$$

$$A = \frac{F}{p_C} = \frac{49,05}{6 \cdot 10^5} = 8,175 \cdot 10^{-5} \text{ m}^2 = 0,8175 \text{ cm}^2$$

Promjer klipa cilindra:

$$A = \frac{D^2 \pi}{4}$$

$$D = \sqrt{\frac{4A}{\pi}} = \sqrt{\frac{4 \cdot 8,175 \cdot 10^{-5}}{\pi}} = 0,01020 \text{ m} = 10 \text{ mm}$$

Prema katalogu FESTO od mogućeg izbora promjera klipa odabran je:  $D = 12 \text{ mm}$

Round cylinders DSNU ★



- Self-adjusting end-position cushioning
- Diameter: 8, 10, 12, 16, 20, 25 mm (standard)
- Diameter: 32, 40, 50, 63 mm
- Stroke length: 1 ... 500 mm
- Force: 19 ... 1870 N
- Double-acting
- Position sensing
- Fixed/adjustable/self-adjusting cushioning
- Mounting flange

Slika 31. Prikaz odabranog dvoradnog cilindra

(Festo, 2021)

Površina klipa cilindra za novousvojeni promjer klipa:

$$A = \frac{D^2 \pi}{4}$$

$$A = \frac{0,012^2 \pi}{4} = 1,130 \cdot 10^{-4} \text{ m}^2 = 1,13 \text{ cm}^2$$

Brzina izvlačenja klipa cilindra:

$$v = \frac{L}{t}$$

$$v = \frac{0,1}{2} = 0,05 \text{ m/s}$$

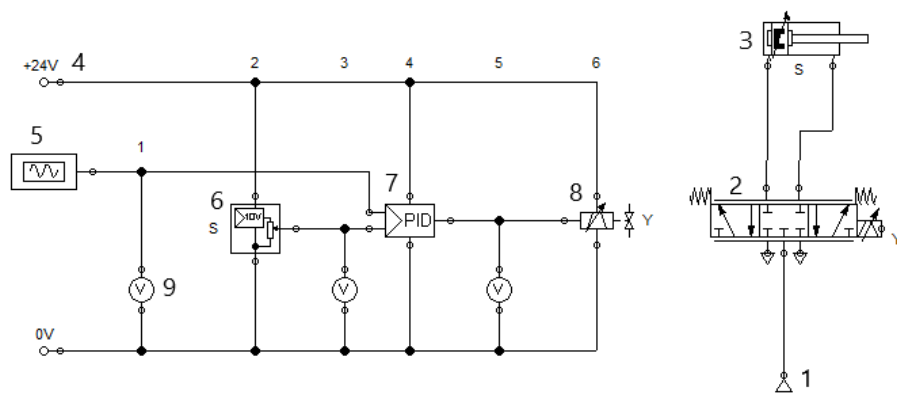
Potreban protok zraka na ulazu u cilindar:

$$Q_{stv}^P = v \cdot A$$

$$Q_{stv}^P = 0,05 \cdot 1,13 \cdot 10^{-4} = 5,65 \cdot 10^{-6} \text{ m}^3/\text{s}$$

## 11. PID UPRAVLJANJE SUSTAVOM ZA POZICIONIRANJE

Izrađen je simulacijski model sustava za pozicioniranje pneumatskog cilindra prema dimenzijama koje su izračunate u proračunu cilindar-ventil, također korišteno je opterećenje kao što je zadano u proračunu, pomoću softvera FluidSim. Sustav koji je složen prikazan je na slici 32., a sastoji se od kompresora, proporcionalnog 5/3 razvodnika i dvoradnog cilindra. Dio pomoću kojega reguliramo sustav sastoji se od izvora napajanja 24V, generatora funkcije, inkodera pomaka, PID regulatora, voltmetra i proporcionalnog ventila.



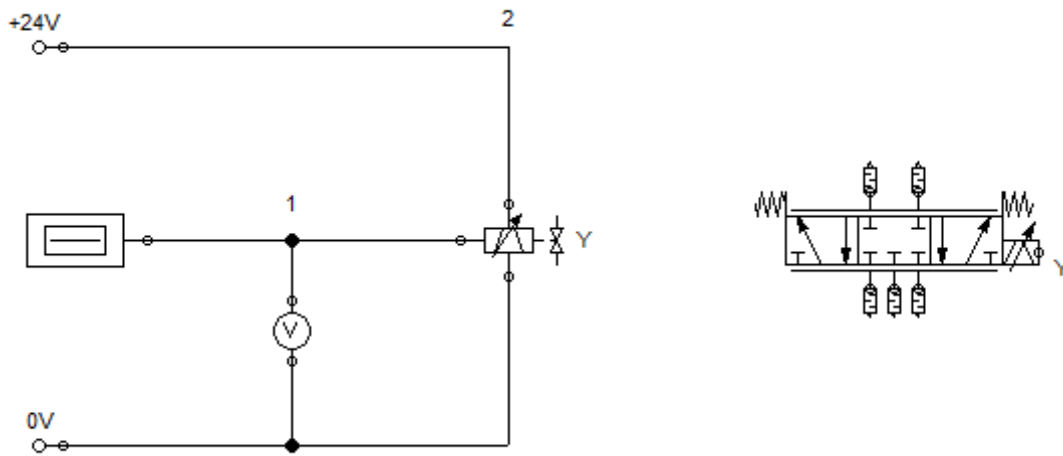
Slika 32. Sustav za pozicioniranje pneumatskog cilindra

Komponente koje se nalaze na slici 31. su sljedeće:

- 1- kompresor
- 2- proporcionalni 5/3 razvodnik
- 3- dvoradni cilindar
- 4- izvor napajanja 24V
- 5- generator funkcije
- 6- inkoder pomaka
- 7- PID regulatora
- 8- proporcionalnog ventil
- 9- voltmetar

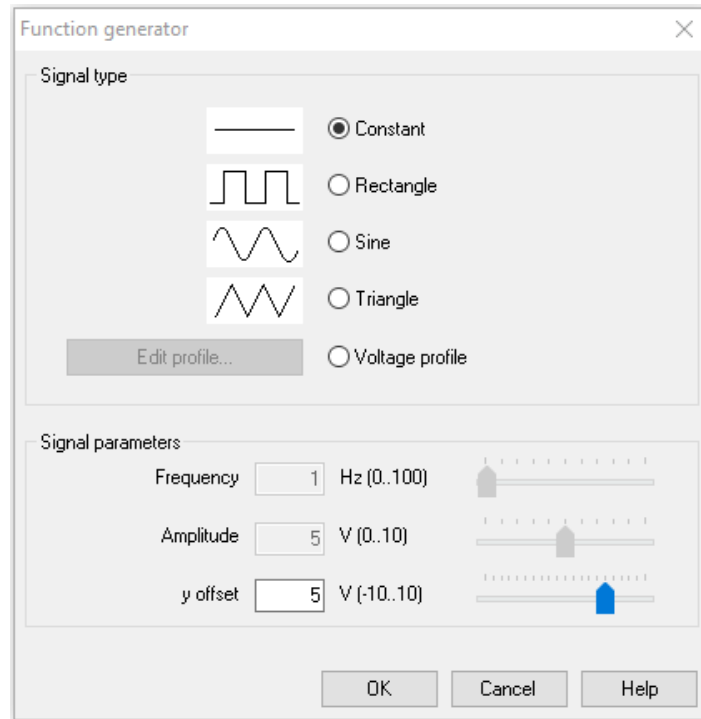


Izrada simulacijskog modela započeta je sa slaganjem sklopa prikazanog na slici 33. Taj sklop sastoji se od izvora napajanja, generatora funkcije, voltmetra, proporcionalnog ventila i proporcionalnog 5/3 razvodnika. On je služio za bolje razumijevanje svrhe generatora funkcije i koju funkciju odabrati za ovaj simulacijski model. Kako bi sklop radio u programu FluidSim moralo se staviti prigušivače na proporcionalni 5/3 razvodnik zbog grešaka koje program izbacuje.



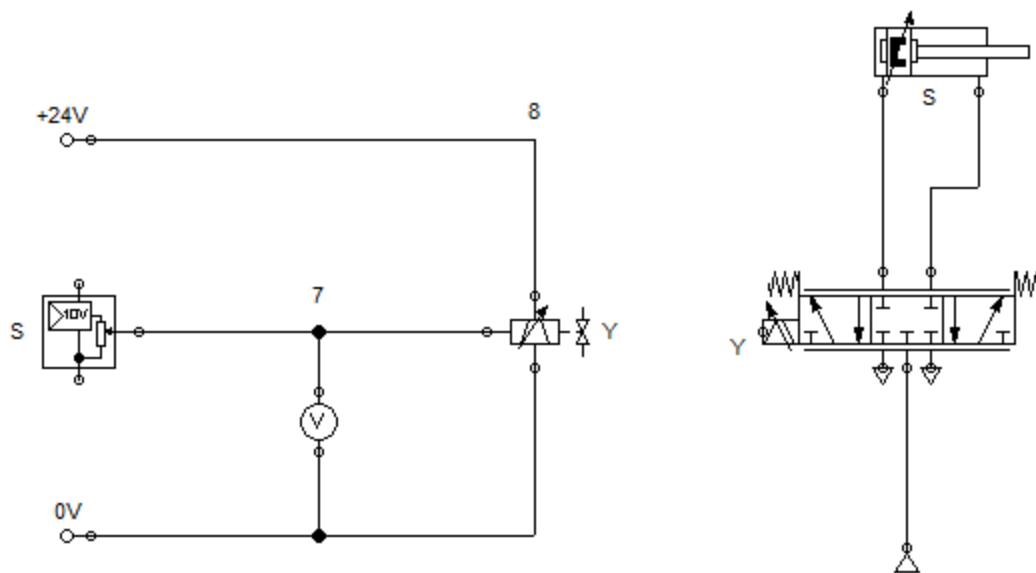
Slika 33. Sklop generatora funkcije

Generator funkcije generira signal između 0 i 10 volti. U ovom slučaju za tip signala korišten je konstantni signal kao što je prikazano na slici 33.



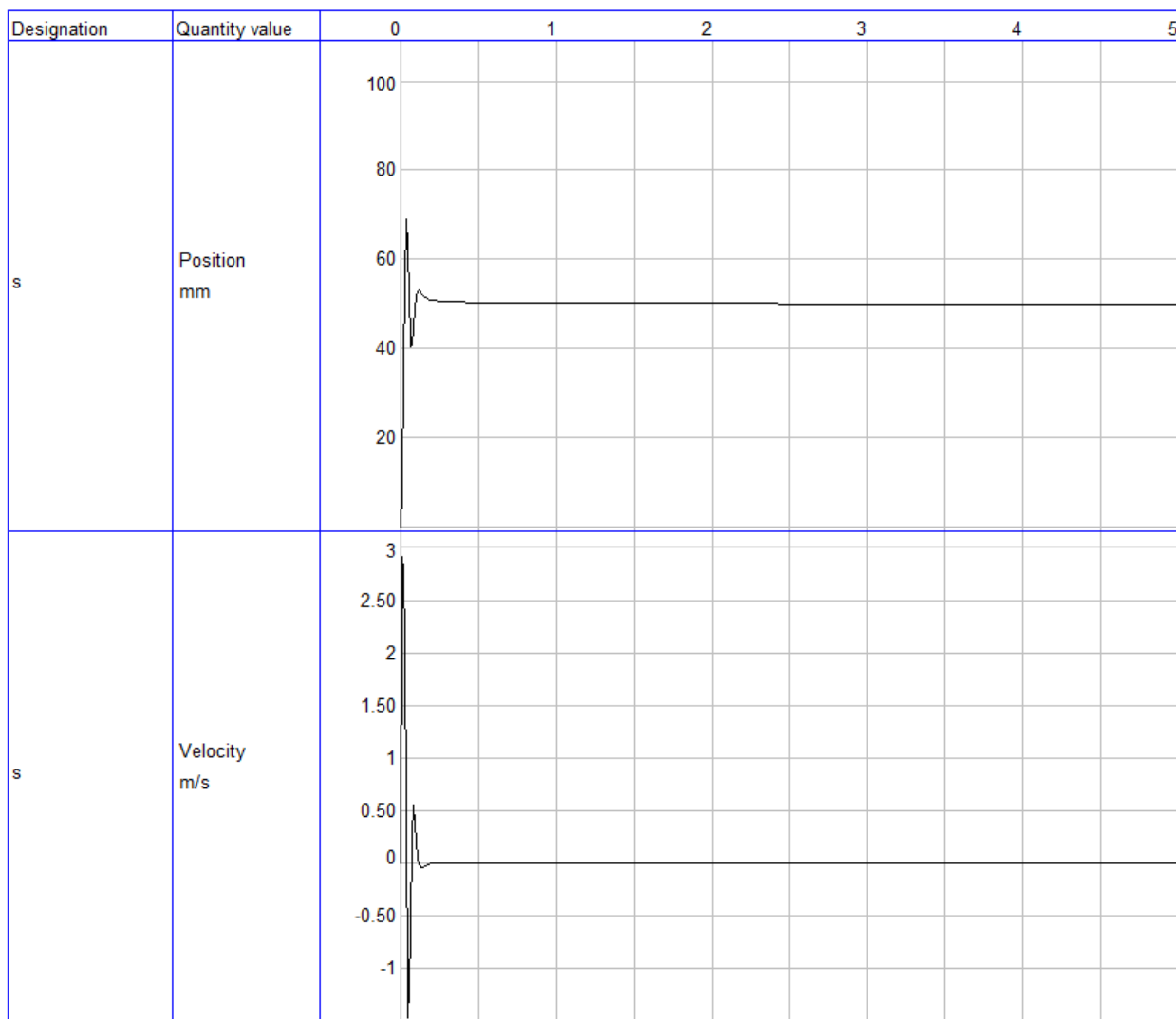
*Slika 34. Generator funkcije*

Poslije toga napravljen je jednostavni sklop za kontrolu položaja pneumatskog cilindra. Promijenjen je sklop kao što je prikazano na slici 35. Prije početka spajanja ostalih komponenti na proporcionalni 5/3 razvodnik maknuti su prigušivači sa njegovih priključaka, gdje je onda spojen kompresor i dvoradni cilindar. Umjesto generatora funkcije sada inkoder pomaka napaja proporcionalni ventil. Također definirane su oznake razvodnika i ventila sa slovom *Y*, kako bi bili međusobno interaktivni. Isto to je napravljeno sa cilindrom i inkoderom pomaka sa slovom *S*.



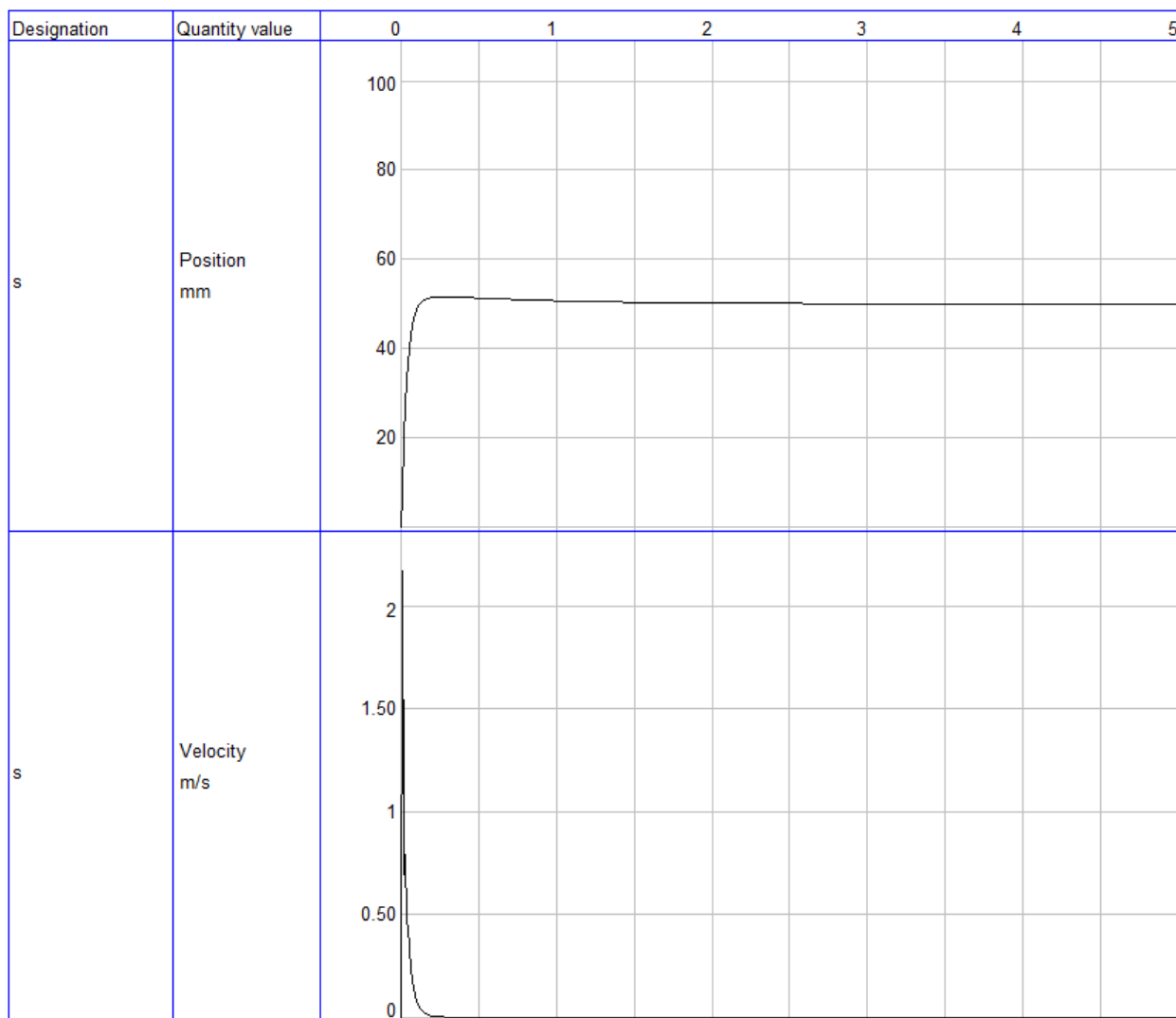
Slika 35. Jednostavni sklop za kontrolu položaja pneumatskog cilindra

Za kraj izrade simulacijskog modela potrebno je sve zajedno spojiti i dodati PID regulator pomoću kojeg ćemo omogućiti sustavu da pneumatski cilindar dođe, što je brže moguće i što preciznije, na bilo koju željenu poziciju. Cijeli sklop je prikazan na slici 32. Kako bi se postigla preciznija analiza kontrole sustava promatrat ćemo put i brzinu cilindra dok ne dostigne željenu poziciju. To će biti postignuto pomoću dijagrama stanja. Na slici 36. prikazan je dijagram simulacije bez podešavanja PID parametra.



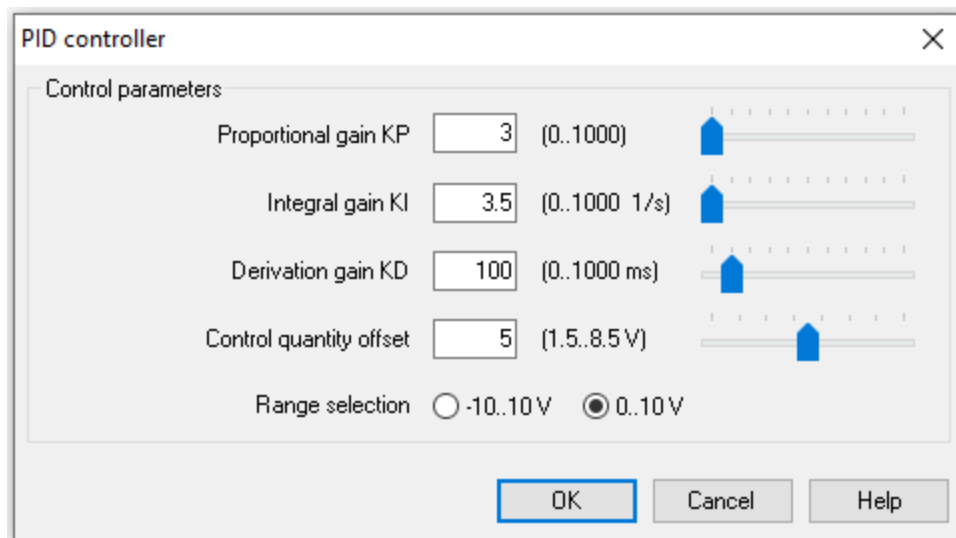
*Slika 36. Dijagram stanja bez podešavanja PID parametra*

Kao što vidimo na dijagramu pomak cilindra ima velike oscilacije te veliki odziv. Pomoću metode pokušaja i pogrešaka mijenjati će se parametri PID regulatora dok se ne dobije stabilno ponašanje sustava. Promjenama proporcionalnog pojačanja (P član) želimo smanjiti odziv sustava, koji će onda uzročiti još veće oscilacije, koje poslije smanjujemo podešavanjem derivacijskog pojačanja (D član). Na slici 37. prikazan je dijagram s podešenim PID parametrima.



*Slika 37. Dijagram stanja s podešenim PID parametrima*

Nakon podešavanja parametara unutar PID regulatora dobiven je sustav koji je stabilan, s vrlo malim odzivom i vrlo malo oscilacija. Pomoću promjena ulaznih parametara sada ovaj sustav ima veću iskoristivost i veću stabilnost u radu. Na slici 38. prikazani su parametri koji su korišteni za ovaj simulacijski model.



Slika 38. Parametri PID regulatora

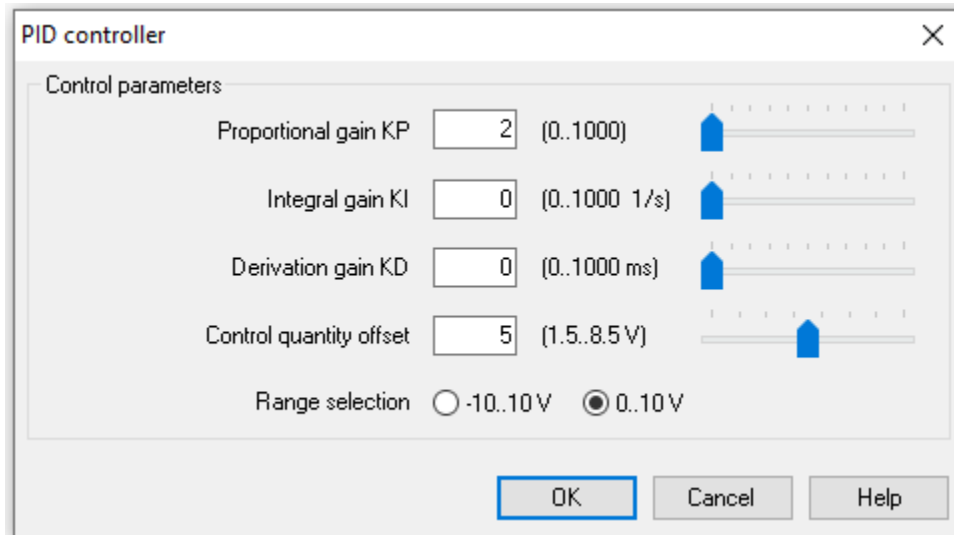
## 12. PODEŠAVANJE PARAMETRA POMOĆU ZIEGLER-NICHOLS METODE

Pomoću metode pokušaja i pogrešaka ostvareno je zadovoljavajuće reguliranje pomaka cilindra pneumatskog cilindra, a nakon toga se to probalo ostvariti pomoću Ziegler-Nichols metode. Prvi korak kod podešavanja parametra ovom metodom je započeti sa malim  $K_p$ , te postaviti vrijednosti  $K_i$  i  $K_d$  na nulu. U ovom trenutku samo proporcionalni dio upravlja sustavom, ili P regulator. Sljedeći korak je povećavanje  $K_p$  parametra sve dok ne postignemo ustaljene oscilacije. To znači da pomoću P regulatora dovedemo sustav u stanje osciliranja gdje oscilacije ne idu prema nuli niti se povećavaju, znači ostaju konstante. Kad postignemo ustaljene oscilacije sljedeći korak je zabilježiti kritičnu/ konačnu dobit  $K_u$ , koja je zapravo  $K_p$  u ustaljenoj oscilaciji. Isto tako ćemo zabilježiti kritično/ konačno razdoblje oscilacije koji je  $T_u$ . Kada imamo vrijednosti  $K_u$  i  $T_u$ , možemo naći parametre  $K_p$ ,  $T_i$  i  $T_d$  pomoću jednadžbi sa slike br. 21 koja se nalazi u ovom radu. Pomoću vrijednosti  $T_i$  i  $T_d$  kasnije možemo doći do parametra  $K_i$  i  $K_d$  pomoću ovih jednadžbi:

$$K_i = \frac{K_p}{T_i}$$

$$K_d = K_p \times T_d$$

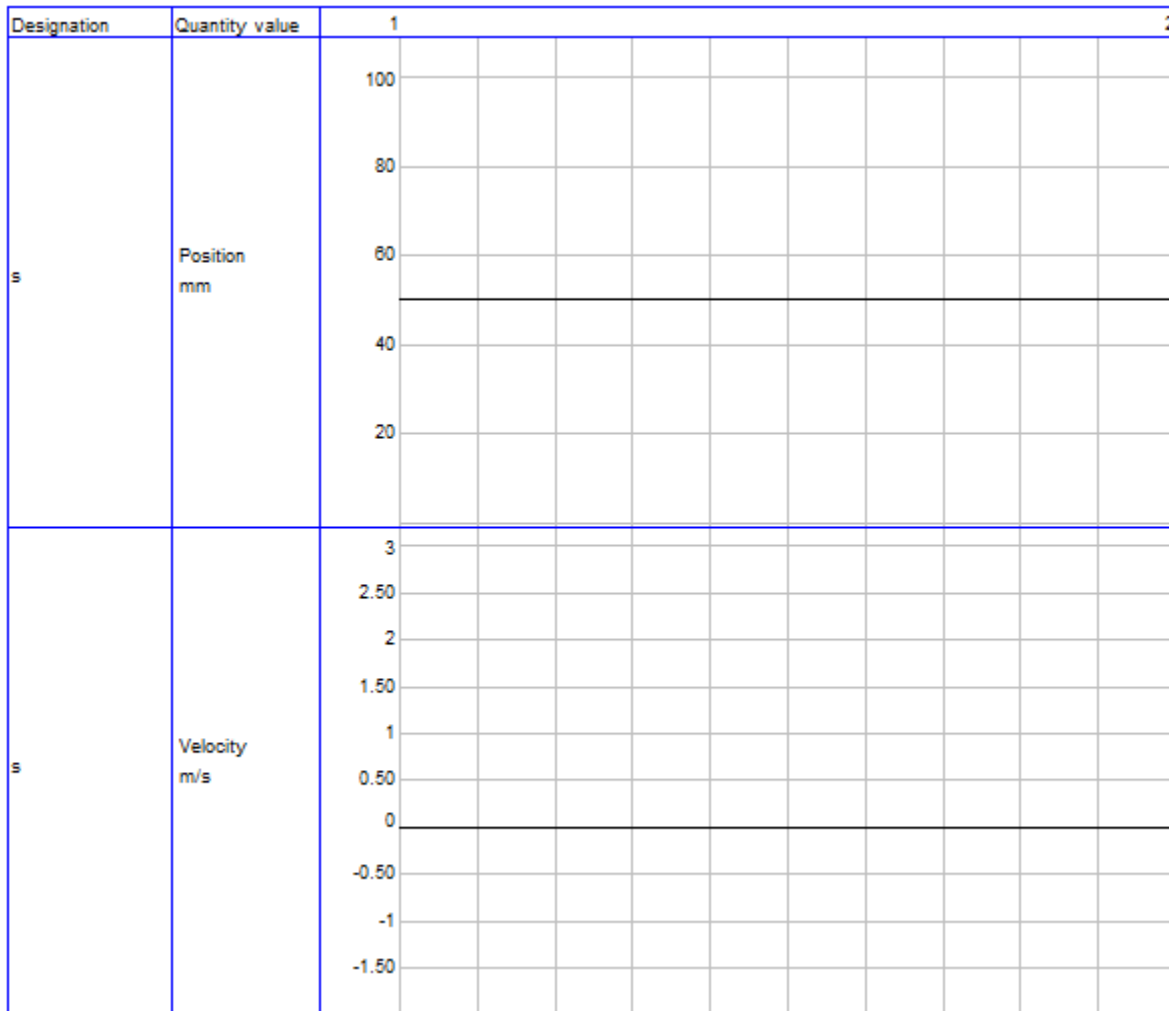
Povećavanjem proporcionalnog člana u PID regulatoru, prvi broj koji je postavljen za proporcionalni dio bio je broj 2, naravno integralni i derivacijski dio moraju biti 0. Nakon ubacivanja parametra u regulator koji su prikazani na slici 39. pokrenuta je simulacija.



Slika 39. Parametri P regulatora



Ne primjećujemo oscilacije na dijagramu kao što je prikazano na slici 40. Sada je potrebno daljnje povećavanje proporcionalnog člana unutar PID regulatora kako bismo postigli konstantno osciliranje sustava.



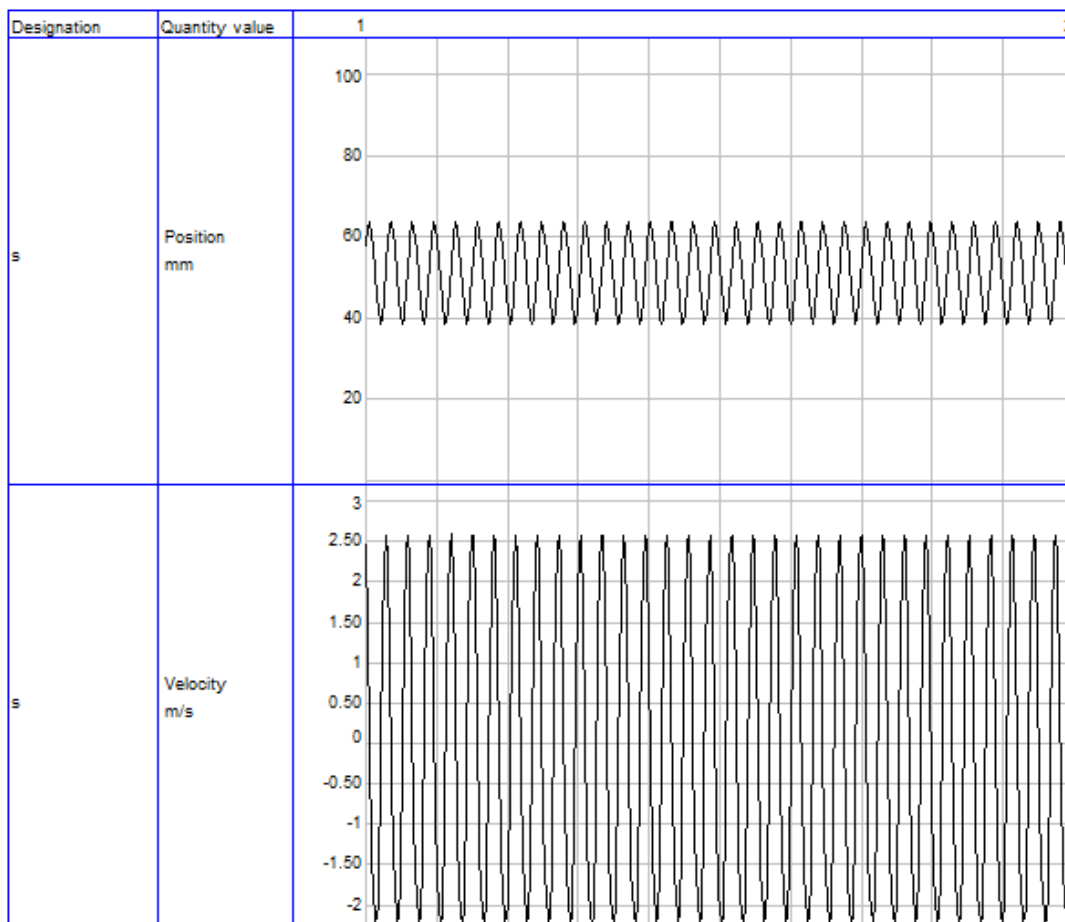
Slika 40. Dijagram stanja gdje je proporcionalni član jednak 2

Mijenjanjem vrijednosti proporcionalnog člana u simulaciji došli smo do broja 6 kao vrijednost koja dovodi sustav u stanje neograničenog osciliranja kao što vidimo na slici 41. Kada smo ostvarili neutralnu stabilnost sustava s dijagrama možemo očitati vrijednost  $Prc$ , tako što izmjerimo vrijeme trajanje jedne pune amplitude u sekundama. Ovaj postupak je vidljiv na slici 20. koja se nalazi u ovom radu.

Izmjerene vrijednosti s dijagrama su sljedeće:

$$Kcr = 6$$

$$Pcr = 0,03$$



Slika 41. Dijagram sustava s konstantnim oscilacijama

Sad kad imamo vrijednosti  $K_{cr}$  i  $P_{cr}$  s kojima pomoću jednadžbi za podešavanje parametra pomoću Ziegler-Nichols metode sa slike 21. dobivamo ove rezultate:

$$K_p = \frac{K_{cr}}{1,7} = \frac{6}{1,7} = 3,5$$

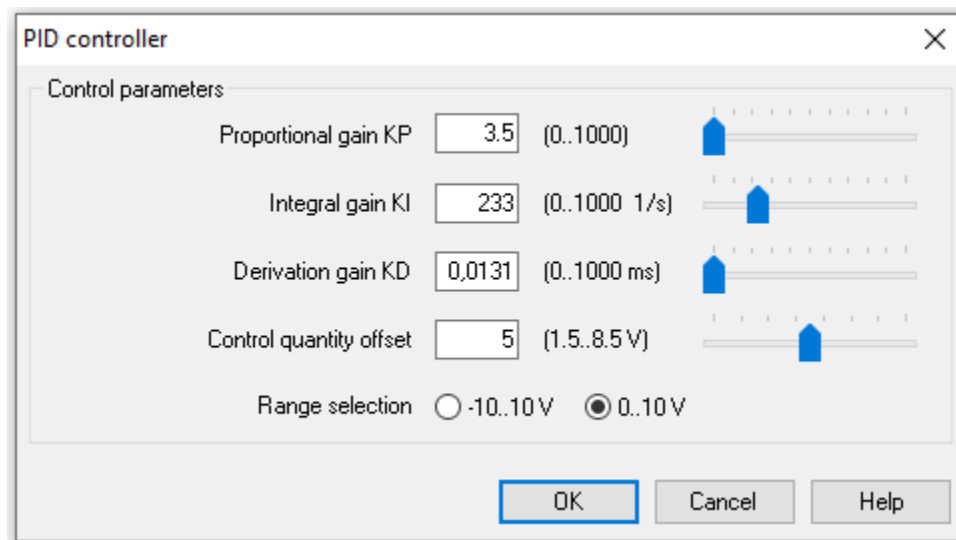
$$T_i = \frac{P_{cr}}{2} = \frac{0,03}{2} = 0,015$$

$$T_d = \frac{P_{cr}}{8} = \frac{0,03}{8} = 0,00375 ;$$

$$K_i = \frac{K_p}{T_i} = \frac{3,5}{0,015} = 233$$

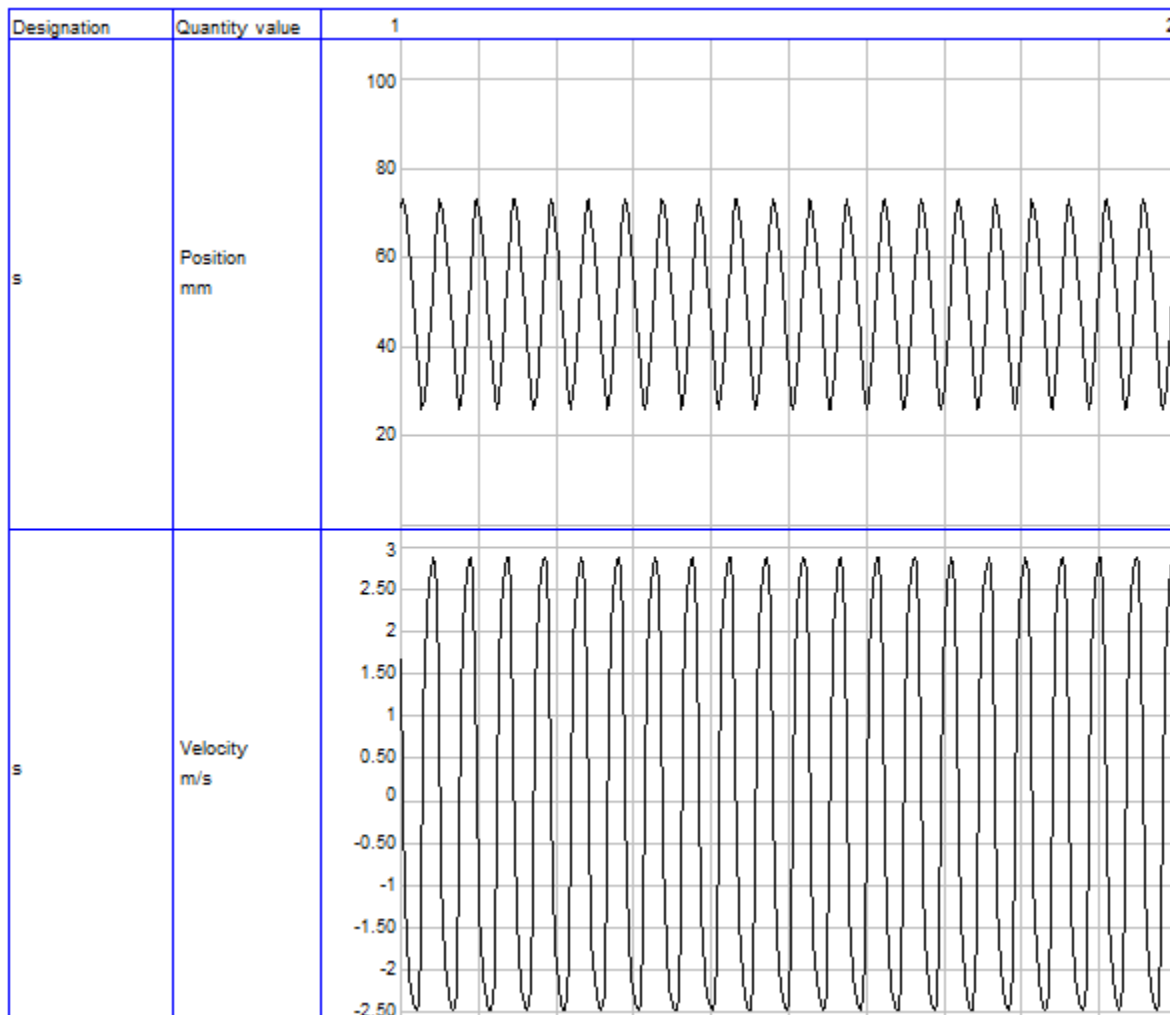
$$K_d = K_p \times T_d = 3,5 \times 0,00375 = 0,0131$$

Sada imamo sve potrebne parametre, proporcionalno pojačanje- $K_p$ , integralno pojačanje- $K_i$  i derivacijsko pojačanje- $K_d$ , za definirati PID regulator pomoću Ziegler-Nichols metode. Unos parametara prikazan je na slici 42.



Slika 42. Parametri Ziegler-Nichols metode

Nakon unosa parametra u PID regulator ponovo pokrećemo simulaciju i pratimo ponašanje sustava pomoću dijagrama stanja.



*Slika 43. Dijagram sustava podešen Ziegler-Nichols metodom*

Kao što vidimo na slici 43. u ovom slučaju metoda Ziegler-Nichols nije se pokazala pouzdanom jer vidimo da su u sustavu još uvijek prisutne oscilacije. Rezultati dokazuju da u ovoj simulaciji koja je vrlo jednostavna pomoću Ziegler-Nichols metode nije moguće upravljati sustavom.

### 13. ZAKLJUČAK

Razradom tema i spoznajom znanja o automatskog regulaciji i PID regulatorima, ovaj rad imao je kvalitetnu podlogu za izradu simulacijskog modela za pozicioniranje pneumatskog cilindra. Također u radu su općenito objašnjene neke od metoda podešavanja parametara PID regulatora.

Iz simulacije možemo vidjeti da kod pozicioniranja pneumatskog cilindra koji nije reguliran PID regulatorom dolazi do velikog odziva i oscilacija u sustavu, kao što je prikazano na slici 36. Promjenom parametara unutar PID regulatora dobivamo stabilno ponašanje sustava, to je ostvareno metodom pokušaja i pogrešaka. Gdje je promjena parametara P dijela izazivala oscilacije, koje su kasnije smanjenje promjenom parametara D dijela, kao što je prikazano na slici 37. Ako parametri PID regulatora nisu pravilo podešeni sustav postaje nestabilan i nije spreman za upotrebu, kao što možemo zaključiti nakon pokušaja reguliranja simulacije pomoću Ziegler-Nichols metode podešavanja parametra.

Zbog visoke kvalitete i njegove funkcije, PID regulator je najpogodniji regulator za reguliranje pomaka cilindra. Ima najbolji odziv i vrlo male oscilacije u sustavu za pozicioniranje što dozvoljava sustavu da bude kompetentan i ima veću stabilnost u radu.

## 14. LITERATURA

1. Aidan O'Dwyer, (2005). PID control: „*the early years*“. Technological University Dublin. <https://arrow.tudublin.ie/cgi/viewcontent.cgi?article=1088&context=engscheart> 20.09.2021.
2. Control Notes: „*Reflections of a Process Control Practitioner*“.s interneta, <https://blog.opticontrols.com/archives/124> 20.09.2021.
3. Đorđe Dobrota, (2020). „*Hidraulički i pneumatski sustavi: Predavanje V*“. [http://www.pfst.unist.hr/uploads/HiPS\\_Predavanje\\_5.pdf](http://www.pfst.unist.hr/uploads/HiPS_Predavanje_5.pdf) 20.09.2021.
4. El-Pro-Cus. s interneta, <https://www.elprocus.com/the-working-of-a-pid-controller/> 20.09.2021.
5. Goran Gregov, (2021). „*OSNOVE AUTOMATSKOG UPRAVLJANJA*“. [https://moodle.srce.hr/2020-2021/pluginfile.php/4225806/mod\\_resource/content/1/9\\_Predavanje\\_OAU\\_Gregov\\_19\\_20.pdf](https://moodle.srce.hr/2020-2021/pluginfile.php/4225806/mod_resource/content/1/9_Predavanje_OAU_Gregov_19_20.pdf) 20.09.2021.
6. Guillermo J. Costa, (2011). „*Tuning a PID Controller*“. <https://www.powertransmission.com/issues/0411/pid.pdf> 20.09.2021.
7. Joško Petrić, (2012). „*Automatska regulacija: uvod u analizu i sintezu*“. [http://titan.fsb.hr/~jpetric/Udzbenici/Udzbenik\\_AUTOMATSKA%20REGULACIJA\\_JPetric.pdf](http://titan.fsb.hr/~jpetric/Udzbenici/Udzbenik_AUTOMATSKA%20REGULACIJA_JPetric.pdf) 20.09.2021.
8. LibreTexts. s interneta, [https://eng.libretexts.org/Bookshelves/Industrial\\_and\\_Systems\\_Engineering/Book%3A\\_Chemical\\_Process\\_Dynamics\\_and\\_Controls\\_\(Wolff\)/09%3A\\_Proportional-Integral-Derivative\\_\(PID\)\\_Control/9.03%3A\\_PID\\_Tuning\\_via\\_Classical\\_Methods](https://eng.libretexts.org/Bookshelves/Industrial_and_Systems_Engineering/Book%3A_Chemical_Process_Dynamics_and_Controls_(Wolff)/09%3A_Proportional-Integral-Derivative_(PID)_Control/9.03%3A_PID_Tuning_via_Classical_Methods) 20.09.2021.
9. PID regulatori, Univerzitet u Novom Sadu, Fakultet tehničkih nauka, Katedra za Automatiku i upravljanje sistemima.
10. Tomislav Kučiš, (2011). „*Samopodesivi pid regulator zasnovan na adaptivnom kalmanovom filtru i relejnom članu*“, PID regulator. [http://repositorij.fsb.hr/1285/1/23\\_03\\_2011\\_Diplomski\\_kucis.PDF](http://repositorij.fsb.hr/1285/1/23_03_2011_Diplomski_kucis.PDF). 20.09.2021.

11. Vinko Tomas, Ivica Šegulja, Marko Valčić, (2010). „Osnove automatizacije“. Sveučilište u Rijeci, Pomorski fakultet u Rijeci.
12. Zoran Vrhovski, (2013.) Automatsko upravljanje: „*Analiza i sinteza linearnih kontinuiranih sustava*“. [https://vub.hr/images/uploads/587/automatsko\\_upravljanje\\_-\\_zoran\\_vrhovski.pdf](https://vub.hr/images/uploads/587/automatsko_upravljanje_-_zoran_vrhovski.pdf). 20.09.2021.
13. Goran Gregov, (2019). PNEUMATSKO UPRAVLJANJE: „*Vježbe*“. [https://moodle.srce.hr/2020-2021/pluginfile.php/4225800/mod\\_resource/content/1/Pneumatsko%20upravljanje\\_GregovG.pdf](https://moodle.srce.hr/2020-2021/pluginfile.php/4225800/mod_resource/content/1/Pneumatsko%20upravljanje_GregovG.pdf) 20.09.2021.

## 15. IZVOR SLIKA

1. Joško Petrić, (2012). Upravljanje ili otvoreni krug [slika]. Preuzeto sa [http://titan.fsb.hr/~jpetric/Udzbenici/Udzbenik\\_AUTOMATSKA%20REGULACIJA\\_JPetric.pdf](http://titan.fsb.hr/~jpetric/Udzbenici/Udzbenik_AUTOMATSKA%20REGULACIJA_JPetric.pdf) 20.09.2021.
2. Joško Petrić, (2012). Osnovni simboli koji sačinjavaju blok dijagram [slika]. Preuzeto sa [http://titan.fsb.hr/~jpetric/Udzbenici/Udzbenik\\_AUTOMATSKA%20REGULACIJA\\_JPetric.pdf](http://titan.fsb.hr/~jpetric/Udzbenici/Udzbenik_AUTOMATSKA%20REGULACIJA_JPetric.pdf) 20.09.2021.
3. Vinko Tomas, Ivica Šegulja, Marko Valčić, (2010). Funkcionalni blok dijagram za primjer: upravljanje temperaturom prostorije [slika]. str. 5
4. Vinko Tomas, Ivica Šegulja, Marko Valčić, (2010). Shematski prikaz unaprijednog upravljanja [slika]. str. 6
5. Joško Petrić, (2012). Poopćeni osnovni blok dijagram automatske regulacije [slika]. Preuzeto sa [http://titan.fsb.hr/~jpetric/Udzbenici/Udzbenik\\_AUTOMATSKA%20REGULACIJA\\_JPetric.pdf](http://titan.fsb.hr/~jpetric/Udzbenici/Udzbenik_AUTOMATSKA%20REGULACIJA_JPetric.pdf) 20.09.2021.
6. Wikipedia, (2021). A block diagram of a PID controller in a feedback loop [slika]. Preuzeto sa [https://en.wikipedia.org/wiki/PID\\_controller](https://en.wikipedia.org/wiki/PID_controller) 20.09.2021.

7. Vinko Tomas, Ivica Šegulja, Marko Valčić, (2010). Usporedni prikaz prijelaznih karakteristika tipičnog procesa pri regulaciji različitim regulatorima [slika]. str. 59
8. Vinko Tomas, Ivica Šegulja, Marko Valčić, (2010). Sažeti prikaz značajki elemenata s P, I, PI, PD i PID [slika]. str. 51
9. Control Notes, (2021). Interactive Controller Algorithm [slika]. Preuzeto sa <https://blog.opticontrols.com/archives/124> 20.09.2021.
10. Control Notes, (2021). Noninteractive Controller Algorithm [slika]. Preuzeto sa <https://blog.opticontrols.com/archives/124> 20.09.2021.
11. Control Notes, (2021). Parallel Controller Algorithm [slika]. Preuzeto sa <https://blog.opticontrols.com/archives/124> 20.09.2021.
12. Guillermo J. Costa (2011) Controller response to step input with derivative and integral values held constant [slika]. Preuzeto sa <https://www.powertransmission.com/issues/0411/pid.pdf> 20.09.2021.
13. Guillermo J. Costa (2011) Controller response to step input with proportional and derivative values held constant [slika]. Preuzeto sa <https://www.powertransmission.com/issues/0411/pid.pdf> 20.09.2021.
14. Guillermo J. Costa (2011) Controller response to step input with proportional and integral values held constant [slika]. Preuzeto sa <https://www.powertransmission.com/issues/0411/pid.pdf> 20.09.2021.
15. Goran Gregov, (2021). Prijenosnici snage – 1 Predavanje [slika]. Preuzeto sa [https://moodle.srce.hr/2020-2021/pluginfile.php/4225806/mod\\_resource/content/1/9\\_Predavanje\\_OAU\\_Gregov\\_19\\_20.pdf](https://moodle.srce.hr/2020-2021/pluginfile.php/4225806/mod_resource/content/1/9_Predavanje_OAU_Gregov_19_20.pdf) 20.09.2021.
16. LibreTexts, (2021). PID Tuning via Classical Methods – Engineering LibreTexts [slika]. Preuzeto sa [https://eng.libretexts.org/Bookshelves/Industrial\\_and\\_Systems\\_Engineering/Book%3A\\_Chemical\\_Process\\_Dynamics\\_and\\_Controls\\_\(Woolf\)/09%3A\\_Proportional-Integral-Derivative\\_\(PID\)\\_Control/9.03%3A\\_PID\\_Tuning\\_via\\_Classical\\_Methods](https://eng.libretexts.org/Bookshelves/Industrial_and_Systems_Engineering/Book%3A_Chemical_Process_Dynamics_and_Controls_(Woolf)/09%3A_Proportional-Integral-Derivative_(PID)_Control/9.03%3A_PID_Tuning_via_Classical_Methods) 20.09.2021.



17. LibreTexts, (2021). PID Tuning via Classical Methods – Engineering LibreTexts [slika].  
Preuzeto sa  
[https://eng.libretexts.org/Bookshelves/Industrial\\_and\\_Systems\\_Engineering/Book%3A\\_Chemical\\_Process\\_Dynamics\\_and\\_Controls\\_\(Woolf\)/09%3A\\_Proportional-Integral-Derivative\\_\(PID\)\\_Control/9.03%3A\\_PID\\_Tuning\\_via\\_Classical\\_Methods](https://eng.libretexts.org/Bookshelves/Industrial_and_Systems_Engineering/Book%3A_Chemical_Process_Dynamics_and_Controls_(Woolf)/09%3A_Proportional-Integral-Derivative_(PID)_Control/9.03%3A_PID_Tuning_via_Classical_Methods) 20.09.2021.
18. LibreTexts, (2021). PID Tuning via Classical Methods – Engineering LibreTexts [slika].  
Preuzeto sa  
[https://eng.libretexts.org/Bookshelves/Industrial\\_and\\_Systems\\_Engineering/Book%3A\\_Chemical\\_Process\\_Dynamics\\_and\\_Controls\\_\(Woolf\)/09%3A\\_Proportional-Integral-Derivative\\_\(PID\)\\_Control/9.03%3A\\_PID\\_Tuning\\_via\\_Classical\\_Methods](https://eng.libretexts.org/Bookshelves/Industrial_and_Systems_Engineering/Book%3A_Chemical_Process_Dynamics_and_Controls_(Woolf)/09%3A_Proportional-Integral-Derivative_(PID)_Control/9.03%3A_PID_Tuning_via_Classical_Methods) 20.09.2021.
19. LibreTexts, (2021). PID Tuning via Classical Methods – Engineering LibreTexts [slika].  
Preuzeto sa  
[https://eng.libretexts.org/Bookshelves/Industrial\\_and\\_Systems\\_Engineering/Book%3A\\_Chemical\\_Process\\_Dynamics\\_and\\_Controls\\_\(Woolf\)/09%3A\\_Proportional-Integral-Derivative\\_\(PID\)\\_Control/9.03%3A\\_PID\\_Tuning\\_via\\_Classical\\_Methods](https://eng.libretexts.org/Bookshelves/Industrial_and_Systems_Engineering/Book%3A_Chemical_Process_Dynamics_and_Controls_(Woolf)/09%3A_Proportional-Integral-Derivative_(PID)_Control/9.03%3A_PID_Tuning_via_Classical_Methods) 20.09.2021.
20. LibreTexts, (2021). System tuned using the Ziegler-Nichols closed-loop tuning method[slika]. Preuzeto sa  
[https://eng.libretexts.org/Bookshelves/Industrial\\_and\\_Systems\\_Engineering/Book%3A\\_Chemical\\_Process\\_Dynamics\\_and\\_Controls\\_\(Woolf\)/09%3A\\_Proportional-Integral-Derivative\\_\(PID\)\\_Control/9.03%3A\\_PID\\_Tuning\\_via\\_Classical\\_Methods](https://eng.libretexts.org/Bookshelves/Industrial_and_Systems_Engineering/Book%3A_Chemical_Process_Dynamics_and_Controls_(Woolf)/09%3A_Proportional-Integral-Derivative_(PID)_Control/9.03%3A_PID_Tuning_via_Classical_Methods) 20.09.2021.
21. LibreTexts, (2021). PID Tuning via Classical Methods – Engineering LibreTexts [slika].  
Preuzeto sa  
[https://eng.libretexts.org/Bookshelves/Industrial\\_and\\_Systems\\_Engineering/Book%3A\\_Chemical\\_Process\\_Dynamics\\_and\\_Controls\\_\(Woolf\)/09%3A\\_Proportional-Integral-Derivative\\_\(PID\)\\_Control/9.03%3A\\_PID\\_Tuning\\_via\\_Classical\\_Methods](https://eng.libretexts.org/Bookshelves/Industrial_and_Systems_Engineering/Book%3A_Chemical_Process_Dynamics_and_Controls_(Woolf)/09%3A_Proportional-Integral-Derivative_(PID)_Control/9.03%3A_PID_Tuning_via_Classical_Methods) 20.09.2021.
22. Dorđe Dobrota, (2020). Princip rada pneumatskog sustava [slika]. Preuzeto sa  
[http://www.pfst.unist.hr/uploads/HiPS\\_Predavanje\\_5.pdf](http://www.pfst.unist.hr/uploads/HiPS_Predavanje_5.pdf) 20.09.2021.
23. PeveX (2021). Uljni kompresor EINHELLTC-AC190/24/8 [slika]. Preuzeto sa  
<https://pevex.hr/uljni-kompresor-einhell-tc-ac-190-24-8-290966.html> 20.09.2021.

24. HiSupplier.com, (2021). Pressure Regulating Valve [slika]. Preuzeto sa <http://chinaxuming.en.hisupplier.com/product-1119736-Pressure-Regulating-Valve-Components.html> 20.09.2021.
25. Flomax.ie, (2021). Single Acting Cylinders [slika]. Preuzeto sa <https://www.flomax.ie/Catalogue/PNEUMATIC-EQUIPMENT/Pneumatic-Cylinders-Accessories/ISO6432-10-25mm-Diameter-AVENTICS/Double-Acting-Cylinder-Cushioned-Magnetic-Bosch-Rexroth> 20.09.2021.
26. Flomax.ie, (2021). Double Acting Cylinders [slika]. Preuzeto sa <https://www.flomax.ie/Catalogue/PNEUMATIC-EQUIPMENT/Pneumatic-Cylinders-Accessories/ISO6432-10-25mm-Diameter-AVENTICS/Double-Acting-Cylinder-Cushioned-Magnetic-Bosch-Rexroth> 20.09.2021.
27. Dorđe Dobrota, (2020). Opisivanje 5/2 upravljačkog ventila [slika]. Preuzeto sa [http://www.pfst.unist.hr/uploads/HiPS\\_Predavanje\\_5.pdf](http://www.pfst.unist.hr/uploads/HiPS_Predavanje_5.pdf) 20.09.2021.
28. Dorđe Dobrota, (2020). Pneumatski simbol 5/2 upravljačkog ventila [slika]. Preuzeto sa [http://www.pfst.unist.hr/uploads/HiPS\\_Predavanje\\_5.pdf](http://www.pfst.unist.hr/uploads/HiPS_Predavanje_5.pdf) 20.09.2021.
29. Goran Gregov, (2019). Energetski sklop jednoradnog cilindra s: a) 3/2 razvodnikom, b) 3/3 razvodnikom [slika]. Preuzeto sa [https://moodle.srce.hr/2020-2021/pluginfile.php/4225800/mod\\_resource/content/1/Pneumatsko%20upravljanje\\_GregovG.pdf](https://moodle.srce.hr/2020-2021/pluginfile.php/4225800/mod_resource/content/1/Pneumatsko%20upravljanje_GregovG.pdf) 20.09.2021.
30. Goran Gregov, (2019). Energetski sklop dvoradnog cilindra s: a) 4/2 razvodnikom, b) 4/3 razvodnikom s otvorenim srednjim položajem, c) 4/3 razvodnikom s zatvorenim srednjim položajem [slika]. Preuzeto sa [https://moodle.srce.hr/2020-2021/pluginfile.php/4225800/mod\\_resource/content/1/Pneumatsko%20upravljanje\\_GregovG.pdf](https://moodle.srce.hr/2020-2021/pluginfile.php/4225800/mod_resource/content/1/Pneumatsko%20upravljanje_GregovG.pdf) 20.09.2021.
31. Festo.com, (2021). Round cylinders [slika]. Preuzeto sa [https://www.festo.com/cat/en-vn/vn/products\\_010204](https://www.festo.com/cat/en-vn/vn/products_010204) 20.09.2021.

## 16. POPIS SLIKA I TABLICA

Slika 1. Upravljanje ili otvoreni krug .....	6
Slika 2. Osnovni simboli koji sačinjavaju blok dijagram .....	8
Slika 3. Blok dijagram upravljanja .....	10
Slika 4. Blok dijagram unaprijednog upravljanja .....	11
Slika 5. Osnovni blok dijagram automatske regulacije .....	12
Slika 6. PID regulator blok dijagram .....	15
Slika 7. karakteristike reguliranja različitim regulatorima .....	17
Slika 8. Smanjeni prikaz značajki elemenata s P, PI, PD i PID djelovanjem .....	18
Slika 9. Interaktivni algoritam .....	19
Slika 10. Ne interaktivni algoritam .....	20
Slika 11. Paralelni algoritam .....	20
Slika 12. Efekt dodavanja $K_p$ ( $K_i$ , i $K_d$ zadržani konstantnim) .....	22
Slika 13. Efekt dodavanja $K_i$ ( $K_p$ , i $K_d$ zadržani konstantnim) .....	23
Slika 14. Efekt dodavanja $K_d$ ( $K_p$ , i $K_i$ zadržani konstantnim) .....	24
Slika 15. Efekt povećavanja parametra nezavisno .....	25
Slika 16. Otvorena petlja „First Order Plus Dead Time“ (S-oblik krivulje) .....	28
Slika 17. Parametri otvorene petlje za ( $K_p$ , $T_i$ , $T_d$ ) .....	29
Slika 18. Test otvorene petlje procesa .....	30
Slika 19. Parametri Cohen-Coon metode .....	31
Slika 20. Sustav podešen pomoću Ziegler-Nichols metode zatvorenom petljom. ....	32
Slika 21. Parametri zatvorene petlje za ( $K_p$ , $T_i$ , $T_d$ ) .....	33
Slika 22. Princip rada pneumatskog sustava .....	36
Slika 23. Kompresor i pneumatski simbol kompresora .....	37
Slika 24. Komponenta za regulaciju pritiska i pneumatski simbol komponenta .....	38
Slika 25. Jednoradni cilindar i pneumatski simbol jednoradnog cilindra .....	38
Slika 26. Dvoradni cilindar i pneumatska shema dvoradnog cilindra .....	39
Slika 27. Opisivanje 5/2 upravljačkog ventila .....	40

Slika 28. Pneumatski simbol 5/2 upravljačkog ventila.....	40
Slika 29. Energetski sklop jednoradnog cilindra s: a) 3/2 razvodnikom, b) 3/3 razvodnikom.....	42
Slika 30. Energetski sklop dvoradnog cilindra s: a) 4/2 razvodnikom, b) 4/3 razvodnikom s otvorenim srednjim položajem, .....	43
Slika 31. Prikaz odabranog dvoradnog cilindra.....	46
Slika 32. Sustav za pozicioniranje pneumatskog cilindra.....	47
Slika 33. Sklop generatora funkcije .....	48
Slika 34. Generator funkcije .....	49
Slika 35. Jednostavni sklop za kontrolu položaja pneumatskog cilindra.....	50
Slika 36. Dijagram stanja bez podešavanja PID parametra .....	51
Slika 37. Dijagram stanja s podešenim PID parametrima .....	52
Slika 38. Parametri PID regulatora .....	53
Slika 39. Parametri P regulatora .....	55
Slika 40. Dijagram stanja gdje je proporcionalni član jednak 2 .....	56
Slika 41. Dijagram sustava s konstantnim oscilacijama .....	57
Slika 42. Parametri Ziegler-Nichols metode.....	58
Slika 43. Dijagram sustava podešen Ziegler-Nichols metodom.....	59
Tablica 1. Izbor metode podešavanja.....	26