



UNIVERZITET U NOVOM SADU
**FAKULTET TEHNIČKIH NAUKA
U NOVOM SADU**



Laslo Tarjan

**Povišenje efikasnosti rada linearnih aktuatora
primenom upravljanja baziranog na FPGA**

DOKTORSKA DISERTACIJA

Novi Sad, 2015. godine



УНИВЕРЗИТЕТ У НОВОМ САДУ • ФАКУЛТЕТ ТЕХНИЧКИХ НАУКА
21000 НОВИ САД, Трг Доситеја Обрадовића 6

КЉУЧНА ДОКУМЕНТАЦИЈСКА ИНФОРМАЦИЈА

Редни број, РБР:		
Идентификациони број, ИБР:		
Тип документације, ТД:	Монографска документација	
Тип записа, ТЗ:	Текстуални штампани материјал	
Врста рада, ВР:	Докторска дисертација	
Аутор, АУ:	Ласло Тарјан	
Ментор, МН:	др Стеван Станковски, ред. проф.	
Наслов рада, НР:	Повишење ефикасности рада линеарних актуатора применом управљања базираног на ФПГА	
Језик публикације, ЈП:	српски	
Језик извода, ЈИ:	српски	
Земља публикаовања, ЗП:	Република Србија	
Уже географско подручје, УГП:	Аутономна покрајина Војводина	
Година, ГО:	2015	
Издавач, ИЗ:	Ауторски репринт	
Место и адреса, МА:	Трг Доситеја Обрадовића 6, Нови Сад	
Физички опис рада, ФО: (поглавља/страна/цитата/табела/слика/ графика/прилога)	5/203/120/12/89/0/8	
Научна област, НО:	Мехатроника	
Научна дисциплина, НД:	Управљање кретањем	
Предметна одредница/Кључне речи, ПО:	ФПГА, управљање кретањем, детекција оптерећења, детекција препрека	
УДК		
Чува се, ЧУ:	Библиотека Факултета техничких наука, Нови Сад, Србија	
Важна напомена, ВН:		
Извод, ИЗ:	У тези је анализирана оправданост примене ФПГА технологије за развој управљачког система за линеарне актуаторе. Реализован је управљачки систем за серво управљање линеарним пнеуматским актуатором, чији рад је експериментално проверен. Развијени су и алгоритми за детекцију оптерећености актуатора, као и за детекцију препреке на непознатој позицији коришћењем методе анализе промене притиска у коморама пнеуматског цилиндра.	
Датум прихватања теме, ДП:	26.03.2015.	
Датум одбране, ДО:	09.10.2015.	
Чланови комисије, КО:	Председник: др Ђура Орос, ванр. проф.	
	Члан: др Љубомир Миладиновић, ред. проф.	
	Члан: др Импре Лендак, доцент	Потпис ментора
	Члан: др Гордана Остојић, ванр. проф.	
	Члан, ментор: др Стеван Станковски, ред. проф.	



KEY WORDS DOCUMENTATION

Accession number, ANO :	
Identification number, INO :	
Document type, DT :	Monographic publication
Type of record, TR :	Textual printed material
Contents code, CC :	PhD thesis
Author, AU :	Laslo Tarjan
Mentor, MN :	Professor Stevan Stankovski, PhD
Title, TI :	Increasing efficiency of linear actuators by applying FPGA based control
Language of text, LT :	Serbian
Language of abstract, LA :	Serbian
Country of publication, CP :	Republic of Serbia
Locality of publication, LP :	Vojvodina
Publication year, PY :	2015
Publisher, PB :	Author's reprint
Publication place, PP :	Trg Dositeja Obradovića 6, Novi Sad
Physical description, PD : <small>(chapters/pages/ref./tables/pictures/graphs/ appendixes)</small>	5/203/120/12/89/0/8
Scientific field, SF :	Mechatronics
Scientific discipline, SD :	Motion Control
Subject/Key words, S/KW :	FPGA, motion control, load detection, obstacle detection
UC	
Holding data, HD :	Library of Faculty of Technical Sciences, Trg D. Obradovića 6, Novi Sad, Serbia
Note, N :	
Abstract, AB :	This thesis discusses the possibilities of FPGA technology application in the development of a control system for linear actuators. A control system for servo control of linear pneumatic actuators was realized, and experimentally tested. Furthermore, algorithms were developed for detection of actuator load, as well as for detection of an obstacle in unknown position, by analysing pressure change in the pneumatic cylinder chambers.
Accepted by the Scientific Board on, ASB :	26.03.2015.
Defended on, DE :	09.10.2015.
Defended Board, DB :	President: Assoc. Prof. Đura Oros, PhD
	Member: Prof. Ljubomir Miladinović, PhD
	Member: Ass. Prof. Imre Lendak, PhD
	Member: Assoc. Prof. Gordana Ostojić, PhD
	Member, Mentor: Prof. Stevan Stankovski, PhD
	Menthor's sign

Apstrakt

Razvoj industrijske automatizacija je danas, u doba kada je borba sa konkurencijom na tržištu ogromna, postala veoma značajna i skoro da predstavlja pitanje opstanka na tržištu. Za automatizaciju proizvodnih procesa koriste se razni mehatronički sistemi kao što su: pokretne linije, obrtni stolovi, manipulatori, roboti, kao i kompleksni sistemi koji su sastavljeni od niza automatizovanih mašina koji su zaduženi za pomeranje predmeta rada unutar proizvodnog pogona, držanje i pomeranje potrebnog alata tokom obrade, kao i za samu obradu. Za pogon ovih sistema potrebni su razni tipovi aktuatora (električni, pneumatski i hidraulični) koji će proizvesti rotaciono ili linearno kretanje. U cilju adekvatnog upravljanja radom mašine, mora se obezbediti i adekvatni upravljački sistem pogonskog aktuatora, zarad dostizanja željenih pozicija, brzina rada, načina kretanja. Potreba za skraćanjem vremena odziva aktuatora, brzine rada i povećavanjem kvaliteta izrade, dovodi do potrebe za veoma brzim i preciznim aktuatorima, koji su ujedno i ekonomični (energetski efikasni). U cilju postizanja ovih karakteristika iziskuje se neprestani razvoj kako samih aktuatora tako i njihovih upravljačkih sistema.

Na performansu aktuatora najviše utiče performansa upravljačkog sistema, jer upravljanje treba da se odvija u realnom vremenu. Povećanjem brzine rada aktuatora, dostupno vreme za obradu i analizu signala se skraćuje, te se radi uštede resursa, neki od bitnih ili manje bitnih faktora za upravljanje izostavljaju, što može da dovede do lošijih performansi rada aktuatora. Primenom upravljačkog procesora sa više paralelnih jezgara vreme obrade se skraćuje, ali se komplikuje upravljačka struktura regulatora. FPGA tehnologija omogućava obradu podataka i izvršavanje upravljačkog algoritma u paralelnoj arhitekturi, što rezultuje bržom obradom upravljačkog algoritma, i ostavlja prostora za dodavanje naprednih funkcija, koji bi omogućili efikasniji rad aktuatora.

Prvi deo istraživanja u okviru ove disertacije je obuhvatio analizu jednog komercijalno dostupnog upravljačkog sistema na bazi procesorske tehnologije, kao i razvoj upravljačkog sistema na bazi FPGA tehnologije za servopneumatski linearni aktuator, i implementaciju dopunskog algoritma za detekciju trenutne opterećenosti aktuatora, čiji je zadatak unapređenje kretanja aktuatora.

Drugi deo istraživanja je obuhvatio razvoj funkcije za detekciju udara u prepreku na nepoznatoj poziciji, koja može da se desi prilikom pomeranja, na osnovu analize promene pritisaka u komorama cilindra koji vrši linearno kretanje.

Urađene su analize eksperimentalnih provera rada upravljačkih jedinica, kao i analize rezultata eksperimentalnih provera pojava na osnovu kojih su dodatne funkcije razvijane. Na kraju disertacije sumirani su postignuti rezultati i dati su pravci za dalje istraživanje.

Posvećeno supruzi Albini
i deci Elviri, Atili i Reki.

Zahvalnica

Želim da izrazim veliku zahvalnost svojoj porodici, supruzi Albini i deci Elviri, Atili i Reki, na pruženoj velikoj podršci i pomoći bez koje ova disertacija ne bi bila završena.

Želim da izrazim zahvalnost mentoru i kolegama koji su svojim sugestijama pomogli u radu, a posebno koleginići Ivani Šenk.

Takođe, zahvaljujem se i firmama Festo i Dunkermotoren na pozajmljenoj opremi za eksperimentalni deo istraživanja.

Sadržaj

Apstrakt.....	i
Zahvalnica	v
Spisak slika	xi
Spisak tabela	xv
Spisak skraćenica	xvii
Poglavlje 1. Uvod – Povišenje efikasnosti aktuatora	1
1.1 Predmet istraživanja.....	3
1.2 Cilj istraživanja i očekivani rezultati.....	4
1.3 Hipoteze.....	5
1.4 Prikaz disertacije po poglavljima	6
Poglavlje 2. Teorijske osnove i pregled literature.....	9
2.1 Linearni aktuatori	9
2.1.1 Indirektni linearni aktuatori.....	10
2.1.2 Direktni linearni aktuatori	36
2.2 Senzori za praćenje linearnih aktuatora.....	51
2.2.1 Linearni senzori pozicije	58
2.2.2 Senzori protoka vazduha pod pritiskom.....	66
2.2.3 Senzori pritiska	73
2.3 Upravljanje linearnim aktuatorom primenom FPGA.....	74
2.3.1 PID upravljanje	78
2.3.2 Fazi upravljanje.....	83
2.4 FPGA tehnologija	84
Poglavlje 3. Istraživanje i diskusija	87

3.1	Metodologija istraživanja	88
3.1.1	Faze istraživanja	88
3.1.2	Istraživačke metode	90
3.1.3	Laboratorija i oprema za eksperimentalni rad	93
3.2	Razvoj upravljačkog sistema zasnovanog na FPGA	105
3.2.1	Osnovni upravljački sistem	105
3.2.2	Algoritam za prepoznavanje opterećenja	116
3.2.3	Algoritam za prepoznavanje udara u prepreku na nepoznatoj poziciji.....	120
3.3	Eksperimentalna istraživanja.....	122
3.3.1	Razlike u trajanju operacija na RT procesoru i FPGA kolu.....	122
3.3.2	Rad proporcionalnog razvodnika MPYE	124
3.3.3	Uticaj promene opterećenja na krivu kretanja pneumatskog aktuatora	125
3.3.4	Uticaj promene opterećenja na krivu kretanja električnog linearnog aktuatora	125
3.3.5	Rad upravljačkog sistema SPC11	127
3.3.6	Ispitivanje rada upravljačkog sistema realizovanog sa FPGA ...	130
3.3.7	Detekcija udara u prepreku analizom promene pritiska.....	132
Poglavlje 4. Analiza rezultata eksperimenata		135
4.1	Analiza rezultata merenja razlike u trajanju operacija na RT procesoru i FPGA kolu	135
4.2	Analiza rada proporcionalnog razvodnika MPYE.....	137
4.3	Uticaj promene opterećenja na krivu kretanja pneumatskog aktuatora	137
4.4	Uticaj promene opterećenja na profil kretanja električnog linearnog aktuatora	140
4.5	Analiza rada upravljačkog sistema SPC11	141
4.6	Analiza rada upravljačkog sistema realizovanog sa FPGA	145
4.7	Detekcija udara u prepreku analizom promene pritiska.....	149

4.8 Diskusija.....	153
Poglavlje 5. Zaključci i pravci daljih istraživanja	157
Literatura	161
Prilozi.....	169
Prilog 1. Detaljan program upravljačke jedinice realizovanog na FPGA kolu.....	171
P1.1 Detaljan program korisničkog interfejsa	171
P1.2 Detaljan program upravljačkog sistema na FPGA kolu	174
Prilog 2. Program za snimanje prenosne karakteristike proporcionalnog ventila	179
Prilog 3. Program za snimanje krive kretanja aktuatora pod različitim opterećenjem	183
Prilog 4. Program za zadavanje reference upravljačkoj jedinici SPC11	187
Prilog 5. Dijagrami kretanja linearnog aktuatora upravljanog pomoću FPGA	191
Prilog 6. Način merenja određenih fizičkih veličina u zavisnosti od tipa senzora	199
Prilog 7. Upporedni pregled tehnologija senzora	201
Prilog 8. Osnovne karakteristike rezistivnog i magnetnih senzora	203

Spisak slika

Slika 1. Prikaz principa rada DC motora [17].	11
Slika 2. Pojednostavljen šematski prikaz dvopolnog motora sa jednim žlebom na rotoru [18].	12
Slika 3. Tipičan presek DC motora sa četkicama [5].	13
Slika 4. Prikaz BLDC motora sa šest statorskih namotaja i 14 rotorskih polova [17].	15
Slika 5. Upravljačka šema za četvoropolni BLDC motor [17].	16
Slika 6. Poprečni presek sinhrona mašine sa: (a) isturenim polovima; (b) cilindričnim rotorom.	18
Slika 7. Skice motora iz patenata prve asinhrona mašine (Nikola Tesla).	19
Slika 8. Skica asinhronog motora sa namotanim rotorom.	20
Slika 9. Skica asinhronog motora sa kaveznom rotorom.	21
Slika 10. Princip rada trofaznog asinhronog motora sa kaveznom rotorom (izvor: physclips).	22
Slika 11. Princip rada koračnog motora [35].	25
Slika 12. Primer okretanja reluktantnog motora sa jednopaketnim statorom u smeru kazaljke na satu [32].	27
Slika 13. Dijagram upravljanja koračnim motorom u režimima: a) pun korak, b) polukorak.	29
Slika 14. Skica mehanizma mehaničkog prenosnika sa navojnim vretenom [5].	31
Slika 15. Skica mehaničkog prenosnika sa navojnim vretenom i navrtkom [5].	32
Slika 16. Skica mehaničkog prenosnika sa zupčanikom i zupčastom letvom [38].	34
Slika 17. Skica mehaničkog prenosnika sa remenim kaišem i remenicom.	35
Slika 18. Mehanizam za zatezanje kaiša.	36
Slika 19. Poprečni presek cilindra jednosmernog dejstva i simbol [48].	39
Slika 20. Poprečni presek cilindra dvoosmernog dejstva i simbol [48].	40
Slika 21. Poprečni presek cilindra dvosmernog dejstva sa prigušenjem i simbol [48].	41
Slika 22. Poprečni presek udarnog cilindra.	45
Slika 23. Presek cilindra bez klipnjače sa čeličnom trakom.	46
Slika 24. Presek linearnog motora sa permanentnim magnetima u reakcionoj ploči [56].	50
Slika 25. Načini reprezentacije veličine izmerene od strane senzora [69].	53
Slika 26. Skica načina izvedbe otporničkog linearnog senzora pozicije, i električna šema [67].	59
Slika 27. Šema linearnog rezistivnog senzora pozicije sa jediničnim pojačavačem na izlazu [67].	60
Slika 28. Skica induktivnog linearnog senzora pozicije [67].	61
Slika 29. Skica magnetostriksijskog senzora položaja [72].	62
Slika 30. Uticaj magnetnog polja na promenu dimenzija feromagnetnog materijala [72].	62
Slika 31. Kodna šara u kojoj je kodovana informacija o poziciji.	64
Slika 32. Princip rada magnetnog i optičkog enkodera.	65
Slika 33. Kvadratni izlazni signal senzora pozicije.	65

Slika 34. Princip rada laserskog senzora rastojanja [67].	66
Slika 35. Profil brzine proticanja fluida tokom laminarnog i turbulentnog protoka [72], [74].	67
Slika 36. Protok fluida kroz konusnu cev koja je nagnuta prema gore.	69
Slika 37. Cevovod sa naglim smanjenjem prečnika.	69
Slika 38. Princip rada protokomera na bazi diferencijalnog pritiska.	70
Slika 39. Princip rada termalnog senzora za merenje protoka sa grejačem.	71
Slika 40. Električna šema mernog mosta sa detektorima temperature [74].	72
Slika 41. Blok šema PID regulatora.	78
Slika 42. Delovanje P regulatora: a) greška, b) izlaz regulatora.	79
Slika 43. Delovanje I regulatora: a) greška, b) izlaz regulatora.	80
Slika 44. Grafikon odziva sistema na odskočnu pobudu.	82
Slika 45. Generička struktura FPGA [93].	85
Slika 46. Pneumatski cilindar bez klipnjače tipa DGPL.	94
Slika 47. Pneumatski cilindar dvosmernog dejstva tipa DNC.	95
Slika 48. Linearna otpornička merna letve tipa MLO-POT.	95
Slika 49. Proporcionalni pneumatski ventil proizvođača Festo tipa MPYE.	96
Slika 50. Pneumatski ventil 5/3 tipa MPYE.	97
Slika 51. Senzor protoka tipa SFAB.	98
Slika 52. Senzor pritiska tipa MBS 3000.	98
Slika 53. Električni linearni aktuator tipa STA2504S.	99
Slika 54. Servo pneumatski Soft-Stop kontroler SPC11, sa pripadajućim digitalnim U/I linijama.	100
Slika 55. Servo električni upravljački sistem tipa Xenus XTL.	101
Slika 56. Razvojni sistem za FPGA, Single Board Rio 9636.	102
Slika 57. Programabilni logički kontroler tipa S7-1200.	103
Slika 58. Električna šema i izgled pločice jedinice za baferovanje analognog signala.	104
Slika 59. Kompresor Panair System HD105CVBi.	104
Slika 60. Tegovi za variranje opterećenja.	105
Slika 61. Blok šema upravljačkog sistema na bazi FPGA.	106
Slika 62. Prikaz korisničkog interfejsa realizovanog upravljačkog sistema (<i>Front Panel</i>).	107
Slika 63. Program korisničkog interfejsa realizovanog upravljačkog sistema (<i>Block Diagram</i>).	109
Slika 64. Program upravljačkog sistema na FPGA kolu (<i>Block Diagram</i>).	113
Slika 65. Način određivanja međureferentne pozicije tokom upravljanja.	116
Slika 66. Upravljačke petlje algoritma za detekciju opterećenja.	118
Slika 67. Eksperimentalna konfiguracija za detekciju udara tokom hoda aktuatora.	121
Slika 68. Pseudo kod algoritma za detekciju prepreke.	122
Slika 69. Primeri blok dijagrama za izvršavanje operacija.	124
Slika 70. Eksperimentalna konfiguracija za testiranje rada električnog linearnog aktuatora.	126
Slika 71. Pneumatska šema sistema za analizu upravljačkog sistema SPC11.	127
Slika 72. Šema povezivanja SPC11 sa pneumatskim sistemom i sa akvizicionim sistemom.	128

Slika 73. Petlja za zadavanje referentnih pozicija tokom eksperimentalnog testiranja.	131
Slika 74. Pneumatska šema postavke eksperimenta za detekciju udara u prepreku. ...	132
Slika 75. Šema povezivanja upravljačko/akvizicionog sistema sa senzorima i namotajima (špulnama) razvodnika.	133
Slika 76. Snimljena prenosna karakteristika proporcionalnog ventila tipa MPYE.	137
Slika 77. Profil kretanja aktuatora pod različitim opterećenjem sa 25 na 180 mm.	138
Slika 78. Profil kretanja aktuatora pod različitim opterećenjem sa 25 na 360 mm.	139
Slika 79. Ključni parametri sa profila kretanja aktuatora pod različitim opterećenjem.	139
Slika 80. Profil kretanja električnog linearnog aktuatora na step pobudu – set parametara 2.	140
Slika 81. Profil kretanja električnog linearnog aktuatora na sinusnu pobudu - set parametara 6.	141
Slika 82. Karakteristične tačke na profilu kretanja aktuatora tokom upravljanja sa SPC11.	142
Slika 83. Karakteristične tačke na profilu kretanja aktuatora tokom upravljanja sa FPGA.	147
Slika 84. Kriva promene pritiska vazduha u klipnoj komori pneumatskog cilindra.	150
Slika 85. Krive promene pritiska tokom hoda cilindra i u trenutku udara u prepreku.	150
Slika 86. Kašnjenje razvodnog ventila (detalj A sa <i>Slike 85</i>).	151
Slika 87. Promena pritiska na početku i u toku pomeranja klipnjače cilindra (<i>detalj B</i> sa <i>Slike 85</i>).	151
Slika 88. Prikaz rada detekcije nailaska na prepreku tokom kretanja.	152
Slika 89. Dijagram sa uporednim karakteristikama upravljačkih sistema.	154

Spisak tabela

Tabela 1. Promena udela momenta po mikro-koraku, sa povećavanjem broja mikro-koraka [37].	29
Tabela 2. Parametri regulatora određeni na osnovu Cigler-Nikolsove metode.	81
Tabela 3. Parametri regulatora određeni na osnovu Čajn-Hrons-Resvikove metode [89].	82
Tabela 4. Upravljanje proporcionalnim pneumatskim ventilom tipa MPYE [100].	96
Tabela 5. Parametri konfiguracija upravljačke jedinice Xenus XTL za aktuator tipa STA2504.	126
Tabela 6. Parametri upravljačke jedinice SPC11.	129
Tabela 7. Parametri regulatora.	131
Tabela 8. Potrebno vreme i broj taktova za izvršenje osnovnih operacija.	136
Tabela 9. Prikaz proporcije rezultata Real Time / FPGA.	136
Tabela 10. Parametri rada aktuatora upravljanog sa SPC11.	143
Tabela 11. Parametri rada aktuatora upravljanog sa FPGA.	148
Tabela 12. Uporedne karakteristike upravljačkih sistema.	154

Spisak skraćenica

A/D	analogno digitalni konvertor.
AC	(eng. <i>alternating current</i>) - naizmenična struja.
ASIC	(eng. <i>application specific integrated circuit</i>) - specijalno dizajnirana integrisana kola za neku unapred određenu namenu.
BDC motor	(eng. <i>brushed DC motors</i>) - motori jednosmerne struje sa četkicama.
BLDC motor	(eng. <i>brushless DC motors</i>) - Motori jednosmerne struje bez četkica.
CAN	(eng. <i>controller area network</i>)
CD	(eng. <i>compact disk</i>)
CNC	(eng. <i>computer numerical control</i>)
D regulator	diferencijalni regulator.
DC	(eng. <i>direct current</i>) - jednosmerna struja.
DMA	(eng. <i>direct memory access</i>) - karakteristika računarskog sistema koja posredstvom hardverskog podsistema omogućava direktan pristup memoriji nezavisno od procesorske jedinice.
DSP	(eng. <i>digital signal processing</i>) – procesor za obradu digitalnih signala.
DTC	(eng. <i>direct torque control</i>) - direktno upravljanje obrtnim momentom.
FIFO	(eng. <i>first in, first out</i>) - metoda za organizaciju i manipulaciju memorijom, kod koje prvi ulazni podatak dolazi prvi na red za izuzimanje i obradu.
FPGA	(eng. <i>field-programmable gate array</i>) - integrisano kolo sa digitalnim logičkim kapijama čija se unutrašnja struktura konfiguriše od strane krajnjeg korisnika.
GND	(eng. <i>ground</i>) - uzemljenje / nulti potencijal električnog napona.
HDL	(eng. <i>hardware description language</i>) - jezik za opis funkcija (funkcionalnosti) hardvera.
HMI	(eng. <i>human-machine interface</i>) – interfejs za komunikaciju sa korisnikom.
I regulator	integralni regulator.
I/O	(eng. <i>input/output</i>) - ulazi / izlazi (U/I)
I²C	(eng. <i>inter-integrated circuit</i>) – vrsta serijskog komunikacionog protokola.

IML	(eng. <i>in-mould labeling</i>) - tehnologija etiketiranja unutar kalupa u trenutku brizganja proizvoda.
LIM	(eng. <i>linear induction motor</i>) - linearni indukcion motor.
LSM	(eng. <i>linear synchronous motor</i>) - linearni sinhroni motor.
LUT	(eng. <i>look-up table</i>) - memorija sa preglednom tabelom.
LVDT	(eng. <i>linear variable differential transformer</i>) - linearni promenljivi diferencijalni transformator.
MAC ALU	(eng. <i>multiply and accumulate arithmetic logic unit</i>) - hardverski ubrzana aritmetičko logička jedinica za množenje i sabiranje.
NTC	(eng. <i>negative temperature coefficient</i>) - negativni temperaturni koeficijent.
P regulator	proporcionalni regulator.
PCI	(eng. <i>peripheral component interconnect</i>) - vrsta komunikacionog interfejsa za povezivanje komponenata.
PD regulator	proporcionalno diferencijalni regulator.
PI regulator	proporcionalno integralni regulator.
PID regulator	proporcionalni integralni derivativni (izvodni) regulator.
PWM	(eng. <i>pulse width modulation</i>) - impulsno-širinska modulacija.
RAM	(eng. <i>random-access memory</i>)
ROM	(eng. <i>read-only memory</i>)
RT	(eng. <i>real time</i>) - realno vreme.
RTD	(eng. <i>resistance temperature detectors</i>) - otpornički temperaturni detektori.
SoCs	(eng. <i>system on chips</i>) - sistem na čipu.
SoPCs	(eng. <i>system on programmable-chips</i>) - sistem na programabilnom čipu.
SPI	(eng. <i>serial peripheral interface</i>) - vrsta serijskog komunikacionog protokola.
U/I	ulazi / izlazi
USB	(eng. <i>universal serial bus</i>) - vrsta serijskog komunikacionog protokola.
VHDL	(eng. <i>VHSIC hardware description language</i>) - veštački jezik za opisivanje funkcionisanja hardvera (integrisanih kola veoma velikog stepena integracije).
VHSIC	(eng. <i>very high speed integrated circuit</i>) - integrisana kola predviđena za rad na veoma velikim brzinama.

Poglavlje 1.

Uvod – Povišenje efikasnosti aktuatora

Razvoj industrijske automatizacije je danas, u doba kada je borba sa konkurencijom na tržištu ogromna, postao veoma značajan i skoro da predstavlja pitanje opstanka na tržištu. Svaki proizvođač se trudi da unapredi svoju proizvodnju, kako bi dobio bolji, zanimljiviji ili jeftiniji proizvod, i na taj način parirao ostalim proizvođačima. Razvoj automatizovanih sistema, pored projektovanja i dizajniranja novog proizvoda, može odigrati ključnu ulogu u dobijanju novog i boljeg proizvoda, jer proizvodne mašine treba da omoguće izradu po funkciji i izgledu kompleksnih proizvoda, koje inženjeri i dizajneri osmisle. Razvoj industrijske automatizacije obuhvata razvoj alata, mašina i računarskih tehnologija. Osnovni ciljevi automatizacije u proizvodnim sistemima se pre svega odnose na zamenu teškog i monotonog ljudskog rada, a ne sme se zaboraviti ni ekonomski doprinos automatizacije, koja dovodi do snižavanja troškova proizvodnje materijala, polufabrikata, delova, sklopova i proizvoda na minimum, uz stalno održavanje kvaliteta proizvodnje od proizvoda do proizvoda.

Za automatizaciju nekog proizvodnog procesa koriste se razni mehatronički sistemi kao što su: pokretne linije, rotacioni stolovi, manipulatori, roboti, kao i kompleksni sistemi koji su sastavljeni od niza automatizovanih mašina. Ovi sistemi su zaduženi za pomeranje predmeta rada unutar proizvodnog pogona, držanje i pomeranje potrebnog alata tokom obrade, kao i za samu obradu. Za pokretanje navedenih mehatroničkih sistema potrebni su razni tipovi aktuatora. Vrste aktuatora koje se najčešće koriste u industriji su: električni, pneumatski i hidraulični, ukoliko se posmatra energent kojim se napajaju, ili rotacioni i linearni pogoni, posmatrajući način kretanja. Većina savremenih aplikacija proizvodnih pogona zahteva upravljanje i regulaciju ovih pogona zarad dostizanja željenih pozicija, brzina rada, načina kretanja. Svaki tip aktuatora zahteva drugačiji pristup upravljanju jer se moraju uzeti u obzir fizičke zakonitosti koje se javljaju za dati tip aktuatora. Električni pogoni su sa strane

upravljanja najjednostavniji, jer se dobro poznaje njihov model upravljanja, i variranjem struje i napona motora se dobija adekvatna regulacija. Kod ovih pogona najčešći problem je taj, što se koristan rad dobija primenom nekog pretvarača, tj. rotaciono kretanje se pretvara u neki drugi oblik kretanja. Greške koje unose pretvarači mogu biti nepoznate i na taj način uticati na nepreciznost upravljanja. Kod pneumatskih aktuatora, na preciznost upravljanja veliki uticaj ima stišljivost vazduha koja unosi nelinearnost u pneumatski sistem, kao i trenje koje se javlja u pneumatskim komponentama. U slučaju upravljanja putem PID (proporcionalno, integralno, diferencijalni) regulatora ili nekog drugog linearnog načina upravljanja, ove nelinearnosti dovode do lošijih performansi pneumatskog sistema [1]. Kod hidrauličkih sistema treba da se računa na rad sa visokim pritiscima, velikim silama unutar aktuatora kao i na inerciju sistema.

Potreba za skraćanjem vremena odziva aktuatora, tj. povećavanjem brzine rada, kao i povećavanjem kvaliteta izrade, dovodi do zahteva za aktuatorima koji su veoma brzi i precizni, a sa druge strane moraju biti ekonomični tj. energetski efikasni. Kako bi se navedeni zahtevi postigli, neophodno je raditi na razvoju samih aktuatora, odnosno na razvoju i poboljšanju konstrukcije aktuatora, kao i na razvoju upravljačkih i regulacionih sistema aktuatora. Prilikom regulacije aktuatora, na performanse aktuatora najviše utiče pravovremena obrada merenih podataka o trenutnom stanju aktuatora, i način odlučivanja o promeni izlaznih upravljačkih veličina, tj. algoritam upravljanja. Regulacija treba da se odvija u realnom vremenu, a povećanjem frekvencije rada, kao i brzine aktuatora, vremena odabiranja se skraćuju kao i dostupno vreme za obradu i analizu signala. Kada je reč o brzim promenama koje je potrebno pratiti, obraditi i analizirati, i na njih primeniti neki kompleksniji algoritam upravljanja, dolazi do nedostatka procesorskog vremena. Radi uštede resursa, neki od bitnih ili manje bitnih faktora za upravljanje se izostavljaju, što dovodi do lošijih performansi aktuatora. Primenom upravljačkog procesora sa više paralelnih jezgara vreme obrade se skraćuje, ali se komplikuje upravljačka struktura regulatora. S druge strane, korišćenje više jezgara dovodi do komplikovanja upravljačkog sistema, kao i do veće potrošnje električne energije digitalnog dela regulatora, tj. do većeg zagrevanja. Primena FPGA (eng. *Field-programmable gate array*) tehnologije omogućava obradu podataka i izvršavanje upravljačkog algoritma u paralelnoj arhitekturi, što skraćuje vreme potrebno za obradu [2], a sa druge strane, primenom jednostavnih logičkih kapija unutar FPGA čipa i potrošnja digitalnog dela regulatora se umnogome smanjuje [3], [4]. Na osnovu uvida u trenutno stanje u oblasti primene FPGA tehnologije kod upravljačkih sistema i sprovedenih uvodnih istraživanja [2] pretpostavlja se da bi se primenom FPGA

tehnologije izvršavanje upravljačkih i regulacionih algoritama ubrzalo i otvorila bi se mogućnost za dodavanje naprednih funkcija za inteligentan rad upravljačko-regulacionog sistema, što bi omogućilo efikasniji rad aktuatora.

1.1 Predmet istraživanja

Linearni aktuator je izvršni organ koji neposredno ili posredno ostvaruje pravolinijsko kretanje. U svim sferama života susrećemo se sa aplikacijama koje koriste neki vid linearnog kretanja. Tu bi trebalo pomenuti automatizovana klizna vrata, klizne kapije, liftove, dodatnu opremu na automobilima kao što su električni ili pneumatski podizači prozora, ili avio i železnički saobraćaj. Kod svih pomenutih primera je prisutno linearno kretanje za čije generisanje se mogu koristiti linearni aktuatori, kao pogonski elementi. Primer korišćenja principa rada linearnih induktivnih motora je brza železnica u Japanu, gde cela kompozicija „leti“ iznad šina u magnetnom polju usled propuštanja struje kroz namotaje elektromagnetnog statora u šinama, i stalnih magneta koje čine pokretni delovi, tj. lokomotiva i vagoni. Linearna kretanja se sreću i u alatnim i industrijskim mašinama: CNC mašine (*eng. computer numerical control (CNC)*), automatizovane linije, manipulatori; u računarskim periferijama kao što su: CD rom (Compact Disk rom), hard disk, štampač; kao i u mnogim drugim aplikacijama.

Pneumatski i hidraulični cilindri su linearni aktuatori koji se koriste za direktno generisanje linearnog kretanja, dok se linearno kretanje gde je pogon konvencionalni elektromotor dobija neposrednim putem, korišćenjem neke vrste mehaničkog prenosnika [5]. Hidraulične pogone karakteriše povoljan odnos sila/brzina i mogu se direktno povezati sa alatom koji pomera predmet rada ili alat za obradu. Sa druge strane, upotreba hidrauličnih sistema često dovodi do pojave opasnih situacija na radnom mestu: radnici koji rade u blizini hidraulične pumpe zahtevaju zaštitu sluha, a neretko se javlja i curenje hidraulične tečnosti [6]. Pneumatski aktuatori, takođe, imaju dobre karakteristike u aplikacijama gde je potrebno linearno kretanje, naročito ako se iskoriste prednosti proporcionalne pneumatike. Ovi aktuatori su jednostavne konstrukcije, lako se održavaju i imaju dobar odnos snaga/masa radnog predmeta koji se pomera. Za razliku od električnih motora, pneumatski aktuatori mogu primeniti silu na fiksnoj poziciji tokom dužeg vremenskog perioda bez negativnih posledica. Nedostatak pneumatskih sistema je što je vazduh

kompresibilan, što znači da aktuator ne stoji uvek čvrsto u poziciji, i može da postoji kašnjenje u odzivu [6].

Pored konvencionalnih linearnih aktuatora kao što su hidraulični i pneumatski aktuatori, ili indirektnih linearnih aktuatora koji kao pogon koriste rotacioni elektromotor, treba pomenuti i linearne električne motore koji svojim jednostavnim dizajnom, i mogućnošću postizanja velikih brzina, ubrzanja i velike preciznosti pariraju ostalim linearnim aktuatorima.

Predmet istraživanja ove doktorske disertacije obuhvata ispitivanje mogućnosti implementacije već poznatih upravljačko-regulacionih algoritama za linearne aktuatore, koji su prvenstveno razvijeni za upravljačke sisteme zasnovane na mikroprocesorskim i DSP (eng. *Digital Signal Processing*) platformama, na novi upravljački sistem baziran na FPGA tehnologiji. Novi upravljačko-regulacioni sistem je prvenstveno namenjen za upravljanje linearnim pneumatskim aktuatorima, koji se često koriste u mehatroničkim sistemima. Na osnovu sličnih prelaznih karakteristika tokom kretanja, pretpostavlja se da bi se princip rada upravljačkog sistema mogao koristiti i za upravljanje električnim, linearnim ili rotirajućim pogonima.

1.2 Cilj istraživanja i očekivani rezultati

Istraživanje u ovoj disertaciji proizilazi iz potrebe za unapređenje upravljačko-regulacionog sistema, prvenstveno za linearne industrijske aktuatore, gde su brzina, preciznost i ekonomičnost elementi koji su ključni u proizvodnji konkurentnog proizvoda.

Jedan od ciljeva istraživanja je u dobijanju rezultata o isplativosti korišćenja FPGA tehnologije za potrebe upravljačko-regulacionih sistema za upravljanje aktuatorima, koristeći prednosti ove tehnologije. Krajnji cilj istraživanja je unapređenje mehatroničkih sistema dobijanjem efikasnijeg regulatora za linearne aktuatore, koji koristi sve prednosti FPGA i mogućnost obrade signala u pravom paralelizmu. Očekuje se da bi se primenom FPGA tehnologije ubrzalo izvršavanje upravljačkih i regulacionih algoritama, što bi trebalo da dovede do mogućnosti primene sofisticiranijih upravljačkih metoda. Očekuje se da će brža obrada i uključivanje više realnih parametara u regulacioni algoritam dovesti do boljih performansi aktuatora, imajući u vidu pre svega preciznost pozicioniranja, brzinu rada, ponovljivost, a sa druge strane obezbediti veću energetska

efikasnost ovih aktuatora, jer bi se prelazni režimi u velikoj meri mogli skratiti adekvatnijom obradom trenutnih merenih podataka.

Motivacija za istraživanjem leži u nedovoljno istraženoj oblasti primene FPGA tehnologije za upravljačke i regulacione sisteme za linearne aktuatore. Primena procesora i specijalizovanih DSP kontrolera je već dovoljno istražena i gotovo sve mogućnosti su potrošene. Novi sistemi se dobijaju kombinovanjem starih sistema na drugi način ili u drugu celinu, ili primenom više jezgara u istom sistemu koji ostavlja prostora za proširivanje. Potreban je novi pristup hardverskom delu upravljačkog sistema, a FPGA tehnologija tj. digitalna obrada u pravom paralelizmu to svakako jeste. FPGA tehnologija omogućava razvoj digitalnog sistema za krajnje potrebe, omogućavajući razvoj i testiranje, kao i naknadno prilagođavanje dobijenog sistema trenutnim potrebama. Brojna istraživanja [7]–[10] u domenu upravljanja elektromotornim pogonima pokazuju opravdanost primene upravljanja zasnovanog na FPGA, koje dovodi do poboljšanja karakteristika upravljanog sistema. Uzimajući u obzir da su elektromotorni pogoni sistemi koji zahtevaju brz odziv u upravljanju, postignuti rezultati motivišu na istraživanje mogućnosti primene ove tehnologije za upravljanje drugim tipovima pogona.

1.3 Hipoteze

Iz predmeta istraživanja, u skladu sa postavljenim ciljevima istraživanja, i do sada postignutim rezultatima u polju predmetnog istraživanja, moguće je definisati sledeće hipoteze:

Hipoteza H1: Odgovarajućom upotrebom paralelnih upravljačkih struktura unutar upravljačkog sistema baziranog na FPGA tehnologiji moguće je u značajnoj meri skratiti vreme izvršavanja osnovnog upravljačkog algoritma, ostavljajući prostora za proširivanje algoritma naprednim funkcijama koje za cilj imaju poboljšanje prenosne karakteristike aktuatora.

Hipoteza H2: Odgovarajućom obradom promene trenutnog stanja aktuatora moguće je proceniti opterećenost aktuatora i optimizovati način kretanja tako da se minimizuje amplituda preskoka pozicije.

U radu će biti prikazani rezultati koji potvrđuju opravdanost postavljenih hipoteza.

1.4 Prikaz disertacije po poglavljima

Doktorska disertacija je organizovana u pet poglavlja.

U Poglavlju 1. dat je uvod u razvoj industrijske automatizacije povišenjem efikasnosti rada korišćenih aktuatora. Opisan je predmet istraživanja, cilj istraživanja i očekivani rezultati i postavljene su hipoteze istraživanja.

U Poglavlju 2. data su osnovna teorijska razmatranja sa aktuelnim stanjem u oblasti istraživanja. U okviru ovog poglavlja opisani su tipovi linearnih aktuatora sa uopštenim karakteristikama rada i načinom upravljanja. Poseban akcenat je stavljen na direktno pogonjene linearne aktuatore, pre svega na pneumatske i električne. Takođe, opisani su senzori za praćenje trenutnog stanja aktuatora, koji se mogu koristiti u upravljačkim krugovima, kao i na osnovu kojih se tokom razvoja može pratiti i procenjivati uspešnost rada upravljačkog sistema. Zatim, date su teoretske osnove za razumevanje načina funkcionisanja već postojećih upravljačkih i regulacionih sistema. Na kraju poglavlja dat je uvod u FPGA tehnologiju. Opisana je struktura FPGA kola, kao i način njihovog programiranja.

U Poglavlju 3. predstavljena je metodologija istraživanja. Opisane su sve faze istraživanja i korišćene istraživačke metode. Opisana je korišćena oprema i uslovi u kojima su istraživanja izvedena. Opisano je koji su komercionalno dostupni upravljački sistem analizirani i na kojim aktuatorima. Takođe, opisan je i novo realizovani upravljački sistem zasnovan na FPGA tehnologiji, i predstavljeni su svi upravljački algoritmi koji su realizovani u okviru istraživanja. Na kraju poglavlja opisani su u toku istraživanja izvedeni eksperimenti: način i uslovi izvođenja. Navedeni su svi korišćeni parametri.

U Poglavlju 4. prikazani su dobijeni rezultati eksperimenata u okviru različitih faza istraživanja. Urađene su detaljne analize dobijenih rezultata i diskutovane su u smislu postavljenih hipoteza.

U Poglavlju 5. predstavljeni su izvedeni zaključci doktorske disertacije, sa posebnim naglaskom na doprinose disertacije, uz naznačene pravce daljeg istraživanja. Takođe, date su preporuke za primenu dobijenih rezultata u praksi, odnosno predlozi za korišćenje novo razvijenog upravljačkog sistema za regulaciju lineranih pneumatskih aktuatora, kao i preporuke za modifikaciju, kako bi se ovaj princip upravljačkog sistema mogao primenjivati i na druge tipove aktuatora.

Na kraju disertacije je data korišćena literatura, i prilozi sa detaljnim blok dijagramima upravljačkih programa, i programa korišćenih u eksperimentima, kao i dijagramima rada razvijenog upravljačkog sistema.

Poglavlje 2.

Teorijske osnove i pregled literature

2.1 Linearni aktuatori

Linearni aktuator je pogonski element koji u osnovi ostvaruje pravolinijsko kretanje [5], [11]. Koristi se u alatnim mašinama i industrijskim postrojenjima, kućnoj automatizaciji, saobraćaju, računarskim periferijama, tj. na svim mestima gde se javlja potreba za nekim vidom linearnog kretanja [12]. Linearni aktuatori se po načinu izvedbe mogu podeliti na direktne i indirektne linearne aktuatore [13], odnosno aktuatore koji po načinu rada direktno proizvode linearno kretanje, i aktuatore koji neki drugi vid kretanja, primenom pretvarača, pretvaraju u pravolinijsko kretanje [5]. Primeri indirektnih linearnih aktuatora su linearni aktuatori kod kojih se rotaciono kretanje pomoću mehaničkih prenosnika pretvara u linearno. Na primer, rotacija vratila elektromotora se pomoću navojnog prenosnika pretvara u translatorno kretanje. U ovom slučaju, navrtka koja se vrti na navojnom vretenu je fiksirana za pokretni klizač tako da je onemogućeno njegovo okretanje, i na taj način se ostvaruje linearno kretanje. Autor poznate knjige „*Priručnik za mehanizme i mehaničke uređaje*“, Nil Sklejter (eng. *Neil Sclater: “Mechanisms and mechanical devices sourcebook”*) [5] ovaj tip linearnog pogona naziva „Mehanički linearni pogoni“ pošto se zapravo mehaničko kretanje dobija pomoću mehaničkog prenosnika. Konstrukcijski gledano, ovi aktuatori su komplikovaniji od direktnih linearnih pogona.

Konstrukcija direktnih linearnih aktuatora je mnogo jednostavnija od indirektnih jer nema pretvaračkog dela, nego se na izlazu aktuatora odmah dobija linearno kretanje [11]. U ovaj tip aktuatora svrstavaju se hidraulični i pneumatski pogoni, kao što su cilindri i mišići, piezo-električni pogoni, kao i direktni elektro-mehanički linearni pogoni [5]. Kod ovih aktuatora se utroškom energije koja pokreće aktuator dobija linearni pomeraj bez korišćenja dodatnih mehaničkih prenosnika kretanja. Tipični primeri direktnih linearnih aktuatora su

hidraulični i pneumatski cilindri koji se koriste za direktno generisanje linearnog kretanja korišćenjem energije skladištene unutar fluida ili gasa pod pritiskom [5]. Pored ovih linearnih aktuatora, treba pomenuti i linearne elektromotore, koji svojim jednostavnim dizajnom, i mogućnošću postizanja velikih brzina, ubrzanja i velike preciznosti pariraju ostalim linearnim aktuatorima [11].

2.1.1 Indirektni linearni aktuatori

Mehanički linearni aktuatori

Linearno kretanje je moguće dobiti pretvaranjem drugih vidova kretanja, kao što je npr. rotaciono kretanje, u linearno upotrebom mehaničkih prenosnika. U ovom slučaju govori se o indirektnim linearnim aktuatorima [13]. Indirektni linearni aktuatori se nazivaju i mehaničkim linearnim aktuatorima [5] jer se zapravo linearno kretanje postiže upotrebom mehaničkog pretvarača, npr. navojnog vretena, kaiša, zupčanika, itd. Električna energija je u današnje doba jedna od najpristupačnijih, pa iz tog razloga većina pogona radi upravo na ovu energiju. Po podacima Međunarodne agencije za energetiku, 60-70 %¹ električne energije potrošene u industrijskom sektoru pretvara se u mehaničku. Rasprostranjenost elektromotora raznih tipova dovodi do toga da se najčešće i za pokretanje indirektnih linearnih pogona koristi upravo elektromotorni pogon. Elektromotorni pogoni se po tipu motora mogu podeliti na sledeće [14], [15]:

- motori jednosmerne struje,
 - motori sa četkicama,
 - motori bez četkica,
- motori naizmjenične struje,
 - sinhroni motori,
 - asinhroni motori,
- koračni motori.

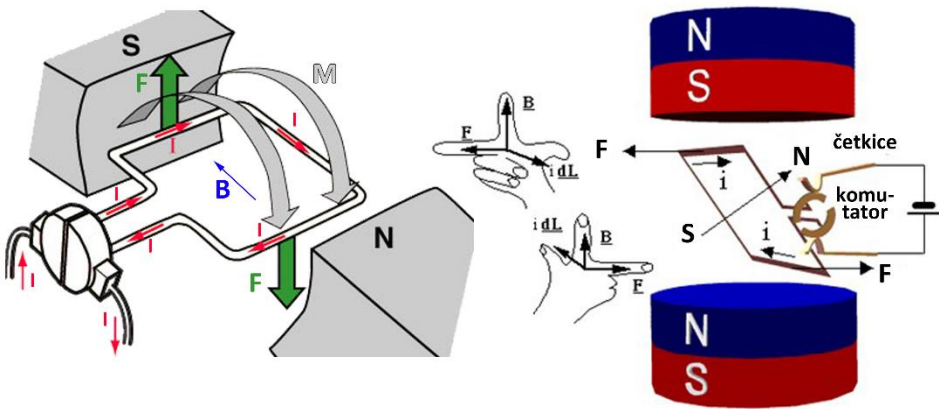
Pored elektromotornog rotacionog pogona, mogu se koristiti i motori sa unutrašnjim sagorevanjem, a kod aplikacija kod kojih je na izlazu potrebno ostvariti veliku konstantnu silu mogu da se koriste pneumatski i hidraulični zakretni motori [6], mada se kod ovih aplikacija češće koriste direktni linearni pneumatski i hidraulični pogoni.

¹ Izvor: Međunarodna agencija za energetiku (eng. *International Energy Agency*) podatak iz 2007. godine.

Motori jednosmerne struje

Motorom jednosmerne struje (eng. *direct current - DC*), ili DC motorom, naziva se električna mašina koja pretvara jednosmernu struju električne energije u mehaničku energiju [5], [14], [15]. Dobijena mehanička energija je u vidu rotacionog kretanja, koje se kasnije korišćenjem raznih mehaničkih prenosnika može transformisati u druge tipove pomeranja. Motori jednosmerne struje mogu biti sa četkicama i bez četkica [6].

Princip rada DC motora je zasnovan na pojavi Lorencove sile² koja deluje na provodnik kroz koji protiče struja i i nalazi se u homogenom magnetnom polju. Slika 1 prikazuje pojednostavljen prikaz principa rada DC motora [16].



Slika 1. Prikaz principa rada DC motora [17].

Namotaj rotora se nalazi u stalnom magnetnom polju B . Kada kroz namotaj dužine L protiče električna struja I , nastaje sila F . Zbog vektorskog karaktera sile, struje i i magnetnog polja, sila koja nastaje usled delovanja magnetnog polja na provodnik kroz koji protiče struja se najlakše izražava vektorskom jednačinom:

$$\vec{F} = I\vec{L} \times \vec{B} \quad (1)$$

² Lorencova sila (eng. *Lorentz force*) je kombinacija sila kojima elektromagnetsko polje deluje na naelektrisanu česticu u pokretu. Sastoji se od dve komponente, električne, koja je proporcionalna električnom polju E , i naelektrisanju čestice q ; i magnetne, koja pored naelektrisanja čestice i i magnetne indukcije polja B , zavisi još i od brzine čestice v .

Osnovni oblik jednačine za Lorencovu silu F je: $F = q (E + v \times B)$.

Budući da sila F iz jednačine (1) deluje na provodnike rotora, a rotor je kružnog oblika, pri čemu su namotaji izmešteni u odnosu na osu rotacije, na vratilo motora će se prenositi moment M :

$$\vec{M} = \vec{D} \times \vec{F} \quad (2)$$

gde je D prečnik rotora (Slika 2) [18].

Realni DC motor na rotoru ima namotaj sa p parova polova, z provodnika i a parova paralelnih grana, pa se ukupan moment može napisati kao:

$$M = \frac{pz}{2\pi a} I_a \Phi \quad (3)$$

gde je:

- I_a – ukupna struja rotora,
- Φ – magnetni fluks pod jednim polom.

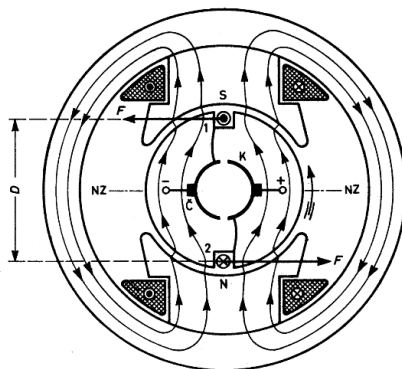
Dalje, magnetni fluks pod jednim polom se može definisati kao:

$$\Phi = B_{sr} \cdot \tau_p \cdot L \quad (4)$$

gde je:

- B_{sr} - srednja vrednost indukcije pod polom,
- τ_p – polni korak:

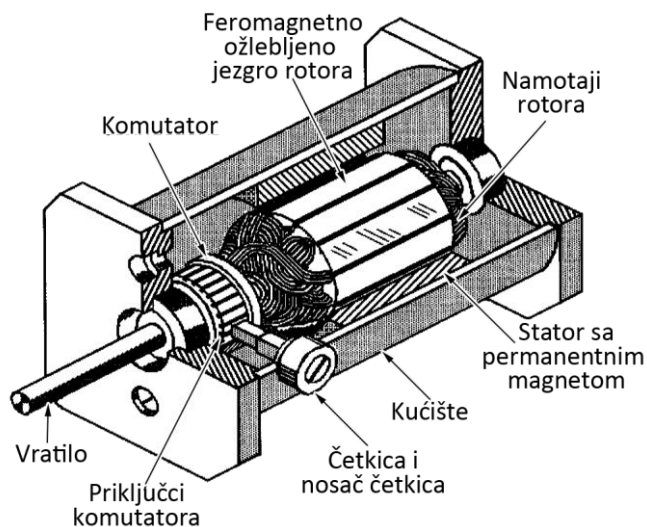
$$\tau_p = \frac{D\pi}{2p} \quad (5)$$



Slika 2. Pojednostavljen šematski prikaz dvopolnog motora sa jednim žlebom na rotoru [18].

Motori jednosmerne struje sa četkicama

Motori jednosmerne struje sa četkicama (eng. *Brushed DC motors – BDC motors*), ili BDC motori, su osnovna izvedba DC motora. Osnovni elementi ovih motora su *stator* (mirujući deo), *rotor* (obrtni deo), *komutator* (kolektor) i četkice [6], [16]. Uloga statora je stvaranje pobudnog fluksa, koji se može dobiti korišćenjem permanentnog (stalnog) magneta ili namotaja kroz koji se uspostavlja jednosmerna struja (indukovani elektromagnet). Uloga rotora je da se vrti u pobudnom magnetnom polju statora. Rotor je pričvršćen na vratilo motora, cilindričnog je oblika i sastavljen je od tankih feromagnetnih limova i ravnomerno ožlebljen po svom obimu. U ove žlebove su postavljeni namotaji rotora [16]. Počeci i krajevi namotaja rotora su izvedeni na komutator koji je sastavljen od bakarnih segmenata koji su međusobno, i prema masi izolovani. Uloga komutatora je preusmeravanje smera struje kroz namotaje rotora [16]. Četkice predstavljaju metalne delove čiji ugljeni krajevi dodiruju spoljašnje segmente komutatora i na taj način dovode napajanje na namotaje elektromagneta rotora [6], [15]. *Slika 3* prikazuje tipičan presek DC motora sa četkicama, koji u statoru ima permanentni magnet. Na *Slici 3* su jasno označeni delovi motora. Druga mogućnost realizacije statorskog dela DC motora sa četkicama, je sa statorskim namotajima kroz koje se indukuje pobudno magnetno polje i koji u tom slučaju zamenjuju permanentne magnete.



Slika 3. Tipičan presek DC motora sa četkicama [5].

Motori jednosmerne struje bez četkica

Motori jednosmerne struje bez četkica (eng. Brushless DC motors – BLDC motors), ili BLDC motori, sve više zamenjuju DC motore sa četkicama zbog mnogo veće efikasnosti iskorišćenja rada motora (faktor korisnog dejstva iznosi i do 95 %), bolje karakteristike obrtnog momenta, mogućnosti rada na mnogo većim brzinama okretanja i dužem radnom veku, [6], [19]–[21]. Ovi motori nemaju četkice i komutator, već pozicioniranjem rotora upravlja kontroler [6]. U prošlosti je njihova primena bila ograničena, s jedne strane zbog dodatnih troškova za kompleksni kontroler koji je neophodan za upravljanje ovim motorima, a sa druge strane zbog malog momenta, što je prouzrokovano korišćenjem, u to vreme, slabih permanentnih magneta u rotoru. U poslednjoj deceniji načinjen je ogroman rast u razvoju upravljačkih jedinica, što je dovelo do pada cena upravljačkih uređaja, a samim tim i kontrolera BLDC motora. Sa druge strane, ogroman napredak je postignut i u domenu proizvodnje sinterizovanih permanentnih magneta na bazi Neodijuma (*Nd*), Samarijum Kobalta (*SmCo*) i legura od Neodijuma, Gvožđa i Bora (*NeFeB*), što je dovelo do masovnije upotrebe ovih motora [22]–[24]. Ranije su se BLDC motori koristili samo tamo gde je bilo potrebno precizno upravljanje brzinom, kao što je računarska, medicinska i automobilska industrija, ali danas se koriste i u industrijskim aplikacijama [6], [20].

Konstrukcija BLDC motora se razlikuje od konstrukcije BDC motora. Ne postoje četkice ni komutator, već se pobudni namotaji kontrolišu elektronski. Ovi motori mogu da se koriste i u sredinama u kojim postoje zapaljiva isparenja, jer nema varničenja pri radu i vrlo su tihi [6], [25]. Na rotoru BLDC motora su postavljeni permanentni magneti. Što je veći broj polova (rotorskih magneta) to je veća i preciznost motora, a sa druge strane, što su magneti jači to je veći izlazni moment motora [24]. U statoru motora nalaze se statorski namotaji koji se pobuđuju odgovarajućom elektronikom. Stator podseća na indukcion motor, samo što su namotaji raspoređeni na drugačiji način. *Slika 4* prikazuje jedan primer BLDC motora sa četrnaest Neodijumskih magneta u rotoru i šest polova statorskih namotaja koji su povezani u tri faze. Pošto je kod ove vrste motora praktično zamenjen mehanički komutator za elektronski, na ovaj način rešen je problem oko zatvaranja strujnog kola kroz rotor preko četkica, što je slučaj kod motora sa četkicama, i ne dolazi do varničenja između rotora i četkica, što doprinosi produžetku radnog veka motora i eliminisanju nepotrebnih smetnji. Za upravljanje statorskim namotajima, kontroler motora treba da prati trenutni

položaj rotora u odnosu na stator. Položaj rotora se određuje na osnovu informacija sa Holovih senzora (eng. *Hall sensor*) ili rotacionog enkodera.



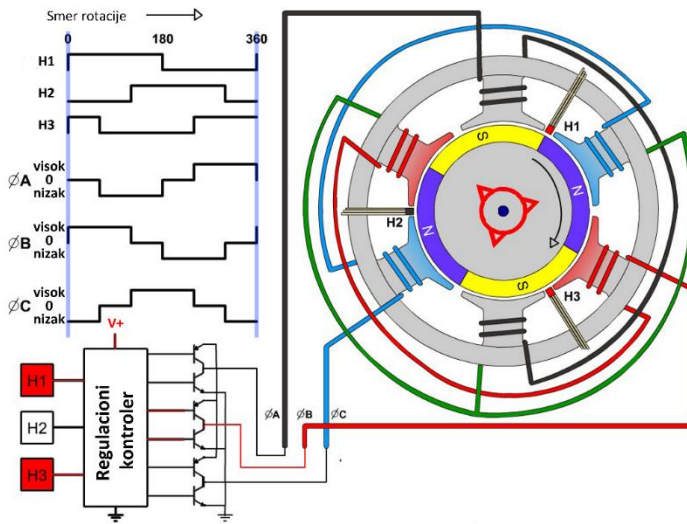
Slika 4. Prikaz BLDC motora sa šest statorskih namotaja i 14 rotorskih polova [17].

BLDC motori su vrsta sinhronog motora, što znači da su magnetno polje koje generiše stator i magnetno polje koje se generiše rotacijom rotora na istoj frekvenciji. Motori se proizvode kao monofazni, dvofazni i trofazni. Trofazni motori su najpopularniji i najviše korišćeni u aplikacijama. Kod većine motora, stator ima tri namotaja (tri faze) povezane u zvezdu. Svaki od ovih namotaja može biti konstruisan iz više namotaja raspoređenih po polovima koji su međusobno povezani tako da formiraju paran broj polova. Postoje dve vrste statorskih namotaja koji čine trapezoidne i sinusoidne motore. Ova podela se vrši na osnovu načina međusobnog povezivanja polova statorskih kalemova u faze, što dovodi do drugačijeg izgleda indukovane elektromotorne sile u statoru motora. Izlazni moment sinusoidnih motora je mnogo ravnomerniji od trapezoidnih [24].

Kao što je već ranije napisano, za razliku od BDC motora, kod BLDC motora promena magnetnog polja u polovima statora je elektronski upravljana. Da bi se rotor BLDC motora vrteo, statorske namotaje treba sekvencijalno napajati, a za to je važno znati poziciju rotora na osnovu koje se vrši napajanje sledećeg segmenta. Pozicija rotora se uglavnom određuje korišćenjem ugrađenih Holovih³ senzora u statorske namotaje. Većina motora ima tri ugrađena Holova senzora, koji kada magnet prođe pored njih, u zavisnosti od pola magneta daju signal visokog (severni pol magneta) ili niskog nivoa (južni pol magneta). Na osnovu kombinacije ova tri Holova senzora određuje se tačna sekvenca komutacije. *Slika 5* prikazuje algoritam uključivanja faza *A*, *B* i *C* trofaznog BLDC

³ Holov efekat: Ukoliko se provodna traka ili poluprovodnička pločica, kroz koju uzdužno protiče električna struja, nađe u spoljašnjem magnetnom polju koje ima pravac normalan na njenu površinu, između bočnih icica nastaje potencijalna razlika, tzv. Holov napon. Pojava je nazvana po američkom naučniku Edvinu Herbertu Holu (engl. *Edwin Herbert Hall*) koji je 1879. godine opisao ovu pojavu [24].

motora na osnovu tri Holova senzora koji su smešteni u statorske namotaje. U zavisnosti od polariteta rotorskih magneta koji prolaze pored Holovih senzora, senzori daju visok ili nizak naponski signal (logička „0“ ili „1“). Na osnovu kombinacija signala koji se dobijaju sa Holovih senzora (H1, H2 i H3), regulacioni kontroler određuje koji namotaj će biti uključen ili isključen i koji polaritet će biti na namotaju. Pomoću drajvera motora⁴ (eng. *motor driver*) regulacioni kontroler može da uključi namotaj na pozitivan ili negativan napon ili da u potpunosti isključi namotaj [24], [26].



Slika 5. Upravljačka šema za četvoropolni BLDC motor [17]

Motori naizmjenične struje

Motori naizmjenične struje (eng. *alternating current - AC*), ili AC motori, za napajanje koriste naizmjeničnu električnu energiju koju pretvaraju u rotaciono mehaničko kretanje. Mogu koristiti jednofazno ili trofazno naizmjenično napajanje.

AC motor se najčešće sastoji od dva osnovna dela: spoljašnjeg stacionarnog statora, koji uz pomoć namotaja koji se napajaju naizmjeničnom strujom proizvodi obrtno magnetno polje, i unutrašnjeg rotora na izlaznom vratilu koji proizvodi drugo obrtno magnetno polje. Magnetno polje rotora može se

⁴ Drajver motora (eng. *motor driver*) je energetski deo kontrolera koji služi za kontrolisano dovođenje napajanja na namotaje motora. Konkretna realizacija drajvera se razlikuje u zavisnosti od tipa motora. Prilikom projektovanja treba uzeti u obzir parametre motora kao što su snaga, otpornost, radni napon, vrsta motora, itd.

proizvesti permanentnim magnetima, kao i električnim namotajima koji su napajani jednosmernom strujom [6].

Princip rada ovih motora se zasniva na rotiranju dva odvojena magnetna polja, polja rotora i statora. Međusobnim privlačenjem ili odbijanjem između polova ova dva magnetna polja, ugaona brzina magnetnog polja statora ω_s i ugaona brzina magnetnog polja rotora ω_r , koji su u relativnom odnosu sa ugaonom mehaničkom brzinom izlaznog vratila ω_m , treba da zadrže sinhronizovanu proizvodnju prosečnog obrtnog momenta zadovoljavajući odnos sinhronih ugaonih brzina (6). U slučaju da ova dva rotaciona magnetna polja nisu u sinhronu, asinhrono magnetno polje će proizvesti pulsiranje ili neujednačeni izlazni moment [27].

$$\pm\omega_s \pm \omega_r = \omega_m \quad (6)$$

Motorni naizmjenične struje se mogu podeliti na sinhronu i asinhronu (indukcione). Magnetno kolo statora i namotaji statora su kod obe vrste AC motora jednaki. Ono što se razlikuje kod ove dve vrste motora je konstrukcija rotora [6].

Sinhroni motori naizmjenične struje

Sinhroni motori naizmjenične struje (Sinhroni AC motori) su jedna vrsta sinhronih mašina, kod kojih je u ustaljenom stanju rotacija rotora (izlaznog vratila) sinhronizovana sa frekvencijom struje napajanja. Period rotacije ovih mašina je uvek jednak celobrojnom delu broja AC ciklusa napajanja [28].

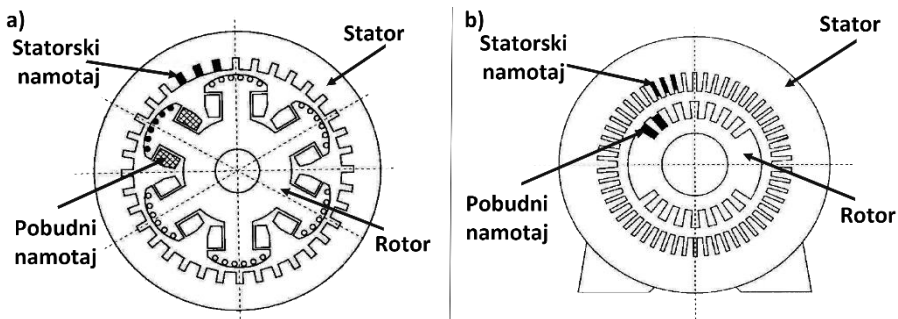
Sinhronu mašine mogu da rade u generatorskom i motorskom režimu. Sinhronu mašine se uglavnom koriste kao generatori u elektranama, pošto se kao motori danas koriste jeftinije i jednostavnije asinhronu mašine. Sinhronu mašine predstavljaju mašine naizmjenične struje bez komutatora, kod kojih konverzija energije nastaje usled mehaničkog pomeranja stalnog magnetnog fluksa polova u odnosu na nepokretan namotaj statora [29].

Rotor sinhronog motora može biti sa stalnim (permanentnim) magnetima ili sa pobudnim namotajem koji posredstvom AC ili DC struje stvara magnetni fluks. Sinhroni motori sa stalnim magnetima se koriste na mestima gde je neophodno njihovo precizno i kvalitetno upravljanje. Ovi motori se uglavnom prave za male snage. Pošto su u rotoru stalni magneti, pobuda ovih motora je konstantna [29].

Kod sinhronih motora sa pobudnim namotajima, magnetni fluks se stvara propuštanjem jednosmerne struje kroz rotorske namotaje. Primenjuju se dve konstrukcije rotora [29]:

- rotor sa isturenim polovima (*Slika 6 a*), i
- cilindričan rotor (*Slika 6 b*).

Kod rotora sa isturenim polovima oko jezgra svakog pola postavljeni su pobudni namotaji učvršćeni pomoću polnih nastavaka, a jezgro je od punog materijala. Poprečni presek sinhronne mašine sa isturenim polovima prikazan je na *Slici 6 a*. Kroz rotorski namotaj protiče jednosmerna struja. Njegovo napajanje se ostvaruje pomoću dva klizna koluta na vratilu i četkica pričvršćenih na statoru [29].



Slika 6. Poprečni presek sinhronne mašine sa: (a) isturenim polovima; (b) cilindričnim rotorom.

Kod sinhronne mašine sa cilindričnim rotorom, rotor je sačinjen od običnog masivnog ožlebljenog gvožđa, a namotaji su postavljeni u ove žlebove. Ova konstrukcija se skoro isključivo primenjuje kod dvopolnih ili četvoropolnih mašina [29].

Brzina obrtanja rotora u minuti se određuje po jednačini (7), po kojoj je brzina obrtanja rotora jednaka brzini obrtnog (Teslinog) elektromagnetnog polja. Iz ove zavisnosti potiče i sam naziv sinhronne mašine.

Brzina obrtanja rotora se računa po jednačini:

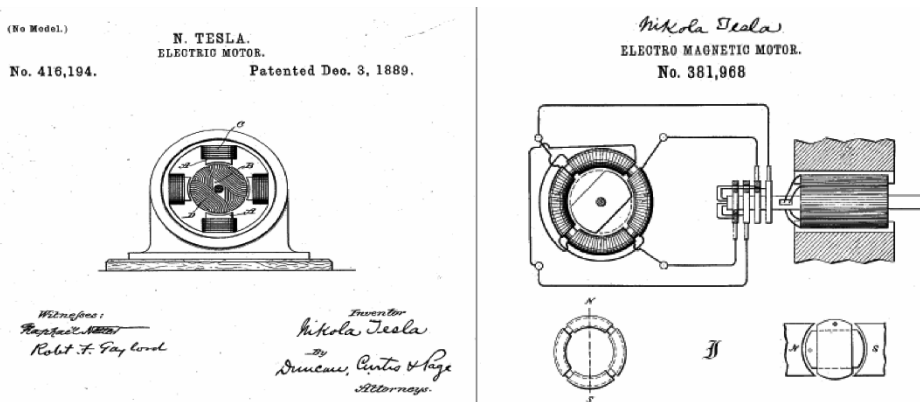
$$n = \frac{60 \cdot f_s}{p} \quad (7)$$

gde je:

- n – brzina obrtanja rotora
- f_s – frekvencija statorskih struja
- p – broj pari polova.

Asinhroni motori

Asinhroni motori su od Teslinog⁵ pronalaska 1887. godine (*Slika 7*), do danas, jedni od najvažnijih pogonskih motora u industrijskim i drugim primenama u pogonima konstantne brzine [30]. Osnovne prednosti asinhronih mašina su njihova sigurnost u pogonu, jednostavnost konstrukcije, pristupačna cena, robustnost, sigurnost u radu i lako održavanje. Nedostaci su u vezi sa uslovima pokretanja i mogućnošću regulisanja brzine obrtanja u širokim granicama [31]. Međutim, sa razvojem energetske elektronike poslednjih decenija, pre svega invertora sa poluprovodničkim prekidačima (tiristorima i snažnim tranzistorima), ovi motori jednostavne konstrukcije osvajaju polja gde su suvereno dominirali motori jednosmerne struje (tj. pogone sa promenljivom brzinom). Štaviše, uvođenjem mikroprocesora u upravljačko-regulacione sisteme pogona, kojima se omogućava da se uz relativno male dodatne troškove ulaganja postigne izvođenje veoma složenih algoritama upravljanja, pogoni sa asinhronim motorima, kao i sinhronim motorima raznih vrsta, postaju konkurentni pogonima na jednosmernu struju čak i u pogledu dinamičkog odziva [30].



Slika 7. Skice motora iz patenata prve asinhronne mašine (Nikola Tesla).

Osnovni elementi asinhronih motora su stator i rotor. Stator se sastoji iz magnetnog kola i namotaja. Magnetno kolo je sačinjeno od tankih i međusobno izolovanih feromagnetnih limova, koji su po unutrašnjoj strani ožlebljeni. U

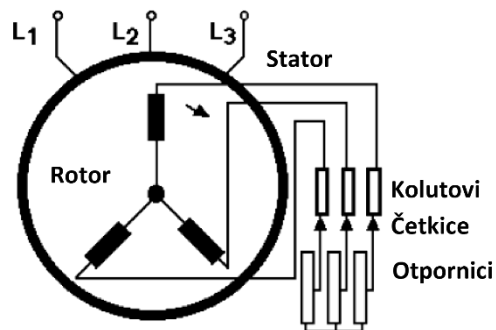
⁵ Nikola Tesla (10 jul 1856 – 7 januar 1943.) je jedan od najvećih srpskih pronalazača, koji je živeo i radio u Sjedinjenim Američkim Državama. Bio je pronalazač, inženjer elektrotehnike, mašinstva, fizičar i futurista [110], [111], a najpoznatiji je po svojim doprinosima u oblasti distribuiranja i primene sistema snabdevanja električnom energijom naizmjenične struje (AC) [112]. Tesla je oktobra 1887. godine u Sjedinjenim Državama podneo patent za prvi naizmjenični indukcion motor, koji je kasnijim patentima usavršio [113].

žlebove statora je smešten pobudni namotaj. Namotaj je trofazni, spregnut u zvezdu ili trougao. Počeci i krajevi statorskih namotaja su izvedeni u priključnu kutiju mašine. Ceo stator se stavlja u kućište mašine, koje je kod manjih mašina obično izliveno od aluminijuma ili livenog gvožđa. Spoljašnji deo kućišta je sa rebrima radi povećanja površine hlađenja. Na vratilo motora je ugrađen ventilator koji pomaže u odnošenju toplote sa površine kućišta. Rotor se sastoji od magnetnog kola i namotaja. Magnetno kolo je sačinjeno od tankih i međusobno izolovanih feromagnetnih limova, ožlebljenih po spoljašnjoj strani. U ove žlebove je smešten namotaj rotora [31].

Namotaj rotora se izvodi na dva načina: kao kavezni (kratkospojeni) i namotani (sa prstenovima). U tom smislu, asinhronne mašine se mogu podeliti na dve grupe i to na asinhronne mašine sa [31]:

- namotanim rotorom (sa kliznim prstenovima) i
- kaveznim (kratkospojenim) rotorom.

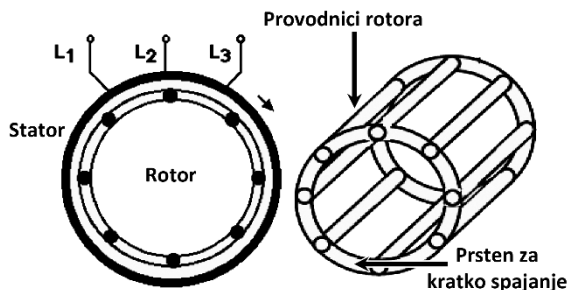
Kod asinhronne mašine sa namotanim rotorom, u žlebove rotora je postavljen trofazni namotaj. Ukoliko je namotaj spregnut u zvezdu, tada se tri kraja spajaju u neutralnu tačku, a preostala tri kraja se izvode do tri klizna prstena, izolovana i međusobno i od vratila. Na klizne prstenove naležu četkice koje su u vezi sa trofaznim rotorskim otpornikom koji se naziva i otpornikom za puštanje u rad. Pošto je rotorski otpornik potreban samo za puštanje u rad, nakon toga se četkice podižu i namotaj rotora se kratko spaja preko odgovarajućeg uređaja [31]. *Slika 8* prikazuje skicu trofaznog asinhronog motora sa namotanim rotorom.



Slika 8. Skica asinhronog motora sa namotanim rotorom (izvor: www.keep.ftn.uns.ac.rs).

Kod asinhronne mašine sa kaveznim rotorom namotaj rotora je značajno različit, u odnosu na motor sa namotanim rotorom, i podseća na kavez. Kod motora manjih i srednjih snaga rotor je izliven od aluminijuma i kratko spojen, a kod motora većih snaga, izrađen je od neizolovanih bakrenih (štapnih)

provodnika, koji se na bočnim stranama kratko spajaju sa po jednim prstenom. U oba slučaja, kratko spojeni rotor nema mogućnost spoljnog električnog pristupa [31]. Slika 9 prikazuje skicu asinhronog motora sa kavezim rotorom, na kojem je prikazana i skica kaveza sa prstenom za kratko spajanje.



Slika 9. Skica asinhronog motora sa kavezim rotorom (izvor: www.keep.ftn.uns.ac.rs).

Prednost konstrukcije kaveznog rotora je da je neuporedivo jednostavnija i jeftinija u odnosu na konstrukciju namotanog rotora. Veća je i sigurnost u radu i ne zahteva rotorske otpornike [31].

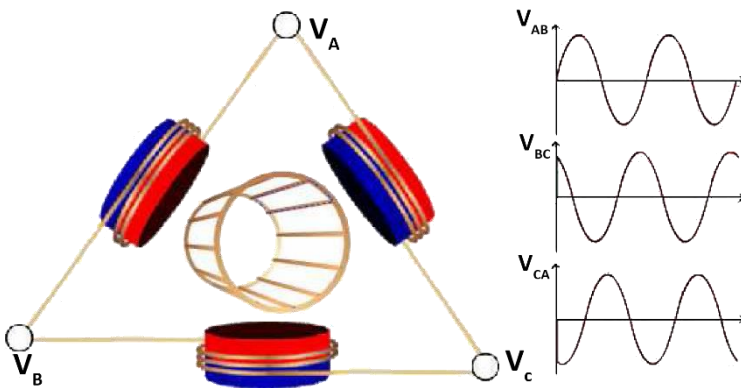
Nedostatak konstrukcije kaveznog rotora je loša karakteristika ovih motora prilikom puštanja u rad (polazna karakteristika), koja se ogleda u prevelikoj polaznoj struji (5-8 puta veća od nominalne struje). Ovaj nedostatak ograničava njihovu upotrebu na manje i srednje snage [31].

Rad asinhronne mašine se zasniva na obrtnom elektromagnetnom polju, koje je otkrio Nikola Tesla. Ako se kroz namotaj na statoru, koji je sačinjen od više navojaka, propusti naizmenična struja koja se menja po sinusnom zakonu, po obodu zazora će se javiti sinusno raspodeljena magnetna pobudna sila (elektromagnetno polje). Ovakva magnetna pobudna sila je nepokretna u prostoru, a promenljiva je u vremenu i naziva se pulsirajuća magnetna pobudna sila. Ako se sada na isti ovaj stator doda još jedan namotaj, koji je takođe sastavljen od više navojaka, i pomeren je za 90° u odnosu na prvi namotaj i kroz njega protiče struja koja je fazno pomerenjena u odnosu na struju prvog namotaja za 90° , stvoriće se druga magnetna pobudna sila, koja je takođe pulsirajuća, ali deluje po osi drugog namotaja. Ove dve, u prostoru nepokretne i vremenski promenljive magnetne pobudne sile, kao rezultat daju obrtnu magnetnu pobudnu silu, čiji se položaj u prostoru menja, a amplituda je konstantna u vremenu [31].

Moguća je postavka i trofaznog namotaja u stator. Postavkom tri prostorno pomerenjena namotaja za po 120° i puštanjem kroz njih tri fazno pomerenjene struje

za po 120° , dobija se pulsirajuća magnetna pobudna sila od svakog namotaja ponaosob (Slika 10). Ukupno dejstvo pojedinačnih magnetnih pobudnih sila određeno je njihovim zbirom. Tri pulsirajuća polja u slučaju prostorno pomerenih namotaja sa vremenski pomerenim strujama daju rezultantno polje koje nije pulsirajuće, već ima konstantnu amplitudu i rotira se u prostoru sinhronom brzinom ω_s koja je jednaka učestanosti struja u namotaju statora. Ako se u oblast gde deluje Teslino obrtno polje stavi npr. kavezni rotor, pod uticajem tog polja u namotaju rotora će se indukovati elektromotorna sila, koja će indukovati struju kroz namotaj rotora, jer je rotor kratko spojen. Rezultat dejstva struje u namotaju rotora i obrtnog polja sa statora je elektromagnetni moment koji deluje na namotaj rotora i rotor počinje da se obrće u smeru obrtnog elektromagnetnog polja [31].

Rotor asinhronog motora nikada ne dostiže sinhronu brzinu obrtanja, jer i kada bi se to desilo, ne bi se indukovala elektromotorna sila u rotoru, a time ni struja u provodnicima namotaja rotora, pa bi elektromagnetni moment bio jednak nuli, usled čega bi rotor usporio. Prema tome, rotor i obrtno polje se ne obrću istom brzinom (sinhrono), već različitom (asinhrono), pa se zbog toga ovakve mašine i nazivaju asinhronim mašinama [30], [31].



Slika 10. Princip rada trofaznog asinhronog motora sa kaveznim rotorom (izvor: physclips).

Razlika između brzine obrtnog polja i brzine rotora naziva se klizanje. Kada motor radi neopterećen, odnosno u praznom hodu, obrtni moment motora savladava samo moment usled trenja i ventilacije, koji je relativno mali te se rotor motora vrti brzinom bliskom sinhronoj brzini obrtnog magnetnog polja. Ako se sa n označi brzina obrtanja rotora, tada se odnos razlike brzina obrtnog

magnetnog polja i brzine rotora prema sinhronoj brzini naziva relativno klizanje [30], [31]:

$$s = \frac{n_s - n}{n_s} \quad (8)$$

gde je:

n – brzina obrtanja rotora

n_s – brzina obrtnog polja (sinhrona brzina)

a sinhrona brzina se može izraziti kao:

$$n_s = \frac{60 \cdot f_s}{p} \quad (9)$$

gde je:

f_s – frekvencija statorskih struja

p – broj pari polova.

Vrednost klizanja s se pri nazivnom opterećenju kreće od 3 do 8 % kod motora manjih snaga, a kod motora većih snaga od 1 do 3 %.

Koračni motori

Koračni motori (eng. *Step / Stepper motors*), ili step motori, su mašine koje pretvaraju električne impulse u mehaničko obrtanje, gde svaki impuls (takt) dovodi do zakretanja motora za određeni fiksni ugaoni pomeraj. Pri malim brzinama okretanja, rotor se zaustavlja na svakom koračnom položaju [32]. Najčešće za napajanje koriste jednosmernu struju, ali postoje i izvedbe sa napajanjem na naizmeničnu struju [6], [25]. Ovi motori se koriste u aplikacijama kod kojih je precizno pozicioniranje od velikog značaja, kao što su, na primer: precizne računarski vođene mašine, roboti, medicinska oprema, računarske periferije, kao i stariji modeli računarskih diskova [33].

Ovi motori su specijalna vrsta BLDC motora. Stator ima paran broj jednako razmaknutih polova sa statorskim namotajem. Rotor može biti sa permanentnim magnetima ili od blok zupčanika od mekog magnetnog materijala (koračni motor sa promenljivom reluktansom) [6], [32].

Prednosti koračnih motora su [6], [32]:

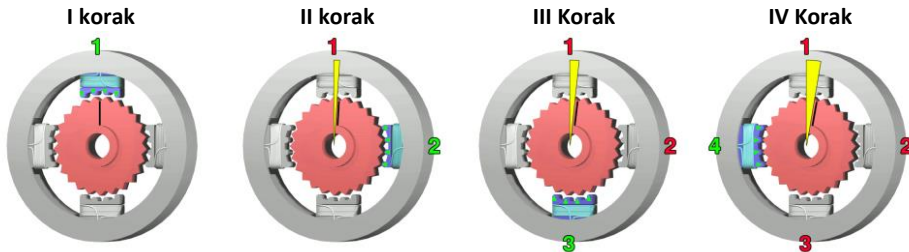
- precizno pozicioniranje i ponovljivost pokreta, budući da kvalitetni koračni motori imaju grešku od 3-5 % od ukupnog koraka.
- mogućnost dugog zadržavanja rotora u nekoj poziciji, ili postizanje vrlo sporih sinhronih brzina rotacije kada je osovina direktno opterećena (teret na osovini),
- širok spektar koračnih uglova ($1,8^{\circ}$ - 90°) i obrtnih momenata, kao i široko područje raspoloživih brzina jer je brzina proporcionalna frekvenciji ulaznih impulsa,
- kompatibilnost sa digitalnim sistemima jer nema potrebe za digitalno-analognim konverterima, nego se koraci zadaju impulsima: broj koraka je jednak broju impulsa,
- mali moment inercije, dimenzije i masa,
- odličan odziv na zalet, zaustavljanje i promenu smera,
- niska cena, mala potrošnja struje pri pokretanju,
- dugotrajni, jer nemaju četkice, pa životni vek motora zavisi od životnog veka ležajeva.

Nedostaci koračnih motora su [6], [32]:

- fiksni korak,
- mala efikasnost, veliki preskok i oscilatornost u odzivu od jednog koraka,
- ograničene mogućnosti pokretanja tereta sa velikim momentom inercije,
- moment trenja i aktivni teret mogu da povećaju grešku položaja jer je moguć gubitak koraka što za posledicu ima akumuliranje greške položaja,
- oscilatoran rad i teško ostvarljivo upravljanje pri velikim brzinama,
- proizvode više buke od klasičnih DC motora.

Princip funkcionisanja svih vrsta koračnih motora je zasnovan na sledećem principu: statorski namotaji pod napajanjem stvaraju magnetne polove u zavisnosti od smera struje. Polovi statora privlače suprotne polove rotora, pri čemu se rotor postavlja u odgovarajući položaj u odnosu na magnetno polje statora. Impulsno napajanje namotaja statora određenim redosledom će dovesti do pomeranja rotora istim tim redosledom. Ukoliko je potrebno zadržati rotor u nekom položaju, to može da se ostvari stalnim napajanjem određenog namotaja statora [6], [34]. *Slika 11* prikazuje rad koračnog motora sa sto koraka po rotaciji, tj. $3,6^{\circ}$ po koraku. Treba napomenuti da je ugao između polova statora 45° a između polova rotora 60° . Ovaj zazor od 15° između polova statora

i rotora obezbeđuje sledeći korak, jer se inače rotor ne bi pokrenuo prilikom idućeg pulsa struje.



Slika 11. Princip rada koračnog motora [35].

Slika 11 prikazuje prva četiri koraka koračnog motora u režimu rada. *I korak* prikazuje inicijalni položaj kada je uključen namotaj (1), i trenutni položaj rotora predstavlja nulti položaj, tj. 0° . Polovi rotora su poravnati sa polovima statora (1), a između polova rotora i polova statora (2) dolazi do zazora. U *II koraku* se uključuje statorski namotaj (2) i zbog zazora (polovi rotora-polovi statora (2)), rotor se dalje okreće dok se polovi ne poravnaju sa polovima statorskog namotaja (2). U ovom trenutku se stvara zazor polova rotora i statora na poziciji 3. U *koraku III* uključuje se namotaj (3) okrećući rotor za još jedan korak. U ovom koraku poravnavaju se polovi rotora i statorskih namotaja (3) a stvara se zazor između polova rotora i statora na poziciji 4. U *koraku IV* uključuje se namotaj (4) okrećući rotor za još jedan korak, stvarajući zazor između polova rotora i statora (1) što omogućava da se dalje okretanje izvršava ponovnim uključivanjem namotaja (1). Redosledom uključivanja namotaja utiče se na smer rotacije rotora, tako da ako se promeni redosled i smer rotacije se menja.

Koračni motori se mogu podeliti prema [6], [14], [32]:

- vrsti pobude:
 - tipu pobude:
 - koračni motori sa permanentnim magnetom (rotor radijalno namagnetisan),
 - koračni motori sa promenljivom reluktansom (nemaju pobudu),
 - hibridni koračni motori (permanentni magneti na rotoru smešteni aksijalno).
 - mestu pobude:
 - pobuda na statoru,
 - pobuda na rotoru.

- broju faza:
 - najčešći broj faza: 2, 3, 4, 5, 6.
 - broj faza = 1 (motori za satove),
 - broj faza ≥ 1 (motori specijalnih namena).
- broju polova:
 - koračni motor s permanentnim magnetima na rotoru, broj polova iznosi: 1 – 4,
 - broj polova serijski proizvedenih koračnih motora iznosi: 1 - 90.
- načinu kretanja:
 - rotacioni,
 - translatorni⁶.

Koračni motor sa permanentnim magnetom

Koračni motor sa permanentnim magnetom imaju radijalni rotor sa permanentnim magnetom i višefazno izvedeni elektromagnetni stator. Uzastopnim uključivanjem ili okretanjem smeru struja pojedinih statorskih faza ili njihovih kombinacija po određenom redosledu, rezultantno magnetno polje statora skokovito se okreće u jednom ili drugom smeru. Rotor sa permanentnim magnetom se postavlja u smeru rezultantnog statorskog polja i na taj način se obavlja koračna rotacija [32]. Princip rada ovog tipa koračnog motora je prikazan na *Slici 11*, a prva četiri koraka su opisana u prethodnom potpoglavlju.

Broj faza kod ove vrste koračnih motora je od 8 do 12, broj pari polova od 1 do 12, a broj zuba statorskih paketa je od 2 do 4. Ovi motoru imaju malu rezoluciju sa tipičnim koračnim uglovima između 7,5° i 15°. Rotor je nazubljen, sa manjim zubima, i namagnetisan je sa alternativnim severnim i južnim polovima magneta [32].

Rezolucija (α_k) ovih koračnih motora se određuje po formuli iz sledeće jednačine:

$$\alpha_k = \frac{360^\circ}{N_{su}} = \frac{360^\circ}{2p_r q_s} \quad (10)$$

gde je:

N_{su} - ukupan broj zuba svih statorskih paketa namotaja,

p_r - broj pari polova rotora,

q_s - broj zuba statorskih paketa.

⁶ Translatorski tip koračnog motora ne potpada pod indirektnu tj. mehaničke linearne aktuatora, već pod direktnu linearne aktuatora, jer se linearno kretanje dobija direktno a ne posredstvom nekog mehaničkog prenosnika. Ovaj tip je nabrojan jer pripada pod kategoriju koračnih motora.

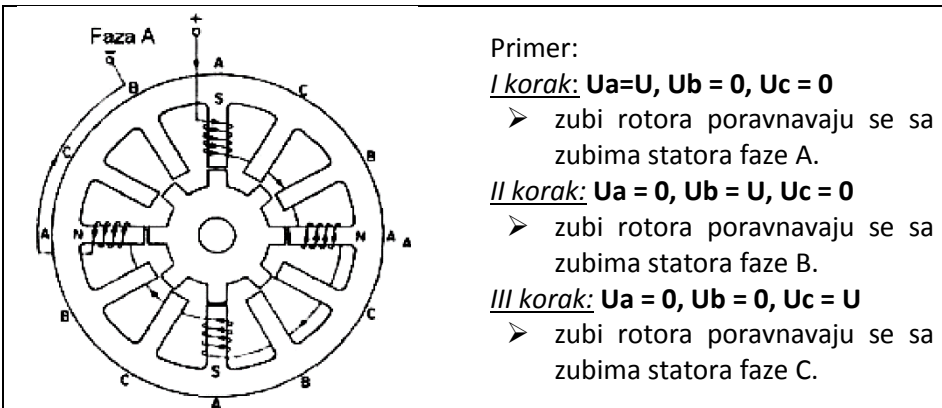
Koračni motori promenljive reluktanse

Reluktantni koračni motori imaju nazubljeni višefazni namotani (lameliran) stator i nazubljen višepolni rotor od mekog gvožđa koji nije trajno namagnetisan. Koračni ugao α_k zavisi od broja zuba statora i rotora, kao i od načina motanja statorskih namotaja (faza) i od načina njihove pobude. Ovi motori imaju koračne uglove od 15° , mali moment inercije rotora i veoma brz odziv, što za posledicu ima mali moment inercije radnog predmeta [6], [32].

Podela reluktantnih koračnih motora se može izvršiti prema [32]:

- broju paketa namota (jednopaketni, višepaketni),
- načinu kretanja (rotacioni, translatorni),
- tipu međugvožđa (radijalni i aksijalni).

Okretanje rotora se postiže napajanjem pojedinačnih namotaja statora, kada dolazi do stvaranja magnetnih polova statora koji privlače metalne zube rotora, pri čemu se rotor pomera za jedan korak [6]. Naizmeničnim napajanjem namotaja statora dolazi do rotacije rotora (Slika 12).



Slika 12. Primer okretanja reluktantnog motora sa jednopakettim statorom u smeru kazaljke na satu [32].

Princip funkcionisanja ove vrste motora identičan je principu funkcionisanja BLDC motora. Prednost koračnih motora sa promenljivom reluktansom u odnosu na BLDC motore je što koračni motori mogu dugo da stoje u nekom položaju bez pregrevanja [36].

Hibridni koračni motori

Hibridni koračni motori funkcionišu na osnovu načela na kojima se zasnivaju koračni motori sa permanentnim magnetom i promenljivom reluktansom. Sastoje se od nazubljenog statora sa namotajima i nazubljenog metalnog rotora sa permanentnim magnetima. Na ovaj način se postižu dobra svojstva promenljive reluktanse i permanentnog magnetnog polja. Zubi su najčešće istoimeni permanentni magneti a ponekad su i bez pobude [6], [32].

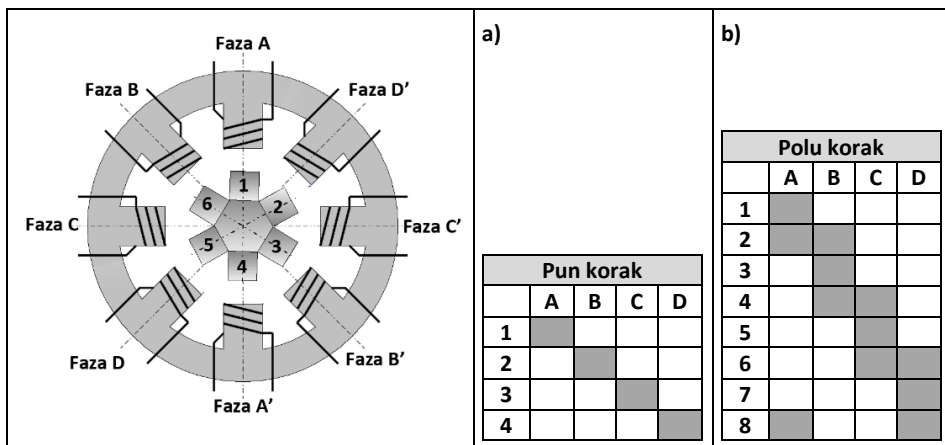
Hibridni koračni motori funkcionišu na isti način kao i koračni motori sa permanentnim magnetom. Ovaj tip koračnih motora je najprecizniji i sa najboljim performansama, od pomenute tri vrste, ali je i najskuplji. Ovi motori ostvaruju manje koračne uglove (α_k), i odlični su za primenu u aplikacijama gde je potreban visok stepen ponovljivosti, veliki moment i brzine, a male gabaritne dimenzije motora [6], [14].

Načini upravljanja koračnim motorima

Upravljanje radom koračnih motora podrazumeva aktiviranje faza na tri različita načina: koračni ili pun korak (eng. *Full Step*), polu-koračni (eng. *Half Step*) i mikro-koračni (eng. *Micro Step*) [6], [25]. Primenom različitih načina upravljanja fazama motora, postižu se različite rezolucije pojedinačnog koračnog ugla i momenti.

Upravljanje sa punim korakom ili koračni način upravljanja radom koračnog motora, podrazumeva da je u jednom trenutku samo jedan namotaj statora pod napajanjem, i da je rotor u svakom koraku u ravni sa polovima statora. Budući da se na ovaj način koristi samo jedan namotaj u jednom trenutku, maksimalan obrtni moment koji motor može da ostvari je na taj način ograničen [6]. Ovaj način upravljanja je prikazan na dijagramu za pun korak na *Slici 13 a*.

Polu-koračni način upravljanja radom koračnog motora podrazumeva zakretanje rotora za polovinu koraka, što znači da se rezolucija motora udvostručuje, tj. da se ugao zakretanja smanjuje za pola. Npr. motor od 100 koraka sa koračnim uglom od $\alpha_k = 1.8^\circ$, će korišćenjem polu-koračnog upravljanja imati 200 koraka i koračni ugao od 0.9° . Polu-koračni način upravljanja prikazan je na *Slici 13 b*. Kod ovog tipa upravljanja, prilikom prelaska sa faze na fazu uključena su oba namotaja, tj. i prethodna faza i sledeća faza. Prednost polu-koračnog načina upravljanja, u odnosu na koračni, je da se ostvaruje veća rezolucija, a nedostatak je što obrtni moment nije konstantan [6].



Slika 13. Dijagram upravljanja koračnim motorom u režimima: a) pun korak, b) polukorak.

Mikro-koračni način upravljanja radom koračnog motora predstavlja podvarijantu polu-koračnog načina upravljanja. Umesto standardnog uključivanja i isključivanja napajanja namotaja, smanjuje se i pojačava jačina struje u namotajima. Rotor se tada zakreće za ugao koji određuje odnos jačina struje u namotajima. Promenljivi odnos jačina struje dovodi do stvaranja mikro-koraka u okviru svakog koraka. Rezolucija kojom se jačina struje menja određuje i rezoluciju koraka. Ovaj način upravljanja omogućava preciznije upravljanje pozicioniranjem rotora, zaustavljanje rotora u određenom delu koraka, i manje oscilacije pri pomeranju rotora iz koraka u korak [6], međutim deljenjem koračne rezolucije na manje mikro delove slabi izlazni moment motora po mikro koraku (Tabela 1) [37].

Tabela 1. Promena udela momenta po mikro-koraku, sa povećavanjem broja mikro-koraka [37].

Broj mikro koraka po jednom punom koraku	Udeo momenta po mikro koraku u odnosu na puni korak
1	100%
2	70,71%
4	38,27%
8	19,51%
16	9,8%
32	4,91%
64	2,45%
128	1,23%
256	0,61%

Mehanički prenosnici kretanja i snage

Pretvaranje rotacionog kretanja u linearno vrši se posredstvom mehaničkih prenosnika. Za konstrukciju mehaničkih prenosnika koriste se osnovni mehanički elementi za prenos kretanja i snage kao što su: zupčanici, zupčaste letve, navojna vretena, kaiševi, sajle, itd. Na osnovu konstrukcije prenosnika, mehanički prenosnici za pretvaranje rotacionog kretanja u linearno mogu se podeliti na prenosnike posredstvom [5]:

- navojnog vretena i navrtke,
- zupčanika i zupčaste letve,
- remenog kaiša, sajle ili lanca sa jedne strane, i remenice, kotura ili lančanika.

Motor, tj. pogonski element koji stvara osnovno rotaciono kretanje, se u aplikacijama sa mehaničkim linearnim aktuatorima bira u zavisnosti od unapred postavljenih zahteva za preciznost, dinamičnost, ponovljivost i nosivost. U zavisnosti od potreba, bira se motor koji zadovoljava tražene parametre [6].

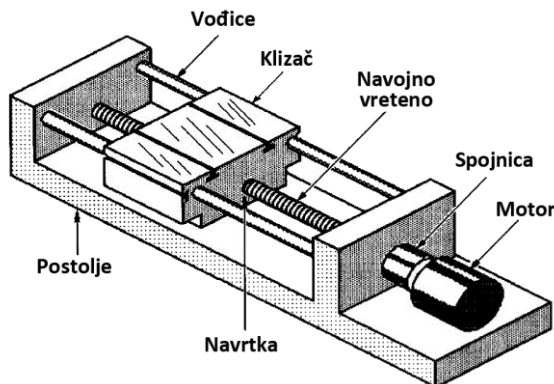
Opterećenje koje treba da se savlada momentom motora u mnogome zavisi od tipa mehaničkog prenosnika, kao i od orijentacije kretanja (načina montaže linearnog aktuatora: horizontalno, vertikalno ili pod nekim uglom) [6], [38]. Opterećenje koje se prenosi na motor u slučaju korišćenja navojnog vretena i navrtke zavisi od koraka navoja, u slučaju zupčanika i zupčaste letve od prečnika kinematskog kruga zupčanika, a u slučaju prenosnika sa remenicama i remenim kaišem od prečnika remenice, jer od ovih parametara zavisi dužina linearnog pomeraja po krugu okretanja motora [38]. U slučaju vertikalnog kretanja pokretnog (kliznog) dela linearnog aktuatora, čitavo opterećenje se prenosi na motor, dok u slučaju horizontalnog kretanja opterećenje koje se prenosi na motor u velikoj meri dolazi od inercijalnih sila, a glavno gravitaciono opterećenje od tereta pada na vođice po kojima klizač klizi. Klizači treba da su dimenzionisani tako da mogu da podnesu projektovani teret. U slučaju preopterećenosti klizača može doći do krivljenja vođica, što dovodi do otežanog rada i povećanog habanja. Kako bi se obezbedile što bolje performanse rada mehaničkih prenosnika koriste se vođice visokog kvaliteta sa linearnim ležajevima, sistem profilnih vođica (šina i kolica), i visoko precizne vođice. [39]

Mehanički prenosnik realizovan upotrebom navojnog vretena i navrtke

Mehanički prenosnici kretanja i snage koji rotaciono kretanje pretvaraju u pravolinijsko posredstvom navojnog vretena i navrtke su jedni od najpreciznijih ali i najsprijijih mehaničkih prenosnika. Maksimalna dužina mehaničkih linearnih aktuatora koji su realizovani korišćenjem navojnog vretena ograničena je maksimalnom dužinom vretena određenog prečnika. Uslov normalnog rada je da nakon montaže ne dolazi do gibanja vretena pod sopstvenom težinom [5]. Ukupna preciznost zavisi od sledećih faktora:

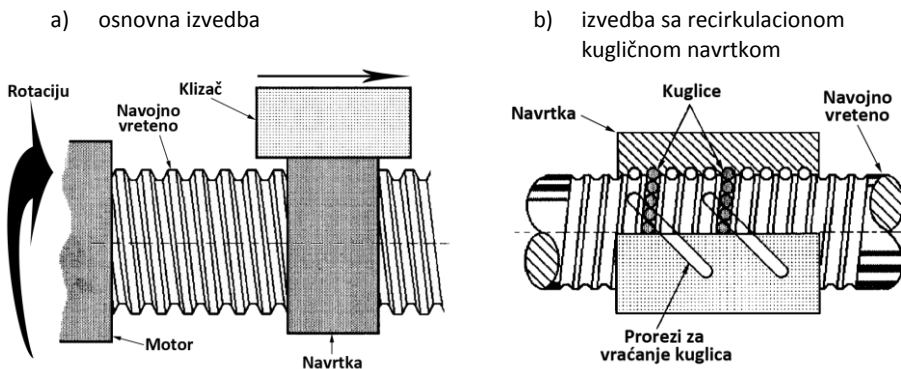
- korak navoja,
- zazor između navoja navojnog vretena i navrtke,
- način izvedbe navojnog vretena i navrtke,
- preciznost vođice,
- preciznost motora,
- način detekcije pozicije.

Na *Slici 14* prikazan je primer realizacije mehaničkog prenosnika sa navojnim vretenom, koji je predstavljen između ostalog i u knjizi Nila Sklejtera: „*Priručnik za mehanizme i mehaničke uređaje*”, [5]. Elektromotor, ili drugi aktuator koji proizvodi rotaciono kretanje, je preko spojnice pričvršćen za navojno vreteno koje se obrće oko svoje ose. Navojno vreteno je na svojim krajevima uležišteno, uglavnom kotrljajućim ležajevima, koji onemogućavaju uzdužno pomeranje. Na navojno vreteno je navrnut specijalna navrtka koja je u sklopu sa klizačem koji treba da vrši translatorno kretanje. Klizač je vođen linearnim vođicama koje dozvoljavaju samo jedan stepen slobode kretanja, u pravcu ose rotacije navojnog vretena, te se obrtanjem navojnog vretena navrtka zajedno sa klizačem pomera levo ili desno, u zavisnosti od smera obrtanja vretena, uzduž ose rotacije vretena.



Slika 14. Skica mehanizma mehaničkog prenosnika sa navojnim vretenom [5].

Na *Slici 15 a* prikazano je navojno vreteno koje se okreće suprotno kazaljka na satu a klizač, koji je pričvršćen za navrtku, se pomera u desno. Brzina kretanja klizača uslovljena je ugaonom brzinom navojnog vretena kao i korakom navoja na vretenu, koji određuje koliko će se klizač pomeriti tokom okretanja vretena za ceo jedan krug. Osim toga, bitni podaci za navojno vreteno su i dimenzija navoja kao i krutost materijala, koji direktno utiču na nosivost, tj. na mogućnost uzdužnog opterećenja mehanizma. Nosivost tereta na klizaču zavisi pre svega od nosivosti vođica na kojima klizač klizi (*Slika 14*) jer se poprečno opterećenje u potpunosti prenosi na klizače. U slučaju preopterećenosti klizača može doći do krivljenja vođica i u tom slučaju se opterećenje prenosi i na navojno vreteno, što dovodi do povećanja trenja u navojnom vretenu, pa samim tim i na sporije okretanje i povećano habanje. Dalje, što je trenje u navojnom vretenu veća, to više opterećuje i motor koji proizvodi rotaciono kretanje. Dobrim dimenzionisanjem vođica se obezbeđuje optimalnost sistema, tj. korišćenja motora minimalnih karakteristika koji zadovoljavaju zahtevima [6].



Slika 15. Skica mehaničkog prenosnika sa navojnim vretenom i navrtkom [5].

U cilju smanjivanja trenja između navojnog vretena i navrtke, što dovodi do lakšeg okretanja i manjeg habanja navojnog vretena i navrtke, između navojnog vretena i navrtke u navoje se ubacuju kuglice koje pomažu kretanje. Da kuglice ne bi ispale iz navoja, na ivicama navoja na klizaču postoje prorezi za vraćanje kuglica koji ne dozvoljavaju kuglicama koje su raspoređene u prsten da se pomeraju u navoju levo ili desno, jer pomeraju kuglice koje bi se pomerale dalje u navoju na početak zavojnice. Ove specijalne navrtke se nazivaju *recirkulacione kuglične navrtke* [39]. *Slika 15 b* prikazuje primer realizacije navojnog vretena i navrtke sa kugličnim vođenjem.

Ova grupa navojnih vretena se može podeliti na [39]:

- valjana vretena sa recirkulacionom kugličnom navrtkom,
- brušena vretena sa recirkulacionom navrtkom,
- valjana kuglasta vretena sa navrtkom,
- minijaturna vretena.

Valjana vretena sa recirkulacionom kugličnom navrtkom zadovoljavaju najširi spektar aplikacija, i ekonomski su najprijvatljivija za proizvođače mašina. Aksijalna tačnost, kao i preciznost celog vretena, po izboru je i zavisi od potrebe za svaku pojedinačnu aplikaciju.

Brušena vretena sa recirkulacionom navrtkom visoke su preciznosti i najčešće su u upotrebi u aplikacijama kod kojih je tačnost od presudnog značaja, kao što su alatne mašine, sistemi za pozicioniranje, itd.

Valjana kuglasta vretena sa navrtkom imaju nosivost od više desetina tona, vrhunske su preciznosti i čvrstoće. Najbolja osobina ovog tipa vretena je što i pored fantastične nosivosti zadržava mogućnost rada pri velikim brzinama zbog čega se upotrebljava u mašinama za presovanje. Zbog velike nosivosti može se koristiti u najrazličitijim tipovima dizalica.

Minijaturna vretena su vrlo kompaktna i interesantna za veliku serijsku proizvodnju manjih mašina. Ističu se zbog svojih karakteristika i ekonomične cene.

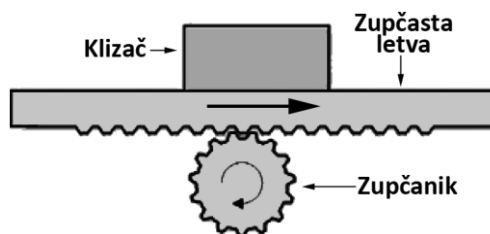
Mehanički prenosnik realizovan upotrebom zupčanika i zupčaste letve

Mehanički prenosnici kretanja i snage koji rotaciono kretanje pretvaraju u pravolinijsko posredstvom zupčanika i zupčaste letve su manje precizni od prethodnog tipa prenosnika kod kojih se koristi navojno vreteno i navrtka, ali obezbeđuju veću brzinu lineranog kretanja na istom broju obrtaja motora koji služi kao pogonski element. Maksimalna dužina linearnih aktuatora koji su realizovani korišćenjem zupčanika i zupčaste letve ograničena je maksimalnom dužinom zupčaste letve određenog poprečnog preseka. Uslov normalnog rada je da nakon montaže ne dolazi do gibanja zupčaste letve pod sopstvenom težinom. U konstrukciji ovog prenosnika ne postoji redukcija obrtaja motora, što je slučaj kod prenosnika sa navojnim vretenom, nego linearni pomeraj zavisi isključivo od prečnika kinematskog kruga zupčanika i broja zubaca (koraka zubaca). Vrlo često se koristi dodatni reduktor koji se priključuje na pogonski

elektromotor u cilju smanjenja broja obrtaja, a povećavanja izlaznog momenta motora [5], [38]. Ukupna preciznost zavisi od sledećih faktora:

- korak zubaca zupčaste letve,
- prečnik kinematskog kruga zupčanika
- zazor između zubaca zupčanika i zupčaste letve,
- zazor u reduktoru – ako postoji,
- način izvedbe zupčanika i zupčaste letve,
- preciznost vođice,
- preciznost motora,
- način detekcije pozicije.

Na *Slici 16* prikazana je skica mehaničkog prenosioca sa zupčanikom i zupčastom letvom. Na izlazno vratilo aktuatora koji proizvodi rotaciono kretanje pričvršćen je zupčanik koji se obrće zajedno sa vratilom motora. Svojim obrtanjem zupčanik pomera zupčastu letvu levo-desno u zavisnosti od smera rotacije. Zupčasta letva je pričvršćena na klizač koji klizi po linearnoj vođici koja omogućava samo jedan stepen slobode kretanja, tako da se dobija linearno kretanje uzduž te vođice.



Slika 16. Skica mehaničkog prenosioca sa zupčanikom i zupčastom letvom [38].

Mehanički prenosnik realizovan upotrebom remenog kaiša i remenice, ili sajle i kotura, ili lanca i lančanika

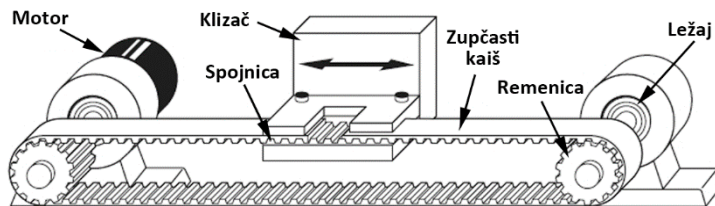
Mehanički prenosnici kretanja i snage koji rotaciono kretanje pretvaraju u pravolinijsko posredstvom remenog kaiša i remenice, sajle i kotura, ili lanca i lančanika obezbeđuju najveću brzinu lineranog kretanja, na istom broju obrtaja motora koji služi kao pogonski element, od sva tri tipa mehaničkih prenosioca [38]. Princip rada ove tri kombinacije mehaničkih elemenata je isti, samo što se koristi druga kombinacija elemenata. Maksimalna dužina linearnih aktuatora koji su realizovani korišćenjem ovih mehaničkih prenosioca ograničena je maksimalnom dužinom linearnih vođica po kojima treba da klizi klizač, a sa obzirom da postoje vođice koje se mogu pričvrstiti po celoj dužini, praktično

nema ograničenja po dužini. Naravno treba računati i na nemogućnost postavljanja kaiša, sajle ili lanca neograničene dužine, pa je samim tim maksimalna dužina ipak ograničena maksimalnom dužinom korišćenog kaiša/sajle/lanca određene dimenzije.

Pošto u samoj konstrukciji prenosnika kretanja ne postoji redukcija obrtaja motora, što je slučaj kod prenosnika sa navojnim vretenom, vrlo često se koristi dodatni reduktor koji se priključuje na pogonski elektromotor u cilju smanjenja broja obrtaja a povećavanja izlaznog momenta motora [5], [38]. Ukupna preciznost linearnih sistema sa ovim prenosnicima zavisi od sledećih faktora:

- zategnutost kaiša ili sajle, odnosno zazor između lanca i lančanika
- zazor u reduktoru – ako postoji,
- preciznost vođice,
- preciznost motora,
- način detekcije pozicije.

Na *Slici 17* prikazana je skica prenosnika sa remenim kaišem i remenicom. Realizacija sa sajlom bi bila identična samo bi se umesto kaiša koristila sajla odgovarajućeg prečnika, a umesto remenice kotur na koji se sajla namotava. Na vratilo na kojoj je pogonska remenica priključuje se izlazno vratilo aktuatora koji proizvodi rotaciono kretanje. Ukoliko je potrebno smanjivati broj obrtaja rotacionog aktuatora, između aktuatora i remenice se dodaje dodatni reduktor obrtaja. Na pogonsku remenicu sa jedne strane i pasivnu remenicu sa druge strane postavljen je remeni kaiš za koji je spojen klizač koji klizi na linearnim vođicama. Za pasivnu remenicu se vrlo često vezuje rotacioni inkrementalni enkoder za određivanje pozicije klizača.

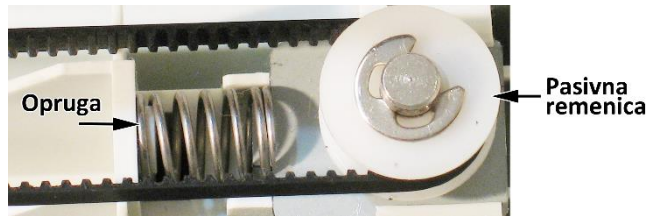


Slika 17. Skica mehaničkog prenosnika sa remenim kaišem i remenicom.⁷

Zbog stalnog uzdužnog opterećenja kaiša ili sajle tokom rada dolazi do istezanja i izduživanja kaiša, odnosno sajle. Ovo može dovesti do preskakanja remena na remenici što bi unelo grešku u linearni sistem. Da bi se izbeglo

⁷ Slika za prenosnik sa remenim kaišem preuzeta sa: <http://goo.gl/SSmUEy> (pristup: februar 2015)

opuštanje kaiša, odnosno sajle, na postolju pasivne remenice montiran je mehanizam za zatezanje kaiša (sajle).



Slika 18. Mehanizam za zatezanje kaiša.⁸

2.1.2 Direktni linearni aktuatori

Pneumatski linearni aktuatori

Pneumatski aktuatori su pogonski elementi koji služe za pretvaranje energije komprimovanog gasa (u najvećem broju slučajeva vazduha pod pritiskom) u mehaničku energiju odnosno linearno ili rotaciono kretanje [6], [40]. Pneumatski aktuatori se sastoje od pokretnih delova kao što su klip i klipnjača i nepokretnih delova kao što su kućište i priključci za pneumatska creva koji služe za dovod pogonskog gasa [6], [41].

Prednosti pneumatskih linearnih pogona su što su jednostavne konstrukcije iz čega proizilazi kompaktna konstrukcija koja omogućava laku ugradnju i korišćenje, kao i mogućnost dugog zadržavanja u nekoj fiksnoj poziciji.

Nedostatak pneumatskih aktuatora je što za njihov rad mora postojati instalacija sa vazduhom pod pritiskom. Kompresori za proizvodnju vazduha pod pritiskom su uglavnom veliki, glomazni i glasni. Teško se transportuju i uglavnom su statične prirode. Pneumatska instalacija se projektuje za svako postrojenje posebno, i fiksne je prirode [40], [41]. Podatak koji ide u prilog korišćenju pneumatskih aktuatora je što je u većini industrijskih okruženja vazduh pod pritiskom svakako prisutan jer se koristi na mnogim mestima i u tehnološkim procesima proizvodnje [6].

Drugi nedostatak je što kod pneumatskih pogona postoji velika verovatnoća za curenje vazduha i to iz više razloga: npr. nepažnja prilikom povezivanja opreme, neadekvatna oprema, neispravna oprema, itd. Ova curenja dovode do manje efikasnosti opreme i povećanih troškova za potrošenu električnu energiju.

⁸ Slika za mehanizam za zatezanje kaiša preuzeta sa: <http://goo.gl/D4La4T> (pristup: februar 2015)

Po procenama, ukoliko bi se ova curenja isključila iz pneumatskih instalacija, moguće uštede se kreću do 30 % [42], pa čak i do 60 % [43] od ukupne energije koja se potroši za proizvodnju, pripremu i distribuciju vazduha pod pritiskom [44]. Ova curenja ne utiču samo na potrošnju, već i na držanje zadate pozicije, jer će se zbog gubitka vazduha klip cilindra pomeriti.

Treći nedostatak pneumatskih sistema se ugleda u fizičkoj osobini gasova, pa i vazduha, da su stišljivi. Ovo dovodi do toga da aktuator ne stoji uvek čvrsto u poziciji i postoji kašnjenje u odzivu sistema [6]. Najveći uticaj kompresibilnosti vazduha na preciznost je ukoliko je pneumatski aktuator montiran tako da je opterećen vertikalnom silom, tj. kada celokupno opterećenje pada na klip cilindra. Po studiji Tajvanskog Nacionalnog Čeng Kung Univerziteta (eng. *National Cheng Kung University in Taiwan*), u ovim situacijama stišljivost utiče na preciznost sa dodatnih $\pm 30 \mu\text{m}$, što je i dalje u zadovoljavajućim granicama kod većine sistema u kojima se primenjuje [45].

Kada se priča o pneumatskom sistemu, potrebno je razlikovati dve vrste pneumatskih sistema. U zavisnosti od korišćenih komponenata i načina njihovog upravljanja, pneumatski sistemi se mogu podeliti na [6]:

- klasične,
- proporcionalne.

Klasični pneumatski sistem se sastoji od: izvora vazduha pod pritiskom, pripreme grupe, signalnih elemenata, elemenata za obradu signala, upravljačkih i radnih elemenata. Kompresorska stanica predstavlja izvor vazduha pod pritiskom i putem razvoda vazduha pod pritiskom (cevi i creva) napaja ostale elemente pneumatskog sistema. Kompresorska stanica se sastoji od: kompresora, hladnjaka, sušača i rezervoara za skladištenje vazduha pod pritiskom. Pripremna grupa se sastoji od: filtera koji se sastoji od više filtera različitih stepeni filtracije, regulatora pritiska sa manometrom (i zauljivača po potrebi⁹). Može da sadrži i ventil za uključivanje, odnosno isključivanje, senzor pritiska, senzor protoka, automatski ili manualni odvajač kondenzata i dr. Signalne elemente predstavljaju: tasteri, prekidači, granični prekidači, i dr. U elemente za obradu signala spadaju "I" ventil, "II" ventil, vremenski relej i druge komponente. Upravljačke elemente predstavljaju upravljački ventili. Radni

⁹ Za funkcionisanje novijih serija pneumatskih komponenata neki proizvođači striktno zabranjuju zauljivanje vazduha.

elementi obuhvataju pneumatske cilindre, pneumatske motore, vakuum generatore i vakuum dizne [6].

Proporcionalni pneumatski sistem u osnovi sadrži iste komponente kao i klasični pneumatski sistem, a razlika je u korišćenim upravljačkim i signalnim elementima. Upravljački element predstavlja proporcionalni ventil, koji se upravlja nekom analognom veličinom, najčešće strujom od 4-20 mA, naponom od -10 do 10 V ili 0-10 V, ili PWM¹⁰ (eng. *Pulse Width Modulation*) signalom. Signalne elemente predstavljaju davači pozicija, kao što su razni otpornički, impulsni ili induktivni enkoderni. Ovi elementi određuju apsolutnu ili relativnu poziciju aktuatora ili predmeta rada. Tačnost izmerene pozicije zavisi od rezolucije enkodera, a tačnost mogućeg pozicioniranja aktuatora u određenu poziciju, od karakteristika proporcionalnog razvodnika. Informacije sa enkodera se koriste za ostvarivanje povratne sprege prilikom upravljanja [6], [46].

Pneumatski aktuatori se mogu podeliti na sledeće grupe [6]:

- pneumatski cilindri,
- pneumatski motori¹¹.

Pneumatski cilindri predstavljaju vrstu pneumatskih aktuatora koji ostvaruju pravolinijsko kretanje. Postoje pneumatski cilindri jednosmernog i dvosmernog dejstva [6].

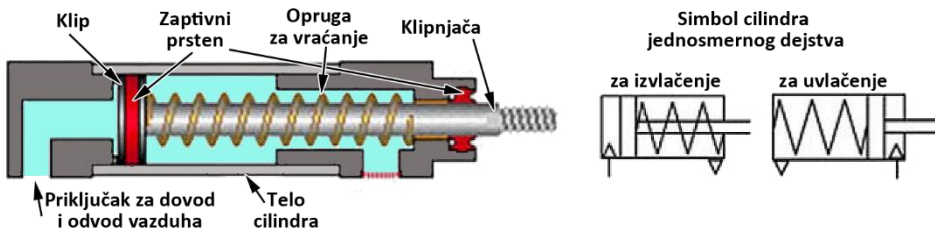
Prema izvedbi, pneumatski cilindri mogu biti klipni i membranski. Za obe izvedbe se koristi isti simbol u pneumatskim šemama [47]. Klipni cilindri se koriste u aplikacijama sa uobičajenim zahtevima, a membranski u aplikacijama u kojima treba da se postignu velike sile, kao što su zakivanje ili stezanje predmeta kod presovanja. Membranski pneumatski cilindri sadrže membranu umesto klipa. Membrana može biti plastična, gumena ili metalna. Zbog potencijalno velikih površina membrana mogu da se ostvare velike sile. Nedostatak membranskih cilindara je kratak hod i kratak vek trajanja [6], [47].

¹⁰ PWM (eng. *Pulse Width Modulation*) signal, ili impulsno-širinski modulirani signal je upravljački signal određene frekvencije koja korisnu „informaciju“ prenosi podešavanjem faktora ispunje signala tokom jedne periode. Faktor ispunje je odnos visokog i niskog naponskog stanja tokom periode [114].

¹¹ Pneumatski motori ostvaruju rotaciono kretanje i mogu se koristiti kao pogonski element kod indirektnih linearnih aktuatora.

Pneumatski cilindri jednosmernog dejstva

Pneumatski cilindar jednosmernog dejstva (*Slika 19*) ili monostabilni cilindar se napaja vazduhom pod pritiskom samo sa jedne strane, tj. komora cilindra se napaja vazduhom pod pritiskom samo tokom perioda izvlačenja, a nakon rasterećenja komore, tj. odzračivanja vazduha iz komore u atmosferu, klip se u početni položaj vraća pomoću opruge. Ovo je slučaj kod cilindra jednosmernog dejstva kod kojeg se dovođenjem vazduha pod pritiskom klipnjača cilindra izvlači. U slučaju da cilindar prilikom napajanja vazduhom treba da se uvlači, opruga i priključak za dovod odnosno odvod vazduha se postavljaju sa obrnute strane, simetrično u odnosu na *Sliku 19* [6], [48].



Slika 19. Poprečni presek cilindra jednosmernog dejstva i simbol [48].

Posledica delovanja vazduha pod pritiskom samo na jednu stranu klipa je da cilindar samo tokom hoda za koji koristi vazduh pod pritiskom može da ostvari koristan rad. Sila opruge u cilindru je proračunata tako da se klip cilindra može vratiti u početni položaj odgovarajućom brzinom, ali ne i da vrši neki rad. Hod cilindra jednosmernog dejstva je ograničen zbog ograničenja u dužini opruge koja vraća klip u početni položaj [6].

Sila F_{cjd} kojom deluje cilindar jednosmernog dejstva je određena prečnikom njegovog klipa A i data je izrazom (11) [49]:

$$F_{cjd} = p \cdot A - F_o - F_{tr} \quad (11)$$

gde je:

p – pritisak vazduha kojim se cilindar napaja,

$A = \frac{D^2 \cdot \pi}{4}$ – korisna površina klipa po kojoj deluje pritisak, ako je D prečnik klipa,

F_o – sila u opruzi,

F_{tr} – sila trenja.

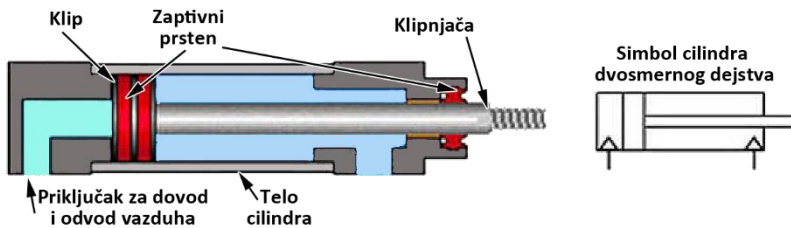
Prednosti cilindra jednosmernog dejstva su, što ne troše vazduh pod pritiskom za povratni hod i nisu potrebni priključak, cevovod i razvodni ventil za

povratni hod, nego se klip se vraća u početni položaj prostim ispuštanjem vazduha iz radne komore cilindra [47].

Nedostatak cilindra jednosmernog dejstva je što se gubi na intenzitetu dejstva cilindra, jer se deo sile troši na sabijanje opruge. Zbog ograničene sile u opruzi, cilindar ne može da ostvari koristan rad tokom povratnog hoda. Hod cilindra je ograničen zbog ograničenja u dužini opruge [47].

Pneumatski cilindri dvosmernog dejstva

Pneumatski cilindar dvosmernog dejstva (*Slika 20*) ili bistabilni cilindar se, za razliku od cilindra jednosmernog dejstva, napaja vazduhom pod pritiskom sa obe strane, tj. postoje dva priključka za dovod/odvod vazduha u komoru cilindra. Vazduh pod pritiskom može da deluje na obe strane klipa cilindra, što dovodi do toga da cilindar može da ostvari koristan rad i u povratnom hodu. [6], [48].



Slika 20. Poprečni presek cilindra dvoosmernog dejstva i simbol [48].

Nosivost cilindra dvosmernog dejstva, ili sila kojom cilindar deluje, određena je prečnikom klipa, tj. aktivnom površinom na koju pritisak deluje i korišćenim pritiskom. Sila izvlačenja klipa F_{cdd+} je određena jednačinom (12) [49]:

$$F_{cdd+} = p \cdot A_i - F_{tr} \quad (12)$$

gde je:

p – pritisak vazduha kojim se cilindar napaja,

$A_i = \frac{D^2 \cdot \pi}{4}$ – korisna površina klipa po kojoj deluje pritisak tokom izvlačenja, ako je D prečnik klipa,

F_{tr} – sila trenja.

Sila uvlačenja klipa F_{cdd-} je kod cilindra sa klipnjačom uvek manja od sile izvlačenja F_{cdd+} jer je aktivna površina na koju pritisak deluje manja za površinu klipnjače, koja je sa te strane.

Sila uvlačenja određena je jednačinom (13) [49]:

$$F_{cdd-} = p \cdot A_u - F_{tr} \quad (13)$$

gde je:

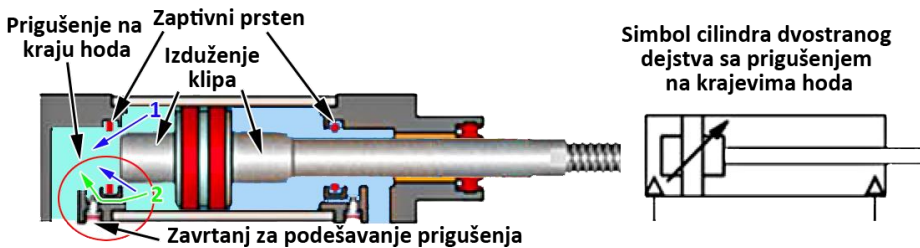
p – pritisak vazduha kojim se cilindar napaja,

$A_u = \frac{(D^2 - d^2) \cdot \pi}{4}$ – korisna površina klipa po kojoj deluje pritisak tokom uvlačenja, ako je D prečnik klipa a d prečnik klipnjače,

F_{tr} – sila trenja.

Hod cilindra dvosmernog dejstva je teoretski neograničen, ali treba obratiti pažnju da ne bude preveliki, jer zbog prevelike dužine klipnjače može doći do njenog savijanja. Za velike hodove potrebno je dodati vođice za klipnjaču [6].

U cilju smanjivanja udara u krajnjim pozicijama, na krajeve hoda cilindra se konstrukcijski mogu postaviti prigušenja koja će u poslednjem delu hoda usporiti kretanje klipa i na taj način ublažiti udar. Prigušenja su neophodna u slučaju kada cilindar pomera predmet velike mase, jer bi inače moglo doći do udarnog rada cilindra, usled čega se smanjuje njegov životni vek [6]. Prigušenje može biti realizovano i pomoću prigušenja koje se postavlja na odzračni vod (Slika 21) ili prigušno-nepovratnog ventila koji se postavlja na priključak za vazduh na samom cilindru. U oba slučaja, podešavanje količine vazduha koji se propušta vrši se putem zavrtnja na ventilu. U slučaju prigušenja koje je montirano na odzračni vod ne prigušuje se ceo hod cilindra, već samo poslednji deo hoda. U ovom slučaju, klip cilindra je formiran sa izduženjem. U prvom delu hoda vazduh se odzračuje bez prigušenja (smer 1 sa Slike 21), sve dok izduženje na klipu ne uđe u deo sa prigušenjem, kada zaptivni prsten prekida put vazduhu kroz smer 1, a preostala količina vazduha se odzračuje preko prigušenog dela (smer 2 sa Slike 21).



Slika 21. Poprečni presek cilindra dvostranog dejstva sa prigušenjem i simbol [48].

Razne modifikacije pneumatskih cilindara

Suštinski, svaki cilindar može da bude u jednosmernoj ili dvosmernoj izvedbi, ako za to postoji potreba, mada se podvarijante cilindara češće realizuju u dvosmernoj izvedbi. Po konstrukciji i načinu izvedbe cilindri se mogu podeliti na [47]:

- cilindar sa obostranom klipnjačom,
- tandem cilindar,
- višepoložajni cilindar,
- cilindar bez klipnjače,
- udarni cilindar,
- membranski cilindar.

Cilindar sa obostranom klipnjačom

Cilindar sa obostranom klipnjačom ima prolaznu klipnjaču, koja je uležištena na obe strane kućišta cilindra. Kod ovog tipa cilindra je, zbog oslanjanja klipnjače na dve tačke, dozvoljeno manje radijalno opterećenje, što inače nije slučaj kod pneumatskih cilindara da ne bi dolazilo do povećanog habanja klipa. Ovi cilindri se najčešće realizuju kao cilindri dvosmernog dejstva. [6]

Nosivost ovog tipa cilindra je identična u oba smera kretanja, jer je aktivna površina identična. Naravno, ovo se odnosi na cilindre sa obostranom klipnjačom kod kojih su obe klipnjače identičnog prečnika. Nosivost cilindra, ili sila sa kojom cilindar deluje, se u ovom slušaju izračunava isto kao i kod običnog cilindra dvosmernog dejstva tokom uvlačenja – jednačina (13).

Tandem cilindar

Tandem cilindar je vrsta cilindra dvosmernog dejstva koji na istoj klipnjači ima dva klipa što omogućava dvostruko veću silu pri istom prečniku cilindra [6]. Ovim je postignuto da je pri nepromenjenom prečniku izlazna sila udvostručena, ali je tokom izvlačenja i uvlačenja izlazna sila različitog intenziteta, a hod cilindra je duplo manji [47]. Ovaj tip cilindra se koristi tamo gde je potrebno ostvariti veliku silu, ada prečnik cilindra ne bude velik. [50]

Pod uslovom da je klipnjača celom dužinom istog prečnika, sila kojom cilindar deluje tokom izvlačenja F_{tan+} i sila kojom deluje tokom uvlačenja F_{tan-} mogu se odrediti jednačinama (14) i (15).

Sila kojom cilindar deluje tokom izvlačenja F_{tan+} je:

$$F_{tan+} = p_1 \cdot A_1 + p_2 \cdot A_2 - F_{tr} \quad (14)$$

gde je:

p_1 – pritisak vazduha koji deluje na prvi klip tokom izvlačenja,

p_2 – pritisak vazduha koji deluje na drugi klip tokom izvlačenja,

$A_1 = \frac{D^2 \cdot \pi}{4}$ – korisna površina dela klipa bez klipnjače po kojoj deluje pritisak p_1 , ako je D prečnik klipa,

$A_2 = \frac{(D^2 - d^2) \cdot \pi}{4}$ – korisna površina dela klipa sa klipnjačom, ako je D prečnik klipa, a d prečnik klipnjače,

F_{tr} – sila trenja.

Sila kojom cilindar deluje tokom uvlačenja F_{tan-} je:

$$F_{tan-} = (p_1 + p_2) \cdot A_2 - F_{tr} \quad (15)$$

gde je:

p_1 – pritisak vazduha koji deluje na prvi klip tokom izvlačenja,

p_2 – pritisak vazduha koji deluje na drugi klip tokom izvlačenja,

$A_2 = \frac{(D^2 - d^2) \cdot \pi}{4}$ – korisna površina dela klipa sa klipnjačom, ako je D prečnik klipa, a d prečnik klipnjače,

F_{tr} – sila trenja.

Višepoložajni cilindar

Višepoložajni cilindar se sastoji od više potpuno nezavisnih cilindara koji su spojeni međusobno [6]. Ako je kraj jedne klipnjače fiksiran a cilindri su slobodni, sa ovom konfiguracijom je moguće ostvariti četiri različita stabilna položaja i beskonačno mnogo međupoložaja [47].

Višepoložajni cilindri se najviše koriste za upravljanje cevovodima, u prehrambenoj industriji, i dr. [51]

Teleskopski cilindar

Teleskopski cilindar je posebna vrsta pneumatskog cilindra kompaktnog dizajna, ali sa mogućnošću ostvarivanja veoma velikog hoda. Dizajn ovog cilindra podseća na niz cevi postavljenih jedna u drugu, što podseća na teleskop, pa otuda i naziv. Broj stepeni izvlačenja je iz konstrukcijskih razloga ograničen na šest, jer bi povećanjem ovog broja cilindar postao nestabilne konstrukcije. Drugi problem kod ovih cilindara predstavljaju momenti koji deluju na uležištenja

između dva segmenta, a koji nastaju kao posledica težine izvučenih segmenata. [6], [52]

Teleskopski cilindri se proizvode i kao cilindri jednosmernog dejstva i kao cilindri dvosmernog dejstva. Jedina vidljiva razlika sa spoljne strane je što kod cilindra jednosmernog dejstva postoji jedan priključak za vazduh pod pritiskom manje, dok je unutrašnjost konstrukciono komplikovanija kod cilindra dvosmernog dejstva [6].

Nosivost ovih cilindara zavisi od njihovog hoda tj. broja stepeni izvlačenja. Koriste se u procesima gde je neophodno ostvariti veliku dužinu hoda, ali nema mesta za postavljanje klasičnih pneumatskih cilindara, kao, na primer, kod dizalica [6].

Udarni cilindar

Udarni cilindar je konstruisan tako da ostvaruje najveću brzinu kretanja uz pomoć velike količine kinetičke energije. Komora za izvlačenje udarnog cilindra je proširena sa pretkomorom za akumulaciju vazduha pod pritiskom. Pritisak koji je u pretkomori na klip cilindra u početnom trenutku deluje samo preko manjeg dela površine klipa (*Slika 22, površina A*), jer klip zatvara otvor i sprečava da sabijeni vazduh prevremeno prodre u deo komore cilindra gde bi mogao da utiče na celu površinu klipa. Intenzivno prodiranje sabijenog vazduha u komoru cilindra počinje u trenutku kada pritisak na zaptivnoj površini klipa (*Slika 22, površina A*) stvori dovoljno veliku silu (F_0) da savlada statičko trenje i pritisak u drugoj komori (ako je ima). U tom trenutku vazduh odgurne klip sa ovog otvora i prodire u komoru u kojoj svoje dejstvo može da iskaže na celu površinu klipa. Proces prodiranja vazduha se odvija veoma brzo, jer je prolaz dovoljno velik, i vazduh pod pritiskom je već pripremljen u pretkomori. Nagli porast intenziteta sile dolazi usled naglog porasta aktivne površine čela klipa, uz neznatno smanjenje radnog pritiska vazduha pod pritiskom. Trenutak prodiranja sabijenog vazduha u prostor ispred klipa se može regulisati intenzitetom pritiska vazduha (p_1) u komori sa klipnjačine strane. Ako je pritisak p_1 dovoljno visok, neće doći do kretanja jer je površina na koju deluje p_r mnogo manja nego površina na koju deluje p_1 . Intenzitet ubrzanja kompletne mase (klipa, i spoljašnje mase) zavisi od veličine stvorene sile i od veličine masa [47]. Ovaj cilindar može postići brzine i do 10 m/s [51].

Ukupna sila se može odrediti kao:

$$F_{udc} = F_0 + \Delta F - F_{tr} = p_r \cdot A + p_1 \cdot \Delta A - F_{tr} \quad (16)$$

gde je:

p_r – pritisak vazduha u pretkomori koji deluje na malu površinu A ,

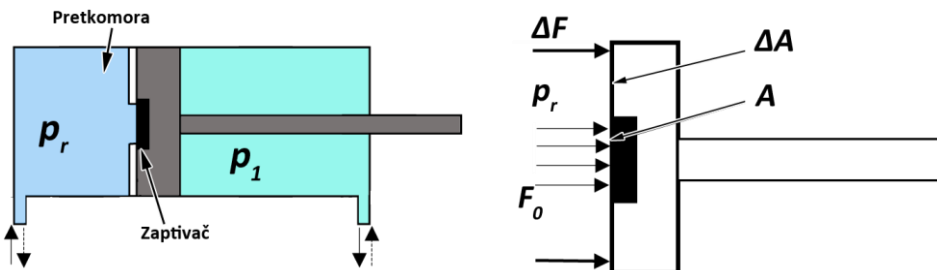
p_1 – pritisak vazduha koji deluje na povećanu površinu ΔA ,

pri čemu je $p_r \approx p_1$

$A = \frac{d^2 \cdot \pi}{4}$ – manji deo površine klipa prečnika d na koji deluje pritisak p_r iz pretkomore,

$\Delta A = (\frac{D^2 \cdot \pi}{4} - A)$ – razlika površina na koju će dodatno delovati pritisak p_1 kada pređe iz pretkomore.

F_{tr} – sila trenja.



Slika 22. Poprečni presek udarnog cilindra.

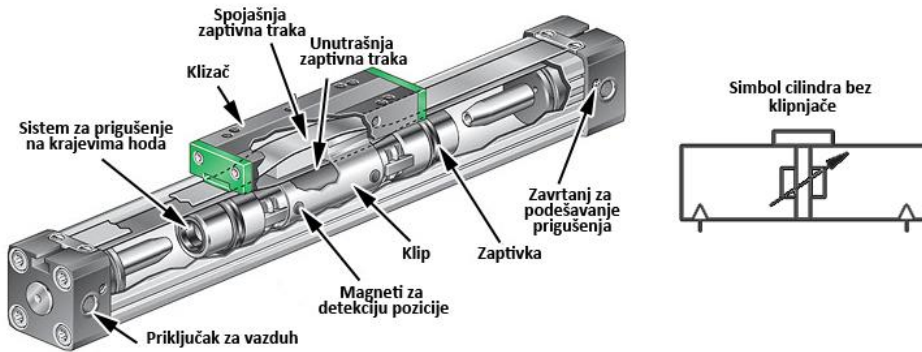
Udarni cilindri se koriste u aplikacijama kod kojih je potrebna velika udarna sila, kao što je obrada deformacijom (prosecanje, zakivanje, presovanje, itd.) [6].

Cilindar bez klipnjače

Kod cilindra bez klipnjače, klipnjača je potpuno eliminisana, a prenos sile se ostvaruje na tri moguća načina: čeličnim užetom, čeličnom trakom ili permanentnim magnetom [6], [11], [50]. Umesto klipnjače, na kućištu cilindra se nalazi klizač koji vrlo često ima i dodatne vođice koje nose teret. Ovi cilindri omogućavaju posebno duge hodove klipa. Maksimalna dužina hoda je i do 12 metara [51].

Cilindar sa čeličnim užetom je vrsta cilindra dvosmernog dejstva kod kojeg je umesto klipnjače sa obe strane klipa je zakačeno uže. Prednost ovih cilindara je izuzetno velik hod. Nedostatak mu je što zaptivanje nije adekvatno rešeno i dolazi do stalnog gubitka vazduha pod pritiskom. Drugi nedostatak je što vremenom dolazi do istezanja užeta. Najčešće se koristi kao pogon za velika klizna vrata (npr. vrata na halama) [6].

Kod cilindra sa čeličnom trakom (*Slika 23*) princip funkcionisanja je isti kao i kod cilindra sa užetom, samo što se umesto užeta koristi traka od nerđajućeg čelika. Sa trakom je rešen problem zaptivanja. Ovaj cilindar je kompaktniji od cilindra sa čeličnim užetom, ali istezanje trake i ovde predstavlja problem, kao i istezanje užeta kod cilindra sa užetom, pa je i u ovom slušaju neophodno češće održavanje [6].



Cilindar sa permanentnim magnetom silu sa klipa prenosi na spoljašnji klizač putem trajnih magneta. Pneumatski sistem cilindra je kod ove izvedbe potpuno zatvoren, pa je zaptivanje idealno. Izvedba ovih cilindara je kompaktna, ali skupa. Opterećenje klizača je ograničeno maksimalnom silom magneta. Prekoračenjem te sile, klizač može da se odvoji od klipa, i da ostane bez ikakve kontrole. Kod ovih cilindara preopterećenje nije dopušteno. Ovi cilindri se koriste za posebne namene, kod kojih je bitan kompaktni dizajn (npr. kod manipulatora za rukovanje materijalom) [50].

Izlazna sila cilindra bez klipnjače je identična u oba smera kretanja, jer je aktivna površina klipa identična. Sila sa kojom cilindar deluje se u ovom slušaju izračunava isto kao i kod običnog cilindra dvosmernog dejstva tokom izvlačenja – jednačina (12).

¹² Slika preseka cilindra bez klipnjače sa čeličnom trakom je preuzeta sa internet strane: *Pneumat system - RLF Rodless Cylinders*: <http://pneumatic-cylinders.eu/rlf.html> (pristup: maj 2015)

Hidraulični aktuatori

Hidraulični aktuatori su pogonski elementi koji služe za pretvaranje energije fluida u mehaničku energiju, odnosno linearno ili rotaciono kretanje. Kao fluid najčešće se upotrebljava mineralno ulje, ali kao pokretački energent mogu se koristiti i drugi fluidi (npr. voda). Hidraulični sistem čine: pogonski agregat hidraulične pumpe, upravljačko regulacioni elementi i izvršni organi. [53]

Hidraulični pogoni se upotrebljavaju u zadacima koji zahtevaju velike sile, brzine i ubrzanja, male jednolične pomake, visoku tačnost pozicioniranja u međupoložajima, itd. Hidraulični pogoni se koriste u vrlo širokom području primene, koje obuhvata: alatne mašine, poljoprivredne mašine, šumarske mašine, građevinske mašine, itd. [51]

Hidraulični cilindri se sastoje od nepokretnih delova, kao što su kućište i priključci za dovod/odvod fluida, i pokretnih delova, kao što su klipnjača i klip. Po smeru delovanja, mogu se podeliti na cilindre jednosmernog i dvosmernog dejstva. Princip funkcionisanja hidrauličnih cilindara je isti kao i kod pneumatskih, sa razlikom što su ovi cilindri konstrukcijski jači, jer hidraulični sistemi rade na pritiscima koji su mnogostruko veći od pritisaka u pneumatskim sistemima. Budući da je radni medijum ulje (ili voda, itd.), pojavljuje se problem sa curenjem ulja kroz zaptivače, pa je potrebno predvideti odvod tog ulja. Takođe, prilikom pražnjenja cilindra, ulje mora da se odgovarajućim vodovima vrati u rezervoar sa uljem. [6], [51]

Hidraulični cilindar jednosmernog dejstva

Hidraulični cilindar jednosmernog dejstva se fluidom pod pritiskom napaja samo sa jedne strane, tj. samo se tokom perioda izvlačenja komora cilindra puni fluidom pod pritiskom, a nakon ispuštanja fluida iz komore klip se u početni položaj vraća pomoću opruge koja se nalazi unutar kućišta cilindra, pri čemu priključak za dovod fluida postaje priključak za odvod fluida iz cilindra.

Sila kojom hidraulični cilindar jednosmernog dejstva deluje na radni predmet F_{hcjd+} je određena prečnikom klipa i pritiskom fluida [54]:

$$F_{hcjd+} = p \cdot A_i \quad (17)$$

gde je:

p – pritisak fluida kojim se cilindar napaja,

$A_i = \frac{D^2 \cdot \pi}{4}$ – korisna površina klipa po kojoj deluje pritisak tokom izvlačenja, ako je D prečnik klipa.

Hidraulični cilindar dvosmernog dejstva

Hidraulični cilindar dvosmernog dejstva se za razliku od cilindra jednosmernog dejstva napaja fluidom sa obe strane, tj. postoje priključci na obe komore cilindra, i fluid pod pritiskom može delovati na obe strane klipa. Posledica delovanja fluida pod pritiskom na obe strane klipa je da cilindar može ostvariti rad u oba pravca kretanja. [6], [48]

S obzirom da su površine sa klipne i klipnjačine strane različite, sila izvlačenja F_{hcdd+} i sila uvlačenja klipnjače F_{hcdd-} će biti različite i zavisice od pritiska fluida. Sila izvlačenja je data jednačinom (18), a sila uvlačenja jednačinom (19) [54]:

$$F_{hcdd+} = p \cdot A_i \quad (18)$$

$$F_{hcdd-} = p \cdot A_u \quad (19)$$

gde je:

p – pritisak fluida kojim se cilindar napaja,

$A_i = \frac{D^2 \cdot \pi}{4}$ – korisna površina klipa po kojoj deluje pritisak tokom izvlačenja, ako je D prečnik klipa.

$A_u = \frac{(D^2 - d^2) \cdot \pi}{4}$ – korisna površina klipa po kojoj deluje pritisak tokom uvlačenja, ako je D prečnik klipa, a d prečnik klipnjače.

Razne modifikacije hidrauličnih cilindara

Po konstrukciji i načinu izvedbe, moguć je niz standardnih i specijalnih izvedbi cilindara. Realizacije pneumatskih cilindara se mogu pronaći i u hidrauličnoj izvedbi, ali su hidraulični cilindri robusniji, jer rade na mnogo većim pritiscima i projektovani su za ostvarivanje mnogo većih sila, dok je način funkcionisanja isti. [6], [54]

Kriterijumi za odabir cilindra su: potrebna sila, potreban hod, potrebna brzina i sama konstrukcija cilindra tj. učvršćenje cilindra, spoj klipnjače, priključci. [54]

Za relativno duge cilindre kod kojih je odnos *hod/prečnik klipnjače* > 10 potrebno je izvršiti proračun klipnjače na izvijanje [54].

Kod brzina kretanja klipa većih od 0,1 m/s, u cilindar je neophodno ugraditi prigušenje na krajeve hoda, kako bi se izbegli preveliki udari. [54]

Od mnogobrojnih izvedbi hidrauličnih cilindara posebno se izdvajaju sledeći [6], [54]:

- teleskopski cilindar,
- tandem cilindar,
- cilindar sa obostranom klipnjačom.

Teleskopski cilindar se koristi kada je potreban dug hod cilindra. Ovaj hidraulični cilindar ima sličnu konstrukciju kao pneumatski teleskopski cilindar, ali robusniju, dok je način funkcionisanja isti. Ukupna visina izvlačenja teleskopskog cilindra zavisi od broja segmenata i dužine svakog pojedinačnog segmenta. Budući da segmenti nisu jednaki, izvlačenjem svakog pojedinačnog segmenta izlazna sila opada, jer se površina na koju pritisak deluje smanjuje. Ovaj tip cilindra se najčešće koristi za pokretanje liftova ili kod raznih vrsta dizalica. [6]

Tandem cilindar koji konstrukcijski liči na pneumatski tandem cilindar, samo što je robusniji, omogućava postizanje velikih sila uz ograničeni prečnik cilindra.

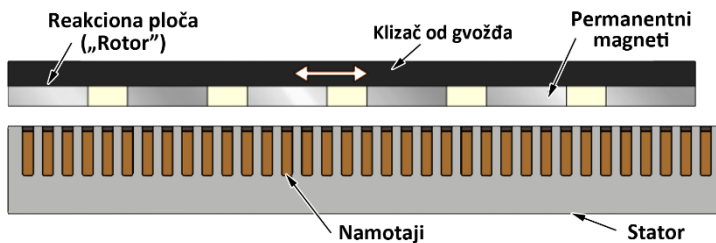
Hidraulični cilindar sa obostranom klipnjačom predstavlja cilindar dvosmernog dejstva kod kojeg je klipnjača uležištena na obe strane kućišta cilindra. Klipnjača cilindra je na sredini čvrstom vezom vezana za klip. Ovaj cilindar obezbeđuje istu radnu silu u oba pravca kretanja. [6]

Linearni motori

Linearni električni aktuator ili linearni motor je električni motor koji je konstrukcijski tako izveden da ima razmotan stator i umesto rotora poseduje klizač koji klizi iznad statora, tako da umesto obrtnog momenta (rotacije) proizvodi silu duž svoje dužine (pravolinijsko kretanje). Rotor rotacionog motora se obrće oko svoje ose i stalno koristi iste statorske polove, dok se kod linearnog motora statorski namotaji postavljaju dužinom konzole statora. Statorska konzola teoretski može da bude beskonačno dugačka, kao što je slučaj kod elektromagnetnih brzih pruga koje koriste ovaj način za proizvodnju linearnog kretanja za pokretanje kompozicije voza. Budući da linearni motor u praktičnoj realizaciji uglavnom ima ograničenu dužinu statora, na krajevima hoda javljaju se ivični efekti (eng. *end-effect*) [55].

Najčešći način rada linearnih motora je po Lorencovom zakonu, kao i kod većine rotacionih motora, gde je proizvedena sila linearno proporcionalna struji i jačini magnetnog polja (jednačina (1) iz *Poglavlja 2.1.1*).

Na *Slici 24* prikazan je presek linearnog motora sa permanentnim magnetima u reakcionoj ploči („rotoru“) i namotajima u statoru koji indukuju elektromagnetno polje. Ovaj linearni sinhroni motor se sastoji od reakcione ploče koja je na klizaču i sadrži niz stalnih magneta sa jedne strane, i statora sa namotajima koji proizvode elektromagnetno polje sa druge strane. Reakciona ploča klizi („leti“) iznad statorske konzole usled delovanja stalnog magnetnog polja reakcione ploče i magnetnog polja indukovanog pomoću statorskih namotaja. Položaj klizača se kontroliše promenom električne struje kroz statorske namotaje. Princip rada je sličan principu rada rotacionih motora bez četkica. Ova konfiguracija dozvoljava da se na statorskoj konzoli istovremeno pokreće više nezavisnih klizača (reakcionih ploča), naravno ukoliko je to podržano od strane upravljačkog sistema koji kontroliše statorske namotaje. [56]



Slika 24. Presek linearnog motora sa permanentnim magnetima u reakcionoj ploči [56].

Postoji mnogo različitih dizajna linearnih motora, ali se oni mogu svrstati u dve velike kategorije: motore sa velikim ubrzanjem, i motore sa malim ubrzanjem.

Linearni motori sa velikim ubrzanjem se koriste u aplikacijama u kojima se prenosi relativno mali teret, ali je potrebno postići jako velika ubrzanja. Obično se koriste u studijama sudara pri velikim brzinama kretanja, kao oružje ili u pogonima za lansiranje letelica [57], [58]. Linearni motor sa velikim ubrzanjem je najčešće trofazni AC linearni indukcion motor (eng. *linear induction motor* (LIM)).

Linearni motori sa malim ubrzanjem se uglavnom koriste za železnički i drugi vid prizemnog saobraćaja, jer ovi motori postižu veoma velike brzine i mogu da ostvare veliku silu [59]. Ovi linearni motori su najčešće Linearni sinhroni motori

(eng. *linear synchronous motor* (LSM)). Najpoznatiji ovakav motor je *Shanghai Transrapid* motor koji se koristi u brzom železničkom saobraćaju.

Linearni indukcionni motori u poslednje vreme dobijaju sve više na značaju zbog jako dobrih performansi aktuatora, naročito ukoliko se primenjuje vektorsko upravljanje ovim motorima, što je prikazano u velikom broju radova [12], [55], [60].

U radu *Indirektna vektorska kontrola redundantnog LIM za lansiranje aviona* autora Miker i Njumen [61] prikazana je primena indirektnog vektorskog upravljanja kod LIM koji se koristi za ubrzavanje aviona tokom lansiranja sa brodova transportera. Vektorsko upravljanje sa LIM se uglavnom sprovodi po SFOC (eng. *secondary flux oriented control*) metodi [61]–[66].

Linearni indukcionni motori imaju veliki potencijal za primenu kod sistema kod kojih je potrebno linearno kretanje. Proizvode linearno kretanje bez korišćenja mehaničkih prenosnika kretanja i snage, čime se izbegavaju mehaničke komponente koje se vremenom troše i unose grešku u sistem. Iako su mogućnosti velike, u nekim aplikacijama osobine materijala i način rada aktuatora predstavljaju ograničavajuće faktore. Pošto se prenos opterećenja oslanja isključivo na privlačenje i odbijanje između statorskih magnetnih polova i polova reakcione ploče, većina linearnih indukcionnih motora ima nizak kapacitet prenosa tereta u odnosu na ostale tipove linearnih aktuatora.

Linearni motori imaju prednost kod primene na otvorenom ili u nečistim sredinama, jer se dve polovine aktuatora fizički ne moraju dodirivati (reakciona ploča lebdi iznad statora), pa se namotaji elektromagneta statora mogu potpuno izolovati od spoljašnjih uticaja (vlage, korozije, itd). Ovi pogoni imaju veoma dug radni vek.

2.2 Senzori za praćenje linearnih aktuatora

Senzori za određivanje pozicije, ili davači pozicije (eng. *transducer*) ili enkoderi (eng. *encoder*) su uređaji koji su neophodni u svim sistemima upravljanja aktuatorima u zatvorenoj sprezi, jer se trenutno stanje aktuatora određuje na osnovu informacija sa ovih senzora. Termini senzor, davač signala i enkoder se ravnopravno koriste u literaturi, ali postoji razlika, kada se koji termin koristi. [67]

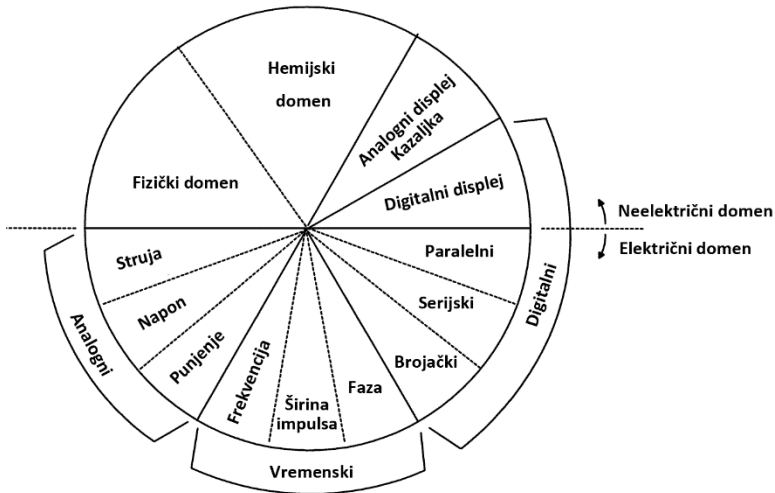
Davač signala se obično definiše kao uređaj koji konvertuje signal iz jedne fizičke forme u odgovarajući signal druge fizičke forme [67], [68]. Energija može biti pretvorena iz jednog oblika u drugi radi prenošenja snage ili informacije. Na primer, koračni motor u automatizovanom menjaču automobila, konvertuje električni ulazni signal u položaj menjača. [67]

Senzor se obično definiše kao uređaj koji obezbeđuje izlazni signal kao odziv na neku specifičnu ulaznu fizičku veličinu. Ulazna fizička veličina koja se meri, utiče na senzor na taj način da se na izlazu senzora dobija signal koji je u nekoj korelaciji sa merenom veličinom. Izlaz senzora je uglavnom električni signal, ali alternativno može biti i mehanički pomeraj, pritisak, protok, ili drugi tip korisnog signala. Na primer, senzor temperature (npr. termopar) konvertuje razliku temperature u električni napon. [67] Na *Slici 25* prikazane su vrste mogućih izlaza senzora koje služe za prenos ili prikaz merenih veličina.

Enkoder ili koder je uređaj, kolo, pretvarač, softverski program, algoritam ili lice koje pretvara podatke iz jednog formata u drugi. Pojam se koristi u raznim oblastima kao što su: informacione tehnologije, rad sa raznim standardima, merenje brzine, šifrovanje podataka, sigurnost stvari i objekata kao i prilikom komprimovanja podataka. Pojam se koristi u širokom opsegu profesija, ali opet zadržava svoje osnovno značenje, a to je da je enkoder „nešto ili neko“ zadužen za pripremu informacije, koja treba da se prenese drugoj strani, na takav način da to drugoj strani bude razumljivo. Na primer, pomoću rotacionog inkrementalnog (brojačkog) enkodera brzina okretanja vratila elektromotora se konvertuje u niz impulsa razumljivih upravljačkoj jedinici, koja na osnovu učestalosti ovih impulsa ima podatak o trenutnom broju obrtaja motora.

U skladu sa ovim definicijama, davač ponekad može biti senzor ili enkoder, i obrnuto [67]. Svi ovi nazivi koriste se ravnopravno u zavisnosti od toga šta konkretno radi uređaj u datom sistemu. U ovom radu će se koristiti naziv enkoder i senzor pozicije za merenje pozicije pokretnog dela aktuatora, a senzor za ostale tipove merenja, ali će se smatrati da imenica senzor obuhvata sve uređaje čija je primarna funkcija merenje neke veličine.

Senzori se mogu podeliti po više osnova, i to po: načinu određivanja merene veličine, vrsti izlaznog signala, načinu rada, veličini koju mere, itd. [67]. U ovom poglavlju će se razmatrati samo senzori koji služe za merenje veličina koje se prate tokom upravljanja linearnim aktuatorima i kao izlaznu veličinu daju električni signal (strujni, naponski).



Slika 25. Načini reprezentacije veličine izmerene od strane senzora [69].

Po načinu određivanja merene veličine, senzori se mogu podeliti na [67]:

- apsolutne i
- inkrementalne.

Apsolutni senzor daje tačnu izmerenu vrednost u odnosu na neku konstantnu zadata referentnu tačku. Na primer, apsolutni senzor dužine će dati izmerenu vrednost u milimetrima od nultog kraja senzora do merenog objekta, što oslikava realno rastojanje od senzora do merenog objekta. Ukoliko se kod apsolutnog senzora prekine napajanje, ili merenje izostane zbog neke smetnje (npr. smetnje usled jakog elektromagnetnog polja), nakon vraćanja uslova u normalno stanje senzor će ponovo meriti pravo rastojanje.

Suprotno apsolutnim sensorima, inkrementalni (brojački) senzori pokazuju samo promene merene veličine u toku nekog određenog vremenskog intervala. Ukoliko se sa ovim tipovima senzora želi pratiti apsolutna pozicija, neophodno je čuvati (akumulirati) prethodna merenja kako bi se mogla izračunati trenutna apsolutna vrednost. Ukoliko dođe do prekida napajanja i gubitka dela informacija o merenoj veličini, više se ne može rekonstruisati apsolutna vrednost, već se ceo sistem mora anulirati. U ovakvim situacijama, nakon prestanka poremećaja sistem se mora dovesti u neko unapred poznato referentno stanje, odakle se kasnije može nastaviti merenje. [67]

Po vrsti izlaznog signala, senzori koji na izlazu daju električni signal mogu se podeliti na [68]:

- analogne senzore sa
 - strujnim izlazom,
 - naponskim izlazom.
- digitalne senzore sa
 - diskretnim izlazom.

Analogni senzori na svom izlazu daju kontinualni, neprekidni niz vrednosti. Izlazni signal je proporcionalan veličini koja se meri, a informacija o vrednosti veličine koja se meri je sadržana u amplitudi izlaznog signala. Izlaz ovih senzora se preko A/D konvertora (analogno digitalni konvertor) može povezati na digitalni upravljački sistem.

Analogni senzori sa strujnim izlazom na svom izlazu daju analogni strujni signal u zavisnosti od merene vrednosti. U industrijskoj primeni uobičajeno je korišćenje strujnog signala od 0-20 mA ili od 4-20 mA. Više se koristi strujni izlaz od 4-20 mA, jer se u ovom slučaju opseg od 0-4 mA koristi za detekciju eventualnog izostanka signala sa senzora (kvara na senzoru ili prekida u kablovima). Kod osnovnih (neindustrijskih) izvedbi senzora, vrlo često se na izlazu senzora dobija mnogo puta manja struja od ovih standardnih opsega. Tokom obrade signali se filtriraju, pojačavaju i dovode na standardne opsege, da bi se mogli dalje distribuirati. [68]

Analogni senzori sa naponskim izlazom na svom izlazu daju jednosmerni ili naizmenični naponski signal u zavisnosti od merene vrednosti. U industrijskoj primeni uobičajeno je korišćenje jednosmernog naponskog signala od 0-10 V ili naizmeničnog od -10 do 10 V. U mikroprocesorskoj tehnici ovi naponski signali se konvertuju na opseg od 0-5 V ili 0-3,3 V. Kod osnovnih (neindustrijskih) izvedbi senzora, vrlo često se na izlazu senzora dobija mnogo puta manji napon od ovih standardnih opsega. Tokom obrade signali se filtriraju, pojačavaju i dovode na standardne opsege, da bi se mogli dalje voditi prema upravljačkoj jedinici. [68]

Digitalni senzori na svome izlazu daju niz diskretnih vrednosti. Svaka vrednost je nezavisna od prethodne i sledeće vrednosti. Na izlazu može da se pojavi jedna od unapred definisanih digitalnih vrednosti. Ovaj broj može biti 1 bit (logička „0“ ili „1“), ili veći broj u zavisnosti od rezolucije senzora. Izlaz senzora se formira u diskretnim vremenskim trenucima, koji su unapred određeni. Vreme

odabiranja¹³ je unapred određena kataloška vrednost, ili se može podešavati u podešavanjima senzora. Digitalni senzori su poznati po svojoj tačnosti i jednostavnom povezivanju na digitalne upravljačke sisteme bez potrebe za dodatnim konverterima. Postoje senzori kod kojih se za očitavanje stanja senzora od strane digitalnog upravljačkog sistema koristi neka vrsta komunikacije¹⁴ sa senzorom. [68]

Senzori se biraju u zavisnosti od toga koja veličina treba njima da se meri. Postoje tzv. hibridni senzorski sistemi koji omogućavaju merenje više veličina od strane istog uređaja, tj. sistema senzora. Najšire korišćeni senzori u industrijskim uslovima su:

- kapacitivni senzor,
- induktivni senzor,
- elektromagnetni senzor,
- optički senzor.

Kapacitivni senzori rade na principu promenljivog kondenzatora. Poseduju dve provodne elektrode koje su razdvojene dielektričnim materijalom (čvrstim, tečnim ili gasovitim) ili vakuumom. Kapacitivnost zavisi od geometrije elektroda i dielektričnog materijala, kao i od dielektrične konstante materijala, koja je kataloška vrednost za svaki materijal. Promenom dielektrikuma kondenzatora, tj. promenom okoline elektroda kondenzatora, menja se i kapacitivnost kondenzatora, koja se kasnije može detektovati pomoću komparatora ili drugog sistema za merenje promene napona na kondenzatoru. Ovim sensorima se može detektovati prisustvo bilo koje vrste predmeta [19], [68].

¹³ Vreme odabiranja ili uzorkovanje (eng. *sampling*) signala predstavlja vremenski period na kojem se dešava proces očitavanja signala. [115]

¹⁴ Ovi senzori imaju ugrađen neki od standardnih komunikacionih protokola, preko kojih je sa njih moguće očitati izmerenu veličinu. Kod nekih specijalnih senzora nije neuobičajeno ni da senzor za komunikaciju sa okolinom koristi sopstveni nestandardni protokol koji razume samo upravljačka jedinica istog proizvođača. Na ovaj način proizvođači se štite od tržišne konkurencije, kako bi se koristili upravo njihovi senzori i upravljačke jedinice.

Induktivni senzori se koriste u radu sa metalnim predmetima i rade na principu detekcije uticaja magnetnog polja na namotaj senzora. Postoji više načina za realizaciju induktivnih senzora, ali najkorišćeniji su [68]:

- senzori promenljive reluktanse,
- senzori vrtložnih struja,
- linearni promenljivi diferencijalni transformatori (eng. *Linear variable differential transformers* - LVDT).

Elektromagnetni senzori se koriste u slučajevima kada uticaj električnog ili magnetnog polja ne može adekvatno da se predstavi preko promene kapacitivnosti ili induktivnosti. Npr. određivanje pozicije rotora kod BLDC motora se vrši na osnovu Holovog efekta. Elektromagnetni senzori se mogu podeliti na senzore koji rade po principu [68]:

- Faradejevog zakona,¹⁵
 - tahogeneratori,
 - linearni senzori brzina,
 - elektromagnetni senzori protoka,
- Holovog efekta.

Optički ili opto-električni senzori su senzori koji svetlost ili svetlosne promene konvertuju u izlazni signal. Postoji više načina realizacije, ali uglavnom se ovi senzori svode na dve ćelije: predajnu i prijemnu. Predajna ćelija služi za emitovanje kontrolisane svetlosti, a prijemna za detekciju svetlosti koja je odbijena od objekta, prelomljena prolaskom kroz neku sredinu, itd. U zavisnosti od toga šta treba da se meri, i na kojoj udaljenosti, tip i intenzitet izvora svetlosti se menja. Kao izvor svetlosti senzori koriste infra-crvenu, lasersku, ili drugu svetlost određene talasne dužine. U zavisnosti od načina realizacije senzora, izvor svetlosti i prijemnik mogu biti dve odvojene jedinice ili jedna senzorska jedinica. Kod optičkih senzora postignuto je galvansko odvajanje od objekta koji se meri, veća zaštita od šumova, mogućnost merenja fizičkih veličina kako u oblasti malih tako i u oblasti velikih vrednosti, visok kvalitet statičkih i dinamičkih karakteristika, itd. [70]

¹⁵ Faradejev zakon elektromagnetske indukcije daje odnos promene magnetnog fluksa kroz površinu S ograničenom konturom C i električnog polja duž te konture: $\oint_C E dl = -\frac{d}{dt} \int_S B dS$ ako je: E – električno polje, dl – infinitesimalni element konture C , a B – gustina magnetnog fluksa. Ova zavisnost je zasnovana na eksperimentima Majkla Faradeja (eng. Michael Faraday) koje je izveo 1831. godine.

Prilikom odabira senzora, pored kriterijuma šta će se senzorom meriti, što utiče na vrstu senzora koja će se koristiti, treba obratiti pažnju i na karakteristike senzora. Karakteristike senzora su: *osetljivost*, *tačnost*, *preciznost*, *ponovljivost*, *linearnost* i prazan hod (ili zazor). Ovo su kataloški podaci senzora i proizvođači su dužni da ih deklariraju [68].

Osetljivost je sposobnost senzora ili mernog instrumenta da odgovori na promene veličine koja se meri. [68] Osetljivost S se definiše kao odnos promene izlazne veličine $\Delta Izlaz$ i ulazne veličine $\Delta Ulaz$ (20):

$$S = \frac{\Delta Izlaz}{\Delta Ulaz} \quad (20)$$

Rezolucija senzora (ili stepen finoće kod instrumenata) se definiše kao najmanja promena merene veličine koja može biti detektovana [68].

Tačnost je mera razlike između izmerene i tačne vrednosti. Ona zavisi od samih mogućnosti i ograničenja senzora kojim se vrši merenje [68].

Preciznost je sposobnost senzora da daje određeni broj očitavanja unutar date tačnosti. Preciznost merenja zavisi od pouzdanosti instrumenta [68].

Ponovljivost merenja je sposobnost senzora da daje iste izlazne vrednosti kada na ulazu pri istim uslovima ima istu ulaznu vrednost [68].

Linearnost senzora predstavlja težnju da izlazni signal bude linearna funkcija ulaznog signala. Linearnost se jako teško postiže i odstupanje od idealnog slučaja se naziva *linearna tolerancija*. Nelinearnost nastaje zbog upotrebe nelinearnih elemenata, histereza¹⁶, curenja i uticaja pojačavanja signala [68].

Prazan hod ili zazor je definisan kao maksimalno odstojanje ili ugao, za koje bilo koji deo mehaničkog sistema, nad kojim se merenje vrši, može biti pomeren a da se pri tome pričvršćeni deo koji se posmatra ne pomeri. Ovo je neželjena pojava i uglavnom proizilazi od korišćenih mehaničkih delova, i veoma je važno otkloniti je ili učiniti sve što je prilikom projektovanja sistema moguće da se ona smanji [68].

¹⁶ Histerezis (grč.: *ὕστερησις* = zakašnjen) je karakteristika sistema čije izlazne veličine ne zavise samo od ulaznih veličina, već i od istorije sistema. Za ovakav sistem se kaže da zavisi od puta promene, tako da je da bi se odredila sledeća izlazna veličina potrebno poznavati prethodne vrednosti. [116] Termin histerezis je u nauku 1890. god. uveo škotski inženjer Sir Džejms Alfred Juing (1855-1935) (eng. *Sir James Alfred Ewing*).

Tokom upravljanja linearnim aktuatorom, potrebno je odabrati adekvatan senzor za merenje pozicije aktuatora. Pored pozicije, upravljački sistem treba da prati i veličine kao što su napon napajanja, struja kroz kalemov u slučaju električnog aktuatora, ili protok vazduha i pritisak u slučaju pneumatskog aktuatora. U *Prilogu 6* data je tabela sa tipovima senzora i načinima merenja određenih fizičkih veličina koje mogu biti interesantne za praćenje kod linearnih aktuatora.

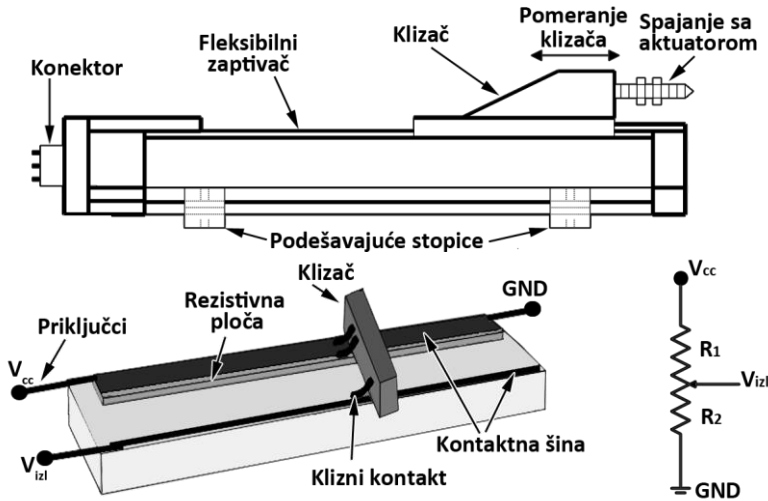
Prilikom odabira senzora, potrebno je da se u obzir uzmu sve prednosti i nedostaci date tehnologije senzora kako bi se obezbedilo adekvatno i precizno merenje. S druge strane, potrebno je poznavati i mehanička svojstva sistema tokom rada (brzine rada, vibracije, temperaturni opseg, itd.) kako bi se obezbedio dug radni vek senzora. U *Prilogu 7* dat je uporedni pregled tehnologija senzora, a u *Prilogu 8* date su osnovne karakteristike rezistivnog i magnetnih senzora. Ova dva priloga mogu pomoći prilikom odabira odgovarajućeg senzora za datu aplikaciju.

2.2.1 Linearni senzori pozicije

Linearni senzori pozicije, davači pozicije ili enkoderni senzori mogu biti realizovani pomoću raznih tehnologija. Neki su kontaktni a drugi beskontaktni. Kod indirektnih linearnih aktuatora vrlo često se koriste rotacioni senzori položaja za određivanje položaja vratila motora, koji je u tom slučaju pogonski element nad kojim se vrši regulacija [67]. U ovom delu će biti prikazani tipovi linearnih senzora pozicije, bez obzira na korišćenu tehnologiju, već samo po osnovnom načinu rada. Linearni senzori pozicije u ovom smislu mogu da se podele na: kontaktne i beskontaktne, kao i na analogne i inkrementalne.

Rezistivni linearni senzor pozicije

Rezistivni ili otpornički linearni senzori pozicije su veoma popularni, relativno su jeftini, i laki su za korišćenje. Ovi senzori spadaju u kontaktne senzore, jer klizač klizi po otporničkoj letvi. Ovaj senzor se naziva još i otporničkom mernom letvom ili linearnim potencijometrom, jer radi na principu potencijometra koji je povezan kao naponski razdelnik [67]. *Slika 26* prikazuje princip realizacije senzora. Krajevi otporničke letve (V_{cc} i GND) treba da su povezani na jednosmerni izvor napajanja, a srednji izvod je klizač koji klizi po otporničkoj letvi menjajući na taj način otpor R_1 i R_2 a samim tim i izlazni napon V_{izl} .



Slika 26. Skica načina izvedbe otporničkog linearnog senzora pozicije, i električna šema [67].

Izlazni napon na otporničkoj letvi V_{izl} zavisi od odnosa R_1 i R_2 kao i od ulaznog napona V_{CC} :

$$V_{izl} = \frac{R_2 \cdot V_{CC}}{R_1 + R_2} \quad (21)$$

gde je ukupan otpor merne letve $R_{letve} = R_1 + R_2$, i ako se uzme da je merna letva dužine L , a x je trenutna pozicija klizača, koja se meri od GND kraja ka V_{CC} , otpornost R_1 i R_2 se mogu izračunati kao:

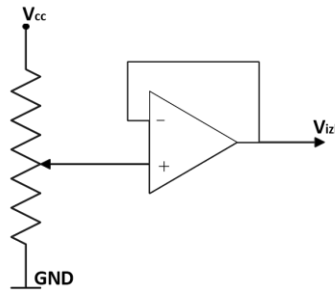
$$R_1 = \frac{R_{letve} \cdot (L - x)}{L} \quad (22)$$

$$R_2 = \frac{R_{letve} \cdot x}{L} \quad (23)$$

Ukoliko se jednačine (22) i (23) uvrste u jednačinu (21) dobija se zavisnost izlaznog napona V_{izl} od trenutne pozicije klizača x , iz koje se lako može izraziti trenutni položaj klizača x :

$$x = \frac{V_{izl} \cdot L}{V_{CC}} \quad (24)$$

U svrhu rasterećenja senzora, izlazni signal senzora je preporučljivo dalje distribuirati preko operacionog pojačavača sa jediničnim pojačanjem koji ima nisku impedansu [67].



Slika 27. Šema linearnog rezistivnog senzora pozicije sa jediničnim pojačavačem na izlazu [67].

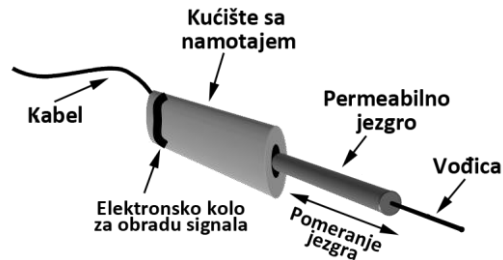
Prednosti linearnih otporničkih senzora pozicije su relativno niska cena, jednostavna instalacija, i laka konverzija izlaznog napona u trenutni položaj (*jednačina (24)*). Razvojem ovih senzora i prelaska sa žičanih otporničkih namotaja na Cermet¹⁷ ploče postignuta je veća rezolucija i duži životni vek, što je bilo neophodno za pravu industrijsku primenu u sistemima upravljanja u zatvorenoj sprezi. Najveći nedostatak senzora je što se radi o kontaktnom senzoru, kod kojeg vremenom dolazi do habanja i uništavanja otporničkog sloja senzora. Kod aplikacija kod kojih se zahteva visoka preciznost, a velika je učestalost promene pozicije, ipak se treba odlučiti za neki beskontaktni tip linearnog senzora pozicije. [67]

Induktivni senzor pozicije

Induktivni senzori pozicije spadaju u beskontaktno senzore pozicije. Rade na principu promene induktivnosti kalema usled pomeranja jezgra kalema. Na *Slici 28* prikazana je skica induktivnog senzora pozicije. Senzorski deo je sastavljen od jedne ili više zavojnica, i pokretnog dela koji se pomera zajedno sa klizačem linearnog aktuatora čiji položaj se prati. Ovaj senzor ima širok spektar primene u aplikacijama koje zahtevaju visoku preciznost tokom relativno kratkog mernog opsega (do nekoliko desetina milimetara), ili u aplikacijama u kojima se zahteva srednja preciznost tokom srednjeg mernog opsega. Ovi senzori nisu praktični u aplikacijama sa dužim hodom (više od 500 mm) zbog težine namotaja. Porastom dužine hoda ovi senzori postaju skuplji nego druge tehnologije beskontaktnih senzora (npr. kapacitivni ili optički). Izlazni signal ovih senzora se ne dobija direktno, kao što je to slučaj kod rezistivnih senzora, nego je potrebno uključiti dodatno elektronsko kolo koje vrši napajanje zavojnice i vrši demodulisanje

¹⁷ Cermet (ceramic + metal) je kompozitni materijal sastavljen od keramike i rezistivnih materijala (nikl, molibden, kobalt) [117].

signala na osnovu kog daje izlazni signal. Ovo dovodi do postojanja razlika u izlaznim signalima od senzora do senzora, što zahteva dodatnu kalibraciju.



Slika 28. Skica induktivnog linearnog senzora pozicije [67].

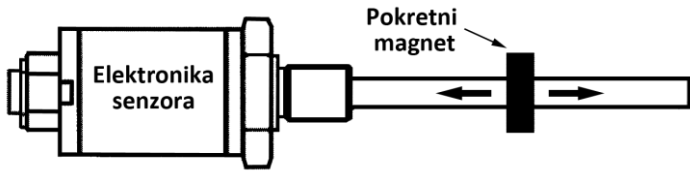
Pošto je senzorska jedinica beskontaktna, ceo sklop senzora radi sa minimalnim habanjem, i ne zahteva veliku silu za pomeranje. Kontakt se u senzoru ostvaruje samo u vođici jezgra koje se pomera. Jedan kraj ove vođice je kruto vezan za klizač aktuatora čija pozicija se prati. Po sličnom principu rade i induktivni senzori položaja (eng. *proximity sensors*), ali im je namena drugačija i sa njima se detektuje samo prisustvo polja a ne i intenzitet, što je potrebno prilikom pozicioniranja. [67]

Magnetni senzor pozicije

Magnetni senzori pozicije su beskontaktni apsolutni senzori sa teorijski beskonačno velikom rezolucijom. U magnetne senzore spadaju sledeće tehnologije senzora: magnetostriksijski, magnetorezistivni, senzori zasnovani na Holovom efektu i magnetni enkoderi. Svi ovi senzori su komercijalno dostupni i imaju nelinearnost reda 0,01 % i radni opseg od 10 mm do 20 m [71], [72].

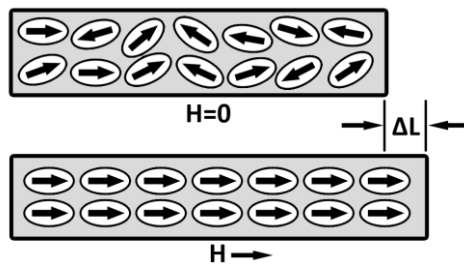
Magnetostriksijski senzor

Magnetostriksijski senzor koristi feromagnetne elemente za detektovanje pozicije pokretnog magneta, koji se linearno pomera duž njegove dužine. Magnet se pomera, bez kontakta, duž mernog područja senzora zajedno sa pokretnim delom aktuatora čija pozicija se prati [72]. *Slika 29* prikazuje skicu magnetostriksijivnog linearnog senzora položaja koji koristi permanentni magnet koji treba da je kruto spojen sa objektom čiji položaj se meri.



Slika 29. Skica magnetostrikcijskog senzora položaja [72].

Feromagnetni materijali kao što su gvožđe i niki imaju tzv. magnetostriktivnu¹⁸ osobinu da pod dejstvom magnetnog polja (H) menjaju svoju dimenziju (ΔL) (Slika 30). Delovanje magnetnog polja dovodi do preorijentacije kristalne rešetke, što dovodi do promene dimenzija materijala [72].



Slika 30. Uticaj magnetnog polja na promenu dimenzija feromagnetnog materijala [72].

Magnetorezistivni senzori

Magnetorezistivni senzori koriste osobinu većine magnetnih materijala da im električni otpor opada kada na njih deluje magnetno polje koje je normalno na smer protoka struje kroz ove materijale. Povećanjem magnetnog fluksa otpor opada, sve dok ne dođe do magnetnog zasićenja. Promena otpornosti je reda veličine 1 % na sobnoj temperaturi (0,3 % za gvožđe, a 2 % za niki). Osetljivost je najveća kada je magnetno polje normalno na smer struje kroz materijal.

Senzori zasnovani na Holovom efektu

Senzori zasnovani na Holovom efektu rade po principu merenja Holovog napona. Ukoliko se provodna traka ili poluprovodnička pločica kroz koju uzdužno

¹⁸ Magnetostriktivna - Džejsms Preskot Džul (eng. *James Prescott Joule*) je 1842. godine otkrio magnetostriktivnu osobinu gvožđa. On je uočio činjenicu da kada magnetno polje deluje na gvožđe, dolazi do povećanja dužine u pravcu magnetnog polja i do smanjenja širine u pravcu normalnom na polje [71].

protiče električna struja nađe u spoljašnjem magnetnom polju koje ima pravac normalan na njenu površinu, između bočnih ivica nastaje potencijalna razlika, tzv. Holov napon [72].

Intenzitet Holovog napona je proporcionalan gustini magnetnog fluksa i struje. Amplituda Holovog napona V_H zavisi od struje i magnetnog polja, i može se opisati izrazom (25) [72]:

$$V_H = \frac{K_H \cdot \beta \cdot I}{d} \quad (25)$$

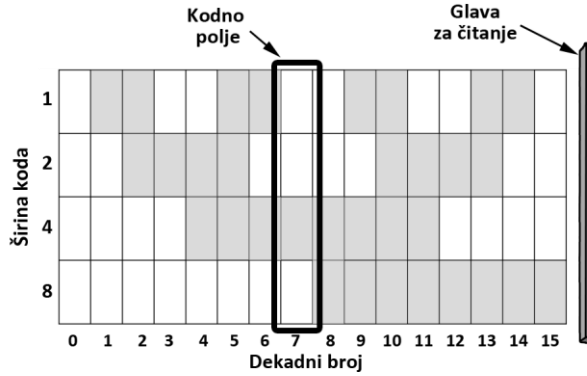
gde je:

- V_H – Holov napon,
- K_H – Holova konstanta,
- β – jačina magnetnog fluksa,
- I – struja kroz provodnik,
- d – debljina provodnika.

Senzori pomeraja ovog tipa su sastavljeni od Holovog elementa (senzorske ćelije) i stalnog magneta, a njihov izlazni signal je proporcionalan rastojanju između magneta i senzora. Ovi senzori su predviđeni za vrlo ograničeni pomak, tako da se linearni senzori ovog tipa proizvode od niza pojedinačnih ćelija. Kako se magnet približava i udaljava od svake Holove ćelije, na ćelijama se menja izlazni signal i pozicija magneta se određuje na osnovu analize signala svih ćelija. Ovaj način proizvodnje senzora omogućava proizvodnju senzora relativno velike dužine sa dobrim performansama, ali je dekodiranje svih izlaza koje treba multipleksirati i obraditi veoma kompleksan posao za elektroniku senzora, pa je ovo ograničavajući faktor što se tiče dužine senzora. Ovi senzori se mogu proizvoditi i kao rotacioni i u tom slučaju je samo drugačiji raspored Holovih ćelija, koji su tada postavljeni po kružnici [72].

Linijski enkoderi

Enkoderi su senzori položaja koji trenutni položaj određuju čitanjem i dekodovanjem binarnih šara (*Slika 31*) koje nose kodovane informacije o položaju i nalaze se na linijskom ili rotacionom medijumu za prenos podataka. U slučaju magnetnih enkodera, medijumi su magnetne trake ili magnetni diskovi, a u slučaju optičkih enkodera, to su providne trake sa zatamnjenim područjima, ili reflektujuće trake sa propuštajućim područjima. Na *Slici 31* prikazan je primer kodne šare u kojoj svako polje odgovara 4-bitnom kodu dekadnog broja kojim je označena data pozicija.



Slika 31. Kodna šara u kojoj je kodovana informacija o poziciji.

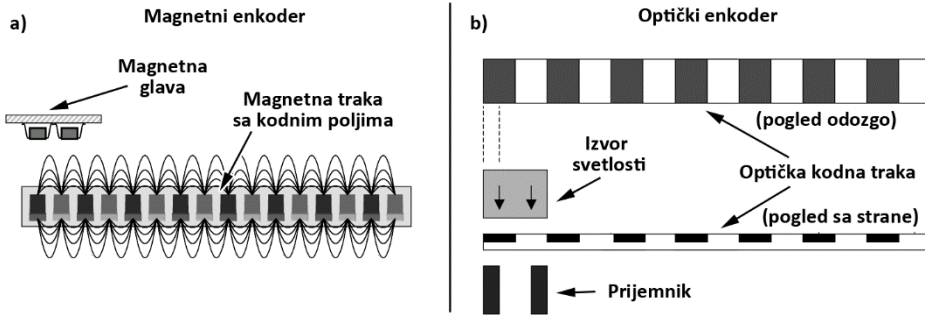
Glava koja služi za čitanje i dekodovanje prolazi iznad trake ili diska, iščitava i dekoduje polja u kojima su kodovane informacije (logičke „0“ i „1“) smeštene na nekoliko paralelnih koloseka, u zavisnosti od binarne širine kodne reči. Na svakom kodnom polju nalazi se informacija o trenutnom položaju. Pošto se kod standardnog binarnog koda porastom broja u nekim slučajevima menja i po više bitova, što predstavlja problem dekođeru jer je moguć izvor greške, za kodovanje informacija se najčešće koristi Grejov kod¹⁹[67], [72].

U slučaju magnetnih enkodera (Slika 32 a), glava za čitanje sadrži feromagnetno jezgro sa ulaznim i izlaznim namotajima. Ulazni namotaj pobuđuje magnetni zapis a izlazni namotaj čita informaciju. Ukoliko je polje namagnetisano, iz njega će se iščitati logička „0“ a ako nije namagnetisano, logička „1“. S druge strane, u slučaju optičkih enkodera (Slika 32 b) glava za čitanje koda sadrži izvor svetlosti sa jedne strane, i foto prijemnik sa druge strane. Ukoliko svetlosni zrak padne na foto prijemnik, senzor polje očitava kao logičku „1“, a u suprotnom kao logičku „0“. U slučaju rotacione izvedbe enkodera, umesto kodne trake koristi se prstenasti prenosnik informacija. U slučaju magnetnih enkodera, koristi se višepolni stalni magnet, a u slučaju optičkih enkodera, kodna polja su raspoređena po kružnici. [67], [72].

U slučaju jednobitnog kodovanja, na izlazu senzora se dobija povorka impulsa u obliku sinusnog i kosinusnog signala. Talasni oblik signala može biti sinusni ili trouglasti. Slika 33 prikazuje primer izlaznog signala senzora pozicije [72]. U slučaju višebitnog kodovanja, koristi se pretvaranje na neki standardni izlaz

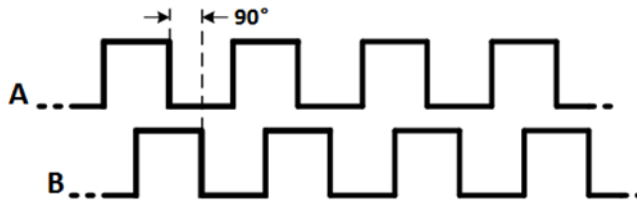
¹⁹ Grejov kod (eng. *Gray's code*) je primer cikličnog koda sa osobinom da se zapisi uzastopnih dekadnih cifara razlikuju u samo jednom bitu. Funkcija (nije jednoznačno određena) kojom se dekadnim ciframa pridružuje Grejov kod je: $G(d) = d \oplus (d/2)$, gde je d binarna reprezentacija dekadne cifre, a \oplus ekskluzivna disjunkcija [118].

(naponski ili strujni) ili se sa senzorom komunicira preko nekog unapred definisanog protokola [67].



Slika 32. Princip rada magnetnog i optičkog enkodera.

U slučaju kvadratnog impulsnog signala (Slika 33), na izlazu enkodera se generišu dva signala (*A* i *B*) koji su fazno pomereni za 90° i svaki impuls (prelaz sa „0“ na „1“) predstavlja jedan inkrement pozicije. Dužina po inkrementu je definisana rezolucijom senzora i predstavlja katalošku vrednost. Pravac pomeranja (ili rotacije) se može zaključiti upoređivanjem faze ova dva kanala (*A* i *B*). Ukoliko prvo nailazi prelaz sa „0“ na „1“ na kanalu *A*, koordinata koja se prati se povećava, a ukoliko prelaz naiđe prvo na kanalu *B*, koordinata se smanjuje [72].



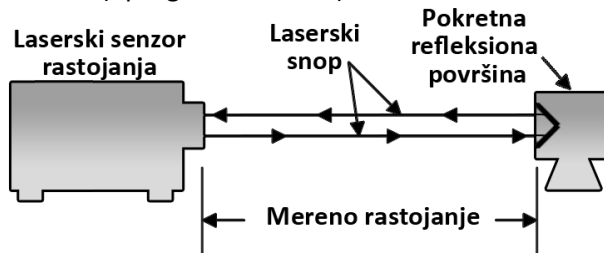
Slika 33. Kvadratni izlazni signal senzora pozicije.

Magnetni enkoderi mogu biti inkrementalni ili apsolutni, dok se optički enkoderi najčešće realizuju kao inkrementalni. U inkrementalnoj konfiguraciji, na jednakom rastojanju su impulsi kodirani na magnetnom medijumu. Impulsi se smeštaju u dvosmernom brojaču, a izlaz brojača predstavlja poziciju. Nulti položaj se postavlja resetovanjem brojača. Kod apsolutnih enkodera digitalni kod na magnetnom medijumu predstavlja apsolutni položaj koji je kodiran u informaciji na magnetnom zapisu. Dekodovanjem Grejovog koda dobija se trenutna pozicija koja se dalje prosleđuje na izlaz. [72]

Laserski linearni senzor pozicije

Laserski senzori daljine se mogu koristiti i kao linearni senzori pozicije, ukoliko promena pozicije nije brza, jer obrada merenog podatka traje duže nego kod prethodno opisanih varijanti linearnih senzora pozicije. Ovi senzori udaljenosti rade na principu svetlosnih impulsa, koji se emituju sa izvora laserske svetlosti i reflektuju od objekta čija se udaljenost meri (Slika 34). Meri se vreme potrebno da svetlosni impuls pređe put od senzora do objekta i nazad. Budući da je brzina svetlosti konstantna, udaljenost se može izračunati na osnovu izmerenog vremena impulsa. Senzori su grupisani u kategorije [73]:

- do 10 m (opseg od 0,3 - 2 m, i od 2 - 10 m),
- do 75 m (opseg od 1 - 75m),
- do 100 m (opseg od 1 - 100 m).



Slika 34. Princip rada laserskog senzora rastojanja [67].

Preciznost senzora zavisi od udaljenosti koja se meri, refleksione površine od koje se poslati svetlosni impuls odbija (boja, materijal), i od brzine rada senzora. Odziv senzora je od 40 ms do 1 s. Kako se frekvencija rada povećava, tačnost senzora opada [73].

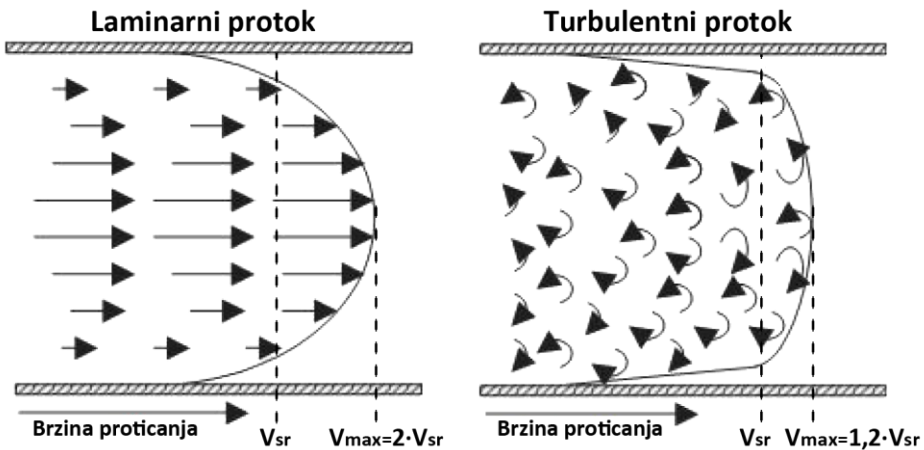
Laserski senzori obezbeđuju merenje pozicije sa velikim opsezima merenja. Prednost im je što se lako mogu montirati i odmah koristiti, a nedostatak im je što rade sa prilično malom tačnošću i spori su. Drugi ograničavajući faktor je što se mora obezbediti stalna optička vidljivost između predajnika i refleksione površine.

2.2.2 Senzori protoka vazduha pod pritiskom

Senzori protoka se koriste za praćenje potrošnje, kako u pneumatskim, tako i u hidrauličnim sistemima. Zadatak ovih senzora je da odrede koja količina fluida protiče kroz određeni poprečni presek u jedinici vremena.

Pri malim brzinama protoka, fluidi se kreću *laminarno*, a sa porastom brzine protoka, fluidi se kreću *turbulentno*. U prelazu između ove dve faze prisutno je i

laminarno i turbulentno kretanje. Na *Slici 35* prikazan je profil brzine kretanja fluida u slučaju laminarnog i turbulentnog kretanja. Prilikom laminarnog kretanja, paralelni slojevi fluida se kreću istom brzinom i istim smerom kretanja. Profil brzine je paraboličan i brzina tečnosti nije ista duž celog poprečnog preseka fluida, nego je na sredini cevi ona najveća v_{max} , a u tačkama dodira sa zidom cevi ona je približno nula. Maksimalna brzina na sredini preseka je dva puta veća od srednje brzine v_{sr} (*Slika 35*). Za brzinu fluida uzima se srednja vrednost fluida duž nekog posmatranog poprečnog preseka (v_{sr}). U slučaju turbulentnog kretanja, svaki sloj se haotično kreće i ima svoju putanju i brzinu. U ovom slučaju, profil brzine više nije paraboličan već približno ravan i može se meriti samo srednja vrednost brzine celog fluida. [72], [74]



Slika 35. Profil brzine proticanja fluida tokom laminarnog i turbulentnog protoka [72], [74].

Način kretanja fluida određen je Reynoldsovim brojem²⁰ (R_e). Reynoldsov broj je određen odnosom inercijalne sile u protoku ($\rho v_{sr} D$) i dinamičkog viskoziteta fluida (η):

$$R_e = \frac{\rho v_{sr} D}{\eta} \quad (26)$$

gde je:

- ρ – gustina fluida,
- v_{sr} - srednja brzina fluida,
- D – prečnik cevi,
- η – dinamički viskozitet fluida.

²⁰ Reynoldsov broj - 1883. godine Ozborn Reynolds (eng. *Osborne Reynolds*) obavio je set eksperimenata na Univerzitetu u Mančesteru koji su pokazali da se karakteristika protoka može predvideti korišćenjem bezdimenzionog broja koji je poznat kao Reynoldsov broj.

Ukoliko je $Re < 2000$ [72], viskozna sila dominira u protoku i protok je sigurno laminaran. U slučaju da je $Re > 4000$ [72] (ili po drugom izvoru $Re > 5000$ [74]) protokom dominira inercijalna sila i protok je turbulentan. Ukoliko je $2000 < Re < 4000$, radi se o prelaznom tipu protoka i obe vrste kretanja su prisutne [72].

Rejnoldsov broj se izračunava pomoću glavnih osobina tečnosti i ne uzima u obzir faktore koji takođe utiču na karakteristike protoka kao što su: neravnine u cevima, zakrivljenja, uticaj ventila. Ipak, Rejnoldsov broj je dobar vodič za tip protoka koji može da se očekuje u većini slučajeva [72].

Pri izboru senzora za konkretnu primenu, potrebno je uzeti u obzir karakteristike fluida, okruženja, oblika i dimenzije cevi, temperature, pritiska, itd.

Merenje protoka se može izvesti na više načina, direktno, merenjem pomeraja čestica, ili indirektno, preko promene diferencijalnog pritiska ili prenosa toplote. Prema načinu merenja protoka, senzori se mogu podeliti na senzore protoka na bazi *diferencijalnog pritiska*, *vertložnih struja*, *povlačenja*, *koriolisovog efekta*, kao i na *turbinske* i *volumetrijske* protokometre, *rotametre*, *elektromagnetne*, *ultrazvučne*, *termalne* i *mikro senzore protoka* [74].

U nastavku ovog poglavlja detaljnije će se razmatrati industrijski senzori protoka koji se mogu koristiti prilikom upravljanja linearnim aktuatorima.

Bernulijeva jednačina

Bernulijeva jednačina²¹ definiše odnos između brzine protoka fluida (V), pritiska (p) i visine neke fiksne tačke fluida (h) koji struji kroz cev različitog poprečnog preseka (*Slika 36*) [72].

Za cev konusnog oblika koja je nagnuta ka gore, kroz koju protiče fluid gustine ρ (*Slika 36*), Bernulijeva jednačina za idealni fluid²² se može napisati u sledećem obliku [72]:

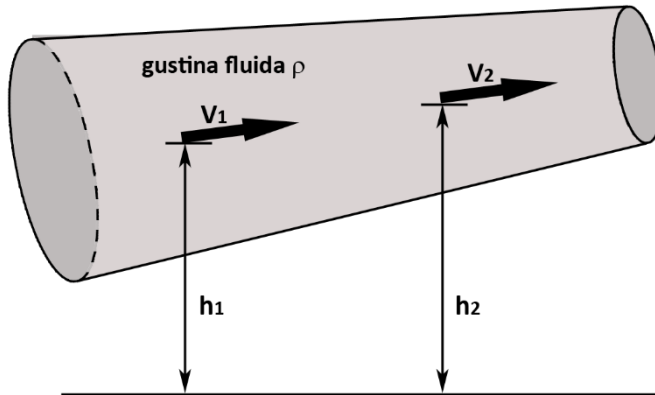
²¹ Bernulijeva jednačina opisuje Bernulijev princip, odnosno definiše međusobnu vezu između pritiska ili potencijalne energije fluida i njegove brzine ili njegove kinetičke energije, u strujnoj cevi (strujnom polju). Dobio je ime po Švajcarskom fizičaru i matematičaru Danijelu Bernuliju (fra. *Daniel Bernoulli*), koji je opisao ovaj princip u svojoj knjizi Hidrodinamika 1738. godine.

²² Idealni fluid se definiše kao neprekidna, neuništiva sredina koja se kreće bez unutrašnjeg trenja. Idealni fluid je nestišljiv. Pojam idealnog fluida se razlikuje od pojma idealnog gasa. Model idealnog gasa izražava diskontinualnu, čestičnu strukturu gasa. Njime se gas predstavlja kao skup ogromnog broja molekula, koji se zamišljaju kao idealno elastične čestice koje uzajamno deluju samo u direktnim međusobnim sudarima i udarima u zidove cevi kroz koju protiču. [119]

$$\frac{p_1}{\rho g} + \frac{v_1^2}{2g} + h_1 = \frac{p_2}{\rho g} + \frac{v_2^2}{2g} + h_2 \quad (27)$$

gde je:

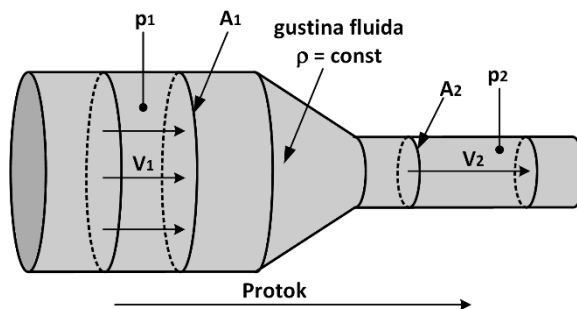
- ρ – gustina fluida ($\rho = const$ za nestišljiv fluid),
- p_1, p_2 – pritisak fluida u posmatranim tačkama,
- v_1, v_2 – brzina fluida u posmatranim tačkama,
- h_1, h_2 – visina na kojoj se posmatrane tačke nalaze,
- g – gravitaciono ubrzanje usled sile gravitacije.



Slika 36. Protok fluida kroz konusnu cev koja je nagnuta prema gore.

Bernulijeva jednačina u ovom obliku (27) važi za nestišljive fluide, kod kojih nema trenja. Iz ove jednačine se može pokazati da se promena prečnika cevi može iskoristiti za merenje protoka. Posmatrajući slučaj smanjenja prečnika prikazanog na Slici 37, uzevši u obzir da je cev postavljena horizontalno i da je $h_1 = h_2$, jednačina (27) se može redukovati na:

$$\frac{p_1 - p_2}{\rho} = \frac{v_2^2 - v_1^2}{2} \quad (28)$$



Slika 37. Cevovod sa naglim smanjenjem prečnika.

Po jednačini kontinuiteta za nestišljive fluide može se napisati da je maseni protok $Q_m = \rho Av = const$, te se može napisati da je [72], [74]:

$$v_1 A_1 \rho = v_2 A_2 \rho \quad (29)$$

Izražavanjem v_1 iz jednačine (29) i uvrštavanjem u jednačinu (28) iz koje se izrazi v_2 , može se napisati jednačina za maseni protok:

$$Q = v_1 A_1 = \frac{A_2}{\sqrt{1 - \left(\frac{A_2}{A_1}\right)^2}} \sqrt{\frac{2(p_1 - p_2)}{\rho}} \quad (30)$$

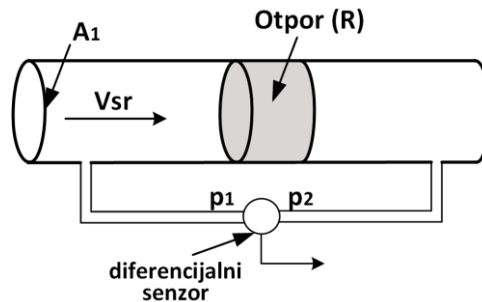
Iz jednačine (30) se vidi da se protok Q može odrediti merenjem razlike pritisaka ($p_1 - p_2$) pre i posle postavljene otpornosti u cevovodu. Na ovom principu rade protokometri na bazi diferencijalnog pritiska.

Protokomer na bazi diferencijalnog pritiska

Protokomer na bazi merenja diferencijalnog pritiska se zasniva na Bernulijevoj jednačini (30), po kojoj je pad pritiska srazmeran protoku, a koeficijent proporcionalnosti predstavlja otpornost R u cevovodu (Slika 38). Otpornost može da unese prigušnica, Venturijeva cev, Dalova cev, cev sa prigrbom, itd. Protok Q , se može izračunati iz sledećeg izraza:

$$Q = \varepsilon A \sqrt{\Delta p} \quad (31)$$

gde je ε koeficijent koji se određuje kalibracijom i zavisi od temperature. Prednost ovih merača protoka je što nemaju pokretne delove, ali unose pad pritiska [74].



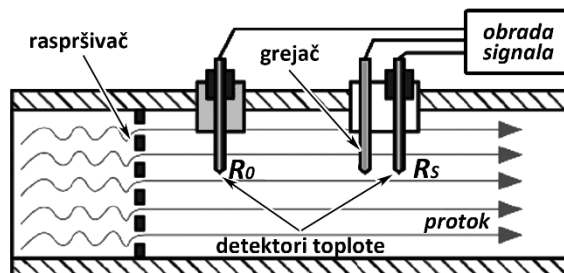
Slika 38. Princip rada protokomera na bazi diferencijalnog pritiska.

Turbinski merači protoka

Turbinski merači protoka merenje vrše na osnovu ugaone brzine turbine koju pokreće fluid koji protiče kroz cev. Turbina se postavlja u centar cevi, i u zavisnosti od fluida čiji protok se meri može biti od metala ili plastike. U slučaju metala, ugaona brzina se meri Holovim senzorom ili induktivnim senzorom, a u slučaju plastike, optičkim enkoderom. Ugaona brzina obrtanja turbine direktno je proporcionalna brzini fluida. Nedostatak ovih senzora je što ne mogu da mere male brzine, jer da bi se savladale sile trenja u turbini, protok fluida mora stvoriti dovoljan moment koji će okretati turbinu. Drugi nedostatak je što zbog prisustva turbine dolazi do većeg pada pritiska.

Termalni senzori za merenje protoka

U pneumatskim sistemima ovo je jedan od najviše korišćenih načina merenja protoka. Merenje protoka se bazira na prenošenju temperature sa grejača na temperaturne detektore. Slika 39 prikazuje princip realizacije ovih senzora protoka. Senzor sadrži dva temperaturna detektora R_0 i R_s . Za detektor R_s obično se koristi RTD (eng. *resistance temperature detectors* – otpornički temperaturni detektori), ali u nekim primenama može se koristiti i NTC (eng. *negative temperature coefficient* – negativni temperaturni koeficijent), zbog veće osetljivosti, posebno u medicinskoj primeni. Detektori su termalno izolovani od cevi kako bi se smanjili toplotni gubici. Grejač zagreva fluid, a zagrevanje se detektuje pomoću temperaturnog detektora R_s . Kada nema kretanja fluida, detektor R_s , koji je bliži grejaču, registruje veću temperaturu od R_0 , koji meri temperaturu fluida. Sa povećanjem brzine protoka, veća je disipacija sa grejača, i temperatura detektora R_s opada. Pored razlike temperatura, za određivanje brzine fluida potrebno je računati i na toplotne gubitke. Raspršivač čestica se koristi kako bi se sprečilo turbulentno kretanje fluida. [74]



Slika 39. Princip rada termalnog senzora za merenje protoka sa grejačem.

U slučaju senzora sa grejačem, brzina kretanja fluida se određuje prema sledećem izrazu [74]:

$$v = \frac{K}{\rho} \left(\frac{dQ}{dt} \frac{1}{T_S - T_0} \right)^{1.87} \quad (32)$$

gde je:

K – kalibraciona konstanta,

ρ – gustina fluida,

T_S, T_0 – temperature detektora toplote R_S i R_0 .

Senzor se može realizovati i bez dodatnog grejača. U tom slučaju ulogu grejača preuzima detektor R_S , koji tada radi u samozagrevajućem režimu, tj. disipacija toplote zbog proticanja fluida kompenzuje se Džulovim gubicima. Brzina kretanja fluida se kod ove realizacije određuje prema izrazu [74]:

$$v = \frac{K}{\rho} \left(\frac{e^2}{R_S T_S - T_0} \right)^{1.87} \quad (33)$$

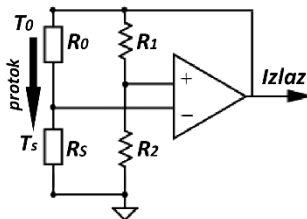
gde je:

e – napon na detektoru R_S ,

R_S – otpornost detektora.

Tokom merenja u senzoru je neophodno obezbediti da temperatura detektora T_S uvek bude veća od temperature fluida. Moguće su dve realizacije. Prva je da se napon na detektoru (e) održava konstantnim, a izlazni signal predstavlja razliku temperatura ($T_S - T_0$). U drugom slučaju se otpornost detektora održava konstantnim, a izlazni signal je napon na detektoru (e). [74]

Temperaturni detektori su povezani u merni most čiji izlaz se vodi na operacioni pojačavač koji pojačava izlazni signal. Izlazni napon operacionog pojačavača održava most u ravnoteži, a time održava i temperaturu T_S konstantnom (Slika 40) [74].



Slika 40. Električna šema mernog mosta sa detektorima temperature [74].

Najveće prednosti ovih senzora su što mogu meriti i veoma male brzine protoka, kao i što nemaju pokretnih delova koji se vremenom troše. Nedostatak senzora je što sa porastom brzine strujanja osetljivost detektora opada, jer čestice fluida suviše brzo prolaze pored detektora R_S , pa se ne ostvaruje dovoljan prenos toplote. Na primer, za vazduh je na ovaj način moguće meriti maksimalnu brzinu od 60 m/s pri atmosferskom pritisku. [74]

2.2.3 Senzori pritiska

Pritisak se definiše kao sila koja deluje na jedinicu površine. U slučaju pritiska fluida ili gasa, pritisak je sila normalna na jedinicu površine na koju deluje. Osnovna jedinica za merenje pritiska po SI sistemu je Pa (Paskal). Prema definiciji, pritisak (p) od 1 Pa predstavlja delovanje sile od 1 N (Njutna) na površinu od jednog kvadratnog metra. Jedinica Pa je po iznosu mala veličina, tako da se u tehnici vrlo često koristi jedinica od 1 bar koja je 10^5 puta veća od Pa (1 bar = 100 kPa) [75]. Pritisak (p) se može izraziti po sledećoj jednačini:

$$p = \frac{F}{A} \quad (34)$$

gde je:

- F – sila koja deluje na jedinicu površine,
- A – površina na koju deluje sila.

Prilikom merenja pritiska razlikuju se tri vrste pritiska: *apsolutni*, *atmosferski* (barometarski) i *diferencijalni*. Apsolutni pritisak predstavlja razliku pritiska između tačke merenja i savršenog vakuuma u kojem je pritisak nula. Atmosferski pritisak je razlika pritiska između tačke merenja i ambijenta. U stvarnosti, ambijentalni (atmosferski) pritisak može da varira, ali za merenje je od interesa samo razlika pritiska. Diferencijalni pritisak je razlika pritiska između dve tačke, od kojih je jedan izabran da bude referenca. Oba pritiska mogu da variraju, ali samo je razlika pritiska od interesa. [72]

Budući da je pritisak definisan kao sila po jedinici površine, najneposredniji način za merenje pritiska je da se izoluje područje sa elastičnim mehaničkim elementom na koji deluje pritisak. Deformacija mernog elementa proizvodi pomeranje koje se kasnije pretvara u neki oblik signala. Ovaj princip predstavlja osnovu za sve komercijalno dostupne senzore pritiska. [72]

Senzori pritiska se mogu podeliti na: hidrostatičke, mehaničke i elektronske senzore (manometre). U sistemima upravljanja najviše se koriste senzori sa električnim signalom na izlazu, jer je potrebno da se signal sa senzora direktno

prosledi upravljačkoj jedinici. Prema načinu pretvaranja deformacije (sile) u električni izlaz, senzori se mogu podeliti na [72]:

- elektromagnetne (indukcione),
- kapacitivne,
- piezo-električne,
- piezo-rezistivne.

Kapacitivni senzori pritiska

Mnogi vrlo precizni senzori pritiska (tačnost manja od 0,1 %) koji su danas u upotrebi razvijeni su na principu kapacitivnog načina detekcije. Ovi senzori mogu da mere širok opseg pritisaka: od 10^{-3} do 10^7 Pa [72].

Piezo-rezistivni senzori pritiska

Piezo-rezistivni senzori su najčešći tipovi senzora pritisaka. Princip rada se bazira na piezo-rezistivnom efektu, tj. na promeni električne otpornosti piezo materijala kada na njega deluje opterećenje [72].

2.3 Upravljanje linearnim aktuatorom primenom FPGA

Stalni razvoj industrijske automatizacije zahteva skraćivanje vremena trajanja operacija i povećavanje kvaliteta izrade, što dovodi do potrebe za povećavanjem brzine rada aktuatora uz održanu ili čak i povećanu preciznost pozicioniranja. S druge strane, zahteva se i ekonomičnost aktuatora, tj. da su energetske efikasni. Povišenju efikasnosti rada aktuatora, pored razvoja i poboljšavanja samog aktuatora, doprinosi i unapređenje upravljačke jedinice aktuatora. Efikasnost funkcionisanja aktuatora se ogleda u faktoru iskorišćenja uloženog resursa na dobijanje korisnog rada, kao i načina pomeranja [76]. Pri izučavanju efikasnosti rada aktuatora, posmatraju se faktori kao što su vreme i tačnost pozicioniranja, ponovljivost, potrošnja energije, itd. Pored efikasnosti rada, neophodno je obezbediti i bezbednost u radu automatizovanih mašina. Prema tome, potrebno je učiniti maksimalne napore kako bi upravljačke jedinice aktuatora bile sposobne da detektuju nepravilan rad aktuatora, tj. verovatnoću nebezbednog rada.

Pošto se u industrijskoj automatizaciji koriste različiti tipovi rotacionih i linearnih aktuatora (električni, pneumatski i hidraulični), da bi se na adekvatan

način upravljalo istim, neophodno je osmisliti upravljački sistem koji uzima u obzir sve fizičke zakonitosti datog tipa aktuatora.

Prilikom upravljanja aktuatorima, na performanse aktuatora najviše utiče pravovremena obrada merenih podataka o trenutnom stanju aktuatora, i algoritam upravljanja po kojem se formira upravljačka veličina. Izvršavanje upravljačkog algoritma treba da se dešava u realnom vremenu, a povećanjem frekvencije rada, kao i brzine kretanja aktuatora, dostupno vreme za akviziciju, obradu i analizu signala sa senzora (pozicija, brzina, ubrzanje, struja, itd.) je ograničeno. Kada je reč o brzim promenama koje je potrebno pratiti, obraditi i analizirati, dolazi se do nedostatka procesorskog vremena, te se radi uštede resursa, neki od bitnih ili manje bitnih faktora izostavljaju, što dovodi do lošijih performansi aktuatora.

Upravljanje linearnim aktuatorima koji se precizno pozicioniraju pri velikim brzinama rada zahteva izuzetno brze upravljačke sisteme. Trenutno korišćeni upravljački sistemi aktuatora su uglavnom bazirani na specijalizovanim DSP kontrolerima koji su namenjeni za obradu signala [77], [78]. Ovi DSP kontroleri su kombinacija 32-bitnih mikroprocesora sa ugrađenim 12-16-bitnim analognim ulazom i setom instrukcija potrebnih tokom realizacije upravljačke logike, i snažnih DSP procesora sa hardverski ubrzanom aritmetičko logičkom jedinicom za množenje i sabiranje (eng. *Multiply and Accumulate Arithmetic Logic Unit - MAC ALU*) [79], [80]. U slučaju primene naprednog načina upravljanja (eng. *Advanced process control*), često ni upravljački sistemi bazirani na DSP nisu dovoljno brzi da isprate sve promene, a da usput stignu da primene i neki sofisticiraniji upravljački algoritam. Primenom upravljačkog procesora sa više paralelnih jezgara, vreme obrade se skraćuje, ali se komplikuje upravljačka struktura regulatora, a sa druge strane korišćenje više jezgara dovodi do komplikovanja upravljačkog sistema, kao i do veće potrošnje električne energije digitalnog dela regulatora, tj. do većeg zagrevanja [81].

U poslednje dve decenije učinjen je veliki napredak na polju razvoja programabilnih tehnologija, kako softverskih, tako i hardverskih. Pad cene proizvodnje osnovnog FPGA kola, za neverovatnih 10.000 %, dovela je do stalnog rasta primene FPGA kola u upravljačkim aplikacijama [82]. Prema izvršenom istraživanju o mogućnostima primene FPGA tehnologije za unapređenje industrijskih upravljačkih sistema [2], potvrđena je pretpostavka da je moguće skratiti vreme potrebno za obradu ulaznih signala i generisanje izlaza tokom upravljačkog procesa, jer FPGA tehnologija omogućava obradu podataka i izvršavanje upravljačkog algoritma u paralelnoj arhitekturi. Naravno,

performanse nisu uvek zagarantovane, ali ako se obrati dovoljna pažnja prilikom projektovanja kombinacionih i logičkih mreža, dobijaju se i željeni rezultati. Druga pozitivna činjenica kod primene FPGA tehnologije, tj. primena upravljačke logike na bazi jednostavnih logičkih kapija unutar FPGA čipa, je da je potrošnja logičkog dela upravljačkog sistema mnogo manja u poređenju sa procesorskim sistemima [4].

Brojni radovi koji govore o primeni FPGA tehnologije u upravljačkim sistemima za regulaciju aktuatora potvrđuju pretpostavku o mogućnosti razvoja moćnih upravljačkih sistema baziranih na FPGA, koji će aktuatorom upravljati po nekom naprednom algoritmu upravljanja.

Autori Satvati i Vaez-Zadeh [60] u svom radu prikazuju upravljački sistem za linearne indukcione motore, od kojeg se očekuju visoke dinamičke performanse. Upravljački sistem je realizovan uz pomoć FPGA kola, a u model aktuatora se uključuju i negativni uticaji usled krajnjih efekata koji se javljaju tokom promene smera kretanja.

Razvoj upravljačkog algoritma na FPGA platformi je dugotrajan posao, koji zahteva mnogo vremena, jer je samo kompajliranje logičkog algoritma veoma dug proces. Iz tog razloga se u prvoj fazi razvoja uglavnom koriste simulirana okruženja, koja omogućavaju brže otkrivanje eventualnih grešaka, mada se prava slika o radu algoritma dobija tek nakon puštanja upravljačkog programa na FPGA. U radu Jokić, Labura i Stankovski [10], prikazana je upotreba *Matlab / Simulink* i *DSP Builder* alata za razvoj upravljačke aplikacije za Altera FPGA. U radu su prikazani rezultati simuliranog upravljanja, kao i rezultati eksperimenata, koji ukazuju na upotrebljivost ovog okruženja za razvoj sličnih aplikacija.

Pozitivne efekte korišćenja simuliranog okruženja za razvoj prikazuju i autori Riči i Li Hju [9] koji u svom radu prikazuju mogućnosti modelovanja i simulacije upravljanja induktivnim aktuatorom sa direktnim upravljanjem obrtnim momentom²³ (*eng. Direct Torque Control (DTC) induction drive*) pomoću FPGA kola. Rezultati su prikazani za realni sistem koji je upravljan pomoću FPGA čipa, za koji su autori upravljačku logičku mrežu razvili u simulatoru (*Matlab / Simulink*). Pokazano je da se algoritam koji je razvijen u simuliranom okruženju može direktno iskoristiti za programiranje FPGA čipa.

²³ Direktno upravljanje obrtnim momentom (*eng. Direct Torque Control*) je jedna od metoda korišćena kod frekventnih regulatora za upravljanje obrtnim momentom (i na kraju i brzinom okretanja) vratila trofaznog elektromotora.

Autori rada *FPGA bazirani prediktivni upravljački sistem, sa kliznim²⁴ režimom rada, za trofazni inverter* [7] u svom radu predlažu novi tip varijabilno struktuiranog prekidačko strujnog kontrolera za trofazne elektromotore koji je razvijen na bazi FPGA tehnologije. Upravljački sistem je dizajniran kao automat sa konačnim brojem stanja. Upravljački sistem za regulaciju obrtnog momenta i brzine okretanja vratila je prvo simuliran, a kasnije i realizovan i testiran.

U drugom vrlo sličnom radu [8] autori predlažu adaptivni povratnokoračni klizni upravljački sistem za dopunsko upravljanje kretanjem linearnog indukcionog motora baziran na FPGA. Upravljački sistem uključuje i sile trenja u model objekta upravljanja. Na ovaj način uključena je upotreba dinamičkog modela za upravljanje LIM pogonom indirektno orijentisanim na polje (eng. *indirect field-oriented LIM drive*) [83], a cilj povratnokoračnog kliznog režima je da kompenzuje poremećaje (greške) sistema za upravljanje kretanjem.

Brojni radovi prikazuju primenljivost FPGA tehnologije u upravljačkim sistemima za regulaciju električnih aktuatora, ali je osetno manje publikacija u vezi sa korišćenjem FPGA za upravljanje pneumatskih i hidrauličnih aktuatora. Publikovani rezultati ipak potkrepljuju potrebu za daljim istraživanjima, jer se vide pozitivni znaci u radu aktuatora korišćenjem ove platforme u njihovom upravljačkom sistemu.

Na primer, u radu autora sa Meksičkog Univerziteta u Kveretarou (eng. *University of Queretaro*) [84] prikazana je implementacija fazi logičkog algoritma za kontrolu protoka vazduha u upravljačkom sistemu pneumatskog robota koji je implementiran na FPGA. Protok vazduha je upravljan impulsno širinski modulisanim upravljačkim signalom, a korišćen je elektropneumatski ventil sa vremenom odziva od 25 ms.

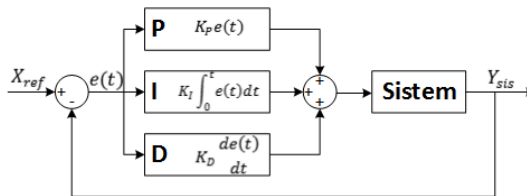
Pneumatski i hidraulični linearni aktuatori su sporiji aktuatori u poređenju sa električnim, ali proporcionalno upravljanje vazduhom ili fluidom otvara mogućnost za primenu ovih aktuatora i u aplikacijama u kojima se zahteva velika preciznost i pokretljivost. Proporcionalni način upravljanja protokom dovodi do povećane potrošnje aktuatora [85], te je neophodno poboljšati način upravljanja kako bi se ova potrošnja smanjila [85], [86], čemu svakako može doprineti napredan način upravljanja koji bi se implementirao u upravljački sistem sa FPGA.

²⁴ Klizni režim rada (eng. *sliding mode control - SMC*) u teoriji upravljanja je nelinearna upravljačka metoda, koja menja dinamiku nelinearnog sistema primenom diskontinuitetnog upravljačkog signala koji na taj način primorava sistem da "sklizne" iz jednog tipa ponašanja u drugi [120].

Na osnovu publikovanih rezultata i na osnovu prethodnih istraživanja, sa osnovom se pretpostavlja da bi se primenom FPGA tehnologije izvršavanje upravljačkih i regulacionih algoritama ubrzalo, što otvara mogućnost za proširivanje upravljačkog sistema naprednim upravljačkim funkcijama, kao što su prepoznavanje opterećenosti na osnovu profila kretanja i adaptacija upravljačkog signala prema trenutnom opterećenju, ili detekcija prepreka tokom kretanja. Ova proširenja, koja bi trebala da dovedu do efikasnijeg i pouzdanijeg rada aktuatora, će se razmatrati u daljim poglavljima ove disertacije.

2.3.1 PID upravljanje

PID (proporcionalno integralno derivativno (izvodno)) upravljanje je jedan od najčešće primenjivanih tipova upravljanja koji se koristi kod linearnih kontinualnih sistema, i u širokoj je upotrebi u industrijskim upravljačkim sistemima. Radi se o upravljanju sa (negativnom) povratnom spregom, gde PID kontroler teži da minimizuje grešku podešavanjem upravljačkog signala, koji je manipulativna varijabla procesa [87]. *Slika 41* prikazuje blok šemu PID upravljanja.



Slika 41. Blok šema PID regulatora.

Trenutna greška procesa (sistema) ($e(t)$) se izračunava kao razlika između izmerene vrednosti procesne promenljive ($Y_{sis}(t)$) i zadate referentne vrednosti (X_{ref}):

$$e(t) = X_{ref} - Y_{sis} \quad (35)$$

Kod osnovnih zakona upravljanja, njihovo dejstvo može linearno zavisiti od greške, njenog integrala ili prvog izvoda greške po vremenu. Na osnovu ove činjenice, linearni regulatori mogu da se podele na proporcionalne, integralne i diferencijalne regulatore [87].

Proporcionalni regulator (P regulator) je najjednostavniji oblik linearnog regulatora i realizovan je proporcionalnim zakonom upravljanja $u(t)$, koji je dat sledećom relacijom:

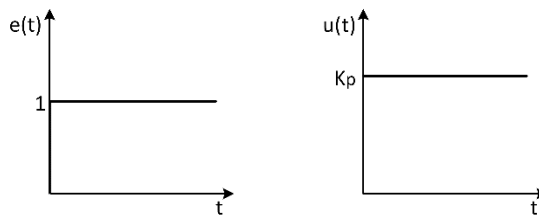
$$u(t) = K_p \cdot e(t) \quad (36)$$

gde je:

K_p – koeficijent proporcionalnog dejstva ili proporcionalno pojačanje regulatora,

$e(t)$ – signal greške iz jednačine (35).

Svaki proporcionalni regulator se odlikuje svojim proporcionalnim područjem, koje se definiše kao potrebna procentualna promena ulazne veličine da bi se izlazna veličina promenila za 100 %. Proporcionalno područje se može definisati i kao recipročna vrednost pojačanja K_p koje je izraženo u procentima (%). Povećanjem pojačanja K_p , odnosno smanjenjem proporcionalnog područja, konstantno odstupanje upravljane promenljive od njene zadate referentne vrednosti se smanjuje. U isto vreme, povećava se brzina reagovanja i smanjuje pretek stabilnosti sistema [87]. Na *Slici 42* prikazano je delovanje P regulatora ($u(t)$) ako se na njegov ulaz dovodi signal greške ($e(t)$) u obliku jedinične odskočne funkcije.



Slika 42. Delovanje P regulatora: a) greška, b) izlaz regulatora.

Integralnim regulatorom (I regulator) ostvaruje se integralni zakon upravljanja, koji proporcionalno povezuje grešku ($e(t)$) sa brzinom promene upravljačke promenljive ($u(t)$), odnosno:

$$\frac{du(t)}{dt} = K_I \cdot e(t) \quad (37)$$

gde je:

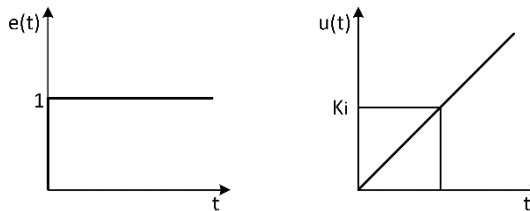
K_I – koeficijent integralnog dejstva,

$e(t)$ – signal greške iz jednačine (35).

Recipročna vrednost pojačanja K_I je konstanta T_I , i predstavlja vreme integraljenja. Ako se prethodni izraz (37) integriše, dobija se uobičajeni oblik jednačine integralnog regulatora:

$$u(t) = K_I \cdot \int_0^t e(t)dt \quad (38)$$

Uvođenjem integralnog regulatora povećava se inertnost sistema, odnosno, sistem sporije reaguje na spoljne uticaje, ali zato u većini slučajeva trajno otklanja grešku rada sistema u stacionarnom stanju. Druga negativna osobina ovog tipa regulatora je kašnjenje koje je posledica akumuliranja greške [87]. Na *Slici 43* je prikazano delovanje I regulatora ($u(t)$) ako se na njegov ulaz dovodi signal greške ($e(t)$) u obliku jedinične odskočne funkcije.



Slika 43. Delovanje I regulatora: a) greška, b) izlaz regulatora.

Diferencijalni regulator (D regulator) svoje upravljanje zasniva na diferencijalnom zakonu upravljanja, koji je određen proporcionalnom zavisnošću između upravljačke promenljive ($u(t)$) i brzine promene greške (prvi izvod $e(t)$ po vremenu, tj. tangenta na krivu promene greške) [87]. Jednačina diferencijalnog regulatora ima sledeću formu:

$$u(t) = K_D \cdot \frac{de(t)}{dt} \quad (39)$$

Samostalno postojanje diferencijalnog regulatora nema mnogo smisla, jer je u ustaljenom stanju signal greške konstantan, te je izvod ovog signala jednak nuli. Zbog osobine da je upravljačka akcija proporcionalna brzini promene greške u vremenu, D regulator reaguje samo na brze promene dok spore i dugotrajne promene praktično ne prouzrokuju nikakvo dejstvo ovog regulatora. Kombinovanjem sa P ili I regulatorom, ovaj regulator dobija na značaju, posebno u prelaznom režimu rada sistema. Njegovo postojanje omogućava bolje praćenje dinamike sistema, jer se njime prati veličina promene greške, a ne samo njena apsolutna vrednost. Uvođenjem diferencijalnog regulatora povećava se stabilnost i brzina reagovanja sistema. [87]

Kombinacijom ovih osnovnih regulatora moguće je formirati složenije oblike regulatora: PI, PD i PID. Na osnovu jednačina (36), (38) i (39) može se napisati i jednačina PID regulatora:

$$u(t) = K_P \cdot e(t) + K_I \cdot \int_0^t e(t)dt + K_D \cdot \frac{de(t)}{dt} \quad (40)$$

Prema osnovnom zahtevu, zadatak regulacije sistema je da se postigne stabilnost, tačnost i brzina odziva, te se i kombinacija korišćenog regulatora (P, PI, PD ili PID) bira po ovim kriterijumima [87].

Podešavanje PID regulatora

Podešavanje parametara PID regulatora (K_P , K_I i K_D) predstavlja posebnu oblast u projektovanju upravljačkih sistema. Da bi se izbegao neplanski pristup eksperimentalnom podešavanju, što u pogonskim uslovima nije poželjno, razvijene su jednostavne metode koje se temelje na teorijskim analizama i praktičnim eksperimentalnim ispitivanjima. Postoji više metoda za određivanje parametara regulatora, od kojih su najpoznatije Cigler-Nikolsova (eng. *Ziegler-Nichols*) i Čajn-Hrons-Resvikova (eng. *Chien-Hrones-Reswick*) [87].

Cigler-Nikolsova metoda

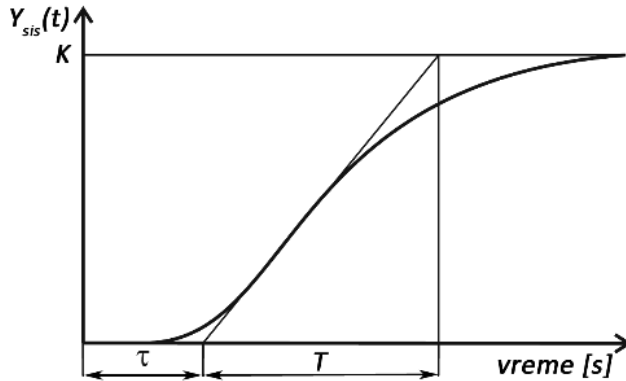
Cigler-Nikolsova metoda (eng. *Ziegler-Nichols*) predstavlja eksperimentalni način određivanja parametara regulatora, pri čemu vrlo često model objekta upravljanja nije poznat, već se veličine koje karakterišu sistem dobijaju pomoću izvedenog eksperimenta. Ukoliko je ceo sistem već realizovan sa povratnom spregom, kod ove metode povratna sprega ne mora da se raskida. Prilikom eksperimenta, bez obzira na primenjeni zakon upravljanja (P, PI ili PID), prvo se dejstvo regulatora svede samo na proporcionalno (K_P), postavljanjem vremenske konstante integralnog dejstva na maksimalnu ($T_I \rightarrow \infty$), a vremenske konstante diferencijalnog dejstva na minimalnu vrednost ($T_D = 0$). K_P se u početku postavlja na neku manju vrednost, tako da regulacioni krug bude stabilan. Sistem se pobuđuje odskočnim signalom, i K_P se povećava u malim koracima, korak po korak, i uz to se stalno posmatra izlazni signal. Kada se sistem dovede na granicu stabilnosti, što se detektuje pojavom prosto periodičnih neprigušenih oscilacija u odzivu sistema, eksperiment je završen. Pamte se vrednosti pojačanja za koje je sistem prooscilovao (K_{kr}) i perioda oscilacija (T_{kr}), a parametri se određuju po *Tabeli 2*.

Tabela 2. Parametri regulatora određeni na osnovu Cigler-Nikolsove metode.

Regulator	K_P	T_I	T_D
P	$0,55 \cdot K_{kr}$		
PI	$0,35 \cdot K_{kr}$	$1,25 \cdot T_{kr}$	
PID	$0,6 \cdot K_{kr}$	$0,8 \cdot T_{kr}$	$0,2 \cdot T_{kr}$

Čajn-Hrons-Resvikova metoda

Čajn-Hrons-Resvikova metoda (eng. *Chien-Hrones-Reswick*) se primenjuje kod sistema višeg reda kod kojih je poznat odskočni odziv. Metoda se sastoji od snimanja i analize odziva sistema na jediničnu odskočnu pobudu [88]. Na osnovu grafikona odziva sistema na odskočnu pobudu (Slika 44) određuje se vreme kašnjenja sistema (τ) i vremenska konstanta sistema (T) [87].



Slika 44. Grafikon odziva sistema na odskočnu pobudu.

Podešavanje regulatora se vrši na osnovu *Tabele 3* u kojoj su predložene vrednosti parametara u zavisnosti od tipa regulacije (čvrsta ili prateća regulacija) i željenog karaktera odziva (aperiodični odziv sa najkraćim trajanjem, ili oscilatorni odziv sa 20% prebačaja i najkraćom periodom oscilovanja). Odabir parametara zavisi od vrste regulisane veličine. Ako je regulisana veličina zadata konstantom, koja se ne menja, reč je o čvrstoj regulaciji (npr. regulacija temperature prostorije ili napona generatora). Ako je regulisana veličina promenljiva i zahteva se što vernije praćenje zadate vrednosti reč je o pratećoj regulaciji (npr. praćenje pozicije kod servo sistema).

Tabela 3. Parametri regulatora određeni na osnovu Čajn-Hrons-Resvikove metode [89].

Regulator	Parametar	Aperiodičan odziv najkraćeg trajanja		20% prebačaja uz najkraću periodu oscilovanja	
		Čvrsta reg.	Prateća reg.	Čvrsta reg.	Prateća reg.
P	K_P	$0,3 \cdot \frac{T}{\tau}$	$0,3 \cdot \frac{T}{\tau}$	$0,7 \cdot \frac{T}{\tau}$	$0,7 \cdot \frac{T}{\tau}$
PI	K_P	$0,6 \cdot \frac{T}{\tau}$	$0,35 \cdot \frac{T}{\tau}$	$0,7 \cdot \frac{T}{\tau}$	$0,6 \cdot \frac{T}{\tau}$
	T_I	$4 \cdot \tau$	$1,2 \cdot \tau$	$2,3 \cdot \tau$	τ
PID	K_P	$0,95 \cdot \frac{T}{\tau}$	$0,6 \cdot \frac{T}{\tau}$	$1,2 \cdot \frac{T}{\tau}$	$0,95 \cdot \frac{T}{\tau}$
	T_I	$2,4 \cdot \tau$	τ	$2 \cdot \tau$	$1,4 \cdot \tau$
	T_D	$0,42 \cdot \tau$	$0,5 \cdot \tau$	$0,42 \cdot \tau$	$0,47 \cdot \tau$

2.3.2 Fazi upravljanje

Upravljanje zasnovano na Fazi logici²⁵ (eng. *Fuzzy logic*) je pokušaj da se upravljanje kompleksnim, ali dobro poznatim pojavama, svede na upravljačku logiku koja se jednostavno dizajnira. Upravljačka pravila su napisana prirodnim jezikom, a zatim prevedena u fazi logiku [90]. Na primer: *Ako je temperatura prevelika, smanji dotok goriva u peć. A ukoliko je temperatura premala, povećaj dotok goriva u peć.* Ili drugi malo detaljniji primer napisan u pseudo kodu:

IF temperatura JE veoma hladna **THEN** isključi ventilator
IF temperatura JE hladna **THEN** smanji obrtanje ventilatora
IF temperatura JE normalna **THEN** održavaj obrtanje ventilatora
IF temperatura JE topla **THEN** povećaj obrtanje ventilatora

Problem u ovom setu definicija fazi logike je što nema jednoznačnog odgovora. Ne postoji *ELSE* opcija²⁶, pa se samim tim svi odgovori vrednuju, jer, na primer, temperatura može biti i hladna a istovremeno i veoma hladna.

U osnovi, merenja u fazi logici su delimično tačna. Za tačnu vrednost se uzima logička „1“, ali je takođe tačna vrednost i ako nije logička „0“. Fazi vrednosti mogu biti između vrednosti 0 i 1, a ne samo „0“ ili „1“ kao u binarnoj logici. Merenja iz realnih vrednosti (kao što je temperatura u peći) se konvertuju u vrednosti na skali između 0 i 1. Obično je maksimalna moguća vrednost 1, a minimalna moguća vrednost 0 [91].

Binarna (tačno/netačno) logika se modifikuje u aritmetičku prema sledećim pravilima:

- negacija (logičko „NE“): $izlaz = 1 - ulaz$
- konjunkcija (logičko „I“): $izlaz = ulaz_1 * ulaz_2$
- disjunkcija (logičko „ILI“): $izlaz = 1 - ((1 - ulaz_1) * (1 - ulaz_2))$

Ukoliko su ulazne vrednosti ograničene na binarnu nulu i jedinicu, umesto dozvoljenih vrednosti iz opsega od nula do jedan, ova aritmetika će se svesti na binarnu aritmetiku.

Poslednji korak u fazi upravljanju je vraćanje dobijenih fazi vrednosti u izvorni oblik, tj. u opsege kojima je moguće upravljati sistemom. Ako su opsezi (fazi

²⁵ Fazi logika (eng. *Fuzzy logic*) – je kao pojam predstavljen u fazi setu teorija od strane Lotfi A. Zadeha (eng. *Lotfali Askar Zadeh*), Azerbejdžanskog matematičara i inženjera, prof. emeritusa sa Berkli Univerziteta u Kaliforniji.

²⁶ ELSE opcija - opcija za slučaj da postavljeni uslov pod IF naredbom nije ispunjen.

trouglovi) adekvatno izabrani, ova vrsta upravljanja može dati veoma dobre rezultate upravljanja.

Kada se robustan dizajn fazi upravljanja svede na jedno brzo računanje, tada upravljački sistem podseća na konvencionalni upravljački sistem sa povratnom spregom, i tada se može reći da je projektovanje fazi kontrolera bilo nepotrebno. Međutim, paradigma fazi logike može obezbediti skalabilnost za velike upravljačke sisteme, kod kojih konvencionalne metode postaju nezgrapne ili skupe za izvedbu.

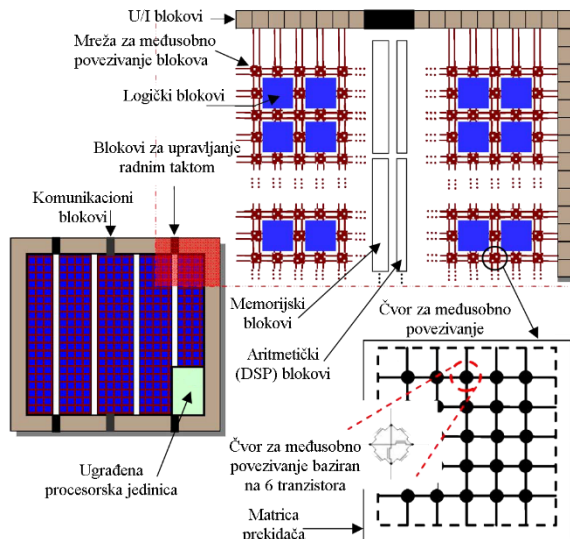
2.4 FPGA tehnologija

FPGA (eng. *Field Programmable Gate Array*) predstavlja integrisano kolo (čip) sa digitalnim logičkim kapijama čija se unutrašnja struktura može konfigurisati i rekonfigurisati od strane krajnjeg korisnika. Definisanje unutrašnje strukture (unutrašnjih veza) FPGA komponente se vrši uz pomoć HDL (eng. *Hardware Description Language*) jezika ili šematskih blok dijagrama. Trenutno najpoznatiji proizvođači FPGA kola su *Xilinx* i *Altera* koji zajedno kontrolišu preko 80 % tržišta, a sam *Xilinx* preko 50 % čitavog tržišta FPGA kola.

Na *Slici 45* prikazana je generička struktura FPGA. Iako svaki proizvođač FPGA kola koristi svoju specifičnu FPGA arhitekturu, u suštini se svako FPGA kolo sastoji od velikog broja identičnih logičkih blokova (eng. *Logic Block* - LB) i rekonfigurabilnih veza prekidača (eng. *Switch Matrix*) koje omogućavaju međusobno povezivanje blokova, kao i konfigurabilne U/I blokove (eng. *I/O blocks*) [82], [92]. Trenutne izvedbe FPGA kola uključuju i memorijske blokove (RAM, ROM, Flash RAM), DSP blokove, blokove za rad sa radnim taktom i komunikacione blokove (Ethernet, CAN USB, PCI, SPI, I²C) [82]. Svaki logički blok, kao nezavisna jedinica, može realizovati bilo koju funkciju Bulove algebre²⁷ korišćenjem jednostavnih logičkih kapija tipa I, ILI, XOR, itd. ili iz unapred ograničenog skupa Bulovih funkcija. U većini FPGA kola logički blokovi se sastoje od memorijskih elemenata koji mogu biti jednostavni flip-flopovi ali i složeni

²⁷ Bulova algebra je deo matematičke logike - algebarska struktura koja sažima osnovu operacija I, ILI i NE kao i skup teorijskih operacija kao što su unija, presek i komplement. Vrednosti promenljivih mogu biti samo: tačno i netačno (istina i laž), što se obično označava sa „1“-tačno i „0“-netačno. Naziv je dobila po tvorcu, Džordžu Bulu (eng. *George Boole*), engleskom matematičaru.

memorijski blokovi koji su međusobno povezani žicama i programabilnim prekidačima.



Slika 45. Generička struktura FPGA [93].

Arhitektura logičkih blokova varira u zavisnosti od proizvođača. Uopšteno govoreći, svaki logički blok kombinuje nekoliko binarnih ulaza sa jednim ili dva izlaza u zavisnosti od Bulove logičke funkcije specificirane u korisničkom programu. Kod većine familija FPGA, korisnik ima mogućnost da upiše željenu kombinaciju izlaza određenog bloka, i na taj način logika može biti jednostavno implementirana. Kombinaциона logika logičkog bloka može biti implementirana kao jedna memorija sa malom preglednom tabelom (eng. *Look-Up Table (LUT)*), ili kao kombinacija multipleksera ili logičkih kapija. LUT komponente pretenduju da budu nešto fleksibilnije i obezbeđuju više ulaza logičkom bloku nego multiplekseri, ali na štetu vremena propagacije [92].

Razvoj FPGA kola je doveo do toga da današnja tehnologija omogućava primenu različitih jezgara na istom kolu, tako da FPGA kola mogu da integrišu čak i jedan ili više procesorskih jezgara, kao i analogne periferije (SoCs²⁸ i SoPCs²⁹ tehnologije) [94], [95].

Projektovanje od strane korisnika se svodi na specifikaciju jednostavne logičke funkcije za svaki logički blok pojedinačno i selekciju zatvaranja prekidača

²⁸ SoCs (eng. *System on Chips*) – Sistem na čipu

²⁹ SoPCs (eng. *System on Programmable-Chips*) – sistem na programabilnom čipu

u matrici međusobnih veza. Logički blokovi i njihove međusobne veze formiraju gradivne blokove za kreiranje složenijih digitalnih sistema. FPGA se može programirati na tri različita nivoa [92]:

- na nivou funkcije logičkih blokova,
- na nivou sprege logičkih blokova,
- na nivou ulaza i izlaza.

Programiranje, tj. definisanje svih unutrašnjih veza predstavlja težak i složen zadatak, jer se zapravo programiranje FPGA kola svodi na generisanje maske spojenosti/raskinutosti unutrašnjih veza. Programiranje je olakšano primenom posebnih softvera koji prevode šematski logički dijagram korisnika ili program napisan u HDL jeziku u skup međusobno povezanih logičkih blokova, a zatim vrše njihovo raspoređivanje i povezivanje na FPGA čipu. Većina softverskih alata dozvoljava korisniku upravljanje implementacijom, raspoređivanjem i povezivanjem, kako bi se obezbedile bolje performanse i iskorišćenost FPGA čipa. Biblioteke kompleksnijih funkcija dodatno pojednostavljaju sam proces projektovanja, tako što omogućavaju korišćenje optimizovanih kola u pogledu brzine i logičkih resursa za implementaciju često korišćenih funkcija.

Mogućnost konfigurisanja FPGA komponenti omogućava korisniku projektovanje složenih digitalnih sistema, koristeći prednosti digitalnih kola (ASIC³⁰ kola), ali oslobođeno visokih troškova razvoja koji su neminovni kada se koriste ASIC komponente. Zbog strukturne sličnosti sa ASIC kolima, FPGA čipovi su pogodni i za realizaciju prototipova ASIC kola, ili za korišćenje na mestima gde će u krajnjoj instanci biti ugrađeno ASIC kolo. Na primer, FPGA se može koristiti u proizvodnji koji bi trebalo brzo da se izbacili na tržište, bez obzira na cenu. Kasnije, sa rastom proizvodnje, FPGA može biti zamenjen ASIC kolom, kako bi se smanjili troškovi [92]. Sve u svemu, FPGA kola mogu predstavljati alternativu DSP procesorima u projektovanju upravljačkih sistema [96].

³⁰ ASIC (eng. *application specific integrated circuit*) – su specijalno dizajnirana integrisana kola za neku unapred određenu namenu. Npr. digitalno kolo za snimanje i reprodukciju zvuka.

Poglavlje 3.

Istraživanje i diskusija

Razvoj automatizovanih sistema je potreba današnje industrije koja teži ka stalnim promenama u načinima proizvodnje u cilju povećanja konkurentnosti, kvaliteta, itd. Razvoj automatizovanih sistema podrazumeva i neprestani razvoj pogonskih elemenata koje učestvuju u pokretanju mašina, transportu, itd. Za upravljanje pogonskim elementima zaduženi su upravljački sistemi čiji je osnovni zadatak upravljanje aktuatorima (regulacija brzine, ubrzanja i pozicije), ali pored osnovne funkcije regulacije zahtevaju se i dodatne funkcije kao što su na primer zaštita od preopterećenja, udara, ili sa druge strane komunikacija sa okolinom (drugim računarima, ili uređajima). Prilikom upravljanja aktuatorima osnovni zadatak upravljačkog sistema je da postigne što je moguće veću preciznost sa što kraćim prelaznim režimima. Pored osnovnog zadatka od upravljačkog sistema se očekuje što efikasniji rad aktuatora pod svim uslovima rada.

Na osnovu pregleda literature, i upoznavanja sa problematikom upravljanja linearnim aktuatorima u slučaju kada je potrebno da se dobije unapređen sistem upravljanja koji ne zavisi od težine trenutnog tereta koju aktuator transportuje (trenutnog opterećenja aktuatora), razvila se ideja da se upravljački sistem realizuje na bazi FPGA kola, kod kog mogu da se iskoriste prednosti paralelnog načina obrade upravljačkih algoritma [2], [81]. Osnovna ideja razvoja ovakvog upravljačkog sistema je da se primenom paralelnog načina obrade osnovnog upravljačkog algoritma rastereti upravljački sistem, što će ostaviti vremena i prostora za uključivanje dodatnih funkcija čiji je osnovni zadatak da poboljšaju efikasnost rada aktuatora.

Ovo poglavlje opisuje metodologiju istraživanja, faze istraživanja, korišćenu opremu, kao i korake istraživanja. Zatim, u ovom poglavlju je predstavljen i razvoj upravljačkog sistema zasnovanog na FPGA tehnologiji sa svim unapređenim funkcijama. Analiza postojećih upravljačkih sistema i verifikacija razvijenog upravljačkog sistema se baziraju na eksperimentalnim proverama.

Osnovni zadatak eksperimentalnog dela istraživanja ove disertacije je upoređivanje razvijenog upravljačkog sistema na bazi FPGA tehnologije sa komercijalno dostupnim servo upravljačkim sistemima. Tokom eksperimenata, prate se parametri efikasnosti upravljačkog sistema, kao što su tačnost i vreme pozicioniranja, kao i potrošnja energije tokom pozicioniranja.

Drugi cilj eksperimentalnog dela istraživanja je pronalaženje ključnih promena u parametrima tokom rada aktuatora, na osnovu kojih se može pretpostaviti trenutno stanje aktuatora, kao što je npr. opterećenost ili neplanirani udar u prepreku, itd. Konačni razvoj dodatnih funkcija kojima se postiže napredno upravljanje i veća efikasnost rada aktuatora bazira se na ovim merenjima.

Treći cilj eksperimentalnog dela istraživanja je potvrđivanje pozitivnih uticaja ugrađenih naprednih funkcija na efikasnost rada aktuatora.

3.1 Metodologija istraživanja

3.1.1 Faze istraživanja

Istraživanje u okviru disertacije je sprovedeno u četiri faze.

Faza I

Prva faza istraživanja je obuhvatila detaljnu analizu teoretskih podloga, upoznavanje sa predmetom istraživanja i aktuelnim stanjem u oblasti, putem naučne i stručne literature, što je predstavljeno u prethodnom poglavlju. Analizirani su tipovi aktuatora, koji mogu proizvesti linearno kretanje, senzori koji mogu biti od značaja u ovim sistemima, kao i vrste najčešće korišćenih tipova upravljanja. Takođe, analizirana je i struktura i način programiranja FPGA kola, kao i mogućnost primene ove tehnologije za upravljanje linearnim pogonima.

Faza II

Druga faza istraživanja je usmerena na ispitivanje aktuelnih, komercijalno dostupnih upravljačkih sistema za linearne pneumatske i električne aktuatore.

Prvo je analiziran upravljački sistem *SPC11*, proizvođača Festo, koji upravlja aktuatorom na principu adaptivnog PID regulatora. Namenjen je za rad sa servopneumatskim sistemima i njime je upravljani pneumatski linearni aktuator

– cilindar dvosmernog dejstva bez klipnjače tipa *DGPL*, preko proporcionalnog pneumatskog ventila tipa *MPYE*. Obe komponente su od proizvođača *FESTO*.

Drugi analizirani upravljački sistem je *Xenus XTL-230-18-S*, proizvođača *Copley Controls*, koji takođe upravlja aktuatorom na principu *PID* regulatora pomoću *DSP* procesora. Namenjen je za upravljanje *BLDC* servo motorima, i njime je upravljan linearni *BLDC* aktuator tipa *STA 2504S*, proizvođača *Dunkermotoren*.

Kao rezultati analiza izmereni su upravljački signali analiziranih upravljačkih sistema, kao i odzivi aktuatora na testirano upravljanje. Istraživanje je vršeno u laboratorijskim uslovima, prvo na neopterećenom aktuatoru, a nakon toga i sa različito opterećenim aktuatorom. Opterećenje je varirano od 1,25 kg do 7,5 kg u koracima od 1,25 kg.

Izvršena je analiza razlika u dobijenim rezultatima, kao i mogućnosti i ograničenja određenih rešenja. Analiziran je uticaj opterećenosti aktuatora na efikasnost rada upravljačkih sistema, kao što su tačnost i brzina pozicioniranja, kao i potrošnja energije.

U ovoj fazi izvršena je i analiza mogućnosti detekcije udara pokretnog dela aktuatora tokom kretanja u prepreku koja se ne nalazi na poznatoj fiksnoj poziciji, već se detektuje analizom profila promene pritiska u komorama pneumatskog aktuatora.

Faza III

U trećoj fazi istraživanja je na osnovu rada upravljačkih sistema analiziranih u Fazi II realizovan upravljački algoritam na *FPGA* platformi, na *FPGA* kolu *XC6SLX45*, proizvođača *Xilinx*, iz serije *Spartan-6 LX45*, koje radi na radnom taktu od 40 MHz. Implementiran je osnovni *PID* algoritam sa dodatkom fazi logike koja vrši kompenzaciju poremećaja nastalih stišljivošću vazduha, smanjujući protok u poslednjoj fazi kretanja ka poziciji.

Algoritam je implementiran uz pomoć softverskog paketa *LabView 2011* i *FPGA dodatka*. Algoritam je crtan korišćenjem blok dijagrama. Algoritam je u koracima (posle svakog koraka implementacije novog dela) testiran prvo na simuliranom *FPGA* u *LabView* okruženju, a kasnije i implementiran na *FPGA* kolu radi potvrđivanja očekivanih rezultata. Korišćeno *FPGA* kolo je u sklopu razvojnog sistema *NI-sbRIO-9636*, proizvođača *National Instruments*, koji

poseduje sve neophodne periferije za direktno priključivanje sistema kojim se upravlja.

Rad upravljačkog sistema je eksperimentalno testiran na pneumatskom sistemu, koji je korišćen i u Fazi II za testiranje upravljačkog sistema *SPC11*.

Faza IV

U četvrtoj fazi istraživanja, algoritam upravljanja iz Faze III je unapređen funkcijom za prilagođavanje upravljanja trenutnom opterećenju aktuatora. Detekcija opterećenosti aktuatora je izvršena bez dodatnog senzora, samo na osnovu načina kretanja aktuatora i analizom istog u realnom vremenu. Na osnovu prepoznatog trenutnog opterećenja, modifikuje se trenutno upravljanje, koje teži da kompenzuje promenu opterećenja za koju je upravljački sistem aktuatora inicijalno konfigurisan. Poboljšani algoritam je prvo testiran na simuliranom FPGA kolu, kao i u Fazi III, a nakon toga je i eksperimentalno testiran na realnom pneumatskom sistemu (koji je korišćen i u fazama II i III).

Na kraju su analizirani dobijeni rezultati eksperimentalnih testiranja, sa osvrtom na specifičnosti konačnog algoritma upravljanja, uz konstataciju ograničenja koja sadrže u sebi. Takođe, dati su i mogući smerovi eventualnog daljeg razvoja.

3.1.2 Istraživačke metode

Prilikom planiranja istraživanja, birane su metode koje će obezbediti objektivnost, pouzdanost, preciznost, sistematičnost i opštost.

Metoda eksperimenta

Osnovni istraživački metod koji je primenjen u istraživanju je metod eksperimenta. Eksperimentalna istraživanja se mogu definisati pomoću:

1) posmatranog predmeta

Tokom istraživanja postoje tri posmatrana predmeta, odnosno posmatrana sistema, koje čine linearni aktuatori i upravljački sistemi korišćeni uz njih. Koriste se dve vrste linearnih aktuatora (pneumatski i električni) i tri različita upravljačka sistema (*SPC11*, *XTL* i novi razvijeni sistem na bazi FPGA).

U drugoj fazi istraživanja, predmet posmatranja su pneumatski linearni aktuator sa upravljačkim sistemom *SPC11* i električni linearni aktuator sa upravljačkim sistemom *XTL*. U trećoj fazi istraživanja, pored upravljačkog sistema *SPC11*, koristi se i kombinacija pneumatskog linearnog aktuatora i novo razvijenog upravljačkog sistema na bazi FPGA.

2) eksperimentalnog faktora

Efikasnost rada linearnog aktuatora posmatrana je u zavisnosti od tri faktora: tačnost pozicioniranja, vreme pozicioniranja i potrošnja energije tokom pozicioniranja.

U toku druge i treće faze istraživanja analizirani su odzivi posmatranih aktuatora. Za svaku kombinaciju posmatranog sistema snimljeni su dijagrami sa podacima o promeni položaja, upravljačkog signala i potrošnje. Sniman je rad bez opterećenja i rad pod različitim opterećenjem. Na osnovu ovih dijagrama, očitani su eksperimentalni faktori za sva tri posmatrana sistema.

3) uticaja varijacije opterećenja na eksperimentalne faktore na posmatranim sistemima

U toku treće faze istraživanja dokazano je da osnovni upravljački sistem baziran na FPGA kolu beleži poboljšane rezultate po sva tri posmatrana faktora. Štaviše, potrošnja u radu je smanjena a potrošnja u stacionarnom stanju u kojoj se održava pozicija skoro je tri puta manja, čime je povećana energetska efikasnost rada aktuatora.

U toku četvrte faze istraživanja, dokazan je uticaj promene opterećenosti aktuatora na većinu posmatranih faktore. S duge strane, potvrđen je pozitivni uticaj algoritma za detekciju opterećenosti aktuatora na modifikaciju upravljanja, na osnovu koje se detektuju poboljšanja u posmatranim faktorima.

Rezultati analiza iz treće i četvrte faze, predstavljeni su u uporednim tabelama.

Metoda analize

Metoda analize je korišćena radi određivanja uticaja različitih upravljačkih sistema i različitog stepena opterećenosti linearnog aktuatora na posmatrane pojedinačne faktore rada u fazama istraživanja II, III i IV. Budući da je ova metoda postupak naučnog istraživanja raščlanjivanjem složenih pojmova, sudova i

zaključaka na njihove jednostavnije sastavne delove i elemente, odnosno gde se pokušava objasniti određena celina na osnovu njenih delova, metoda analize omogućava zanemarivanje onih pojava, svojstava i odnosa koji na određenom nivou istraživanja otežavaju ispitivanje predmeta istraživanja.

Metoda sinteze

Metoda sinteze je korišćena radi objedinjavanja pojedinačnih zaključaka o uticaju posmatranih sistema na analizirane faktore rada aktuatora za procenu efikasnosti rada upravljačkih sistema.

Takođe, metoda sinteze je korišćena u četvrtoj fazi za sintezu konačnog upravljačkog sistema baziranog na FPGA, sintezom pojedinačnih funkcija za napredno upravljanje u jednu upravljačku celinu.

Metoda komparacije

Komparativna metoda je korišćena tokom analize eksperimentalnih rezultata u cilju upoređivanja eksperimentalnih faktora koji prate rad linearnih aktuatora, budući da je to postupak upoređivanja srodnih činjenica, pojava, procesa i odnosa, odnosno utvrđivanje njihove sličnosti i razlika u njihovom ponašanju i intenzitetu.

Metoda generalizacije

Metoda generalizacije se koristiti za formiranje opštih stavova na osnovu pojedinačnih zaključaka. Izvršena je generalizacija zaključaka o mogućnosti primene upravljačkog sistema baziranog na FPGA, sa konkretno testiranog pneumatskog linearnog aktuatora na ostale tipove linearnih i nelinearnih aktuatora, koji u ovom istraživanju nisu testirani. Navedena su i ograničenja koja se moraju poštovati kako bi generalizacija važila.

3.1.3 Laboratorija i oprema za eksperimentalni rad

Eksperimentalni rad je obavljen u prostorijama Fakulteta tehničkih nauka, odnosno u laboratorijama MI 125 i MI G3, u zgradi Mašinskog instituta.

Prilikom eksperimentalnog rada korišćena je sledeća oprema:

- 1) linearni aktuatori i prateća merna i upravljačka oprema
 - pneumatski linearni aktuator
 - cilindar bez klipnjače: *DGPL-25-600-PPVA-KF-B*, Festo [97],
 - cilindar dvosmernog dejstva: *DNC-32-100-PPV-A-S10*, Festo [98],
 - otpornička merna letva: *MLO-POT-600*, Festo [99],
 - proporcionalni razvodni ventil: *MPYE-5-1/8-HF-010-B*, Festo [100],
 - razvodni ventil: *CPE10-M1BH-5/3B-QS6-B*, Festo [101],
 - senzor protoka vazduha: *SFAB-600U-WQ10-2SA-M12*, Festo [102],
 - senzor pritiska: *MBS 3000-2011-1 AB04*, Danfoss [103],
 - električni linearni aktuator:
 - linearni aktuator: *STA2504S-053-S-03D*, Dunkermotoren [104].
- 2) upravljački i akvizicioni sistemi
 - Soft-Stop kontroler za servopneumatiku: *SPC11-POT-TLF*, Festo [105],
 - Servo električni upravljački sistem: Xenus *XTL-230-18-S*, Copley Controls [106],
 - Razvojni sistem za FPGA, *LabVIEW RIO Evaluation Kit*, National Instruments.
- 3) izvor napajanja
 - sistem za snabdevanje vazduhom pod pritiskom:
 - kompresor: *Panair System HD105CVBi*, za snabdevanje vazduhom određenog pritiska.
 - pripremna grupa:
 - regulator pritiska sa filterom *AW40-F04D* i manometrom *G36-10-01*, SMC
 - filter čestica i odvajač kondenzata *LF-D-MINI*, Festo
 - izvor jednosmernog napona na 24V DC, 5A: *TRIO-PS/1AC/24DC/5*, Phoenix Contact,
- 4) ostala oprema
 - programabilno logički kontroler *S7-1200*, Siemens,
 - jedinica za baferovanje analognog signala,
 - tegovi za variranje opterećenja.

Cilindar bez klipnjače, DGPL-25-600-PPVA-KF-B

Cilindar bez klipnjače (*Slika 46*), kataloške oznake *DGPL-25-600-PPVA-KF-B*, proizvođača Festo, je linearni pneumatski aktuator sa dužinom hoda od 600 mm, od kojih je 580 mm hoda dostupno u eksperimentalnoj konfiguraciji. Tip izvedbe cilindra je sa čeličnom trakom. Na pokretni deo linearnog pogona, koji je kruto vezan sa klipom cilindra, montiran je klizač sa vođicom sa strane kućišta cilindra. Cilindar je predviđen za rad na pritisku do 800 kPa. Na krajevima hoda cilindra postavljeni su mehanički apsorbiri udara, kataloške oznake *YSR-12-12-C*, proizvođača Festo, predviđeni za amortizaciju sile udara do 1 kN, pri maksimalnoj brzini od 3 m/s [107]. Na priključne vodove montirani su priključci za dovod vazduha pod pritiskom preko creva $\Phi 10$ mm.



Slika 46. Pneumatski cilindar bez klipnjače tipa DGPL.

Osnovni kataloški podaci cilindra bez klipnjače tipa DGPL [98]:

- hod cilindra: 600 mm,
- prečnik klipa: 25 mm,
- radni pritisak: 200-800 kPa,
- maks. izlazna sila: 295 N.

Cilindar dvosmernog dejstva, DNC-32-100-PPV-A-S10

Cilindar dvosmernog dejstva (*Slika 47*), kataloške oznake *DNC-32-100-PPV-A-S10*, proizvođača Festo, je pneumatski linearni aktuator koji je korišćen u delu istraživanja mogućnosti detekcije kontakta sa preprekom tokom kretanja aktuatora na osnovu analize promene profila pritiska u komorama cilindra. Cilindar je predviđen za rad na pritisku do 1200 kPa, i na izlazu može da da silu od 483 N prilikom izvlačenja ili silu od 415 N prilikom uvlačenja. Na priključne vodove montirani su priključci za dovod vazduha pod pritiskom preko creva $\Phi 6$ mm.



Slika 47. Pneumatski cilindar dvosmernog dejstva tipa DNC.

Osnovni kataloški podaci cilindra dvosmernog dejstva tipa DNC [98]:

- hod cilindra: 100 mm,
- prečnik klipa: 32 mm,
- radni pritisak: 20-1200 kPa,
- maks. izlazna sila: 483 N (izvlačenja), 415 N (uvlačenja).

Otpornička merna letva, MLO-POT-600

Otpornička merna letva, kataloške oznake *MLO-POT-600*, proizvođača Festo, korišćena je za određivanje apsolutne pozicije pokretnog dela cilindra bez klipnjače tokom eksperimenata u drugoj, trećoj i četvrtoj fazi istraživanja. Ovaj linearni senzor pozicije predviđen je za merni opseg od 0 do 600 mm, sa rezolucijom od 0,01 mm.



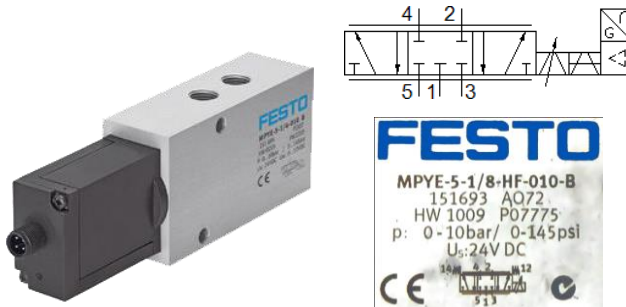
Slika 48. Linearna otpornička merna letve tipa MLO-POT.

Osnovni kataloški podaci otporničke merne letve [99]:

- merni opseg: 0 - 600 mm,
- rezolucija: 0,01 mm,
- maks. brzina pomeranja: 10 m/s ,
- Električni parametri:
 - napajanje: maks. 42 V DC,
 - struja: maks. 4 mA.

Proporcionalni razvodni ventil, MPYE-5-1/8-HF-010-B

Proporcionalni razvodni ventil (*Slika 49*), kataloške oznake MPYE-5-1/8-HF-010-B, proizvođača Festo, korišćen je za upravljanje kretanjem pneumatskim linearnim aktuatorom, cilindrom bez klipnjače tipa DGPL. Ovo je naponom upravljani 5/3 razvodni ventil sa srednjim blokirajućim položajem. Ventil je predviđen za rad do pritiska od 1000 kPa, i obezbeđuje protok do 700 L/min. Na priključne vodove montirani su priključci za dovod vazduha pod pritiskom preko creva $\Phi 10$ mm. Upravljanje proporcionalnim ventilom prikazano je u *Tabeli 4*.



Slika 49. Proporcionalni pneumatski ventil proizvođača Festo tipa MPYE.

Osnovni kataloški podaci proporcionalnog ventila [100]:

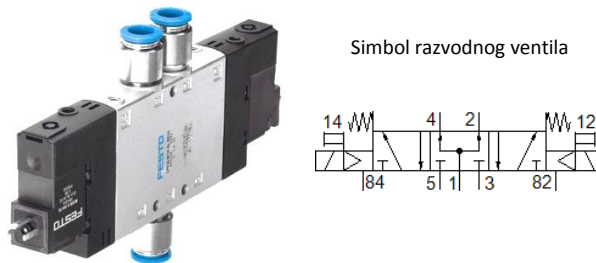
- tip ventila: 5/3, srednji položaj: svi priključci zatvoreni,
- upravljački signal: analogni naponski 0-10 V DC,
- protok kroz ventil: 700 L/min,
- radni pritisak: 0-1000 kPa,
- frekvencija rada: 95 Hz,
- napon napajanja: 17-30 V DC.

Tabela 4. Upravljanje proporcionalnim pneumatskim ventilom tipa MPYE [100].

	5 V – 0 V	5 V	5 V – 10 V
Protok		Protok je ~0.	
Promena protoka	Protok se povećava na priključku 2.	Izlazi blokirani	Protok se povećava na priključku 4.
Usmeravanje vazduha	Pritisak: 1→2 Odzraka: 4→5	Izlazi blokirani	Pritisak: 1→4 Odzraka: 2→3

Razvodni ventil, CPE10-M1BH-5/3B-QS6-B

Pneumatski razvodni ventil (*Slika 50*), kataloške oznake *CPE10-M1BH-5/3B-QS6-B*, proizvođača Festo, korišćen je za upravljanje kretanjem pneumatskim cilindrom tipa *DNC* u delu istraživanja mogućnosti detekcije kontakta sa preprekom tokom kretanja aktuatora na osnovu analize promene profila pritiska u komorama cilindra. Radi se o električno upravljanim 5/3 razvodnim ventilu sa srednjim položajem sa oba priključka pod napajanjem. Ventil je predviđen za rad na pritisku do 800 kPa, i obezbeđuje protok do 300 L/min. Na priključne vodove montirani su priključci za dovod vazduha pod pritiskom preko creva $\Phi 6$ mm.



Slika 50. Pneumatski ventil 5/3 tipa MPYE.

Osnovni kataloški podaci razvodnog ventila tipa *CPE10* [101]:

- tip ventila: 5/3, srednji položaj: oba priključka pod napajanjem,
- upravljački signal: 24 V DC,
- protok kroz ventil: 300 L/min,
- radni pritisak: 300-800 kPa,
- vreme uključenja: 16 ms,
- vreme isključenja: 20 ms,
- napon napajanja: 24 V DC.

Senzor protoka vazduha, SFAB-600U-WQ10-2SA-M12

Senzor protoka vazduha, protokomer (*Slika 51*), kataloške oznake *SFAB-600U-WQ10-2SA-M12*, proizvođača Festo, korišćen je za merenje protoka vazduha pod pritiskom, kojim je napajan pneumatski aktuator, cilindar bez klipnjače tipa *DGPL*. Protokomer je predviđen za opseg merenja od 6-600 L/min, za vazduh pod pritiskom od 0 do 1000 kPa. Na izlazu senzora moguće je, između ostalog, dobiti analogni strujni signal u rasponu od 4-20 mA linearno proporcionalan protoku. Prilikom korišćenja senzora, analogni strujni izlaz je

preko podešljivog (trimer) otpornika, koji je bio podešen na 500 Ω , spojen na analogni naponski ulaz (0-10 V) akvizicione opreme.



Slika 51. Senzor protoka tipa SFAB.

Osnovni kataloški podaci protokomera tipa *SFAB* [102]:

- opseg merenja: 6-600 L/min,
- radni pritisak: 0-1000 kPa,
- analogni izlaz: 4-20 mA,
- napon napajanja: 15-30 V DC.

Senzor pritiska, MBS 3000-2011-1 AB04, Danfoss (Danfoss, 2014)

Senzor pritiska (*Slika 52*), kataloške oznake *MBS 3000-2011-1 AB04*, proizvođača Danfoss, je piezoelektrični pretvarač sile usled pritiska vazduha ili fluida u strujni naponski signal od 4 – 20 mA. Senzor meri natpritisak u odnosu na atmosferski. Tokom istraživanja mogućnosti detekcije kontakta sa preprekom tokom kretanja aktuatora na osnovu analize promene profila pritisa u komorama cilindra, korišćena su dva ovakva senzora. Senzor je predviđen za merni opseg od 0 do 1000 kPa.



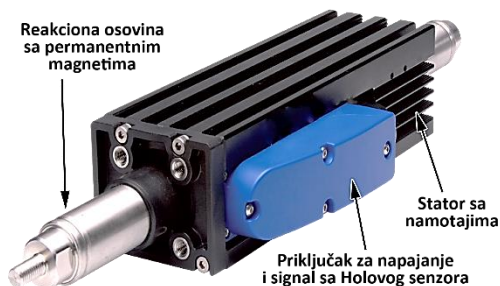
Slika 52. Senzor pritiska tipa MBS 3000.

Osnovni kataloški podaci senzora pritiska tipa *MBS 3000* [103]:

- opseg merenja: 0-1000 kPa,
- analogni izlaz: 4-20 mA,
- napon napajanja: 9-32 V DC.

Električni linearni aktuator, STA2504S-053-S-03D

Električni linearni aktuator (*Slika 53*), kataloške oznake *STA2504S-053-S-03D*, proizvođača Dunkermotoren, je direktni linearni električni aktuator aktivne dužine hoda 242 mm, maksimalne brzine 5,9 m/s, sa ubrzanjem do 394 m/s². Posедуje ugrađen Holov senzor sa rezolucijom od 12 μm. Izlazna nominalna sila je: 42,5 N (maksimalna (impulsna) do 312 N). Ovaj linearni aktuator je korišćen u eksperimentalnom delu istraživanja za određivanje zavisnosti prelazne karakteristike kretanja u zavisnosti od varijacije veličine opterećenja.



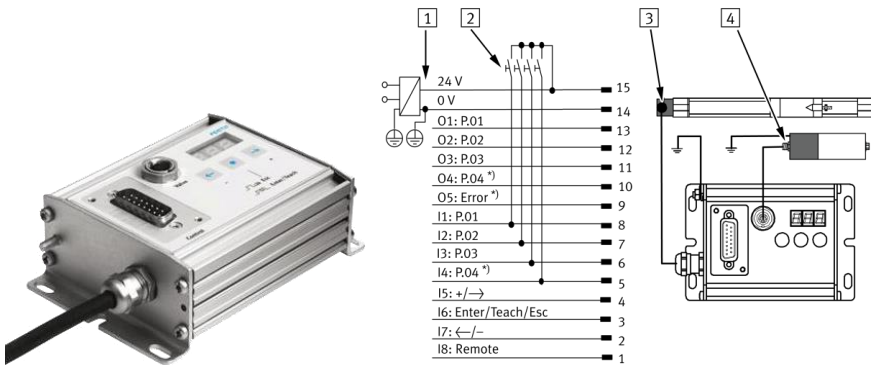
Slika 53. Električni linearni aktuator tipa STA2504S.

Osnovni kataloški podaci linearnog električnog servo aktuatora tipa *STA2504S* [104]:

- hod: 292 mm (242 mm aktivno),
- sila: 42,5 N (maks. 312 N),
- maks. brzina: 5,9 m/s,
- maks. ubrzanje: 394 m/s²,
- struja namotaja: 1,92 A (maks. 20 A),
- otpornost namotaja: 6,02 Ω
- vremenska konst.: 0,5 ms
- enkoder:
 - Holov senzor
 - rezolucija: 12 μm
 - izlaz: struja ±10 mA
 - napajanje: 5 V

Soft-Stop servo pneumatski upravljački sistem, SPC11-POT-TLF

Soft-Stop servo pneumatski upravljački sistem (*Slika 54*), kataloške oznake *SPC11-POT-TLF*, proizvođača Festo, korišćen je za upravljanje pneumatskim aktuatorom, cilindrom bez klipnjače tipa *DGPL*. Ovaj upravljački sistem je predviđen za upravljanje proporcionalnim pneumatskim razvodnim ventilom i koristi se za brze aplikacije tipa „uzmi-ostavi“ (eng. *pick and place*). Upravljački sistem obezbeđuje pozicioniranje bez udara u 4 različite pozicije (2 krajnje i 2 proizvoljne) pri velikim brzinama kretanja, za unapred definisano transportovano opterećenje.



Slika 54 Servo pneumatski Soft-Stop kontroler SPC11, sa pripadajućim digitalnim U/I linijama [1] – izvor napajanja, [2] – tasteri za odabir pozicije, [3] – izlaz sa linearnog senzora pozicije, [4] – upravljački signal za upravljanje proporcionalnim ventilom

Parametrizacija i puštanje u rad upravljačkog sistema obezbeđena je preko ugrađenog displeja i tastera, kao i preko digitalnih ulaza i izlaza (*Slika 54 desno*). Obučavanje parametara kontrolera dešava se automatski (eng. *autotuning*) pokretanjem režima za učenje (eng. *Teach mode*).

Osnovni kataloški podaci upravljačkog sistema *SPC11* [105]:

- pozicije: 4 (2 fiksne i 2 podesive),
- upravljački signal: analogni, 0-10 V DC,
- signal sa senzora pozicije: 0-10 V DC,
- napajanje: 24 V DC.

Servo električni upravljački sistem, Xenus XTL-230-18-S

Servo električni upravljački sistem (*Slika 55*), kataloške oznake *Xenus XTL-230-18-S*, proizvođača Copley Controls, predviđen je za upravljanje servo DC motorima do 373 V, sa strujom od 6 A (impuls 18 A). Korišćen je za upravljanje

električnim linearnim aktuatorom tipa *STA2504S*. Konfiguracija upravljačkog sistema je moguća korišćenjem aplikacije na računaru *CPE2*, Copley Motion. Upravljački sistem se preko RS232 veze spaja sa računarom na kojem se vrši konfiguracija.



Slika 55. Servo električni upravljački sistem tipa Xenus XTL.

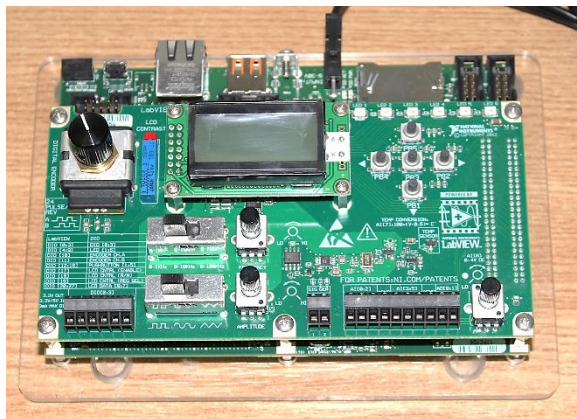
Osnovni kataložki podaci upravljačkog sistema Xenus XTL-230 [106]:

- Upravljačka izlazna veličina za aktuator:
 - napon: do 373 V,
 - struja: do 6 A (impulsno 18 A),
- Povratna sprega:
 - enkoder (kvadratni, sin/cos),
 - digitalni Holov senzor,
- Komunikacija: RS232, CANopen,
- Digitalni U/I: 12 ulaza, 4 izlaza,
- Zadavanje reference:
 - analogni napon: ± 10 V,
 - impulsi (kao za koračni motor),
 - PWM,
 - CAN open,

Razvojni sistem za FPGA, *LabVIEW RIO Evaluation Kit*

Razvojni sistem *LabVIEW RIO Evaluation Kit* (Slika 56) je baziran na *sbRIO 9636* [108] upravljačkoj jedinici, proizvođača National Instruments. Ovo je platforma za razvoj aplikacija predviđenih za FPGA i procesore u realnom vremenu (eng. *Real Time*). Razvojni sistem je opremljen FPGA kolom najnovije generacije, oznake *XC5S2X45*, iz serije SPARTAN-6, proizvođača Xilinx, i 32-bitnim procesorom *MPC5125YVN400*, proizvođača Freescale. *MPC5125* mikroprocesor je predviđen za automatizaciju vrlo zahtevnih procesa, podržava industrijske i neindustrijske komunikacione protokole, kao i rad sa HMI uređajem (eng. *human-machine interface*). Preko FPGA kola dostupni su 16-bitni

analogni ulazi i izlazi, kao i konfigurabilne digitalne linije koje rade na 3,3 V. Pored realizacije upravljačke jedinice zasnovane na pomenutom FPGA čipu, ovaj razvojni sistem je korišćen i kao akviziciona jedinica za potrebe snimanja analognih i digitalnih signala tokom eksperimentalnih merenja koja su rađena u fazama II, III i IV.



Slika 56. Razvojni sistem za FPGA, Single Board Rio 9636.

Na razvojnem okruženju *LabVIEW RIO Evaluation Kit* nalaze se sledeće periferije:

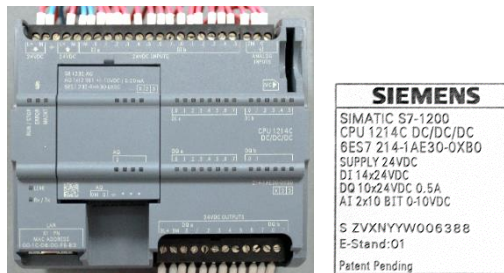
- 4 digitalne U/I linije,
- 6 analognih ulaza (16-bitnih),
- 2 analogna izlaza (16-bitna),
- 5 tastera,
- 6 programabilnih LED indikatora,
- Potenciometar: 100K Ω (linearni),
- Kvadratni enkoder: 24 impulsa/krugu,
- Funkcijski generator
 - trapezasti: 0 do 1 kHz,
 - sinusni: 0 do 10 kHz,
 - testerast: 0 do 100 kHz
- LCD displej za karaktere,
- Ethernet, USB 2.0 sa OTG,
- priključak za SD karticu.

Pored navedenih periferija, koje su izvedene na razvojnem okruženju, sbRIO 9636 poseduje još 10 analognih ulaza, 2 analogna izlaza i 24 digitalnih linija koje se po potrebi mogu koristiti.

Razvoj aplikacije je omogućen iz inženjerskog softverskog alata *LabVIEW 2011* ili novijim, u kojem se uz pomoć modula *LabVIEW FPGA* i *LabVIEW Real-Time* na jednostavan način vrši programiranje razvojnog okruženja. *LabVIEW* obezbeđuje jednostavno programiranje rada svih periferija preko ugrađenih softverskih drajvera, a ujedno omogućava i razvoj sopstvenih modula. Na ovaj način FPGA se programira na logičkom nivou (korišćenjem logičkih blokova), bez potrebe za programiranjem u VHDL jeziku (eng. *VHSIC³¹ Hardware Description Language*), ali ukoliko je to neophodno radi postizanja boljih performansi, deo upravljačkog koda je moguće napisati u VHDL-u. Za kompajliranje algoritma na FPGA platformu koristi se ugrađeni Xilinx-ov kompajler. Sve periferije su direktno dostupne sa FPGA, što dodatno olakšava rad naročito kada se radi o brzo menjajućim signalima koje treba procesuirati i na osnovu njih vršiti dalje upravljanje.

Programabilno logički kontroler, S7-1200

Programabilno logički kontroler (PLK) tipa *S7-1200* (Slika 57), kataloške oznake *6ES7 214-1AE30-0XB0*, proizvođača Siemens, korišćen je za zadavanje reference upravljačkoj jedinici *SPC11*, tokom ispitivanja ove upravljačke jedinice. Radi se o PLK iz serije *S7-1200* sa procesorom *CPU 1214* i verziji *DC/DC/DC*, tj. PLK koji se napaja na jednosmerni napon od 24 V i svi ulazi i izlazi su jednosmernog PNP tipa. Verzija firmvera³² PLK je 2.2.



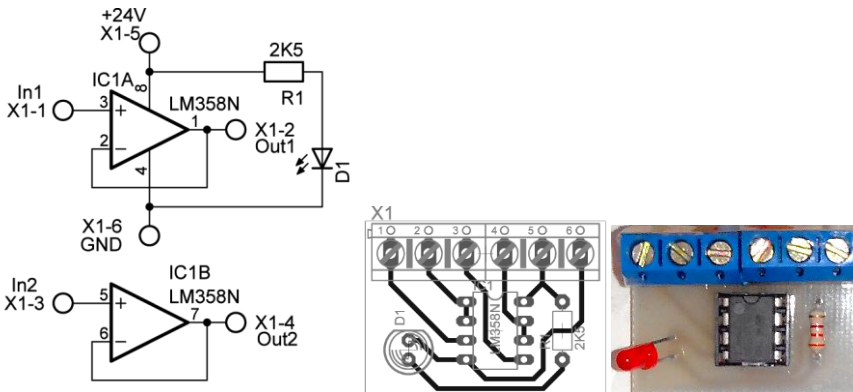
Slika 57. Programabilni logički kontroler tipa S7-1200.

³¹ VHSIC (eng. *Very High Speed Integrated Circuit*) – integrisana kola predviđena za rad na veoma velikim brzinama.

³² Firmver (eng. *firmware*) je osnovni program (softver) koji opisuje i definiše rad elektronske komponente, definiše set instrukcija. Na nekim komponentama je firmver fiksiran (uprogramiran u trenutku proizvodnje) a na nekima se može menjati u svrhu ispravki nedostataka primećenih tokom korišćenja. Prilikom promene firmvera proizvođač obeležava novi firmver novom verzijom.

Jedinica za baferovanje analognog signala

U toku eksperimentalnog dela istraživanja, prilikom testiranja upravljačke jedinice *SPC11*, sniman je analogni signal sa linearnog senzora pozicije i analogni izlazni signal upravljačke jedinice. Kako paralelno povezivanje akvizicione jedinice ne bi uticalo na rad *SPC11*, između signala sa *SPC11* i akvizicione jedinice povezana je jedinica za baferovanje signala (*Slika 58*), koja je izvedena sa dva operaciona pojačavača koja rade kao jedinični pojačavač. Korišćeno je integrisano kolo *LM358*, koje u svom pakovanju sadrži dva operaciona pojačavača. Kolo je napajano napajanjem od 24V DC.



Slika 58. Električna šema i izgled pločice jedinice za baferovanje analognog signala.

Kompresor Panair System HD105CVBi

Kompresor Panair (*Slika 59*) je dvoklipni kompresor, maksimalnog protoka 810 L/min i pritiska od 1000 kPa. Ovaj kompresor korišćen je za obezbeđivanje dovoljne količine vazduha pod pritiskom u eksperimentalnom delu istraživanja.



Slika 59. Kompresor Panair System HD105CVBi.

Izvor napajanja na 24 V DC, 5A, TRIO-PS/1AC/24DC/5

Izvor napajanja na 24 V DC, kataloške oznake *TRIO-PS/1AC/24DC/5*, proizvođača Phoenix Contact, obezbeđuje stabilisani izvor napajanja jednosmernog napona od 24 V, i struje do 5 A. Korišćen je za napajanje upravljačke jedinice *SPC11*, *PLK S7-1200*, razvodnih ventila, senzora protoka i pritiska kao i ostalih komponenti, koje su zahtevale jednosmerno napajanje.

Tegovi za variranje opterećenja

Tokom testiranja rada upravljačkih jedinica, za variranje opterećenja korišćeni su tegovi od 1,25 kg i 2,5 kg (*Slika 60*). Pomoću ovih tegova sastavljena su opterećenja od: 1,25; 2,5; 3,75; 5,0; 6,25 i 7,5 kg.



Slika 60. Tegovi za variranje opterećenja.

3.2 Razvoj upravljačkog sistema zasnovanog na FPGA

3.2.1 Osnovni upravljački sistem

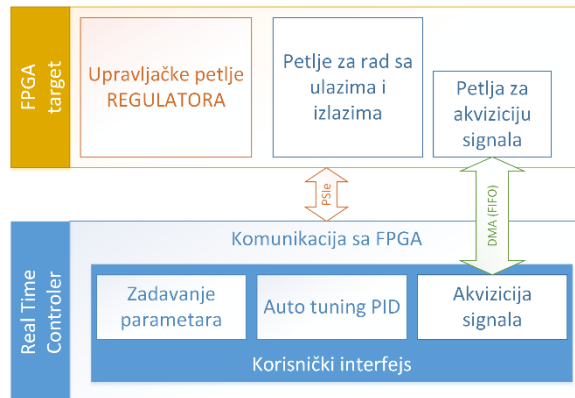
Osnovna ideja razvoja upravljačkog sistema baziranog na FPGA tehnologiji je da se rastereti upravljačka jedinica primenom paralelnog načina obrade osnovnog upravljačkog algoritma. Rasterećenje upravljačke jedinice daje prostora za uključivanje dodatnih funkcija čiji je osnovni zadatak da poboljšaju efikasnost rada aktuatora, kao i da povećaju funkcionalnost upravljačkog sistema.

Na osnovu uvida u trenutno stanje u oblasti primene FPGA tehnologije kod upravljačkih sistema i urađenih uvodnih istraživanja [2], čiji eksperimentalni deo je izložen u *Poglavljima 3.3.1* i *4.1*, osnovano je pretpostavljeno da bi se primenom FPGA tehnologije izvršavanje upravljačkih algoritama ubrzalo, što bi otvorila mogućnost za dodavanje naprednih funkcija za poboljšanje rada upravljačkog sistema.

Upravljački sistem baziran na FPGA kolu je razvijen na *LabVIEW RIO Evaluation Kit* razvojnom sistemu čiju osnovu predstavlja *Single Board RIO, sbRIO 9636*, proizvođača National Instruments. Na ovom razvojnom sistemu je FPGA kolo *XC6SLX45*, proizvođača Xilinx, iz serije *Spartan-6 LX45* koji radi na radnom taktu od 40 MHz i 32-bitni RT procesor *MPC5125YVN400*, proizvođača Freescale Semiconductor, koji radi na radnom taktu od 400 MHz. Za potrebe realizacije upravljačkog sistema korišćena su:

- 2 analogna naponska ulaza (0-10 V) na koji su spojeni signali sa merne letve (*Slika 71, Sp*) i sa protokometra (*Slika 71, Sf*),
- 1 analogni naponski izlaz (0-10 V) na koji je spojen upravljački signal za proporcionalni razvodnik (*Slika 71, Uv*).

Upravljački sistem je sačinjen iz dva dela, što je prikazano na *Slici 61*. Korisnički interfejs je realizovan na RT kontroleru i zadužen je za komunikaciju sa korisnikom. Tu se zadaju željeni parametri, i vrši se monitoring trenutnog stanja aktuatora. Omogućeno je i snimanje signala koji se menjaju na FPGA delu sistema kao što su: *referentna vrednost pozicije, trenutna pozicija, izlaz regulatora*, itd. Korišćenjem ugrađenog bloka *PID Online Autotuning (PID on the loop).vi*, koji se izvršava na RT kontroleru, omogućeno je automatsko podešavanje parametara PID regulatora (eng. *Auto tuning*) koji je implementiran na FPGA delu upravljačkog sistema.



Slika 61. Blok šema upravljačkog sistema na bazi FPGA.

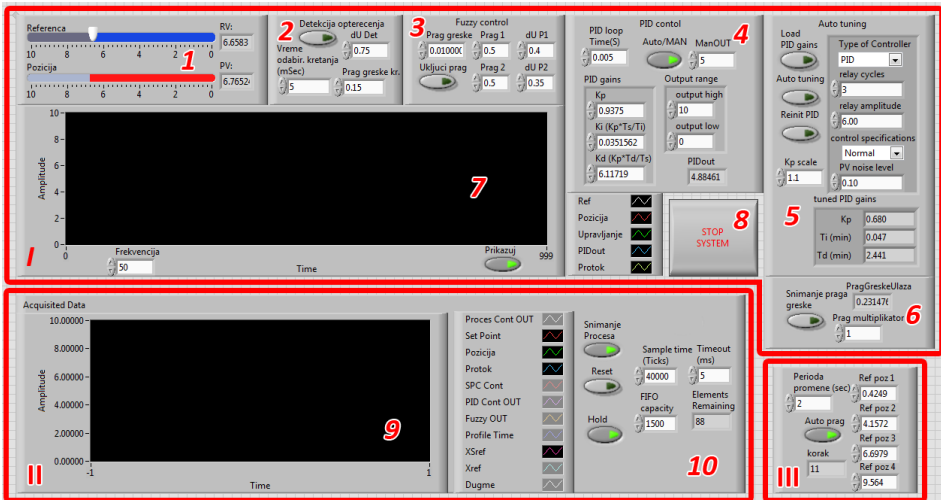
Regulacioni deo upravljačkog sistema se izvršava na FPGA kolu, na kojem su algoritmi regulacije aktuatora podeljeni u nekoliko paralelnih upravljačkih petlji. Glavnu upravljačku petlju čini petlja sa PID regulatorom, čiji izlazni upravljački signal se modifikuje signalom iz petlje u kojoj se upravljanje formira na osnovu

Fazi logike. Tokom rada, algoritam za detekciju opterećenosti aktuatora vrši modifikaciju referentne tačke tako, da kada se uzme u obzir kašnjenje sistema klizač zaustavi na primarno zadatoj poziciji (sa minimalnom mogućom greškom). Pored upravljačkih petlji, paralelno sa njima se izvršava i petlja za snimanje praćenih signala. Sve pomenute petlje se izvršavaju simultano.

Korisnički interfejs upravljačkog sistema

Korisničko okruženje

Korisnički interfejs upravljačkog sistema je realizovan na RT kontroleru razvojnog sistema *LabVIEW RIO Evaluation Kit* i služi za zadavanje parametara upravljačkoj jedinici kao i za prikazivanje praćenih promena. Program korisničkog interfejsa se može podeliti na dva osnovna dela: korisničkog okruženja (*Front Panel*) i programskog dela (*Block Diagram*). Polja za unos i očitavanje parametara na *Front Panel*-u (*Slika 62*) se mogu grupisati u tri grupe: *parametri regulatora upravljačkog sistema* (I), *parametri za akviziciju praćenih veličina* (II), i *parametri za automatizovano zadavanje pozicija* (III).



Slika 62. Prikaz korisničkog interfejsa realizovanog upravljačkog sistema (*Front Panel*).

U okviru *grupe parametara I* preko *polja 1* zadaje se referentna pozicija klizača aktuatora (*Referenca*) i vrši indikacija trenutne pozicije klizača aktuatora (pokazivač *Pozicija*). U *polju 2* se nalaze parametri algoritma za detekciju opterećenja (parametri su detaljno opisani u *Poglavlju 3.2.2*). U *polju 3* se nalaze

parametri Fazi upravljačkog algoritma, a u *polju 4* parametri PID regulatora. Ukoliko je dugme *Auto/MAN* uključeno, upravljački sistem je u automatskom režimu rada i vrši regulaciju. U slučaju da je dugme isključeno, na upravljački izlaz se prosleđuje veličina upisana u polje *ManOUT* što predstavlja ručnu zadatu upravljačku veličinu. *Polje 5* služi za podešavanje algoritma za automatsku parametrizaciju PID regulatora. *Polje 6* je predviđeno za pokretanje algoritma za automatsku detekciju praga greške analognog ulaza (greška uzorkovanja tokom A/D konverzije). Ovaj parametar se kasnije koristi tokom praćenja promena pozicije aktuatora. *Polje 7* služi za vizuelni prikaz trenutnih stanja praćenih signala (virtualni osciloskop). Pomoću opcije *Frekvencija* se podešava učestalost odabiranja tačaka. Signali prikazani na ovom dijagramu su samo informativne prirode jer način uzimanja odabiraka merenih vrednosti ne obezbeđuje potpunu vremensku ekvidistantnost, tj. moguće je da neke tačke izostanu. Rad celog upravljačkog sistema se zaustavlja pritiskom na taster *STOP SYSTEM (8)* koji je u blok dijagramu označen sa promenljivom *stop*.

U *grupi parametara II* su predviđena polja za prikaz snimanih signala (*polje 9*), koji se direktno, klikom miša, mogu izvesti u eksel datoteku. Parametri za podešavanje akvizicije su u *polju 10*. Tu se unose parametri za vreme odabiranja (*Sample time*), kapacitet FIFO³³ registra (*FIFO capacity*), i vremensku zadržku FIFO prenosa (*Timeout*). Proces snimanja se pokreće pritiskom na dugme *Snimanje procesa*. Resetovanje slike na osciloskopu postiže se pritiskom na dugme *Reset*, a pauziranje prikaza na taster *Hold*.

U *grupi parametara III* su parametri programa za automatsko zadavanje referentne vrednosti koji je korišćen tokom testiranja. Tu se mogu definisati četiri različite pozicije (*Ref poz 1...4*) i period između promena (*Period promena*), a redosled promena se definiše u programu tj. blok dijagramu unutar bloka *Formula Node*.

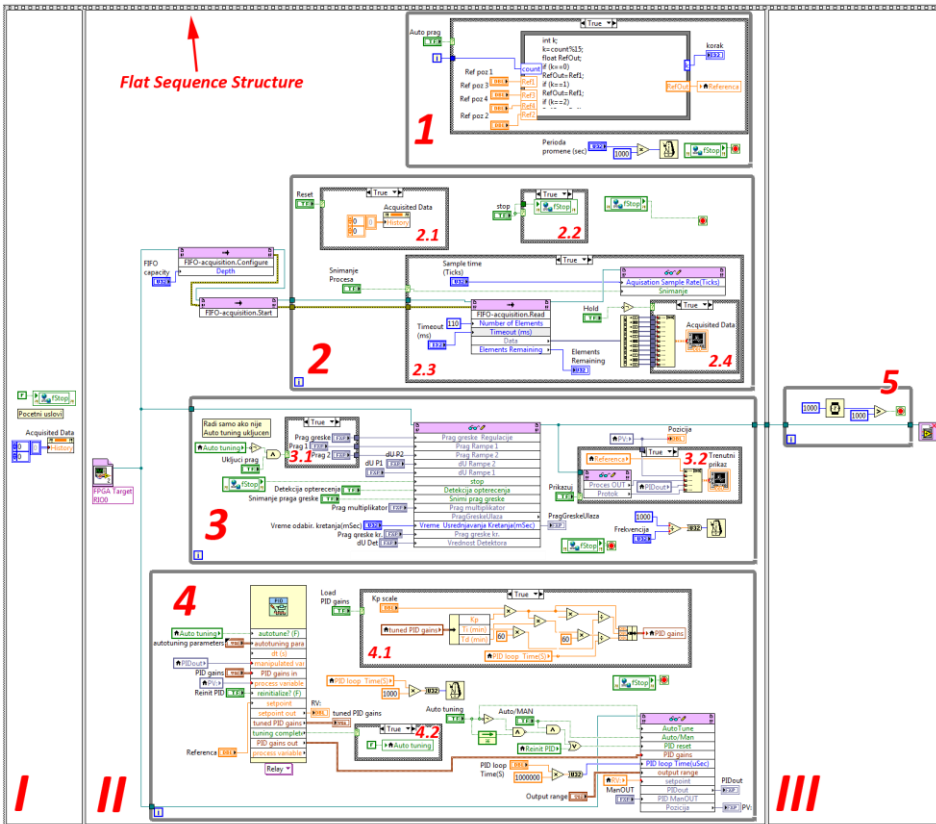
Program korisničkog interfejsa

Programski blok dijagram korisničkog interfejsa (*Slika 63*) se izvršava na RT kontroleru i predstavlja spregu između korisnika i FPGA kola na kojem se izvršava glavna upravljačka logika. Program interfejsa je zadužen za prenos parametara upravljačkog sistema (*petlje 2 i 4*), automatsku parametrizaciju PID regulatora (*petlja 4*), komunikaciju sa akvizicionom petljom na FPGA kolu i prikaz prenetih

³³ FIFO (eng. *First In, First Out*) - metoda za organizaciju i manipulaciju sa baferom podataka, kod koje prvi ulazni podatak u bafer dolazi prvi na red za izuzimanje i obradu.

podataka (*petlja 2*) i automatizovano ciklično zadavanje referentne vrednosti (*petlja 1*). Pojedinačni prikaz svih delova programa dat je u *Prilogu 1*.

Program je podeljen u tri koraka korišćenjem strukture sekvenci (*Flat Sequence Structure*), koja obezbeđuje tačan redosled izvršavanja operacija. Prvi korak (I) predstavlja inicijalizaciju gde se resetuje zastavica *fStop* koja je zadužena za zaustavljanje programa i aktivira se pritiskom na dugme *stop* (dugme *STOP SYSTEM*, *Slika 62*, *polje 8*). Drugi korak (II) predstavlja glavni deo programa koja počinje pokretanjem programa na FPGA kolu i nastavlja sa neprestanim izvršavanjem petlje (1, 2, 3, 4). Nakon pokretanja se petlje u okviru ovog koraka izvršavaju sve dok se program ne zaustavi pritiskom na dugme *stop*. Nakon zaustavljanja programa sledi treći korak (III) koji služi za vremensku zadržku dok se odvija algoritam za vraćanja aktuatora u nulti položaj koji se izvršava na FPGA kolu, i prethoduje gašenju programa na FPGA kolu.



Slika 63. Program korisničkog interfejsa realizovanog upravljačkog sistema (*Block Diagram*).

U okviru *II koraka* ciklično se izvršava *while petlja 1*. Ciklus izvršavanja se zadaje pomoću parametra *Period promene*. Ukoliko je dugme *Auto prag* uključen izvršava se *if struktura* u kojoj se unutar bloka *Formula Node* izvršava zadatata sekvenca programa (data je u *Prilogu 1*). Pomoću ulaznih promenljivih *Ref poz 1 ... Ref poz 4* se mogu definisati četiri pozicije koje se mogu upotrebiti u programskom kodu unutar bloka *Formula Node*.

Petlja 2 je predviđena za komunikaciju (DMA transfer³⁴) sa FIFO registrom na FPGA kolu i za prikaz prenetih podataka. Ukoliko je aktivirano dugme *Snimanje Proces* sa kojim je uslovljena *if struktura 2.3* svake 1 ms se prikazuje novi podatak na virtualnom osciloskopu *Acquisited Data*. Prikazivanje se može zaustaviti aktiviranjem dugmeta *Hold*. Pritiskom na dugme *Hold* se prekida samo prikazivanje novih tačaka na osciloskopu, dok se DMA transfer i dalje obavlja kako se ne bi napunio FIFO registar predviđen za snimanje. Pritiskom na taster *Reset* se unutar *if struktura 2.1* reinicijalizuje virtualni osciloskop za prikaz. Stanje dugmeta *stop* (dugme STOP SYSTEM, *Slika 62, polje 8*) se proverava u ovoj petlji.

Program unutar *while petlje 3* vrši prenos parametara sa korisničkog panela na FPGA kolu, i ako je aktivirano dugme *Prikazuj* sprovodi prikazivanje praćenih podataka (*if struktura 3.2*). U slučaju da je uključeno dugme *Ukljuci prag* i nije uključeno dugme *Auto tuning*, čime je uslovljena *if petlja 3.1*, na FPGA se prenose prag greške regulacije (*Prag greske*) kao i parametri Fazi algoritma (*Par 1* i *Prag 2*), a u suprotnom se za ove parametre prenosi konstanta 0 i Fazi algoritam je na taj način isključen. Učestalost izvršavanje ove petlje se podešava pomoću parametra *Frekvencija*.

U *while petlji 4* nalazi se program za automatsku parametrizaciju (eng. *Auto tuning*) PID regulatora (na FPGA kolu). Za izvršavanje algoritma za automatsku parametrizaciju korišćen je *PID Online Autotuning.VI* (ugrađen u LabView) koji je konfigurisan za režim rada *Relay Feedback*. Ovaj algoritam direktno zadaje parametre PID regulatoru na FPGA kolu i kao ulazni parametar uzima vrednost izlaza PID ovog regulatora (*PIDout*) kao i promenu trenutne pozicije (*PV*: - koja je preslikana vrednost promenljive *Pozicija*). Automatska parametrizacija se pokreće pritiskom na dugme *Auto tuning*. Nakon završene parametrizacije proračunati parametri se nalaze u promenljivi *tuned PID gains*, iz koje se preko *if struktura 4.1*, ukoliko je dugme *Load PID gains* pritisnuto, prenose u polje sa

³⁴ DMA (eng. *Direct memory access*) - predstavlja karakteristiku računarskog sistema koja pomoću određenog hardverskog podsistema omogućava direktan pristup memoriji nezavisno od procesorske jedinice.

parametrima PID regulatora (*PID gains*). Na izlazu bloka za automatsku parametrizaciju (*tuned PID gains*) dobijaju se parametri: K_P , T_I i T_D a u PID regulator se unose parametri K_P , K_I i K_D . Tokom prenosa parametara potrebno je koristiti jednačine (42) i (43) za proračun K_I i K_D na osnovu dobijenih vrednosti proporcionalnog faktor K_P i vremena T_I i T_D , kao i periodu rada PID regulatora (T_S). K_P se po jednačini (41) može povećati ili smanjiti menjajući faktor K_{Pscale} (inicijalna vrednost ovog faktora je 1).

$$K_P = K_P \cdot K_{Pscale} \quad (41)$$

$$K_I = \frac{K_P \cdot T_S}{T_I \cdot 60} \quad (42)$$

$$K_D = \frac{K_P \cdot T_D \cdot 60}{T_S} \quad (43)$$

Sve *while* petlje se završavaju nakon aktiviranja tastera *stop* nakon čega se prelazi na *korak III* i završava program kako na FPGA kolu tako i na RT kontroleru.

Program upravljačkog sistema na FPGA kolu

Glavni deo upravljačkog sistema zasnovanog na FPGA tehnologiji, razvijenog u sklopu ove disertacije, predstavlja program (*Slika 64*) koji se izvršava na FPGA kolu razvojnog sistema *LabVIEW RIO Evaluation Kit*. Program se sastoji iz trinaest *while* petlji od kojih se dvanaest simultano (paralelno) izvršavaju. Program je pomoću strukture sekvenci (*Flat Sequence Structure*) podeljen na dva korak. Nakon pokretanja FPGA kola program se nalazi u *koraku I* u kome ostaje sve dok se pomoću dugmeta *stop* ne zaustavi rad upravljačke jedinice, kada prelazi u *korak II*. U drugom koraku se izvršava *while* petlja 13, u kojoj se na izlaz upravljačke jedinice prosleđuje signal za vraćanje pokretnog dela aktuatora u nultu poziciju u kojoj može da ostane nakon isključivanja napajanja. Detaljan prikaz blokova svih delova programa dat je u *Prilogu 1*.

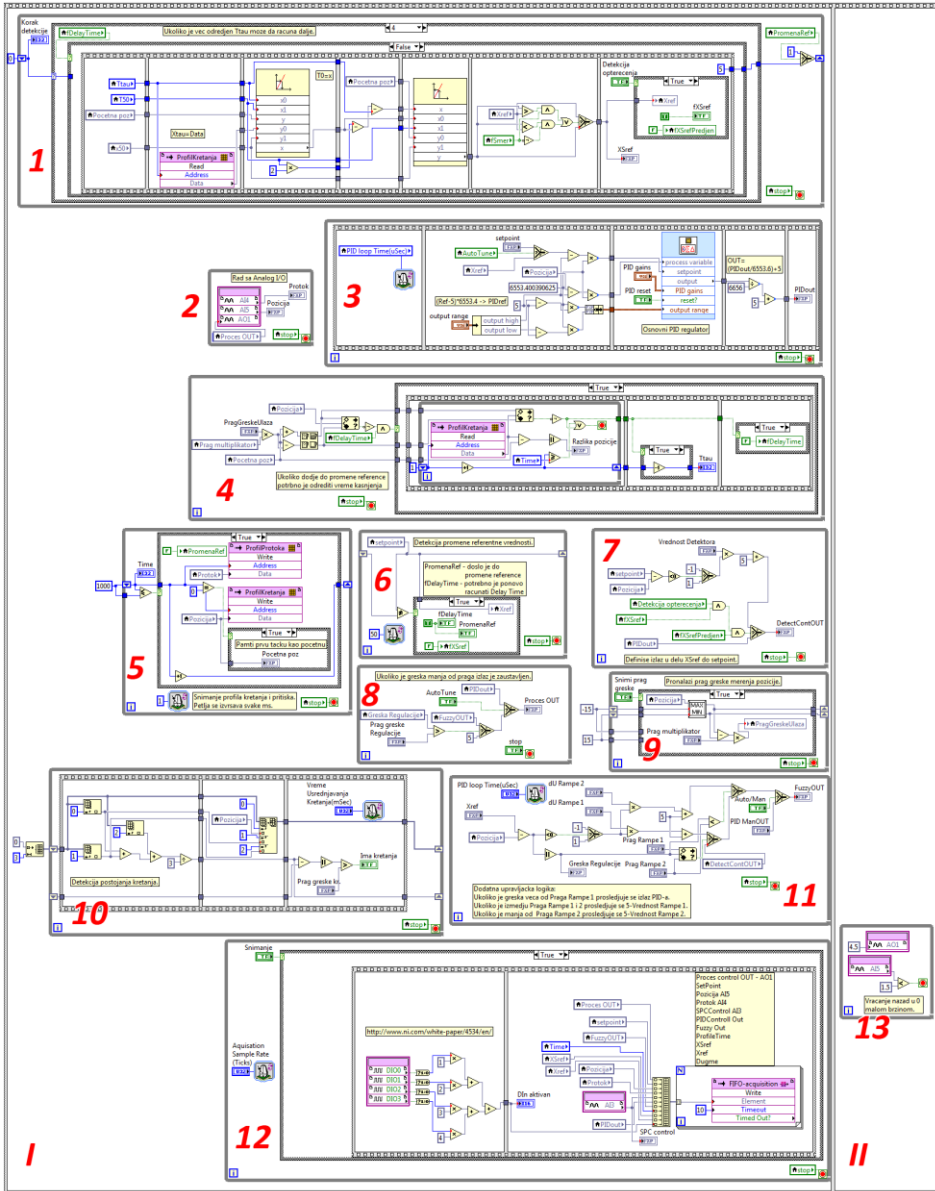
Unutar programa na FPGA kolu (*Slika 64*) petlje se mogu kategorisati u tri osnovne kategorije:

- petlje za rad sa ulaznim i izlaznim signalima (2, 7, 9),
- upravljačke petlje (1, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 10, 11, 13),
- petlje za akviziciju (5, 12).

Kao što se iz kategorizacije vidi, određene petlje su uvrštene u dve kategorije pa se i njihova funkcionalnost treba posmatrati na taj način. Sve petlje su *while*

petlje koje se nakon pokretanja izvršavaju kao beskonačna petlja, sve do trenutka kada se pritiskom na dugme *stop* njihovo izvršavanje zaustavi. *Petlje 1, 4, 5, 6, 7 i 10* pripadaju algoritmu za prepoznavanje opterećenja i detaljno su opisani u *Poglavlju 3.2.2*.

Glavni upravljački algoritam je baziran na pozicionom PID regulatoru kao osnovni regulator sa dodatnom Fazi upravljačkom logikom, koja se po želji može uključiti ili isključiti, i koja modifikuje izlazni upravljački signal PID regulatora na osnovu trenutne veličine greške (razlika zadate i trenutne pozicije). Pragovi odlučivanja su fiksni i određuju se eksperimentalno u zavisnosti od statičkog trenja sistema. Za mani prag uzeta je minimalna vrednost upravljačkog napona za koju se dobija kretanje a za veći prag duplo veća vrednost.



Slika 64. Program upravljačkog sistema na FPGA kolu (Block Diagram).

PID regulator se nalazi unutar *while* petlje 3, čiji period izvršavanja se podešava pomoću parametra *PID loop Time*. *PID loop Time* predstavlja vreme T_s prilikom određivanja parametara PID regulatora po jednačinama (42) i (43). Za PID regulator korišćen je blok *PID (FPGA) Express.vi* koji je ugrađen u LabView okruženje unutar FPGA dodatka. Blok radi sa 8.16 aritmetikom fiksne tačke (eng. *Fixed Point Arithmetic*) tj. opseg korišćenih vrednosti u regulatoru je od -32768

do 32765 sa korakom od 256. Signali sa kojima upravljački sistem treba da radi su u opsegu od 0 do 10 V tako da su ulazni signali pre ulaska u PID blok preskalirani po jednačini (44) (gde je S_{ul} signal iz opsega brojeva 0-10 a S_{PIDul} signal iz opsega korišćenih vrednosti regulatora), a izlazni signal PID bloka preskaliran po jednačini (45) (gde je S_{izl} signal iz opsega 0-10 a S_{PIDizl} signal iz opsega regulatora). Blok poseduje parametar *output range* kojim se podešava izlazni opseg, ali ovaj parametar samo ograničava vrednost izlaza a ne radi i preskaliranje, što dovodi do velike greške regulacije, u konkretnom slučaju do regulacije tipa *uključeno / isključeno* pa se ne može koristiti samo parametar *output range*.

$$S_{PIDul} = (S_{ul} - 5) \cdot 6553,4 \quad (44)$$

$$S_{izl} = \frac{S_{PIDizl}}{6553,6} + 5 \quad (45)$$

Upravljanje se u cilju smanjivanja oscilacija oko referentne tačke, koje se javlja prilikom većih brzina kretanja (usled inercije i stišljivosti vazduha), modifikuje pomoću dodatnog algoritma na bazi Fazi logike, koja uvodi fiksni upravljački signal u delu kretanja, kada se greška pozicije smanji na određeni nivo, da bi se završni deo kretanja odvijalo u dodatno kontrolisanim uslovima. Ovaj deo upravljanja se izvršava unutar *petlje 11* i aktivira se preko korisničkog interfejsa preko dugmeta *Ukljuci prag* (Slika 62, polje 3). Kao parametar regulatora definisani su dva praga (*Prag Rampe 1* i *2*) i dva upravljačka napona (*dU Rampe 1* i *2*). Ovi pragovi su fiksni i određuju se eksperimentalno u zavisnosti od statičkog trenja sistema i veličine oscilacija. Za upravljački signal *dU Rampe 2* uzeta je minimalna vrednost upravljačkog napona za koju se dobija kretanje pokretnog dela aktuatora a za signal *dU Rampe 1* duplo veća vrednost. Za *Prag Rampe 1* uzeto je 25 puta veća vrednost od praga greške a za *Prag Rampe 2* polovina praga *Prag Rampe 1*. Ukoliko je Fazi algoritam isključen za vrednosti pragova postavlja se vrednost 0.

Fazi logika je definisana sledećim izrazima:

- Ukoliko je greška veća od *Praga Rampe 1* prosleđuje se izlaz PID regulatora.
- Ukoliko je greška između *Praga Rampe 1* i *Praga Rampe 2* izlaz je:
 $Izlaz = 5 \pm dU Rampe 1.$
- Ukoliko je manja od *Praga Rampe 2* izlaz je:
 $Izlaz = 5 \pm dU Rampe 2.$

Za upravljački signal od 5 V proporcionalni ventil je isključen, za veće napone se kretanje aktuatora odvija u smeru porasta koordinata, a za manje vrednosti napona u suprotnom smeru. Ako je zadato kretanje u pozitivnom smeru uzima se napon 5 V plus izabrani upravljački napon, a u suprotnom 5 V minus izabrani upravljački napon. U *petlji 11* definisan je i prag greške (*Prag greske*) za koju se smatra da je pozicija postignuta i na izlaz upravljačkog sistema se postavlja konstantna vrednost od 5 V (proporcionalni ventil isključen, tj. protok minimalan). Takođe, u ovoj petlji se vrši i provera da li je upravljački sistem uključen u automatski režim (aktivirano dugme *Auto/Man*), kada se na izlaz prosleđuje izlaz regulatora, ili je u manualnom režimu rada kada se na izlaz prosleđuje zadati napon iz polja *PID ManOUT*. Vreme izvršavanja *petlje 11* je identično kao i *petlje 3* (PID regulator) i podešava se pomoću parametra *PID loop time*.

Pored navedenih upravljačkih petlji postoji posebna petlja za rad sa fizičkim analognim ulazima i izlazima (*petlja 2*) čiji je zadatak postavljanje očitane vrednosti o poziciji u promenljivoj *Pozicija*, vrednost trenutnog protoka vazduha u promenljivoj *Protok* i postavljanja izlazne upravljačke veličine iz promenljive *Proces OUT* na analogni izlaz.

Zadatak *petlje 8* je da na osnovu veličine trenutne greške u poziciji odluči da li je neophodno dalje upravljanje ili ne. Ukoliko je greška manja od zadate granice greške izlaz je isključen (postavlja se 5 V) a ukoliko je greška veća prosleđuje se izlazni signal regulatora.

Petlja 9 je predviđena za automatsku detekciju greške merenja (*PragGreskeUlaza*), tj. grešku A/D konverzije signala dovedenih na analogni ulaz uređaja. Snimanje praga se pokreće uključivanjem dugmeta *Snimi prag greske*. U sklopu ove petlje nalazi se i podprogram *maxmin.vi* koji služi za detekciju maksimalne i minimalne vrednosti tokom perioda snimanja praga greške, a greška (*PragGreskeUlaza*) se računa kao razlika maksimalne i minimalne vrednosti. Ovaj parametar, koji se kasnije koristi u upravljačkim petljama, se može proporcionalno povećati pomoću faktora *Prag multiplikator*.

Petlja 12 je predviđena za akviziciju i prenos trenutnih vrednosti signala na RT kontroler odakle se prikazuje korisniku. Ovaj deo programa je izrađen sa ciljem da se omogući merenje rada ovog i ostalih ispitivanih upravljačkih sistema i korišćena je u eksperimentalnom delu istraživanja. Obezbeđena je mogućnost akvizicije stanja 4 digitalna ulazna signala i 10 analognih veličina. Za skladištenje podataka tokom akvizicije korišćen je FIFO memorijski registar veličine 10000

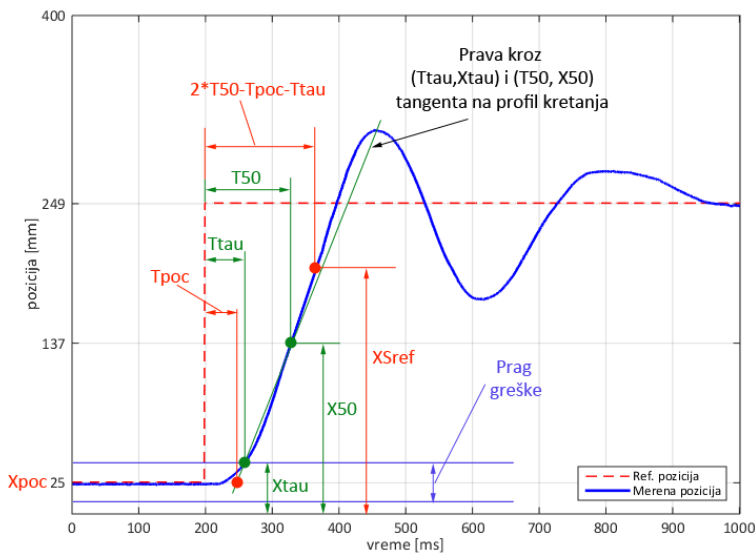
čelija, a prenos podatke na RT kontroler upravljačkog sistema se obavlja posredstvom DMA transfera. Perioda akvizicije podešava se pomoću parametra *Acquisition Sample Rate*.

3.2.2 Algoritam za prepoznavanje opterećenja

Tokom rada aktuatora u automatizovanim sistemima često se dešava da se menja opterećenost aktuatora u odnosu na predviđeno opterećenje za koju je upravljački sistem aktuatora konfigurisan. U slučaju rada na velikim brzinama ovo dovodi do većih oscilacija od predviđenog (veće amplitude preskoka pozicije) kao i do produžavanja vremena potrebnog za dostizanje postavljene referentne pozicije.

Algoritam za prepoznavanje opterećenja je zamišljen kao dodatak na inače korišćen upravljački algoritam. Rad ovog algoritma je koncipiran tako da modifikuje prvobitno zadatu referentnu vrednost na taj način, da kada se uzme u obzir kašnjenje trenutnog sistema (trenutno opterećenog aktuatora) klizač aktuatora zaustavi na pravoj poziciji, tj. da preskok pozicije bude minimalno moguć.

Analizirajući rezultate istraživanja uticaja promene opterećenosti aktuatora na profil promene pozicije kretanja (*Poglavlja 3.3.3 i 4.3*), ustanovljeno je da bi model računanja prikazan na *Slici 65*, bio prihvatljiv za određivanja međureferentne vrednosti.



Slika 65. Način određivanja međureferentne pozicije tokom upravljanja.

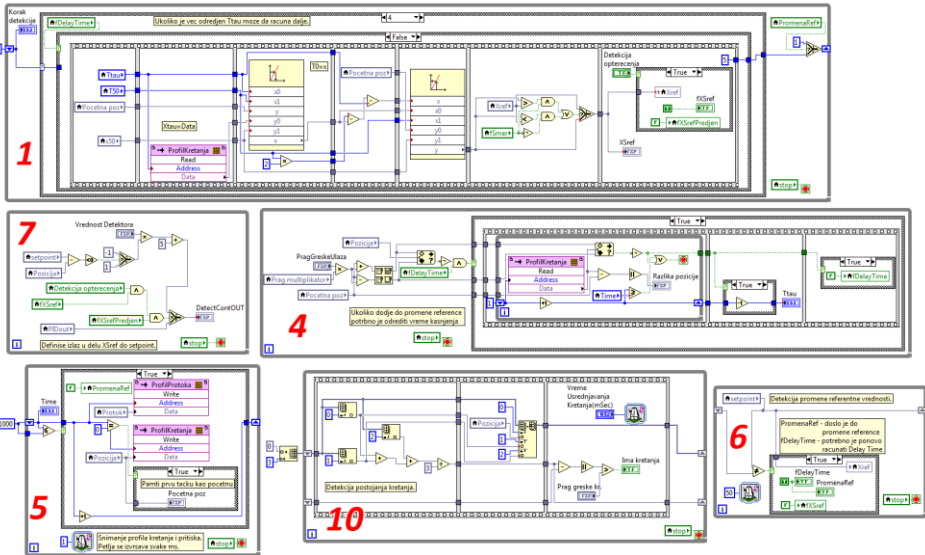
Cilj je da se odredi međureferentna tačka (X_{Sref}) koja je u odnosu na zadatu referentnu vrednost udaljena toliko, da kada se uzme u obzir kašnjenje sistema, pokretni klizač aktuatora zaustavi na zadatoj referentnoj poziciji. Određivanje X_{Sref} treba da se dešava u realnom vremenu, tj. za vreme trenutnog kretanja, tako da se ova tačka treba odrediti još u prvoj polovini kretanja. Analizom snimljenih profila tokom eksperimenta koji je rađen da se utvrdi uticaj promene opterećenosti aktuatora na profil promene pozicije kretanja, utvrđeno je da deo krive, kada se aktuator kreće maksimalnom brzinom, može aproksimirati sa pravom koja bi se provukla kroz tačke (T_{50}, X_{50}) i (T_{tau}, X_{tau}). X_{50} je pozicija koja se nalazi na polovini puta od početne tačke do zadate referentne tačke, a X_{tau} je tačka koja se nalazi na krivi kretanja koja je udaljena u odnosu na početnu tačku za vrednost dozvoljene greške regulacije (minimalna greška za koju se smatra da je pozicija dostignuta). Nakon toga se pomoću jednačine prave kroz ove dve tačke (50 i tau) traže koordinate tačke preseka sa početnom pozicijom (X_{poc}) iz koje se određuje vremenski trenutak T_{poc} tj. aproksimirano vreme kašnjenja sistema. Nakon toga se na pravi povučenoj kroz tačke (T_{poc}, X_{poc}) i (T_{50}, X_{50}) određuje tačka (T_{Sref}, X_{Sref}), ako se zna T_{Sref} ($T_{Sref} = 2 \cdot T_{50} - T_{poc} - T_{tau}$) a X_{Sref} se računa pomoću jednačine prave i predstavljaće međureferentnu tačku.

Algoritam za detekciju opterećenja (*Slika 66*) je realizovan u sklopu upravljačkog programa koji se izvršava na FPGA kolu (*Slika 64*). Za njegov rad zadužene su *while* petlje 1, 4, 5, 6, 7 i 10 koje rade nezavisno, ali su sinhronizovani preko lokalnih promenljivih. Rad algoritma se pokreće zadavanjem nove referentne vrednosti, a zadaci su podeljeni među pomenutim petljama.

Petlja 6 vrši detekciju promene referentne pozicije na osnovu stare vrednosti reference iz prethodnog ciklusa i nove zadate vrednosti. Nakon detekcije da je došlo do promene reference, referentna vrednost se učitava u promenljivu $Xref$ (na osnovu koje glavni regulacioni algoritam vrši upravljanje) i postavljaju se flegovi $fDelayTime$ i $PromenaRef$ na osnovu kojih ostale petlje znaju da je došlo do promene reference i da je potrebno proračunati nove parametre kretanja, i na kraju se poništava fleg $fXSref$.

Nakon što se aktivirao fleg $PromenaRef$, *while* petlja 5 reinicijalizuje promenljivu $Time$ koja prati proteklo vreme, od zadavanja nove referentne pozicije, i počinje da pamti vrednost trenutne pozicije i trenutnog protoka na svakih 1 ms, formirajući na taj način profil kretanja i profil potrošnje vazduha.

Profil potrošnje vazduha nije korišćen u upravljačkom algoritmu, ona je snimana samo radi upoređivanja tokom analiza profila kretanja različito opterećenog aktuatora. Veličina memorijskog bloka je 1000 vrednosti po promenljivoj tako da se može snimiti kretanje u prvoj sekundi. Za rad algoritma za detekciju opterećenja, potrebno je da se snime tačke do vrednosti X_{50} .



Slika 66. Upravljačke petlje algoritma za detekciju opterećenja.

Nakon što je aktuator započeo kretanjem i trenutna pozicija je van praga greške, u odnosu na početnu poziciju koja je definisana promenljivom *PragGreskeUlaza*, i ukoliko je fleg *fDelayTime* aktivan, zadatak *petlje 4* je da iz promenljive sa nizom pozicija *ProfilKretanja* nađe vremenski trenutak T_{tau} . Nakon određivanja vrednosti promenljive *Ttau* poništava se fleg *fDelayTime* i ova petlja više nema zadatak u ovom kretanju.

Petlja 10 ima zadatak detekcije postojanja kretanja. Ukoliko postoji kretanje, tj. pozicija se menja iz ciklusa do ciklusa, uključen je fleg *Ima kretanja*, a ukoliko aktuator stoji ovaj fleg je ugašen. Kretanje postoji ukoliko je promena pozicije tokom vremena, definisanom promenljivom *Vreme Usrednjavanja Kretanja*, veća od vrednosti promenljive *Prag greske kr*.

Glavni deo algoritma čini *petlja 1* u kojoj su definisani koraci algoritma. Algoritam je podeljen u 6 pravih koraka, korišćenjem *case* strukture, a ukupno ima 7 korak (od 0 do 6). Do pojave nove referentne vrednosti i aktiviranja flega *PromenaRef* algoritam se nalazi u koraku 0, nakon čega prelazi u korak 1. U

koraku 1 se čeka da prođe prvih 5 ms vremena, tj. da i sve ostale petlje počnu da rade. Ovde zapravo nije potrebno čekati toliko dugo, ali zbog kašnjenja sistema koja je svakako veća od 5 ms uzeta je ova vrednost. Nakon 5 ms se prelazi na sledeći korak (2) u kome se određuje vrednost promenljive $X50$ (polovina putanje kretanja) i smer kretanja. Ukoliko je kretanje u smeru porasta pozicije $fSmer=1$ a u suprotnom je $fSmer=0$. U sledećem koraku (3) se određuje vreme $T50$ (vremenski trenutak kada je tačka u profilu kretanja najbliža vrednosti $X50$), odakle se ne ide dalje dok aktuator ne prođe polovinu opsega kretanja i ne nađe se vrednost za $T50$. U koraku 4 se na osnovu prave kroz tačke ($Ttau, Xtau$) i ($T50, X50$) odredi vreme $Tpoc$ ukoliko se zna vrednost početne pozicije koja je sačuvana u promenljivoj $Xpoc$. Nakon određivanja kašnjenja sistema $Tpoc$, traži se vrednost promenljive $XSref$ koja se nalazi na pravi postavljenoj kroz tačke ($Tpoc, Xpoc$) i ($T50, X50$) za vremenski trenutak $2*T50-Tpoc-Ttau$. Ako je računom dobijena vrednost poziciono bliža nego vrednost $Xref$ (zadate referentne pozicije) u tom slučaju se u $XSref$ učitava proračunata pozicija a u suprotnom vrednost zadate pozicije (ovo se dešava ako aproksimacija da proračunatu vrednost koja je dalja od zadate, koju ne bi trebalo uzeti u obzir). Do ovog momenta algoritam radi svakako, bez obzira da li je uključena ili ne. Ako je algoritam za detekciju uključen (aktivirano dugme *Detekcija opterećenja*) vrednost $XSref$ se učitava u promenljivu $Xref$ i postavlja se fleg $fXSref$, nakon čega se prelazi na sledeći korak. Ukoliko dugme *Detekcija opterećenja* nije aktivirano izostavlja se promena vrednosti $Xref$. U koraku 5 se čeka da pozicija dođe do vrednosti $XSref$ i da se na trenutak zaustavi kretanje (deaktivira fleg *Ima kretanja*), nakon čega se prelazi na korak 6 u kome se u promenljivu $Xref$ učitava zapravo zadata koordinata iz promenljive *setpoint*, i rad algoritma se završava a aktuator nastavlja da se kreće usporenije prema zapravo zadatoj referentnoj poziciji.

Zadatak *petlje 7* je da u završnoj fazi kretanja (od pozicije $XSref$ do pozicije *setpoint*) upravljački signal formira na osnovu zadate vrednosti upravljačkog signala koja je data u promenljivoj *Vrednost Detektora*.

Tokom testiranja algoritma, pokazan je pozitivan uticaj na smanjivanje amplitude preskoka pozicije, za šta je i projektovan. Ograničenje algoritma je što se ne može primeniti za kratke dužine kretanja, kod kojih je deo kretanja na maksimalnoj brzini veoma kratak ili uopšte ne postoji, jer aproksimacija krive kretanja sa pravom mnogo odstupa od stvarnog profila kretanja i dobija se međureferentna tačka koja je dalja od prave referentne tačke, tako da algoritam nema uticaja na upravljanje.

3.2.3 Algoritam za prepoznavanje udara u prepreku na nepoznatoj poziciji

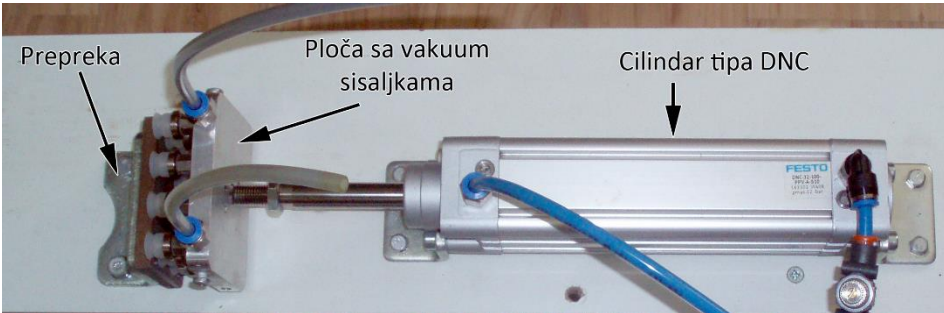
Tokom kretanja pokretnog dela aktuatora, ili tereta koji se prevozi, u bilo kom trenutku može doći do neželjenog udara u prepreku čija pozicija nije unapred poznata. Na primer, putanje kretanja aktuatora se preklapaju i u slučaju nepravilnog rada upravljačke jedinice koja sinhronizuje rad svih aktuatora, one počinju haotično da se kreću i tom prilikom može doći do sudara. U ovom primeru pozicije prekrštanja mogu biti poznate ali ni ne moraju. Drugi primer je kada operater (čovek) slučajno uđe u radni prostor mašine. Čest primer u proizvodnim sistemima je da se horizontalni transport dešava u istoj ravni kao i kretanje radnika. U ovom slučaju se putanje kretanja transportera obeležavaju iscrtanim trakama po podu sa jasnim obaveštenjem da je u toj zoni zabranjeno kretanje. Naravno bez obzira na zabranu kretanja u toj oblasti, ne bi smelo da se dogodi da mašina povredi čoveka (radnika), ili da polomi drugu mašinu koja mu se nađe na putu, te je iz tog razloga neophodno predvideti niz zaštitnih mehanizama, koji bi sprečili ili ublažili udar u prepreku. U oba navedena slučaja neophodno je detektovati da je do udara došlo i zaustaviti kretanje aktuatora.

S druge strane, tokom rada aktuatora može doći do planiranog udara u prepreku koja se nalazi na nepoznatoj poziciji. U ovom slučaju cilj kretanja je da određena hvataljka, alat ili nešto treće, što je montiran na klizač aktuatora, dođe do određene prepreke čiji položaj nije unapred poznat. U ovom slučaju se ne može pričati o neželjenom udaru, ali svejedno neophodno je detektovati udar i adekvatno reagovati.

Tokom ovog dela istraživanja urađen je niz eksperimenata (koji su detaljno opisani u *Poglavljima 3.3.7 i 4.7*) i čiji je cilj bio da se proverí mogućnost detekcije udara u prepreku na nepoznatoj poziciji koji se može desiti tokom hoda pneumatskog linearnog aktuatora, cilindra dvosmernog dejstva, snimanjem i analizom promene pritisaka u komorama cilindra dvosmernog dejstva. Testiran je rad cilindar tipa *DNC* (Festo) upravljaniog preko razvodnika novije generacije sa odzivom manjim od 10 ms tipa *CPE10* (Festo). Na klipnjaču cilindra bila je montirana ploča sa vakuum sisaljka (Slika 67).

Uvodni eksperimenti (detaljno u *Poglavljima 3.3.7 i 4.7*) su ukazali na mogućnost detekcije udara u prepreku, analizom promene pritiska u komori cilindra koja se trenutno napaja vazduhom, pa čak i promenom pritiska u komori koja se odzračuje ukoliko se cilindar pomera sa većim brzinama, jer se u trenutku

udara dešava nagla promena u gradijentu promene pritiska koja se može detektovati u vrlo kratkom vremenu.



Slika 67. Eksperimentalna konfiguracija za detekciju udara tokom hoda aktuatora.

Na osnovu detaljnih analiza i testiranja utvrđeno je da je dovoljno uzeti 3 do 5 uzastopnih merenih vrednosti pritiska, sa odabiranjem na 1 ms, da bi se sa sigurnošću detektovala nagla promena u gradijentu promene pritiska za koju se može pretpostaviti da je posledica udara u prepreku. Naravno ovo nije apsolutno sigurna metoda za detekciju prepreke, ali pošto se radi o zaštitnoj funkciji, bolje da se dobije lažno pozitivan signal nego da se ne detektuje prepreka. Naravno povećanjem broja odabiraka, koji se razmatraju, i mogućnost greške se smanjuje.

Algoritam za detekciju prepreke (Slika 68) se sastoji iz dve upravljačke petlje. Zadatak prve je da detektuje u kojoj fazi kretanja se nalazi aktuator: stoji a pritisak raste; došlo je do kretanja i pritisak u komori opada; desio se udar u prepreku i pritisak naglo raste. Zadatak druge petlje je da komunicira sa drugim delom upravljačkog programa koji određuje način rada aktuatora u datoj aplikaciji. Vrlo često ovaj deo može biti u sklopu nekog drugog programa.

Opisani algoritam za detekciju udara u prepreku tokom kretanja aktuatora implementiran je u jedan od IML robota razvijenih na Fakultetu tehničkih nauka, čiji je zadatak opsluživanje etiketama mašina za brizganje plastičnih ambalaža proizvedenih IML tehnologijom³⁵. Rezultati ovog istraživanja objavljeni su u radu [109] publikovanog u časopisu *IJST, Transactions of Mechanical Engineering* 2011. godine.

³⁵ IML tehnologija (eng. *In-Mould Labeling* - IML) je tehnologija etiketiranja unutar kalupa u trenutku brizganja proizvoda. Na ovaj način se dobija ambalaža sa etiketama u boji visoke rezolucije otporne na spoljašnje uticaje (vlaga, toplota, žuljanje, itd.).

Petlja 1 – izvršava se svake 1 ms	Petlja 2 – izvršava se ciklično
<pre> % pamćenje prethodna dva odabirka P[0]=P[1]; P[1]=P[2]; % uzimanje sledeceg odabirka % smer=1 izvlacenje % smer=0 uvlacenje if smer==1 then P[2]=P1; % komora za izvl. else P[0]=P2 % komora za uvl. end_if; % ukoliko pritisak opada % savladano staticko trenje % pocelo je kretanje if (P[1]>P[2]>P[3]) then Kretanje=1; end_if; % ukoliko pritisak raste % udario je u prepreku if (P[1]<P[2]<P[3]) then Prepreka=1; end_if; </pre>	<pre> % inicijalno: korak=1; if Y1 and NOT Y2 then smer=1; else smer=0 end_if; case (korak) 1: % pokretanje cilindra if START then Y1=1; Y2=0; Kretanje=0; end_if; if Kretanje==1 then korak=2; Prepreka=0; else if; 2: % hod cilindra % povratni hod u slucaju % prepreke if Prepreka then Y1=!Y1; % invert. stanja Y2=!Y2; korak=100;% korak za gresku else_if; if Kraj_hoda then Y1=0; Y2=0; korak=3; end_if; 3: % sledeci redovni korak.... 100: % greska % ovde se definise radnja % u slucaju udara u prepreku end case; </pre>

Slika 68. Pseudo kod algoritma za detekciju prepreke.

3.3 Eksperimentalna istraživanja

3.3.1 Razlike u trajanju operacija na RT procesoru i FPGA kolu

Na početku istraživanja opravdanosti korišćenja FPGA kola, koji je planiran da se koristi za razvoj upravljačkog sistema za linearni aktuator, urađen je uvodni eksperiment koji je za cilj imao dobijanje jasnije slike o razlikama u vremenu potrebnog za obradu istih operacija koje se izvršavaju na procesoru, odnosno na FPGA kolu. Ovi podaci bi trebali da potvrde pretpostavljenu nadmoć u brzini rada FPGA tehnologije u odnosu na procesorsku tehnologiju. U eksperimentu je izvršeno merenje vremena, odnosno broja taktova, potrebno za izvršavanje

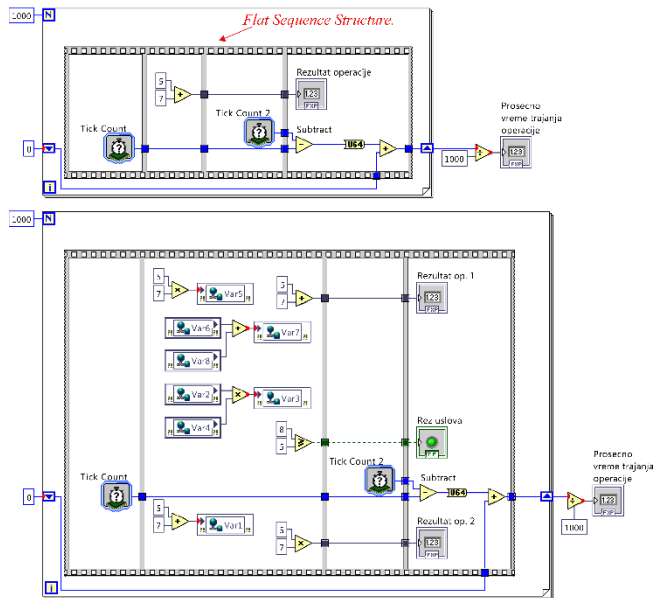
osnovnih aritmetičkih i logičkih operacija na FPGA kolu, odnosno procesu koji radi u realnom vremenu (eng. *Real Time* (RT)). Obe jedinice se nalaze na *LabVIEW RIO Evaluation Kit* razvojnom sistemu. U eksperimentu upoređen je rad 32-bitnog procesora *MPC5125YVN400*, proizvođača Freescale Semiconductor, koji radi na radnom taktu od 400 MHz, i FPGA kola *XC6SLX45*, proizvođača Xilinx iz serije Spartan-6 LX45 koji radi na radnom taktu od 40 MHz.

U cilju dobijanja uporednih podataka merena je razlika potrebnog vremena odnosno broja taktova za izvršavanje osnovnih aritmetičkih i logičkih operacija na FPGA kolu odnosno RT procesoru. Tokom testova proveravane su ove operacije, jer su one bazični delovi svakog upravljačkog algoritma. Tokom eksperimenta merenja su urađena za sledeće operacije:

1. sabiranje dve konstante tipa *fixed point*,
2. množenje dve konstante tipa *fixed point*,
3. sabiranje dve konstante tipa *fixed point* u promenljivu istog tipa,
4. množenje dve konstante tipa *fixed point* u promenljivu istog tipa,
5. sabiranje dve promenljive tipa *fixed point* u promenljivu istog tipa,
6. množenje dve promenljive tipa *fixed point* u promenljivu istog tipa,
7. ispitivanje logičke relacije: $konst_1 \geq konst_2$,

Da bi se dobilo tačno vreme i broj taktova potrebno za izvršavanje testiranih operacija korišćena su dva bloka *Tick Counter* (Slika 69). Sa prvim je pročitano trenutno vreme (a u slučaju FPGA kola trenutni takt) pre nego što je pozvana testirana operacija, a sa drugim je očitano vreme (trenutni takt) nakon izvršene operacije, i na osnovu razlike ta dva vremena (takta) dobijeno je stvarno vreme (broj taktova) potrebno za izvršenje operacije. Da bi se dobilo što tačnije vreme, ista procedura je ponovljena 1000 puta uz pomoć *for* petlje i na kraju je uzeta aritmetička sredina merenja. *Tick Counter* blok je za merenje vremena na RT procesoru bio podešen na mikro sekunde (μs) a za vreme merenja broja taktova na FPGA kolu na taktove (*ticks*). Da bi se kontrolisao tok izvršavanja operacija korišćena je struktura za kontrolu programa *Flat Sequence Structure* (Slika 69). Na *Slici 69* prikazani su primeri blok dijagrama za izvršavanje operacije pojedinačno (Slika 69 gore) i u paraleli (Slika 69 dole).

Prilikom sastavljanja blok dijagrama za paralelno izvršavanje operacija vodilo se računa o tome da se u svakoj operaciji koristi druga promenljiva kako ne bi došlo do narušavanja paralelizma zbog nemogućnosti rada više istovremenih operacija sa jednom promenljivom.



Slika 69. Primeri blok dijagrama za izvršavanje operacija.

Da bi uslovi bili isti za sva merenja iskorišćena je struktura za kontrolu toka programa *Flat Sequence Structure* da bi se sve varijante potrebne za merenje mogle smestiti u kod jedna posle druge. Prvo je vršeno merenje potrebnog vremena za izvršenje operacija pojedinačno, nakon toga merenje broja taktova za pojedinačne operacije, posle čega sve isto ali za paralelno izvršavanje operacija. Ista sekvenca je kompajlirana i izvršena i na RT kontroleru i na FPGA kolu, sa jednom malom izmenom, da u slučaju rada na FPGA kolu nije bila korišćena sistemska RAM memorija za smeštanje promenljive u memoriju, nego memorija na samom FPGA čipu, jer RAM memorija nije direktno dostupna za FPGA kolo.

3.3.2 Rad proporcionalnog razvodnika MPYE

Eksperiment u kome je izvršeno snimanje prenosne karakteristike proporcionalnog razvodnog ventila, korišćenog za upravljanje protokom kroz pneumatski linearni aktuator, je izveden da bi se dobila jasna slika o stvarnom protoku kroz ventil u pneumatskoj konfiguraciji u koju je spojen. Prenosna karakteristika ventila snimljena je pomoću *LabVIEW RIO Evaluation Kit* razvojnog sistema. Ventil je pobuđivan pomoću upravljačkog programa koji je realizovan za FPGA na razvojnom sistemu, koji je ujedno i vršio snimanje analognog strujnog signala senzora protoka (tip *SFAB*, Festo) sa kojim je meren protoka

vazduha kroz ventil. Program za snimanje prenosne karakteristike ventila, koji je realizovan za ovaj eksperiment u LabVIEW okruženju dat je u *Prilogu 2*.

Snimanje prenosne karakteristike ventila urađeno je pobuđivanjem ventila sa naponom od 0 do 10 V sa koracima od 0,1 V. Upravljački napon je povećavan svakih 50 ms i izvršeno je 30 uzastopnih snimanja.

3.3.3 Uticaj promene opterećenja na krivu kretanja pneumatskog aktuatora

Cilj ovog eksperimenta je analiza mogućnosti detekcije promene opterećenosti aktuatora na osnovu analize profila kretanja aktuatora. Tokom ovog eksperimenta urađeno je snimanje prenosne karakteristike (pozicije) tokom kretanja aktuatora sa teretom od početne pozicije (25 mm) do zadate pozicije (360 mm). Eksperiment je vršen na pneumatskom sistemu opisanom u *Poglavlju 3.3.3* a upravljanje proporcionalnim ventilom i akvizicija vrednosti merenja vršeno je pomoću *LabVIEW RIO Evaluation Kit* razvojnog sistema za koji je napisan program koji se izvršavao na FPGA kolu. Program je dat u *Prilogu 3*.

Tokom snimanja karakteristika aktuator je napajan sa punim protokom (upravljački signal 10 V) sve dok ne dođe do referentne pozicije nakon čega je dotok vazduha odmah prekinut (upravljački signal 0 V). Opterećenost aktuatora variran je od 0 kg do 7,5 kg sa koracima od 1,25 kg.

3.3.4 Uticaj promene opterećenja na krivu kretanja električnog linearnog aktuatora

Zadatak ovog eksperimenta je provera pretpostavke, da se promenom opterećenosti aktuatora (promenom aktivnog tereta koji se prenosi) menja i način kretanja klizača električnog linearnog aktuatora, na osnovu koje se može detektovati trenutni teret koji se transportuje.

Eksperiment je rađen na linearnom električnom aktuatoru *STA2504S-053-S-03D* (Dunkermotoren), dužine hoda od 292 mm (aktivno 242 mm) koji je upravljan preko upravljačke jedinice *Xenus XTL-230-18-S* (Copley Controls). Eksperimentalna konfiguracija prikazana je na *Slici 70*. Teret, koji se tokom eksperimenta menjan, postavljan je na klizač sa vođicama čija platforma je kruto vezana sa pokretnom „reakcionom šipkom“ linearnog aktuatora. Testiranja su izvršena za 6 različitih konfiguracija parametara upravljačke jedinice. U *Tabeli 5* dati su parametri koji su korišćeni prilikom testiranja. Parametri regulatora su određeni pomoću ugrađenog algoritma za samo podešavanje (eng. *Auto tuning*).

Priklom pokretanja algoritma birani su samo tip pozicione petlje (*S Curve* ili *Trap*) i vrednost *Vff* parametra (*Best Settling* ili *Best Following*).

Tabela 5. Parametri konfiguracija upravljačke jedinice Xenus XTL za aktuator tipa STA2504.

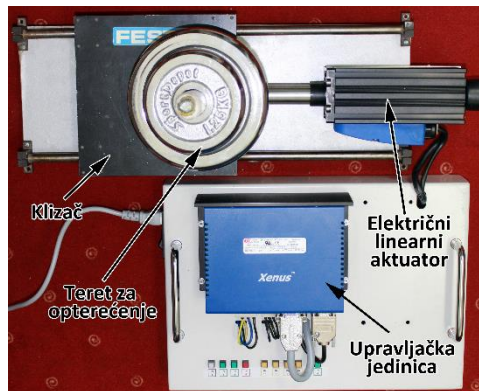
	Poziciona petlja				Brinska petlja			Strujna petlja			Opterećenje
	Tip	Pp	Vff	Aff	Bandwidth	Vp	Vi	Bandwidth	Cp	Ci	
1	S Curve	1250	16384	4096	50 Hz	464	232	1,3 kHz	625	241	0 kg
2	S Curve	1600	16384	4096	40 Hz	540	270	1,1 kHz	600	232	3,75 kg
3	TBS	1000	4915	1229	10 Hz	218	109	1 kHz	575	222	3,75 kg
4	TBF	1500	16384	4096	50 Hz	518	259	1,1 kHz	691	267	3,75 kg
5	TBS	1800	4915	1229	50 Hz	470	235	900 Hz	550	212	0 kg
6	TBF	1800	16384	4096	50 Hz	464	232	1,1 kHz	600	232	0 kg

TBS = Način kretanja: *Trap – Best Settling*

TBF = Način kretanja: *Trap – Best Following*

Tokom testiranja za sve kombinacije parametara (iz *Tabele 5*) opterećenje je varirano od 0 do 7,5 kg po koracima od 1,25 kg. Za konfiguracije 1 i 2 urađena su po tri seta snimanja pri različitim maksimalnim brzinama kretanja (uzete su brzine od 300, 500 i 1000 mm/s). Za konfiguracije od 3 do 6 testiranje je rađeno za maksimalnu brzinu kretanja od 1450 mm/s, i za svako opterećenje je snimljen odziv na odskočnu (eng. *step*) promenu referentne vrednosti, i na kontinualnu promenu referentne vrednosti po sinusnom signalu. U oba slučaja amplituda signala je bila ± 1000 impulsa, a perioda 1 Hz.

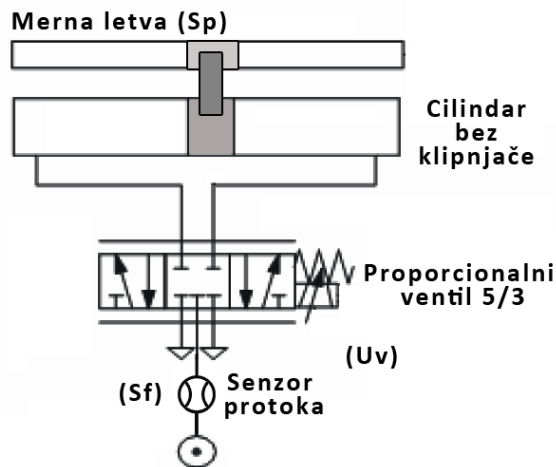
Tokom rada aktuatora praćeni su sledeći signali: *trenutna pozicija*, *struja motora*, i *upravljački signal*. Akviziciju ovih signala je vršila sama upravljačka jedinica sa periodom uzorkovanja od 2 ms.



Slika 70. Eksperimentalna konfiguracija za testiranje rada električnog linearnog aktuatora.

3.3.5 Rad upravljačkog sistema SPC11

U cilju analize rada jednog komercijalnog upravljačkog sistema, koji je namenjen za upravljanje linearnim pneumatskim aktuatorom, testiran je Soft Stop kontroler *SPC11*, proizvođača Festo, koji je preko proporcionalnog ventila tipa *MPYE* (Festo) povezan sa pneumatskim cilindrom bez klipnjače tipa *DGPL* (Festo) sa hodom od 600 mm (od kojih je 580 mm hoda dostupno u eksperimentalnoj konfiguraciji). Pozicija linearnog aktuatora je praćena pomoću otporničke merne letve tipa *MLO* (Festo), rezolucije 0,01 mm, koji je ujedno i senzor u povratnoj sprezi na osnovu čije informacije se vrši pozicioniranje pokretnog klizača. Pokretni klizač cilindra, koji je kruto vezan sa klipom cilindra, je direktno povezan sa mernom letvom (*Slika 71, Sp*). Za praćenje trenutnog protoka korišćen je analogni senzor protoka tipa *SFAB* (Festo) od 6-600 L/min (*Slika 71, Sf*). Pneumatska šema ovog sistema prikazana je na *Slici 71*. Ceo sistem je preko pneumatskih creva $\Phi 10$, priključen na regulisani i filtrirani izvor vazduha pod pritiskom od 600 kPa.



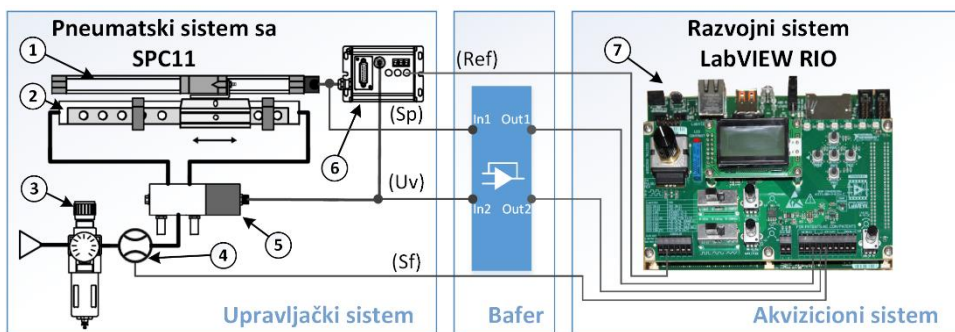
Slika 71. Pneumatska šema sistema za analizu upravljačkog sistema SPC11.
[Sp] - merna letva dužine 600 mm; cilindar bez klipnjače hoda 600 mm; [Uv] – proporcionalni ventil sa protokom do 450 L/min, [Sf] – analogni senzor protoka 6-600 L/min.

Sa mernom letvom (*Sp*) merena je apsolutna pozicije klizača cilindra. Izlaz merne letve povezan je na senzorski ulaz *SPC11* kontrolera. Izlazni analogni signal senzora je u opsegu od 0-10 V. Upravljački signal sa kontrolera povezan je na proporcionalni razvodni ventil preko kojeg se upravlja smerom i brzinom kretanja aktuatora. Analogni upravljački signal koji se dovodi na proporcionalni ventil je u opsegu od 0 do 10 V (0-5 V u jednom smeru, 5-10 V u drugom smeru).

Da bi se tokom rada mogla pratiti potrošnja celog sistema, na ulazni priključak vazduha pod pritiskom priključen je analogni protokomer (*Sf*). Protokomer na svom izlazu daje analogni strujni signal u rasponu od 4-20 mA, koji je linearno proporcionalan protoku vazduha.

Akvizicija praćenih promenljivih vršena je pomoću *LabVIEW RIO Evaluation Kit* razvojnog sistema. Praćene su analogne veličine kao što je: *zadata pozicija, trenutna pozicija, upravljački signal sa SPC11 i trenutni protok vazduha*. Sve praćene analogne veličine su priključene na 16-bitne analogne ulaze FPGA kola, a zadavana referentna pozicija je praćena preko digitalnih ulaza. Referentna pozicija se kod ovog upravljačkog sistema zadaje pomoću digitalnih ulaza, pa su ovi signali dovođeni i na akvizicioni sistem. Kako akvizicioni sistem ne bi ometao rad *SPC11* kontrolera tokom akvizicije analognih veličina (pozicija i upravljanje) između ova dva odvojena sistema redno je povezan jedinični pojačavač koji igra ulogu bafera (*Slika 72, bafer*). Akvizicija podataka je rađena u realnom vremenu na FPGA kolu koji je u sklopu *LabVIEW RIO Evaluation Kit* razvojnog sistema (*Slika 72, akvizicioni sistem*). Izmereni podaci skladišteni su u FIFO protočnom registru na FPGA, sa kojeg su preko *Real Time* procesora i *DMA* prenosa podataka preneti u *LabView* okruženje, odakle su sačuvani u excel³⁶ tabeli. Akvizicija merenih podataka rađena sa odabiranjem na svakih 1 ms za četiri kanala (referentna pozicija, pozicija, upravljanje i protok). Realizacija dela programa za akviziciju koji se izvršava na FPGA kolu i RT kontroleru opisan je u *Poglavlju 3.2.1*.

Na *Slici 72* prikazana je šema povezivanja upravljačkog kontrolera *SPC11* sa pneumatskim sistemom (*Slika 72, upravljački sistem*), kao i način povezivanja praćenih signala na *LabVIEW RIO Evaluation Kit* razvojnog sistema.



Slika 72. Šema povezivanja SPC11 sa pneumatskim sistemom i sa akvizicionim sistemom.
 [1] - merna letva; [2] - cilindar bez klipnjače; [3] - pripremljena grupa; [4] - senzor protoka; [5] - proporcionalni razvodni ventil; [6] - SPC11; [7] – sbRIO 9636.

³⁶ Microsoft Excell, deo paketa Microsoft Office 2010

Upravljačka jedinica *SPC11*, omogućava pozicioniranje u četiri unapred određene tačke (dve krajnje koji su sa fiksiranim limitom, i dve po želji). U eksperimentalnoj konfiguraciji odabrane su pozicije 25 mm (fiksna); 249 mm; 402 mm i 576 mm (fiksna). Da bi se upravljačka jedinica konfigurisala sa parametrima sistema, unose se parametri iz tabela koja su data u tehničkoj dokumentaciji [105]. Parametri zavise od povezanog pneumatskog sistema i menjaju se u zavisnosti od vrste pneumatskog aktuatora, dimenzija (dužina hoda, prečnik, način montaže), tipa proporcionalnog razvodnika, težine predviđanog tereta. Parametri koji su uneti u kontroler tokom eksperimenta prikazani su u *Tabeli 6* [105]. Testiranje upravljačke jedinice *SPC11* je urađeno prvo sa parametrima kontrolera za nominalno opterećenje od 2 kg, a posle i za nominalno opterećenje od 6 kg.

Tabela 6. Parametri upravljačke jedinice *SPC11*.

Parametar	za 2 kg	za 6 kg	Opis
A	16	19	pojačanje – utiče na ubrzanje
C	20	24	utiče na način kretanja prema zadatoj poziciji
S	12	12	parametar sistema – zavisi od konfiguracije priključenog upravljanog sistema
vreme [s]*	0,56	0,59	vremenska konstanta

* ne unosi se – kontroler proračunava

Na osnovu unetih parametara kontroler *SPC11* automatski vrši parametrizaciju svog regulatora. Potrebno je pokrenuti režim za obučavanje (*Teach mode*) nakon kog je upravljački sistem spreman za rad i testiranje. Upravljanje je zasnovano na adaptivnom PID regulatoru, tako da se najbolje performanse upravljačkog sistema mogu očekivati tek nakon više uzastopnih ponavljanja ciklusa pozicioniranja. Da bi se tokom ispitivanja obezbedilo dobijanje što relevantnijih merenja, nakon parametrizacije i obučavanja upravljačkog sistema, uključen je trening program čiji je zadatak da koriguje parametre sistema tokom njegovog realnog rada. Upravljačkom sistemu su preko digitalnih signala saopštavane sve moguće kombinacije pozicija u 100 iteracija. Da bi se obezbedilo zadavanje referentnih tačaka u tačno određenim vremenskim trenucima, i da bi zadavanje bilo jednolično, korišćen je programabilno logički kontroler *S7-1200* (Siemens), za koji je napisan kratak upravljački program (*Prilog 4*) čiji je zadatak da ponovi prelasku iz jedne u drugu zadatu tačku, po svim mogućim kombinacijama za dostupne četiri pozicije. Tokom trening režima prelazi između kombinacija ponovljeni su 100 puta, a tokom akvizicije rada sistema po 5 puta.

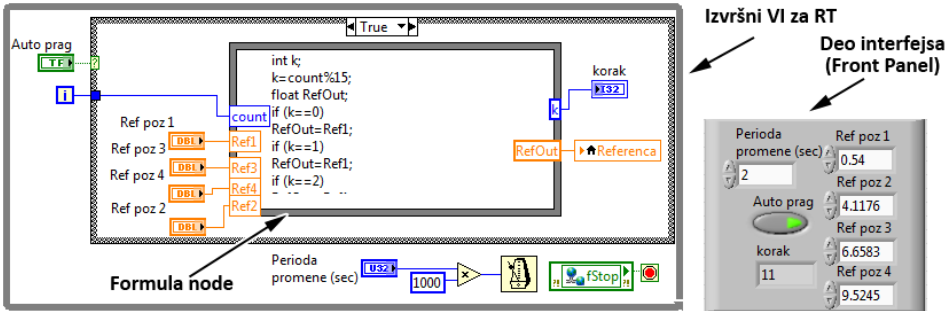
Tokom eksperimenta opterećenost aktuatora (teret koji se transportuje) je manjan u opsegu od 0 kg do 7,5 kg sa koracima od 1,25 kg, za obe konfiguracije upravljačke jedinice (prvo na 2 kg, a nakon toga na 6 kg).

3.3.6 Ispitivanje rada upravljačkog sistema realizovanog sa FPGA

Zadatak ovog eksperimenta je ispitivanje rada novog upravljačkog sistema razvijenog za FPGA kolo koje je u sklopu *LabVIEW RIO Evaluation Kit* razvojnog sistema. Testiranje je vršeno na istom pneumatskom sistemu kao i u slučaju upravljačkog sistema *SPC11*, samo što je kompletno upravljanje i akvizicija vršena pomoću *LabVIEW RIO Evaluation Kit* razvojnog sistema za koji je razvijen upravljački program opisan u *Poglavlju 3.2*. Korišćeni pneumatski sistem je detaljno opisan u eksperimentu koji je dat u *Poglavlju 3.3.5*.

Tokom eksperimentalnog testiranja upravljačkog sistema referentna pozicija je menjana po istim tačkama kao i kod eksperimenta sa upravljačkim sistemom *SPC11*, kako bi se dobijeni rezultati mogli uporediti. Urađeni su prelazi između pozicija 25 mm (fiksna); 249 mm; 402 mm i 576 mm (fiksna), po skoro svim kombinacijama sem prelaza sa 25 mm na 576 mm i obrnuto, jer je u prethodnom eksperimentu ustanovljeno da se zbog fiksnih krajnjih pozicija ne dobijaju realni vrednosti vremena dostizanja pozicija kao ni amplitude preskakanja pozicije.

Naizmenično zadavanje reference je izvedeno pomoću za ovu svrhu napisanog dela programa koji je u sklopu korisničkog interfejsa (*Slika 62, grupa III* kao i *Slika 63, petlja 1*) čije izvršavanje se odvija na RT kontroleru razvojnog sistema. *Slika 73* prikazuje izdvojeni deo programa upravljačke jedinice koja je zadužena za zadavanje reference, i koja radi kao posebna nezavisna *while petlja*. U programu je predviđena mogućnost zadavanja četiri različite tačke (*Ref poz 1 ... 4*) koje se periodično menjaju (*Perioda promene*) a redosled promena se definiše pomoću programskog koda koji je napisan u bloku *Formula node*. Detalji svih delova programa dati su u *Prilogu 1*.



Slika 73. Petlja za zadavanje referentnih pozicija tokom eksperimentalnog testiranja.

Akvizicija rada linearnog pneumatskog aktuatora upravljano pomoću novog upravljačkog sistema, urađen je za sva tri režima rada regulatora upravljačkog sistema uz promenu opterećenosti od 0kg do 7,5 kg sa korakom od 1,25 kg i to za:

- regulaciju na bazi PID algoritma (opterećenje od 0 do 2,5 kg)
- regulacija na bazi PID i Fazi algoritma (opterećenje od 0 do 2,5 kg)
- regulacija na bazi PID i Fazi algoritma, sa dodatnim algoritmom za detekciju opterećenja (opterećenje od 0 do 7,5 kg)

Parametri PID regulatora određeni su automatskim podešavanjem regulatora (eng. *auto tuning*), a parametri Fazi regulatora i regulatora za detekciju opterećenja empirijski. Korišćeni parametri dati su u *Tabeli 7*.

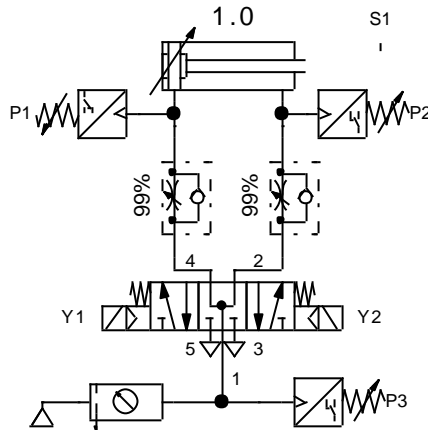
Tabela 7. Parametri regulatora.

Regulator	Parametar	Vrednost
PID i Fazi	Prag greske	0,01 V
PID i Fazi	Ts	0,005 s
PID	Opseg izlaza	0 – 10 V
	KP	0,9375
	KI	0,035156
	KD	6,11719
Fazi	Prag 1	0,25 V
	Prag 2	0,125 V
	dU Praga 1	0,4 V
	dU Praga 2	0,25 V
Detekcija opterećenja	dU Det	0,75 V
	Prag greske kr.	0,00125 V
	Vreme odabir. kretanja	0,001 s

3.3.7 Detekcija udara u prepreku analizom promene pritiska

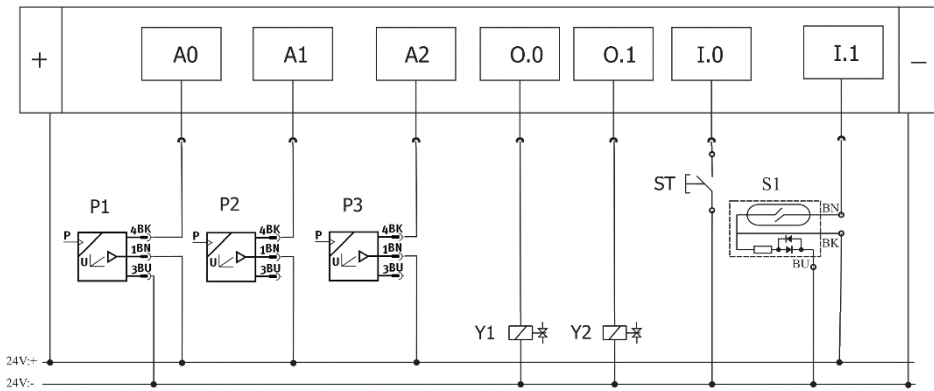
U cilju istraživanja mogućnosti detekcije udara linearnog aktuatora u prepreku čija pozicija nije poznata, urađen je eksperiment u kome je pronađena veza između trenutka udara u prepreku sa naglom promenom pritiska u komorama cilindra. Za ovaj eksperiment je korišćen cilindar dvosmernog dejstva, tipa *DNC* (Festo), koji je upravljani sa razvodnim ventilom 5/3 tipa *CPE10* (Festo), a pritisak u komorama cilindra praćen je preko tri analogna senzora pritiska tipa *MBS 3000* (Danfoss). *Slika 74* prikazuje pneumatsku šemu eksperimentalne postavke.

Promena pritiska unutar komore cilindra praćena je pomoću senzora pritiska *P1* i *P2* a promena pritiska u priključnom vodu sa izvora vazduha pomoću senzora *P3*. Na mesto udara postavljen je granični senzor položaja *S1* (eng. *reed contact*) koji je služio kao indikator ulaza da bi se olakšalo praćenje promena na dijagramu promene pritiska. Prigušno nepovratni ventili sa minimalnim mogućim prigušenjem su postavljeni, kako bi se dobio što preciznija vrednost pritiska u komori cilindra (a ne u dovodu vazduha).



Slika 74. Pneumatska šema postavke eksperimenta za detekciju udara u prepreku.

Tokom akvizicije praćene su promene pritiska (analogne veličine) i stanja uključenosti elektromagnetnih špulni razvodnika kao i signal sa senzora graničnog položaja *S1* (digitalni signali). Šema povezivanja signala sa akvizicionom opremom prikazana je na *Slici 75*.



Slika 75. Šema povezivanja upravljačko/akvizicionog sistema sa sensorima i namotajima (špulnama) razvodnika.

Eksperiment je izveden u tri koraka:

1. Prvo je urađeno snimanje profila promene pritiska tokom prigušenog kretanja cilindra bez udara u prepreku .
2. Nakon toga urađeno je snimanje kretanja cilindra punom brzinom sa udarom u prepreku na drugoj polovini hoda.
3. Na kraju je testirana aplikacija za detekciju prepreke, koja je nakon udara u prepreku zaustavila a nakon toga i okrenula smer dotadašnjeg kretanja.

U prvom koraku za merenje je korišćen samo senzor pritiska *P1*, a za druga dva koraka dodati su i senzori pritiska *P2* i *P3* kao i senzor graničnog položaja *S1*, kako bi se dobila jasnija slika o trenucima u kojima se promene dešavaju.

Poglavlje 4.

Analiza rezultata eksperimenata

Nakon izvršenih eksperimenata, koji su detaljno opisani u prethodnom poglavlju, obrađeni su podaci čiji prikaz je dat u ovom poglavlju. Posle prikaza rezultata, analizirani su dobijeni rezultati, i diskutovano je njihovo značenje. U slučaju parametara rada upravljačkih jedinica izvršeno je međusobno upoređenje rezultata.

4.1 Analiza rezultata merenja razlike u trajanju operacija na RT procesoru i FPGA kolu

U eksperimentu opisanog u *Poglavlju 3.3.1* svaka testirana operacija ponovljena je 1000 puta uz pomoć *for* petlje i na kraju je uzeta aritmetička sredina izmerenih vrednosti vremena trajanja odnosno broja taktova potrebnih za izvršenje operacije. Na procesoru je mereno vreme trajanja operacije (t_{op}) a broj taktova (N_{takt}) je proračunata po formuli (46) na osnovu radnog takta ($f_{takt} = 400$ MHz), a na FPGA kolu je meren broj taktova (N_{takt}) potrebnih za izvršenje operacije i proračunato vreme trajanja (t_{op}) na osnovu radnog takta ($f_{takt} = 40$ MHz). Rezultati dobijenih vremena i broja taktova potrebnih za izvršavanje operacija dati su u *Tabeli 8*. U kolonama za pojedinačna vremena/broj taktova data je i suma kako bi se lakše uporedilo sa vremenom/brojem taktova u slučaju paralelnog izvršavanja.

$$N_{takt} = f_{takt} \cdot t_{op} \quad (46)$$

Uvidom u dobijene rezultate primećuje se da su sva vremena na strani FPGA kola, koji bez obzira na deset puta manji radni takt u odnosu na procesor, uspeva za više stotina kraće vreme da završi i najosnovniju operaciju kao što je sabiranje ili logičko upoređivanje. Prilikom paralelnog izvršavanja operacija na procesoru dobijaju se veća vremena i od sume svih vremena prilikom sekvencijalnog

izvršavanja pojedinačnih operacija, što proizilazi iz toga što se za izvršavanje pojedinih trenutnih operacija koriste isti resursi kao i u prethodnim operacijama koji se trebaju pripremiti za narednu operaciju. Ovo nije slučaj prilikom korišćenja FPGA, kod koje se dobija neznatno duže vreme nego što je vreme trajanja najduže operacije.

Tabela 8. Potrebno vreme i broj taktova za izvršenje osnovnih operacija.

Operacija	FPGA				Procesor			
	Pojedinačno		Paralelno		Pojedinačno		Paralelno	
	Vreme [μs]*	Broj taktova	Vreme [μs]*	Broj taktova	Vreme [μs]	Broj taktova*	Vreme [μs]	Broj taktova*
1	0.025	1	1.2	48	12	4800	4968	1987200
2	0.025	1			16	6400		
3	0.2	8			348	139200		
4	0.2	8			268	107200		
5	0.9	36			2400	960000		
6	0.9	36			1588	635200		
7	0.025	1			8	3200		
Σ	2.275	91			4640	1856000		

* proračunat podatak na osnovu formule (46)

Da bi se dobila jasnija slika o odnosu uštede vremena korišćenjem FPGA kola u odnosu na procesor, u *Tabeli 9* su date proporcije svih vremena (t_{prop}) i brojeva taktova (N_{prop}) potrebnih za izvršavanje testiranih operacija. Proporcija je računata po formuli: (47) za vremena u μs, i po (48) za broj taktova.

$$t_{prop} = \frac{t_{procesor}}{t_{FPGA}} \quad (47)$$

$$N_{prop} = \frac{N_{procesor}}{N_{FPGA}} \quad (48)$$

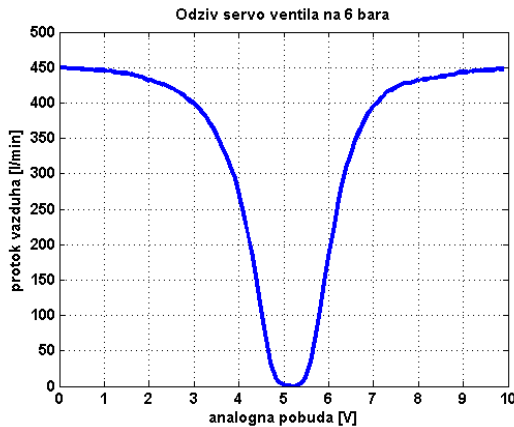
Tabela 9. Prikaz proporcije rezultata Real Time / FPGA.

Operacija	Proporcija RT/FPGA			
	Pojedinačno		Paralelno	
	Vreme [μs]	Broj taktova	Vreme [μs]	Broj taktova
1	480	4800	4140	41400
2	640	6400		
3	1,740	17400		
4	1,340	13400		
5	2,667	26667		
6	1,764	17644		
7	320	3200		
Σ	2,040	20396		

Na osnovu dobijenih rezultata merenja može se zaključiti da je opravdano kompleksne upravljačke sisteme zasnivati na FPGA platformi.

4.2 Analiza rada proporcionalnog razvodnika MPYE

Tokom snimanja prenosne karakteristike ventil je pobuđivan sa naponom od 0 do 10 V sa koracima od 0,1 V. Upravljački napon je povećavan svakih 50 ms. Izvršeno je 30 uzastopnih snimanja, a za prenosnu karakteristiku uzet je *median* vrednosti svih trideset merenja. Na *Slici 76* prikazana je snimljena prenosna karakteristika proporcionalnog ventila. Na dijagramu je prikazana zavisnost protoka [L/min] od napona na ventilu [V]. Sa dijagrama se jasno vidi da se vazduh propušta u jednom smeru za opseg napona od 0-5V, a u drugom za upravljački napon od 5-10 V. Vidi se i to da prenosna karakteristika nije linearna već da je u rasponu od 3 do 7 V raspoređene čak 90% propusnog opsega. Tokom razvoja upravljačkog sistema na FPGA, uzeti su u obzir ovi podaci.

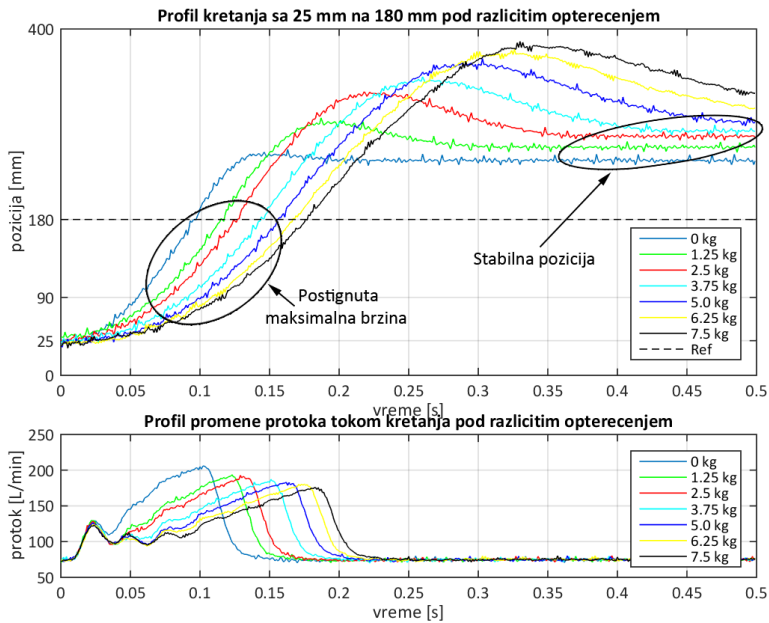


Slika 76. Snimljena prenosna karakteristika proporcionalnog ventila tipa MPYE.

4.3 Uticaj promene opterećenja na krivu kretanja pneumatskog aktuatora

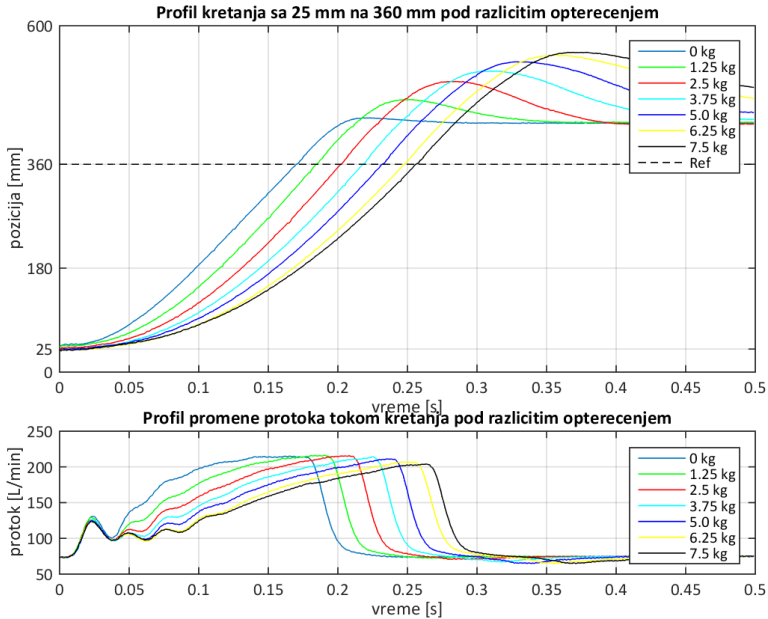
U ovom eksperimentu je opterećenost aktuatora variran od 0 kg do 7,5 kg, sa korakom od 1,25kg, i za svako opterećenje je snimljen profil kretanja i protok prilikom prelaska sa pozicije 25 mm na poziciju 180 mm, i sa pozicije 25 mm na poziciju 360 mm. Krive koje su dobijene posle snimanja prikazane su na *Slikama 77* i *78*. Analizom profila kretanja može se ustanoviti da porastom opterećenja raste i vreme prelaska sa jedne do druge pozicije, tj. menja se nagib krive

kretanja što je najjasnije uočljivo u delu u kome je postignuta maksimalna brzina kretanja (npr. iznad dela 90 mm na *Slici 77*). Sa profila kretanja se takođe jasno uočava razlika u amplitudi preskoka pozicije koja raste sa porastom opterećenja, što je posledica veće inercijalne sile koja se javlja sa porastom opterećenja, kao i veće kompresije vazduha u komorama cilindra. Prilikom naglog zaustavljanja kretanja kinetička energija mase u pokretu se apsorbuje u komorama cilindra komprimovanjem vazduha u jednoj od komori cilindra i stvaranjem podpritiska u drugoj komori (pošto je dotok i odvod vazduha zaustavljen). Nakon zaustavljanja mase koja se kretala, dolazi do kretanja u suprotnom smeru od smera dotadašnjeg kretanja jer pneumatski sistem teži do izjednačavanja pritiska u komorama cilindra.



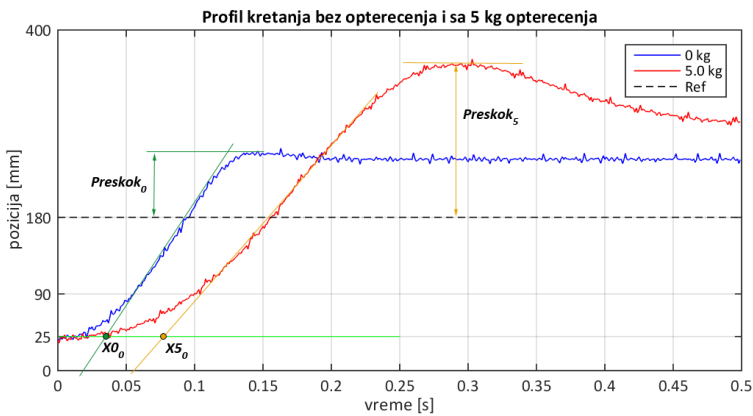
Slika 77. Profil kretanja aktuatora pod različitim opterećenjem sa 25 na 180 mm.

Nakon zaustavljanja pokretnog dela aktuatora beleži se greška u poziciji koja je u svim primerima manja od maksimalne amplitude preskoka.



Slika 78. Profil kretanja aktuatora pod različitim opterećenjem sa 25 na 360 mm.

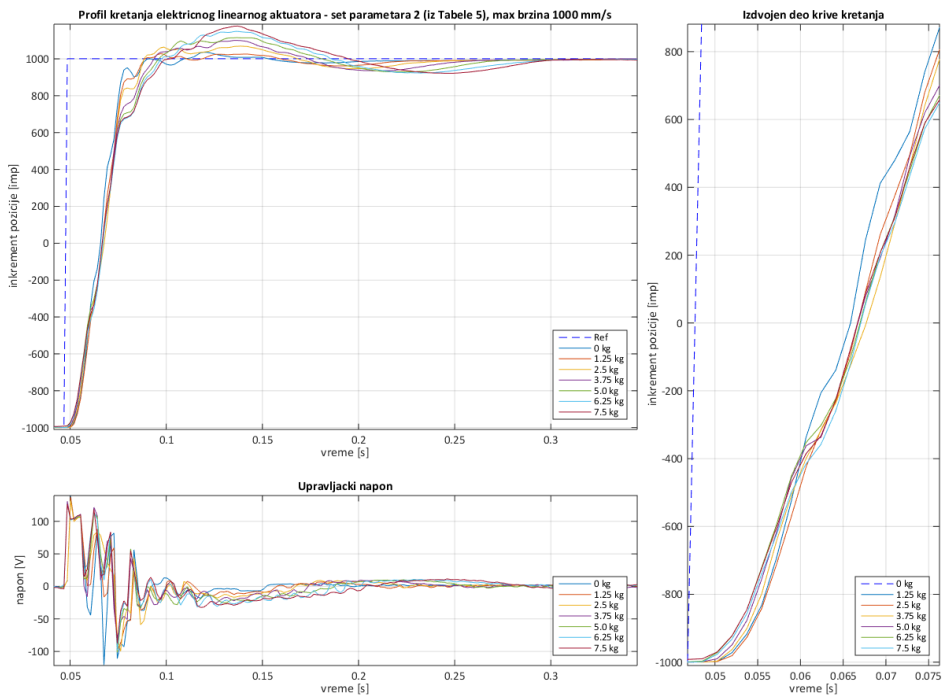
Izdvajanjem dve krive kretanja na primer za kretanje bez opterećenja i za kretanje sa opterećenjem od 5 kg (Slika 79) i njihovom analizom primećuje se da se povlačenjem tangente na profil kretanja i uzimanjem presečnih tačaka sa početnom tačkom kretanja mogu naći tačke $X0_0$ i $X5_0$ na osnovu kojih se još u toku kretanja može detektovati razlika u opterećenosti aktuatora, što bi se moglo iskoristiti za razvoj algoritma za modifikaciju upravljanja tako da se dobije manji preskok u kretanju.



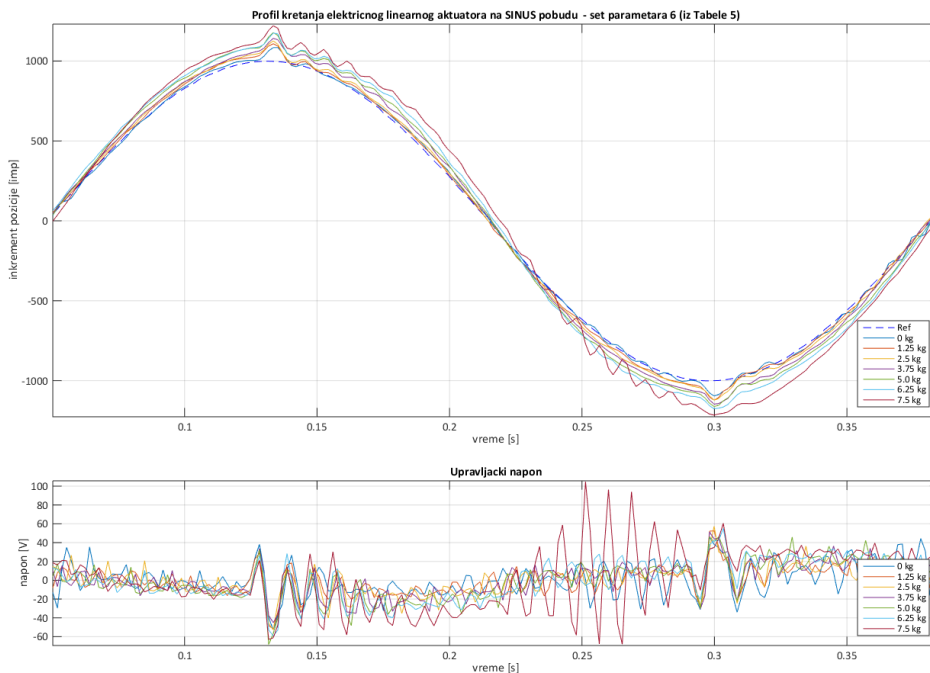
Slika 79. Ključni parametri sa profila kretanja aktuatora pod različitim opterećenjem.

4.4 Uticaj promene opterećenja na profil kretanja električnog linearnog aktuatora

Eksperiment za proveru uticaja promene opterećenja na kretanje linearnog aktuatora je rađen na *STA2504S-053-S-03D* (Dunkermotoren), a tok eksperimenta je detaljno opisan u *Poglavlju 3.3.4*. Testiranja su izvršena za 6 različitih konfiguracija podešenja upravljačke jedinice, a tokom testiranja opterećenje je varirano od 0 do 7,5 kg po koracima od 1,25 kg. Tokom rada aktuatora praćeni su: *trenutna pozicija*, *struja motora*, i *upravljački napon*. Akvizicija je rađena sa periodom uzorkovanja od 2 ms. Snimljeni podaci su predstavljeni u obliku dijagrama, na kojem je prikazan profil kretanja pozicije pokretnog dela aktuatora, i upravljački napon. Struja motora se nije posebno prikazivala, jer ona prati upravljački napon na motoru, i za ovaj eksperiment nije bila od značaja. Reprezentativni primeri prikazani su na *Slikama 80* i *81*. *Slika 80* prikazuje primer pozicioniranja na skokovitu (eng. *step*) promenu referentne vrednosti, a *Slika 81* na sporu promenu referentne vrednosti po sinusnoj funkciji.



Slika 80. Profil kretanja električnog linearnog aktuatora na step pobudu – set parametara 2.



Slika 81. Profil kretanja električnog linearnog aktuatora na sinusnu pobudu - set parametara 6.

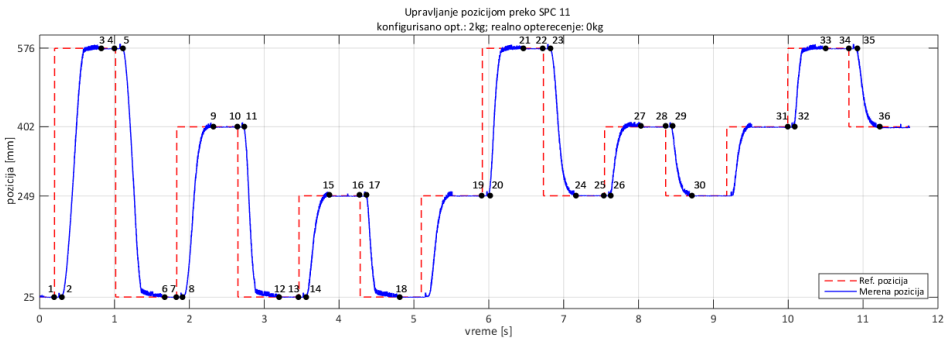
Na svim dijagramima sa snimljenim podacima se uočava vidljiva razlika u profilu kretanja pozicije pokretnog dela aktuatora, kao što je to bio slučaj i sa pneumatskim aktuatorom koji je testiran na sličan način (*Poglavlja 3.3.3 i 4.3*), te se može zaključiti da se i u ovom slučaju može analizom profila kretanja utvrditi opterećenost aktuatora.

4.5 Analiza rada upravljačkog sistema SPC11

Tokom eksperimentalnog testiranja rada upravljačkog sistema *SPC11* vršeno je snimanje ponašanja aktuatora upravljanog preko ovog upravljačkog sistema. Postavka eksperimenta detaljno je opisana u *Poglavlju 3.3.5*. Tokom testiranja praćeni su četiri veličine: *referentna pozicija*, *trenutna pozicija*, *upravljanje* i *protok vazduha*. Akvizicija merenih vrednosti rađena je sa odabiranjem na svakih 1 ms. Promene su prikazane u vidu grafikona na kojima su određene ključne tačke kao što je i prikazano na *Slici 82*. Tačke su tako birane da se na osnovu njihovih vrednosti mogu izračunati sledeće veličine:

- τ – vreme kašnjenja: vreme od trenutka zadavanja nove referentne vrednosti do početka kretanja (promena u trenutnoj poziciji),
- T – vreme pozicioniranja: potrebno vreme da se od trenutka zadavanja nove referentne vrednosti aktuator postavi na novu zadatu poziciju,
- e – greška u ustaljenom stanju: razlika postignute i zadate pozicije (apsolutna vrednost)
- X_{prs} – maksimalan preskok pozicije tokom kretanja.
- Fl – količina potrošenog vazduha tokom promene pozicije.

Tačke 1, 4, 7, 10, 13, 16, 19, 22, 25, 28, 31 i 34 predstavljaju trenutke promene referentne pozicije, tačke 2, 5, 8, 11, 14, 17, 20, 23, 26, 29, 32 i 35 predstavljaju trenutke početka kretanja, a tačke 3, 6, 9, 12, 15, 18, 21, 24, 27, 30, 33 i 36 trenutke u kojima je postignuta pozicija.



Slika 82. Karakteristične tačke na profilu kretanja aktuatora tokom upravljanja sa SPC11.

Tokom testiranja snimljen je rad aktuator sa parametrima upravljačkog sistema za opterećenje do 2 kg i za 6kg (parametrizacija je rađena u prvom slučaju bez opterećenja a u drugom slučaju sa tegovima od 6,25 kg), a tokom snimanja realno opterećenje je menjano od 0 kg do 7,5 kg u koracima od 1,25 kg. Na osnovu očitanih ključnih tačaka, sa dobijenih dijagrama, izračunati su posmatrani parametri (τ , T , e , X_{prs} , Fl) i dobijeni rezultati predstavljeni su u Tabeli 10. Brojevi u indeksu parametra predstavljaju tačke za koje je parametar izračunat, tako da na primer T_{1012} označava vreme pozicioniranja između tačaka 10 i 12. Parametri e i X_{prs} za prelaze kod kojih je krajnja tačka fiksna nisu prikazani jer ih iz fizičkih razloga nije bilo smisla meriti jer ne prikazuju realno ponašanje aktuatora.

Tabela 10. Parametri rada aktuatora upravljano sa SPC11.

Parametar	Jedinica	Konfiguracija na 2 kg							Konfiguracija na 6 kg							
		Opterećenje – transportovani teret														
		0	1.25	2.5	3.75	5.0	6.25	7.5	0	1.25	2.5	3.75	5.0	6.25	7.5	
τ_{12}	[ms]	56	59	58	60	55	54	59	61	60	60	61	63	60		
τ_{45}		56	59	55	59	60	55	55	63	61	61	65	63	62	59	
τ_{78}		55	59	65	61	55	56	56	60	63	63	61	62	61	61	
τ_{1011}		55	58	55	61	58	57	55	60	60	64	60	59	64	62	
τ_{1314}		55	59	60	59	54	58	54	61	58	59	60	60	60	59	
τ_{1617}		58	60	54	58	57	56	58	63	64	59	61	61	61	60	
τ_{1920}		63	58	56	58	61	57	57	64	65	61	64	62	64	62	
τ_{2223}		57	56	59	55	59	54	55	62	59	64	66	62	61	64	
τ_{2526}		56	59	59	55	57	59	56	63	66	65	62	62	60	60	
τ_{2829}		57	56	59	55	53	55	58	58	65	61	62	64	60	62	
τ_{3132}		55	57	56	62	44	59	60	66	66	67	66	63	64	65	
τ_{3435}		58	56	58	57	57	59	56	59	64	60	59	60	62	62	
T_{13}		[ms]	647	657	657	606	584	655	717	544	506	542	582	579	613	618
T_{46}			654	652	662	695	612	611	591	631	626	662	671	658	647	670
T_{79}	472		491	529	614	659	698	759	658	516	766	582	576	758	813	
T_{1012}	549		562	547	545	486	477	470	494	535	539	562	544	546	562	
T_{1315}	406		417	447	495	430	613	737	553	463	464	467	490	441	483	
T_{1618}	497		505	468	462	409	410	430	480	473	483	497	469	453	477	
T_{1921}	524		551	505	452	495	494	521	398	400	444	432	434	408	432	
T_{2224}	417		436	469	482	444	531	606	534	498	511	544	557	540	565	
T_{2527}	477		358	380	375	755	579	415	638	381	408	404	459	330	576	
T_{2830}	332		380	373	479	374	587	427	462	411	435	413	441	464	459	
T_{3133}	462		487	466	445	423	367	397	378	322	407	386	330	343	390	
T_{3436}	389		397	412	433	405	455	618	676	463	464	465	476	395	405	
e_{910}	[mm]		0.78	1.91	2.00	1.74	1.74	0.97	1.52	2.04	1.07	0.58	1.10	0.70	0.68	1.76
e_{1516}			0.89	1.00	0.72	0.46	0.54	1.24	1.47	0.86	0.80	0.03	0.52	0.03	1.38	0.62
e_{2425}		0.16	0.27	0.13	0.24	1.44	0.47	1.18	0.16	0.49	1.19	1.30	0.10	0.88	0.19	
e_{2728}		0.54	1.39	1.83	1.87	1.82	1.34	1.33	1.31	1.74	1.03	1.44	1.09	1.87	0.32	
e_{30+}		0.26	0.52	0.39	0.83	0.29	0.72	2.67	0.11	0.90	0.91	0.18	0.03	1.14	1.03	
e_{36+}		1.85	1.13	1.44	0.93	0.97	1.79	0.67	1.29	0.97	0.92	0.89	0.62	0.87	2.07	
X_{prs79}	[mm]	9.12	8.87	8.49	9.2	8.99	20.9	31.8	8.20	9.45	10.91	9.91	10.25	10.68	9.10	
$X_{prs1315}$		8.92	9.57	9.86	9.93	10.3	15.4	25.7	9.65	8.13	10.97	9.95	10.30	8.72	9.26	
$X_{prs2224}$		0.11	0.17	0.16	0.37	9.06	19.5	22	0.54	0.98	1.63	1.52	0.06	4.28	7.75	
$X_{prs2527}$		11	8.87	8.49	12.5	17.9	20.1	23.7	10.51	8.64	8.05	9.37	8.89	8.53	9.60	
$X_{prs2830}$		0.5	0.79	0.65	2.69	5.32	14.5	16.3	0.12	0.98	1.25	0.12	0.54	5.53	8.23	
$X_{prs3436}$		2.35	1.85	1.77	0.79	5.07	8.83	13.6	1.31	1.54	1.04	1.48	0.62	1.12	2.17	
Fl_{13}	[L po kretanju]	0.765	0.774	0.791	0.755	0.791	0.742	0.720	0.972	0.871	0.885	0.912	0.868	0.826	0.829	
Fl_{46}		0.784	0.815	0.845	0.824	0.819	0.850	0.783	0.843	0.852	0.876	0.879	0.889	0.943	0.933	
Fl_{79}		0.465	0.481	0.521	0.603	0.578	0.712	0.704	0.857	0.490	0.651	0.617	0.577	0.863	0.733	
Fl_{1012}		0.599	0.691	0.677	0.656	0.645	0.624	0.654	0.657	0.663	0.649	0.777	0.724	0.763	0.744	
Fl_{1315}		0.293	0.328	0.377	0.383	0.317	0.431	0.569	0.689	0.355	0.349	0.361	0.446	0.392	0.418	
Fl_{1618}		0.466	0.524	0.587	0.555	0.525	0.591	0.534	0.568	0.559	0.576	0.603	0.620	0.632	0.611	
Fl_{1921}		0.546	0.591	0.643	0.635	0.601	0.601	0.612	0.767	0.655	0.805	0.791	0.750	0.658	0.675	
Fl_{2224}		0.395	0.431	0.503	0.514	0.492	0.581	0.568	0.680	0.452	0.508	0.617	0.549	0.623	0.576	
Fl_{2527}		0.305	0.307	0.329	0.360	0.564	0.494	0.449	0.856	0.348	0.364	0.398	0.481	0.368	0.473	
Fl_{2830}		0.204	0.310	0.379	0.371	0.380	0.463	0.594	0.709	0.333	0.407	0.376	0.393	0.429	0.435	
Fl_{3133}		0.435	0.473	0.478	0.519	0.504	0.463	0.526	0.753	0.576	0.765	0.663	0.601	0.604	0.574	
Fl_{3436}		0.321	0.356	0.360	0.377	0.387	0.460	0.532	0.960	0.445	0.450	0.474	0.457	0.397	0.418	

Vreme kašnjenja (τ) je za sve varijante testiranja u opsegu od 44 ms do 67 ms a prosečno 59,5 ms, i ne beleži se bitan uticaj promene opterećenja na ovaj parametar, već je ovo kašnjenje verovatno prouzrokovano unutrašnjem algoritmom i načinom rada upravljačke jedinice SPC11 i proporcionalnog razvodnika. Vreme kašnjenja za rad sa predviđenim opterećenjem tokom parametrizacije iznosi od 55 ms do 63 ms sa prosekom od 56,75 ms za 2kg, i od 58 ms do 66 ms sa prosekom od 61,67 ms za 6.25kg.

Vreme pozicioniranja (T) je takođe vrlo slično za čitav opseg proveravanih kretanja što dovodi do toga da se kretanje namerno usporava da bi se lakše moglo upravljati nastalim promenama. Drugo objašnjenje za vrlo slično vreme kretanja je u adaptivnom algoritmu koji podešava parametre regulatora na trenutnu situaciju, a pošto je kretanje između tačaka ponovljena 10 puta sa istim uslovima regulator je imao dovoljan broj iteracija da koriguje svoje parametre. Vremena se kreću od 506 ms do 717 ms sa prosekom od 607,64 ms za kretanje po najdužoj putanji (25 - 576 mm) od fiksne početne do fiksne krajnje pozicije aktuatoram, i od 300 ms do 755 ms sa prosekom od 449 ms za kretanje po najkraćoj putanji između ne fiksnih pozicija (249-402 mm). Vreme pozicioniranja između ne fiksnih pozicija (249 mm i 402 mm), sa predviđenim opterećenjem za koju je upravljački sistem parametrizovan, iznosi 477 ms za kretanje od 249 mm do 402 mm a 332 ms za povratni hod (za parametre do 2 kg), i 330 ms za kretanje od 249 mm do 402 mm a 464 ms za povratni hod za parametre za 6 kg.

Greška pozicioniranja³⁷ (e) se malo povećava sa porastom opterećenosti, ali se vidi uticaj adaptivnog algoritma koji nakon 10 ponavljanja uspe da snizi grešku na zadovoljavajući nivo. Greška se kreće u opsegu od 0,03 mm do 2,67 mm sa prosekom od 0,984 mm, što je za pneumatski aktuator poprilično zadovoljavajuće.

Maksimalan preskok (X_{prs}) koji se beleži tokom kretanja i te kako raste sa povećanjem opterećenja, što je bilo i za očekivati, ali je interesantna činjenica da je prevelik preskok i za konfiguraciju kada je sistem konfigurisan na 6 kg i predviđen je za rad sa većim opterećenjem. Za konfiguraciju do 2 kg preskok se

³⁷ Treba napomenuti da je podatak o grešci kod ovog upravljačkog sistema samo orijentacione prirode, jer je zapravo prava referentna vrednost ne fiksnih pozicija za korisnika nepoznata. Referentna pozicija se kod ovog upravljačkog sistema memoriše tako što se klizač aktuatora postavi u određenu poziciju, čiju vrednost upravljački sistem pamti ali ne prikazuje korisniku. Pretpostavljena referentna vrednost je za obe ne fiksne pozicije određena kao median vrednosti za 100 uzastopnih merenja nakon pozicioniranja u tu poziciju i greške su računate u odnosu na ove vrednosti.

kreće u granicama od 0,11 mm do 31,8 mm sa prosekom od 9,9 mm i primećuje se nagli porast preskoka za opterećenja većih od 5 kg. Za konfiguraciju od 6 kg preskok se kreće u granicama od 0,06 mm do 10,97 mm sa prosekom od 5,75 mm i prilično je nezavistan od veličine opterećenja.

Potrošnja vazduha tokom kretanja (F_l) zavisi od opterećenja. Porast ove veličine je povezana sa porastom opterećenosti aktuatora i to se najlepše vidi kod kretanja ka ne fiksnim pozicijama. Potrošnja se tokom svih kretanja kreće od 0,2 do 0,97 litara potrošenog vazduha po kretanju, dok je prosečna potrošnja po kretanju 0,58 L. Pritisak korišćenog vazduha je 600 kPa, a prosečna potrošnja u stanju mirovanja aktuatora je 206.94 L/min (pritisak u komorama cilindra se i tokom mirovanja konstantno održava).

4.6 Analiza rada upravljačkog sistema realizovanog sa FPGA

Tokom faza razvoja upravljačkog sistema baziranog na FPGA delovi algoritma su se prvo proveravali na simulatoru a nakon toga rad algoritma je i eksperimentalno proveren. Nakon završetka razvoja urađen je eksperiment u kojem je proveren rad svih delova upravljačkog sistema. Detalji eksperimenta opisani su u *Poglavlju 3.3.6*. Tokom eksperimenta praćene su sledeće veličine: *referentna pozicija, trenutna pozicija aktuatora, izlazni upravljački signal, upravljački signal iz PID regulatora, upravljački signal iz PID regulatora koji je modifikovan sa Fazi logikom, prag koji je odredio algoritam za detekciju opterećenja i modifikovana međureferenca* koja je generisana na osnovu praga algoritma za detekciju. Pored ovih signala praćen je i *protok vazduha*. Tokom testiranja snimljen je rad aktuatora sa tri različita načina rada upravljačkog sistema, tj. prvo samo sa PID regulatorom, zatim je uključen i Fazi regulator, a na kraju i algoritam za Detekciju opterećenja, tj. za modifikaciju referentne pozicije (uvođenje međureferenca) na osnovu procenjenog kašnjenja sistema usled opterećenosti. Parametrizacija PID regulatora je izvršena za neopterećen aktuator, a ostali parametri su određeni empirijski kao što je to opisano u *Poglavlju 3.3.6*.

Akvizicija merenih vrednosti rađena je sa odabiranjem na svakih 1 ms. Praćene promene prikazane su u vidu grafikona (*Slika 83*) na kojem je dat profil promene pozicije tokom kretanja, promena krajnjeg upravljačkog signala kao i promena protoka vazduha.

Na dijagramu sa profilom kretanja (*Slika 83*, *prvi dijagram*) prikazivani su referentna (zadata) pozicija kao i kretanje trenutne pozicije tokom kretanja pokretnog dela aktuatora, a u slučaju kada je bio uključen i algoritam za detekciju opterećenja (*PID+Fazi+Detekcija*) prikazan je i signal *Xref* koja je zapravo takozvana međureferenca, tj. prvo se aktuator pozicionira na prag koju odredi algoritam za detekciju opterećenja a nakon dostizanja ovog praga referenca se menja na pravu zadatu vrednost reference. Detalj sa signalom međureference prikazan je na *Slici 83*, (*prvi dijagram*).

Na dijagramu sa upravljačkim signalom prikazan je krajnji upravljački signal koji je zapravo dovođen na proporcionalni ventil preko kojeg je aktuator napajan. U fazama razvoja posmatrani su i ostali delovi signala, tj. posebno izlazni signal PID regulatora, i posebno signal PID regulatora modifikovan sa Fazi logikom.

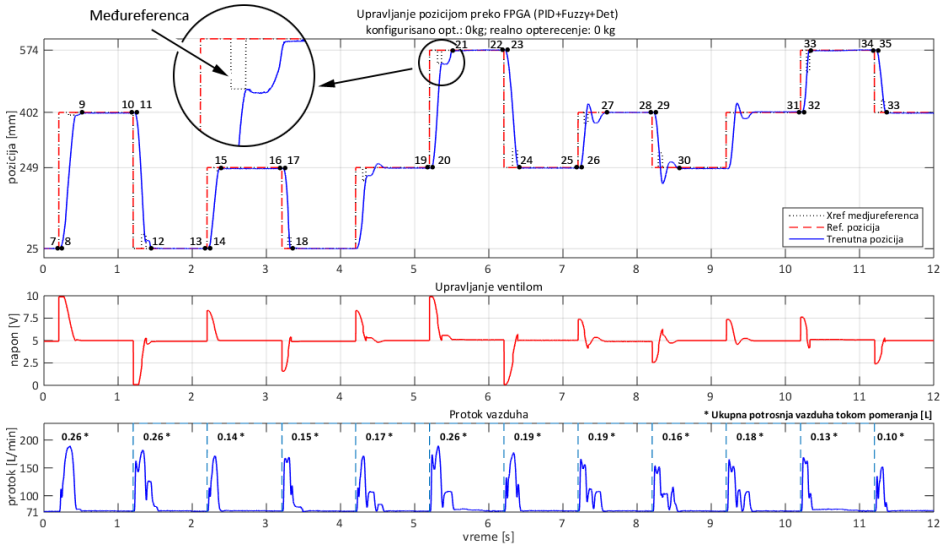
Na dijagramu za promenu protoka prikazana je promena protoka vazduha za čitavo vreme akvizicije i podatak o ukupno potrošenoj količini vazduha tokom pojedinačnog kretanja.

Tokom obrade podataka sa dijagrama sa profilom kretanja određene su vrednosti ključnih tačaka na osnovu kojih su određeni vrednosti posmatranih parametara. Tačke su tako birane da se na osnovu njihovih vrednosti mogu izračunati sledeće veličine: τ – vreme kašnjenja; T – vreme pozicioniranja; e – greška u ustaljenom stanju; X_{prs} – maksimalan preskok pozicije tokom kretanja; Fl – količina potrošenog vazduha tokom promene pozicije. Radi lakšeg upoređivanja rezultata korišćeni su isti indeksi za tačke kao i u slučaju analize upravljačkog sistema SPC11 (*Poglavlje 4.5*).

Na osnovu očitanih ključnih tačaka, sa dobijenih dijagrama, izračunati su posmatrani parametri (τ , T , e , X_{prs} , Fl) i dobijeni rezultati predstavljeni su u *Tabeli 11*. Brojevi u indeksu parametra predstavljaju tačke za koje je parametar izračunat, tako da na primer T_{1012} označava vreme pozicioniranja između tačaka *10* i *12*. Tokom eksperimenta nije testiran prelaz od 25 mm do 574 mm, tj. od početne fiksne pozicije do krajnje fiksne pozicije, jer se tu ne mogu očitati svi parametri i ne dobijaju se relevantni vrednosti, a parametri e i X_{prs} nisu prikazani (iz istog razloga) ni za ostale prelaze sa krajnjim fiksnim tačkama.

Vreme kašnjenja (τ) varira u zavisnosti od trenutne početne pozicije klizača aktuatora kao i veličine opterećenja i za sva merenja je u opsegu od 15 ms do 78 ms a prosečno 29,3 ms. Primećeno je da je najveće kašnjenje u drugom delu hoda aktuatora, što je i za očekivati jer vazduhu treba više vremena da napuni

komoru cilindra. Vreme kašnjenja za rad sa predviđenim opterećenjem tokom parametrizacije PID regulatora iznosi od 15 ms do 31 ms sa prosekom od 22,8.



Slika 83. Karakteristične tačke na profilu kretanja aktuatora tokom upravljanja sa FPGA.

Vreme pozicioniranja (T) je takođe vrlo promenljivo za čitav opseg kretanja što je i za očekivati ukoliko se uvek koristi maksimalna moguća brzina kretanja za što kraće vreme odziva. Vremena se kreću od 118 ms do 1295 ms sa prosekom od 538,5 ms za kretanje po čitavom opsegu. Vreme pozicioniranja između ne fiksnih pozicija (249 mm i 402 mm), sa predviđenim opterećenjem za koju je PID regulator parametrizovan, iznosi 239 ms za kretanje od 249 mm do 402 mm a 254 ms za povratni hod.

Greška pozicioniranja (e) ne zavisi od porasta opterećenosti, već je slična u čitavom opsegu. Za maksimalne brzine kretanja greška se kreće u opsegu od 0,001 mm do 3,48 mm sa prosekom od 1,29 mm, što je za pneumatski aktuator koji se većinom dela hoda kreće maksimalnom brzinom i te kako zadovoljavajuće.

Maksimalan preskok (X_{prs}) koji se beleži tokom kretanja i te kako raste sa povećanjem opterećenja, što je bilo i za očekivati. U slučaju korišćenja samo PID regulatora za neopterećen aktuator ona prosečno iznosi 19,96 mm, a sa 2,5 kg opterećenim aktuatorom 87,7 mm, dok se primenom Fazi algoritma i algoritma za detekciju opterećena ona smanjuje na 12,88 mm (teret 0 kg) i 58,15 mm (teret 2,5 kg).

Tabela 11. Parametri rada aktuatora upravljano sa FPGA.

Parametar	Jedinica	Opterećenje – transportovani teret												
		PID algoritam			PID + Fazi			PID + Fazi + Detekcija						
		0	1.25	2.5	0	1.25	2.5	0	1.25	2.5	3.75	5.0	6.25	7.5
τ_{78}	[ms]	21	21	26	18	16	18	16	21	24	21	25	32	27
τ_{1011}		22	33	25	33	38	41	31	26	40	34	43	32	31
τ_{1314}		78	17	20	17	19	23	15	16	21	22	20	22	24
τ_{1617}		26	32	40	35	33	38	24	26	31	35	22	43	39
τ_{1920}		28	30	34	22	24	31	25	31	31	32	23	27	37
τ_{2223}		26	27	21	28	20	28	19	25	25	19	23	32	20
τ_{2526}		28	29	32	38	31	24	21	38	25	26	26	49	61
τ_{2829}		23	39	32	30	34	47	25	25	27	28	30	33	34
τ_{3132}		38	21	25	26	21	24	28	38	38	42	42	43	46
τ_{3435}		22	24	20	27	25	27	24	27	22	29	37	59	53
T_{79}	[ms]	251	423	907	245	581	660	341	677	865	887	940	1037	1075
T_{1012}		189	235	239	488	742	511	354	441	290	340	294	296	575
T_{1315}		245	355	767	183	364	756	168	358	922	1136	990	1050	951
T_{1618}		137	148	244	450	684	239	303	197	235	275	362	275	432
T_{1921}		229	244	260	228	477	250	515	640	540	289	410	479	566
T_{2224}		390	534	1085	539	834	1178	202	793	1103	1088	1211	1295	869
T_{2527}		239	404	595	301	674	595	400	647	760	808	851	852	883
T_{2830}		254	498	765	470	711	596	381	656	737	878	852	907	552
T_{3133}		158	176	199	118	152	230	661	158	254	207	247	482	470
T_{3436}		284	371	586	606	561	760	159	542	835	710	797	818	843
e_{910}	[mm]	0.14	2.26	2.97	0.54	0.38	1.86	1.92	3.10	0.15	0.00	0.73	0.27	0.24
e_{1516}		2.26	2.26	1.97	0.71	0.59	0.30	3.20	0.27	1.89	1.01	0.86	0.45	0.80
e_{2425}		3.12	3.05	1.81	1.42	1.08	0.44	1.49	0.99	1.96	0.77	0.12	0.00	2.24
e_{2728}		0.16	1.53	2.32	0.28	0.10	0.75	0.16	2.68	3.48	0.55	0.72	0.33	0.01
e_{30+}		2.91	1.97	0.84	1.76	1.28	2.54	2.96	0.79	0.93	0.43	0.37	0.69	2.65
e_{36+}		2.83	2.49	2.07	1.86	0.76	0.63	2.04	2.32	0.38	0.86	0.26	0.81	1.10
X_{prs79}	[mm]	0.21	58.4	73.10	0.35	66.0	61.03	1.93	27.6	61.0	46.7	67.36	62.96	60.16
$X_{prs1315}$		2.40	59.8	106.9	0.27	60.7	67.48	3.17	21.0	24.0	49.7	60.55	69.18	72.29
$X_{prs2224}$		30.8	76.9	113.7	39.6	71.0	103.1	1.56	43.8	83.2	91.6	125.9	113.2	101.4
$X_{prs2527}$		32.0	82.0	78.95	31.6	56.9	88.91	24.0	45.5	47.3	54.0	53.41	64.07	50.88
$X_{prs2830}$		43.1	83.5	93.17	51.0	79.1	80.70	44.4	69.2	74.1	84.6	93.63	94.83	81.76
$X_{prs3436}$		11.0	53.7	60.28	23.8	48.6	75.56	2.10	29.6	59.1	65.5	58.98	63.15	63.15
Fl_{79}	$\frac{L}{\text{okretanje}}$ pritisak: 600 kPa	0.26	0.28	0.420	0.27	0.30	0.392	0.25	0.35	0.46	0.44	0.417	0.453	0.466
Fl_{1012}		0.21	0.23	0.232	0.27	0.30	0.282	0.26	0.23	0.26	0.26	0.276	0.251	0.252
Fl_{1315}		0.14	0.17	0.351	0.15	0.19	0.313	0.13	0.13	0.31	0.43	0.377	0.428	0.373
Fl_{1618}		0.14	0.17	0.182	0.18	0.21	0.220	0.15	0.16	0.18	0.19	0.201	0.218	0.186
Fl_{1921}		0.22	0.23	0.255	0.21	0.23	0.247	0.26	0.25	0.21	0.22	0.214	0.244	0.357
Fl_{2224}		0.20	0.30	0.571	0.21	0.33	0.595	0.18	0.35	0.48	0.47	0.483	0.506	0.391
Fl_{2527}		0.12	0.16	0.213	0.11	0.17	0.235	0.18	0.24	0.25	0.28	0.286	0.336	0.353
Fl_{2830}		0.11	0.17	0.297	0.12	0.24	0.289	0.16	0.23	0.25	0.31	0.261	0.307	0.226
Fl_{3133}		0.14	0.13	0.145	0.13	0.14	0.147	0.12	0.15	0.17	0.18	0.183	0.211	0.227
Fl_{3436}		0.10	0.14	0.251	0.12	0.17	0.318	0.09	0.19	0.27	0.30	0.304	0.328	0.354

Potrošnja vazduha tokom kretanja (Fl) zavisi od opterećenja ali je primenom Fazi logike i algoritma za detekciju opterećenja ona smanjena. Potrošnja tokom jednog ciklusa kretanja sa teretom od 2,5 kg pri PID upravljanju kretala se od 0,14 L do 0,57 L sa prosekom od 0,2917 L, dok je uključivanjem svih upravljanja ona svedena na opseg od 0,17 L do 0,48 L sa Prosečnom potrošnjom od 0,28 L po kretanju. Pritisak korišćenog vazduha je 600 kPa, a primenom veće frekvencije upravljanja (200 Hz) prosečna potrošnja u stanju mirovanja aktuatora je svedena na 70,67 L/min (pritisak u komorama cilindra se i tokom mirovanja konstantno održava).

4.7 Detekcija udara u prepreku analizom promene pritiska

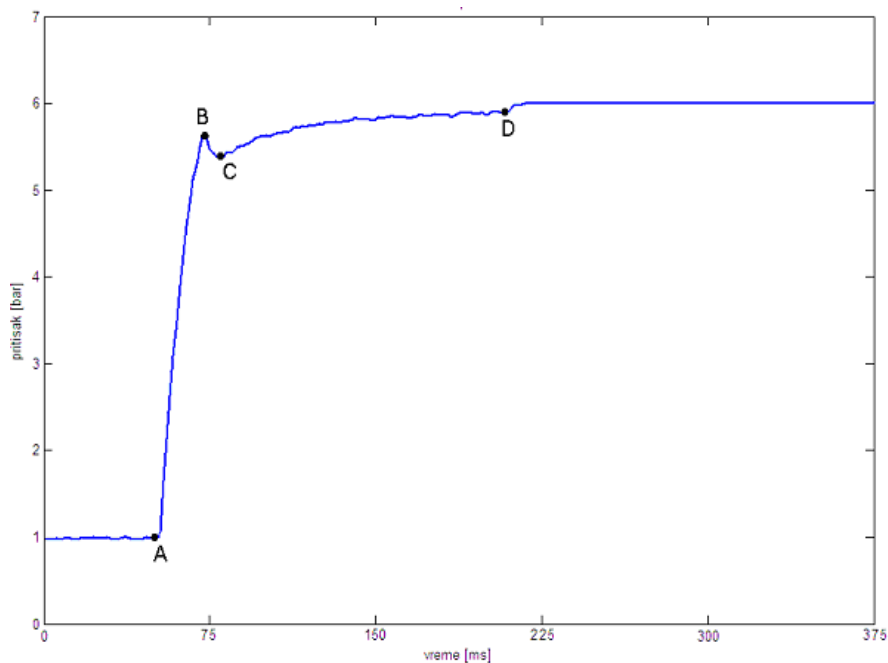
Tokom eksperimenta čiji je cilj bio da se pronađena veza između trenutka udara u prepreku na osnovu promene pritiska u komorama cilindra snimljene su promene pritiska za kretanje neopterećenog cilindra, zatim za kretanje cilindra sa udarom u prepreku i na kraju kretanje cilindra kada je ugrađena detekcija prepreka i obrtanje smera kretanja u trenutku udara. Opis eksperimenta i korišćena oprema data je u *Poglavlju 3.3.7*.

Prvo je urađeno snimanje profila promene pritiska tokom kretanja cilindra bez udara. U ovom eksperimentu kretanje cilindra je prigušeno na polovinu protoka i sniman je pritisak u komori cilindra za izvlačenje (senzor P1). Dobijeni rezultati prikazani su na *Slici 84*.

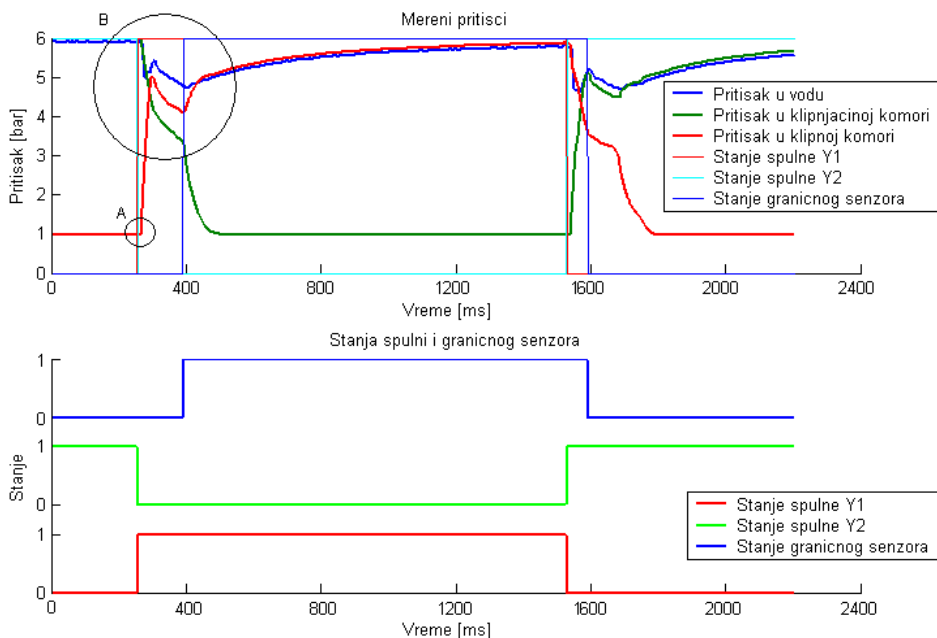
Tačka A na krivoj (*Slika 84*) predstavlja trenutak uključivanja ventila *Y1*, tj. dovođenje pritiska u komoru cilindra, u kojoj pritisak vazduha raste sve do *tačke B*. *Tačka B* predstavlja trenutak kada je pritisak dovoljno velik da se savlada statičko trenje između klipa i kućišta cilindra (kao i ostalih trenja) i klipnjača cilindra počinje da se izvlači. Usled naglog povećanja zapremine komore cilindra (usled pomeranja) dolazi do malog pada pritiska u klipnoj komori cilindra koji se ubrzo nadoknadi (*tačka C*) i nastavlja dalje da polako raste pritisak sve do kraja hoda (*tačka D*). Kada klipnjača dostigne svoj krajnji položaj, pritisak raste do vrednosti pritiska u dovodu vazduha.

Nakon prvog snimanja urađeno je i snimanje kretanja cilindra sa udarom u prepreku. Praćena je promena pritiska sa tri priključne tačke: pritisak u klipnoj komori (senzor *P1*), pritisak u klipnjačinoj komori (senzor *P2*), i pritisak u priključnom vodu (senzor *P3*). Trenutak udara je registrovan pomoću senzora

graničnog položaja *S1*, a snimani su i stanja ventila *Y1* i *Y2*. Dobijeni podaci prikazani su na *Slici 85*.

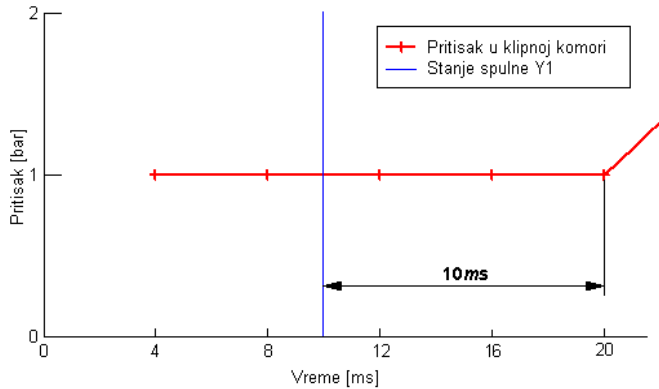


Slika 84. Kriva promene pritiska vazduha u klipnoj komori pneumatskog cilindra.



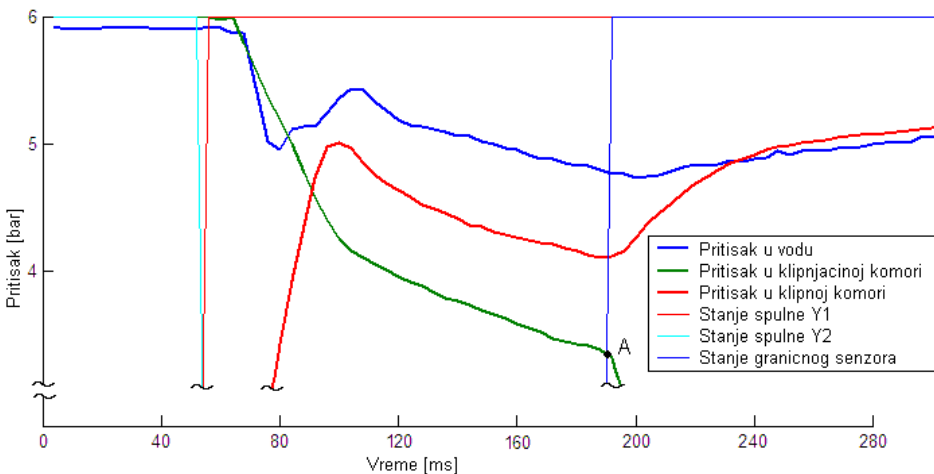
Slika 85. Krive promene pritiska tokom hoda cilindra i u trenutku udara u prepreku.

Prva promena koja može da se uoči sa dijagrama (Slika 85) je obeležen sa *detaljom A*. *Detalj A* (Slika 86) predstavlja kašnjenje u uključivanju ventila u odnosu na trenutak kada je dat signal za izvlačenje klipnjače (uključena špulna ventila Y1).



Slika 86. Kašnjenje razvodnog ventila (detalj A sa Slike 85).

Posle uključivanja razvodnog ventila, u klipnoj komori cilindra, pritisak raste sve dok sila koja deluje na klip usled pritiska vazduha ne postane veća od sile trenja koja se javlja između klipa i unutrašnje površine cilindra, nakon čega klipnjača kreće da se izvlači. Nakon toga pritisak opada sve dok klipnjača ne udari u prepreku, ili dok ne dođe do prigušenja na kraju hoda klipa (slučaj kod cilindara sa prigušenjem) kada dolazi do naglog skoka pritiska. Ovaj deo krive (Slika 85) prikazan je *detaljem B* (Slika 87).

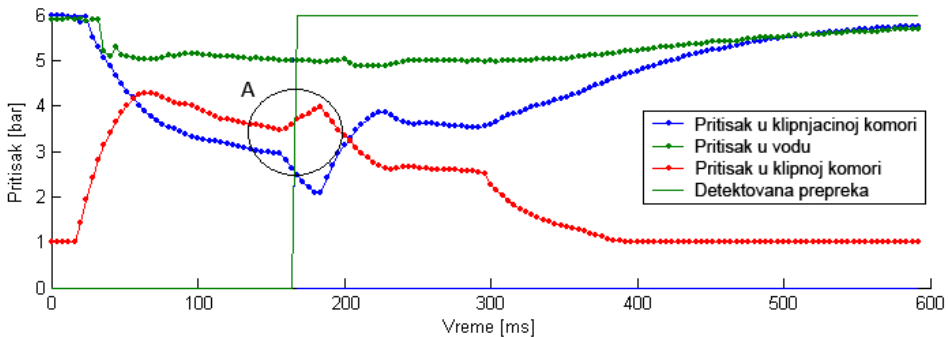


Slika 87. Promena pritiska na početku i u toku pomeranja klipnjače cilindra (detalj B sa Slike 85).

Sa *Slike 87* se vidi da prilikom udara klipnjače cilindra u prepreku, u komori cilindra koji je pod pritiskom dolazi do naglog skoka u pritisku, nakon koga pritisak ubrzano raste do nivoa radnog pritiska u sistemu. Nagli skok pritiska je trenutak kada treba da se zaustavi dotok vazduha, i/ili okrene smer kretanja klipnjače cilindra.

Posmatrajući promenu pritiska u klipnjačinoj komori (koja se odražuje) može se primetiti da i ova kriva ima prelomne tačke na istim mestima kao i kriva promene pritiska klipne komore. Sa *Slike 87* se vidi da se gradijent promene pritiska u trenutku udara (*tačka A*) naglo poveća u odnosu na prethodni interval, čak je i veća nego kod krive promene pritiska u komori koji je pod napajanjem. Iz pomenutog se može zaključiti da bi se za detekciju trenutka udara mogla koristiti i praćenje promene pritiska u klipnjačinoj komori cilindra (zelena kriva sa *Slike 87*). Ovu krivu ima smisla posmatrati samo u slučajevima kada se kretanje odvija na većim brzinama i tokom odraživanja vazduh gura klip cilindra. Ukoliko se radi o manjim brzinama kretanja, kada vazduh ima vremena da se u potpunosti odzrač, praćenje promene pritiska u ovoj komori nije najbolje rešenje.

Na kraju je testirana probna aplikacija koja je na osnovu posmatranja naglih promena u pritisku uspešno detektovala prepreku i okrenula smer kretanja cilindra (*Detalj A* na *Slici 88*).



Slika 88. Prikaz rada detekcije nailaska na prepreku tokom kretanja.

4.8 Diskusija

Na osnovu prikazanih rezultata eksperimenata u prethodnim potpoglavljima, zaključuje se da je opravdana primena FPGA tehnologije za realizaciju upravljačkih sistema za linearne aktuatorne.

Prvi deo eksperimenata je bio usmeren na merenju brzine izvršavanja osnovnih aritmetičkih i logičkih operacija, na osnovu kojih je zaključeno, da u odnosu na procesor koji radi u realnom vremenu, FPGA kolo paralelne zadatke izvršava i više desetine hiljada puta brže (tj. za manji broj osnovnih taktova) i ako radi na deset puta manjoj frekvenciji. Pravom podelom upravljačkog zadatka, se ova prednost može iskoristiti za dobijanje bržeg i efikasnijeg upravljačkog sistema.

Drugi deo eksperimenata je bio usmeren na proveru mogućnosti detekcije opterećenosti aktuatora, trenutnom analizom profila promene pozicije tokom kretanja. U ovom delu analiziran je rad pneumatskog i električnog linearnog aktuatora. Pokazano je da postoji razlika u profilu promene pozicije tokom kretanja, koja se može detektovati i iskoristiti za modifikaciju upravljanja u cilju kompenzacije poremećaja nastalih usled povećanja ili smanjenja tereta. Upoređujući profile kretanja pneumatskih i električnih aktuatora, primećuje se da su promene iste prirode, te se može pretpostaviti da se i detekcija može izvršiti na sličan način.

Treći deo eksperimenata usmeren je na proveru rada upravljačkih sistema za servopneumatski linearni aktuator. Analiziran je rad upravljačke jedinice *SPC11*, i novo razvijenog upravljačkog sistema baziranog na FPGA kolu, koji je razvijen na osnovu analize rada *SPC11*. U *Tabeli 12* prikazane su prosečne vrednosti rada upravljačkog sistema *SPC11* i upravljačkog sistema sa FPGA kolom za slučaj neopterećenog aktuatora. Odnosi posmatranih parametara prikazani su na *Slici 89*. Uporedivši ove parametre rada upravljačkih sistema, zaključuje se da je primenom upravljanja na bazi FPGA:

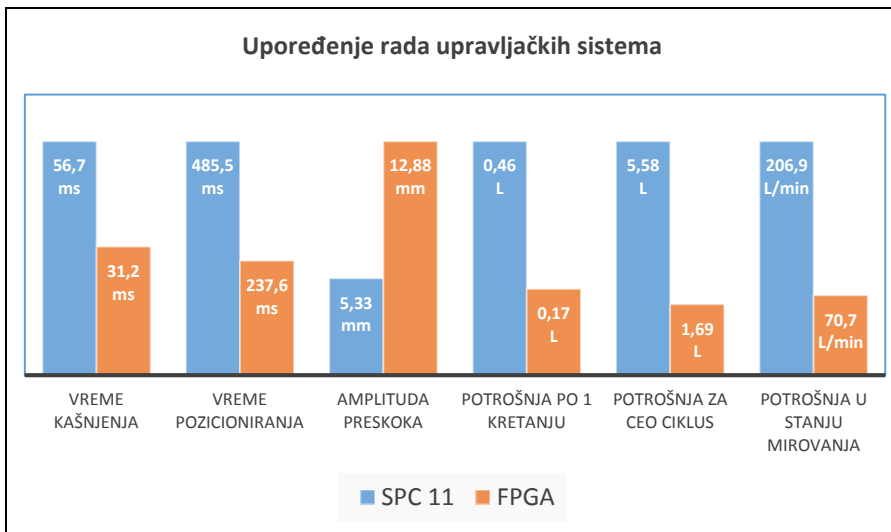
- smanjeno (*pozitivan uticaj*)
 - vreme kašnjenja sistema 1,8 puta,
(*ukupno vreme = odziv upravljačkog sistema + odziva aktuatora*)
 - vreme pozicioniranja 2 puta - povećana brzina kretanja,
(*ukupno vreme od trenutka zadavanja nove reference do trenutka postizanja zadate pozicije*)

- potrošnja pri kretanju za 2,7 puta, po ciklusu za 3,3 puta, a u stanju mirovanja za 2,9 puta,
- uvećana (negativan uticaj)
 - amplituda preskoka pozicije 3,7 puta, (uz algoritam za detekciju opterećenja 2.4 puta) – usled mnogo veće brzine kretanja.

Tabela 12. Uporedne karakteristike upravljačkih sistema.

	SPC11	FPGA	Odnos SPC11/FPGA
Vreme kašnjenja	56.75	31.2	1.82
Vreme pozicioniranja	485.5	237.6	2.04
Amplituda preskoka	5.33	12.88	0.41
Potrošnja po jednom kretanju	0.46	0.17	2.71
Potrošnja za ceo ciklus	5.58	1.69	3.30
Potrošnja u stanju mirovanja	206.94	70.67	2.93

Vreme kašnjenja sistema karakteristika je upravljačkog i upravljanog sistema. Sa stanovišta upravljanja može se diskutovati samo parametar kašnjenja upravljačkog sistema, jer se na kašnjenje samog pneumatskog sistema ne može uticati. Cilj je da se dobije što je moguće kraće vreme kašnjenja, ali ujedno da za to vreme upravljački sistem stigne da obradi zahtevane algoritme za formiranje upravljačkog signala. Kod ovog parametra se može primetiti brzina rada FPGA kola, kod koje je vreme kašnjenja svedeno na nivo vremena kašnjenja rada pneumatskog sistema (proporcionalnog razvodnika i aktuatora).



Slika 89. Dijagram sa uporednim karakteristikama upravljačkih sistema.

Posmatrajući vreme pozicioniranja i kataloške podatke upravljačkog sistema *SPC11*, zaključuje se da upravljački sistem namerno usporava kretanje, povećavši time vreme potrebno za pozicioniranje, kako bi stigao izvršiti upravljačke algoritme za ublažavanje udara na kraju hoda (prouzrokovanih stišljivošću vazduha i inercijom aktuatora), i postigao adekvatno pozicioniranje. Manja brzina kretanja dovodi i do manjih amplituda u preskoku pozicije.

Sporiji rad upravljačke jedinice *SPC11* dovodi i do veće potrošnje vazduha, kako tokom kretanja, tako i tokom održavanja pozicije, jer se veća količina vazduha odzračuje usled manje frekvencije promene upravljačkog signala.

Na osnovu prva tri dela eksperimentalnih rezultata zaključuje se da je opravdana primena FPGA tehnologije za potrebe upravljanja pneumatskim linearnim aktuatorom, a na osnovu izvršenih teorijskih i eksperimentalnih analiza rada električnog linearnog aktuatora, zaključuje se da bi ovakav upravljački sistem mogao da se primeni i kod električnog linearnog aktuatora.

Poslednji deo eksperimenata obuhvatilo je istraživanje mogućnosti detekcije udara u prepreku, metodom merenja promene pritiska unutar komore cilindra. Rađeni eksperimenti potvrđuju mogućnost detekcije udara u prepreku na pomenuti način. Ovaj princip detektovanja je već primenjen u praksi, kod realizacije IML robota, i opravdava očekivano delovanje.

Poglavlje 5.

Zaključci i pravci daljih istraživanja

Cilj istraživanja u okviru ove doktorske disertacije je povišenje efikasnosti linearnih aktuatora primenom upravljanja baziranog na FPGA tehnologiji. Po hipotezi H1 koja kaže: *„Odgovarajućom upotrebom paralelnih upravljačkih struktura unutar upravljačkog sistema baziranog na FPGA tehnologiji moguće je u značajnoj meri skratiti vreme izvršavanja osnovnog upravljačkog algoritma, ostavljajući prostora za proširivanje algoritma naprednim funkcijama koje za cilj imaju poboljšanje prenosne karakteristike aktuatora.“* urađena su istraživanja u cilju prikazivanja razlike između procesorskih upravljačkih jedinica kao što su mikroprocesori, mikrokontroleri, i hardverskih konfiguracija digitalnih mreža kao što je FPGA. Utvrđene su razlike u vremenima potrebnim za izvršavanje pojedinih operacija kao što su osnovne matematičke i logičke operacije, čijom kombinacijom se kasnije dolazi do složenijih i zahtevnijih upravljačkih struktura. Dobijene su velike razlike u vremenu, u korist FPGA tehnologije, koji opravdavaju korišćenje FPGA tehnologije, koja je ipak mnogo skuplja nego procesorska tehnologija i razvoj aplikacija zahteva više vremena.

U cilju prikazivanja mogućnosti unapređenja upravljačkih sistema za linearne aktuatore na bazi FPGA tehnologije, razvijen je upravljački sistem za pneumatski linearni aktuator, koji koristi prednosti FPGA i mogućnost rada u pravom paralelizmu. Prema izvršenim eksperimentalnim merenjima, ustanovljeno je da osnovni upravljački sistem baziran na FPGA tehnologiji prednjači po svim posmatranim faktorima u odnosu na posmatrani upravljački sistem. Što se vremena pozicioniranja i potrošnje vazduha tiče, beleži se višestruka efikasnost upravljačkog sistema zasnovanog na FPGA. Ovim delom istraživanja je potvrđen deo hipoteze H1, koja kaže da odgovarajućom upotrebom paralelnih upravljačkih struktura unutar upravljačkog sistema baziranog na FPGA tehnologiji moguće je u značajnoj meri skratiti vreme izvršavanja osnovnog upravljačkog algoritma. Analizom dobijenih rezultata merenja rada upravljačke

jedinice sa dodatnim funkcijama za unapređenje kretanja, može se izvesti zaključak da je primenom FPGA tehnologije moguće u značajnoj meri skratiti vreme izvršavanja osnovnog upravljačkog algoritma, ostavljajući time prostora za proširivanje algoritma naprednim funkcijama, koje za cilj imaju poboljšanje prenosne karakteristike aktuatora, čime je potvrđen i drugi deo hipoteze H1.

Eksperimentima koji su sadržali merenja sa različito opterećenim aktuatorom, prikazano je da je moguća detekcija opterećenja na aktuator snimanjem i analiziranjem trenutnog prelaznog režima, čime je potvrđena hipoteza H2 koja kaže: *„Odgovarajućom obradom promene trenutnog stanja aktuatora moguće je proceniti opterećenost aktuatora i optimizovati način kretanja tako da se minimizuje amplituda preskoka pozicije.“*

Osnovni cilj disertacije je bio da istraži mogućnosti FPGA platforme za realizaciju upravljačkog sistema pre svega za linearne aktuatore, kao i da prikaže načina implementacije paralelnih petlji sa algoritmima za upravljanje i regulaciju koji se paralelno i nezavisno izvršavaju na FPGA kolu. Pored ovog osnovnog cilja, dat je doprinos i u vidu poboljšavanja osnovnog PID upravljačkog algoritma dodavanjem Fazi algoritma i algoritma za detekciju opterećenosti aktuatora. Pored toga istražena je i mogućnost implementacije zaštitnog algoritama za detekciju udara od strane trećeg objekta tokom kretanja na osnovu analize promene pritiska u komori pneumatskog aktuatora.

Razvijeni upravljački sistem je razvijen i testiran za upravljanje pneumatskim linearnim aktuatorom, ali analize načina rada ostalih tipova aktuatora pokazuju da je ovaj princip kreiranja upravljačkog sistema primenjiv i na ostalim tipovima električnih kao i hidrauličnih linearnih sistema, naravno uz osnovna prilagođavanja, koja se pre svega odnose na energetske deo. Na osnovu eksperimentalnih analiza rada pod različitim opterećenjem, kojima je bio podvrgnut testirani električni linearni aktuator, zaključuje se da bi ovakav upravljački sistem, sa algoritmom za detekciju opterećenosti, mogao biti primenjiv i kod električnog linearnog aktuatora.

Pravci daljeg razvoja bi se mogle definisati u tri pravca: dalji razvoj osnovnog upravljačkog dela, razvoj složenijih dopunskih upravljačkih algoritama i uvođenje automatizovanih metoda za parametrizaciju dopunskih upravljačkih algoritama.

Razvoj osnovnog upravljačkog dela koja bi mogla uključiti korišćenje adaptivnog PID regulatora, kao i proširivanja regulacionog kruga ne samo na

pozicioniranje nego i na upravljanje brzinom kretanja ili održavanjem određene sile, itd.

Razvoj dopunskih upravljačkih algoritama bi podrazumevao dalji razvoj već ugrađenih algoritama korišćenjem složenijih setova definicija za Fazi algoritam kao i poboljšavanje algoritma za detekciju opterećenosti uvođenjem aproksimacija za krive kretanja sa funkcijama višeg reda koje vernije opisuju čitav opseg kretanja, kao i mogućnost dodavanja određene doze veštačke inteligencije na osnovu koje bi upravljački sistem preciznije mogao proceniti koliko je promenjeno opterećenje.

Kod predstavljenog upravljačkog sistema parametri Fazi regulatora i algoritma za detekciju su empirijski određivani. U daljem razvoju bi trebalo i za ove parametre razviti metodu za automatsku parametrizaciju, koja bi omogućila efikasniju parametrizaciju a samim tim i rad aktuatora.

Dobijeni rezultati i opisani principi bi trebali da doprinesu u oblasti razvoja novih upravljačkih sistema, čija je primarna oblast korišćenja u automatizovanim proizvodnim pogonima gde su od presudne važnosti brzina rada aktuatora, preciznost i ponovljivost (alatne mašine, manipulatori, automobilska i precizna industrija, itd.). Razvijeni i prikazani upravljački sistem baziran na FPGA kolu za izlazni upravljački signal koristi standardni analogni napon, koji može biti priključen i za energetske stepen drugih tipova aktuatora (hidrauličkih, električnih), ne samo za proporcionalni ventil pneumatskog aktuatora.

Literatura

- [1] M. B. Thomas, "Advanced servo control of a pneumatic actuator, Dissertation," The Ohio State University, 2003.
- [2] L. Tarjan, I. Šenk, D. Oros, and S. Horvat, "Mogućnosti primene FPGA za unapređenje industrijskih upravljačkih sistema," in *Zbornik radova - 13. Međunarodni naučno-stručni simpozijum INFOTEH-JAHORINA*, 2014, vol. 13, pp. 571–575.
- [3] J. Choi and H. Cha, "A Processor Power Management Scheme for Handheld Systems Considering Off-Chip Contributions," *Industrial Informatics, IEEE Transactions on*, vol. 6, no. 3. pp. 255–264, 2010, doi:10.1109/TII.2010.2050330, ISBN:1551-3203.
- [4] F. Sun, H. Wang, F. Fu, and X. Li, "Survey of FPGA low power design," *Intelligent Control and Information Processing (ICICIP), 2010 International Conference on*. pp. 547–550, 2010, doi:10.1109/ICICIP.2010.5565246.
- [5] N. Sclater, *MECHANISMS AND MECHANICAL DEVICES*, 5th Editio. McGraw-Hill, 2011, ISBN:978-0-07-170441-0.
- [6] D. Oros, "Određivanje parametara korelacije izbora aktuatora i vremena ciklusa proizvodnje, Doktorska disertacija," Univerzitet u Novom Sadu, 2014.
- [7] M. Curkovic, K. Jezernik, and R. Horvat, "FPGA-based predictive sliding mode controller of a three-phase inverter," *IEEE Trans. Ind. Electron.*, vol. 60, no. 2, pp. 637–644, 2013, Available: <http://goo.gl/otDd7N>.
- [8] F.-J. Lin, C.-K. Chang, and P.-K. Huang, "FPGA-Based Adaptive Backstepping Sliding-Mode Control for Linear Induction Motor Drive," *Power Electron. IEEE Trans.*, vol. 22, no. 4, pp. 1222–1231, 2007, doi:10.1109/TPEL.2007.900553, ISBN:0885-8993, Available: <http://goo.gl/qVmlRq>.
- [9] F. Ricci and H. Le-Huy, "Modeling and simulation of FPGA-based variable-speed drives using Simulink," *Math. Comput. Simul.*, vol. 63, no. 3–5, pp. 183–195, Nov. 2003, doi:10.1016/S0378-4754(03)00066-1, ISSN:03784754, Available: <http://goo.gl/4tZYKA>.
- [10] D. Jokic, S. Labura, and S. Stankovski, "Development of Integral Environment in Matlab / Simulink for FPGA," *Adv. Electr. Electron. Eng.*, vol. 12, no. 5, pp. 459–468, 2014, doi:10.15598/aeed.v12i5.1112.
- [11] A. Zsuffa, "Villamos hajtások és mozgásvezérlők - 7. resz: Lineáris motorok," *Magyar Elektronika, Hajtástechnika, Q-TECH Mérnöki Szolgáltató Kft.*, vol. 1–2, pp. 36–39, 2007.
- [12] I. Boldea and S. a. Nasar, *Linear Electric Actuators and Generators*. Cambridge: Cambridge University Press, 1997, doi:10.1017/CBO9780511529641, ISBN:9780511529641.
- [13] H. Ben Ahmed, L. Prevond, B. Multon, B. Salamand, and J. Lucidarme, "Special Synchronous Linear Actuators. Structures and Performances," *Electromotion*, vol. Vol.5, pp. pp.93–101, Oct. 1998, Available: <https://goo.gl/xpuCib>.
- [14] J. Velagić, "Osnove aktuatora," Elektrotehnički fakultet, Sarajevo, 2012.

- [15] A. Zsuffa, "Villamos hajtások és mozgásvezérlők - 1. rész," *Magyar Elektronika, Hajtástechnika, Q-TECH Mérnöki Szolgáltató Kft.*, vol. 6, pp. 42–44, 2006.
- [16] J. Hindmarsh, "CHAPTER 3 - D.C. MACHINES," in *Electrical Machines & Drives (Second Edition)*, John Hindm., Pergamon, Oxford, 1985, doi:10.1016/B978-0-08-031685-7.50011-1.
- [17] Avdweb, "Permanent magnet DC electric motor tuning," 2015. [Online]. Available: <http://goo.gl/GKSTtE>.
- [18] A. Ristić, D. Petrovački, P. Nikolić, and V. Brugarski, "Primenjena automatizacija u industriji - Jednosmerni pogoni, Fakultet tehničkih nauka, Novi Sad," 2012.
- [19] L. K. Baxter, *Capacitive Sensors: Design and Applications*, John Wiley, 1996.
- [20] Ohio Electric Motors, "Brushless DC Motors Used in Industrial Applications," *Published by Ohio Electric Motors*, 2012. .
- [21] T. Bartelt, *Industrial Automated Systems: Instrumentation and Motion Control*. Delmar, Cengage Learning, 2011, ISBN:978-1-4354-8888-5.
- [22] C. C. Chan, K. T. Chau, J. Z. Jiang, W. Xia, M. Zhu, and R. Zhang, "Novel permanent magnet motor drives for electric vehicles," *Industrial Electronics, IEEE Transactions on*, vol. 43, no. 2. pp. 331–339, 1996, doi:10.1109/41.491357, ISBN:0278-0046.
- [23] R. Krishnan, *Permanent Magnet Synchronous and Brushless DC Motor Drives*. Taylor & Francis, 2010, ISBN:978-0-8247-5384-9.
- [24] P. Yedamale, "Brushless DC (BLDC) Motor Fundamentals," *Microchip Technology Inc.*, pp. 1–20, 2003, Available: <http://goo.gl/BS8BRD>.
- [25] T. K. Kiong and A. S. Putra, *Drives and Control for Industrial Automation*, Advances i. Springer London, 2011, doi:10.1007/978-1-84882-425-6, ISBN:978-1-84882-424-9.
- [26] W. S. Levine, *Control System Applications, Second Edition*, The Contro. Taylor & Francis, 2010, ISBN:978-1-4200-7361-4.
- [27] H. H. Woodson and J. R. Melcher, *Electromechanical Dynamics, Part 1*. John Wiley and Sons Inc., 1968, ISBN:9780894644597, Available: <http://goo.gl/Aq6iiT> (pristup: maj 2015.).
- [28] A. E. Fitzgerald, J. Charles Kingsley, and A. Kusko, *Electric Machinery, 3rd Edition*, Library of. McGraw-Hill, 1971.
- [29] M. N. Bandyopadhyay, *Electrical Machines: Theory and practice*. Prentice Hall, 2007, ISBN:978-81-203-2997-3.
- [30] Đ. R. Vukić, "Asinhroni motori," 2009. [Online]. Available: <http://goo.gl/zaKDMX> (pristup: februar 2015.).
- [31] R. Wolf, *Osnove električnih strojeva - četvrto izdanje*. Školska knjiga - Zagreb, 1995, ISBN:953-0-30609-1.
- [32] A. Ristić, D. Petrovački, P. Nikolić, and V. Brugarski, "Elementi automatizacije postrojenja: Koračni - step motori," Fakultet tehničkih nauka, Novi Sad, 2012.
- [33] R. N. Bateson, *Introduction to Control System Technology, 6th edition*,. Prentice Hall, 1998, ISBN:978-0-13-895483-3.
- [34] J. F. Gieras and M. Wing, *Permanent magnet motor technology: Design and applications, Second Edition, Revised and Expanded*. Marcel Dekker Inc., 2002.

- [35] Adafruit, "What is a Stepper Motor?," 2014. [Online]. Available: <https://goo.gl/Dj74wB>.
- [36] J. R. Hendershot Jr and T. Miller, *Brushless Permanent-Magnet and Reluctance Motor Drives*, Monographs. Oxford science publications, 1989, ISBN:978-0198593690.
- [37] A. Zsuffa, "Villamos hajtások és mozgásvezérlők - 6. rész," *Magyar Elektronika, Hajtástechnika, Q-TECH Mérnöki Szolgáltató Kft.*, vol. 12, pp. 50–53, 2006.
- [38] A. Zsuffa, "Villamos hajtások és mozgásvezérlők - 2. rész," *Magyar Elektronika, Hajtástechnika, Q-TECH Mérnöki Szolgáltató Kft.*, vol. 7–8, pp. 46–49, 2006.
- [39] SKF, "Lineari," 2015. [Online]. Available: <http://goo.gl/Ge5bjz>.
- [40] S. R. Majumdar, *Pneumatic Systems: Principles and Maintenance*. Tata McGraw-Hill Education, 1995, ISBN:0-07-460231-4.
- [41] A. Parr, *Hydraulics and pneumatics: A technician's and engineer's guide - 2nd Edition*. Elsevier Ltd., 2006, ISBN:978-0-7506-4419-9.
- [42] P. Radgen and E. Blaustein, "Compressed air aystems in the European Union, energy, emissions, savings potential and policy actions," Stuttgart, Germany, 2001.
- [43] US DOE., "Assessment of the market for compressed air efficiency services," 2001.
- [44] I. Milenković, "Kvalitet vazduha pod pritiskom u funkciji održive proizvodnje, Doktorska disertacija," Univerzitet u Novom Sadu, 2014.
- [45] M. H. Tsai, C. N. Cheng, and M. C. Shih, *Design and Control for the PneuMatic Cylinder Precision Positioning Under Vertical Loading*. 2006, Available: <http://goo.gl/gbpQE9>.
- [46] J. Wang, J. Pu, and P. Moore, "A practical control strategy for servo-pneumatic actuator systems," *Control Eng. Pract.*, vol. 7, no. 12, pp. 1483–1488, Dec. 1999, doi:10.1016/S0967-0661(99)00115-X, ISSN:09670661, Available: <http://goo.gl/9YLO1W>.
- [47] J. Njerš, *Pneumatika*. Viša tehnička škola, Subotica, 2004.
- [48] B. Karczub, *Pneumatikus alapkapsolások és összetett vezérlések készítése rajzdokumentációja*. Nemzeti Szakképzési és Felnőttképzési Intézet, 2008, Available: <http://goo.gl/Z9jcx3> (pristup: januar 2015.).
- [49] F. Ebel, S. Idler, G. Prede, and D. Scholz, *Fundamentals of automation technology: Technical book*. Festo Didactic Gmbh & Co. KG, Germany, 2008.
- [50] P. Beater, *Pneumatic Drives - System Design, Modelling and Control*. Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2007, doi:10.1007/978-3-540-69471-7, ISBN:978-3-540-69470-0.
- [51] R. Korbar, *Pneumatika i hidraulika*. Karlovac: Veleučilište u Karlovcu, 2007, ISBN:978-953-7343-07-1.
- [52] H. Meixner and R. Kobler, *Uvod u Pneumatiku*. Novi Sad: Fakultet tehničkih nauka, 1972.
- [53] V. Savić, *Osnovi uljne hidraulike*. Zenica: IKOS, 1991.
- [54] V. N. Kelić, *Hidroprenosnici - 2. izd.* Beograd: Naučna Knjiga, Beograd, 1989.
- [55] J. F. Gieras, *Linear Induction Drives*. Clarendon Press - Oxford, 1994, ISBN:0198593813.

- [56] Texchange, "Elevating innovation." [Online]. Available: <http://goo.gl/5S0tM7> (pristup: maj 2015.).
- [57] A. F. Reidl III, "Preliminary Investigation of an Electromagnetic Gun, NWL Technical Not No. TN-E-10/72," 1972.
- [58] H. Kolm, K. Fine, F. Williams, and P. Mongeau, "ELECTROMAGNETIC GUNS, LAUNCHERS and REACTION ENGINES - Overview of Electromagnetic Guns," Cambridge, Massachusetts, 02139, 1980, Available: <http://goo.gl/sBEIRZ> (pristu: maj 2015).
- [59] J. R. Powell and G. T. Danby, "The Linear Synchronous Motor and High Speed Ground Transport", in *6th International Energy Conversion Engineering Conference*, 1971.
- [60] M. Satvati and S. Vaez-Zadeh, "End-Effect Compensation in Linear Induction Motor Drives," *J. Power Electron.*, vol. 11, no. 5, 2011.
- [61] D. C. Meeker and M. J. Newman, "Indirect Vector Control of a Redundant Linear Induction Motor for Aircraft Launch," *Proc. IEEE*, vol. 97, no. 11, pp. 1768–1776, 2009, doi:10.1109/JPROC.2009.2030232, ISBN:0018-9219.
- [62] E. F. da Silva, C. C. dos Santos, and J. W. L. Nerys, "Field oriented control of linear induction motor taking into account end-effects," in *Advanced Motion Control, 2004. AMC '04. The 8th IEEE International Workshop on*, 2004, pp. 689–694, doi:10.1109/AMC.2004.1297952.
- [63] E. F. da Silva, E. B. dos Santos, P. C. M. Machado, and M. A. A. de Oliveria, "Vector control for linear induction motor," in *Industrial Technology, 2003 IEEE International Conference on*, 2003, vol. 1, pp. 518–523 Vol.1, doi:10.1109/ICIT.2003.1290384.
- [64] J.-H. Sung and K. Nam, "A new approach to vector control for a linear induction motor considering end effects," in *Industry Applications Conference, 1999. Thirty-Fourth IAS Annual Meeting. Conference Record of the 1999 IEEE*, 1999, vol. 4, pp. 2284–2289 vol.4, doi:10.1109/IAS.1999.799162, ISBN:0197-2618.
- [65] Z. Mingyuan, M. Weiming, X. Jin, and L. Weibo, "Vector Control for the Linear Induction Motor Based on the Position Closed-Loop," in *Electrical and Control Engineering (ICECE), 2010 International Conference on*, 2010, pp. 2515–2518, doi:10.1109/ICECE.2010.622.
- [66] W. Yuhua and G. Kang, "Speed and Rotator Magnetic Flux Close Loop Vector Control System for the Linear Induction Motor Based on Neuron Adaptive Controller," in *Management and Service Science, 2009. MASS '09. International Conference on*, 2009, pp. 1–5, doi:10.1109/ICMSS.2009.5303046.
- [67] D. S. Nyce, *Linear Position Sensors: Theory and Application*. John Wiley & Sons, Inc., 2003, doi:10.1002/0471474282, ISBN:9780471474289.
- [68] R. Pallás-Areny and J. G. Webster, *Sensors and Signal Conditioning, 2nd Edition*. John Wiley & Sons, Inc., 2001, ISBN:978-0-471-33232-9.
- [69] H. V Malmstadt, C. G. Enke, and S. R. Crouch, *Electronics and instrumentation for scientists*. Benjamin/Cummings Pub. Co., 1981, ISBN:9780805369175.
- [70] G. C. Righini, A. Tajani, and A. Cutolo, "An Introduction to Optoelectronic Sensors," in *Series in Optics and Photonics: Volume 7*, World Scientific, 2009, ISBN:978-981-283-412-6.

- [71] D. S. Nyce, "Magnetostriction-Based Linear Position Sensors," *Sensors*, vol. 11, no. 4, 1994.
- [72] J. G. Webster, *Measurement, Instrumentation, and Sensors Handbook*. CRC Press LLC, 1999, ISBN:0-8493-2145-X.
- [73] IFM, "Senzori udaljenosti," *Laserski senzori / senzori za merenje razdaljine*, 2015. [Online]. Available: <http://goo.gl/f59zfA> (pristup: maj 2015.).
- [74] M. Barjaktarović, "Fizičko tehnička merenja: Senzori protoka," Beograd, 2009, Available: <http://goo.gl/8ZK3PT> (pristup: maj 2015.).
- [75] D. Šešlija, *Proizvodnja, priprema i distribucija vazduha pod pritiskom*. Novi Sad: IKOS, 2002.
- [76] L. Tarjan, I. Šenk, N. Đukić, I. Baranovski, and S. Stankovski, "Upravljanje servopneumatskim linearnim aktuatorom zasnovano na FPGA," in *Zbornik radova - 14. Međunarodni naučno-stručni simpozijum INFOTEH-JAHORINA*, 2015, pp. 827–831.
- [77] H. Yu, "DSP-Based Fuzzy Logic Servo Motor Control," in *Control Engineering and Communication Technology (ICCECT), 2012 International Conference on*, 2012, pp. 556–559, doi:10.1109/ICCECT.2012.193.
- [78] Y. Song, J. Ma, H. Zhang, and N. He, "Digital implementation of neural network inverse control for induction motor based on DSP," in *Future Computer and Communication (ICFCC), 2010 2nd International Conference on*, 2010, vol. 1, pp. V1–174–V1–178, doi:10.1109/ICFCC.2010.5497810.
- [79] A. V. Deshmukh, *Microcontrollers, Theory and Applications*. ser. The Companies, Computer Engineering Series, New York: Mac-Graw-Hill, 2007, ISBN:0-07-058595-4.
- [80] P. Lapsley, J. Bier, A. Shoham, and E. A. Lee, *DSP Processor Fundamentals: Architecture and Features*. Piscataway, NJ: IEEE Press, 1997, ISBN:978-0-7803-3405-2.
- [81] L. Tarjan, I. Šenk, S. Stankovski, G. Ostojić, L. Gogolak, S. Stankovski, and L. Gogolak, "Application of FPGA Technology and a Real-Time Controller for Automatic Regulation of Rapidly Changing Variables," in *Proceedings of the 2nd Regional Conference - Mechatronics in Practice and Education (MECHEDU 2013)*, 2013, pp. 125–128.
- [82] J. J. Rodriguez-Andina, M. J. Moure, and M. D. Valdes, "Features, Design Tools, and Application Domains of FPGAs," *Industrial Electronics, IEEE Transactions on*, vol. 54, no. 4. pp. 1810–1823, 2007, doi:10.1109/TIE.2007.898279, ISBN:0278-0046.
- [83] K. Aditya, "Speed control of LIM drives using indirect secondary field oriented control," in *Circuits, Power and Computing Technologies (ICCPCT), 2013 International Conference on*, 2013, pp. 574–578, doi:10.1109/ICCPCT.2013.6529049, ISBN:978-1-4673-4921-5, Available: <http://goo.gl/qQ5ZUL> (pristup: maj 2015.).
- [84] J.-M. Ramos-Arreguin, E. Guillen-Garcia, S. Canchola-Magdaleno, J.-C. Pedraza-Ortega, E. Gorrostieta-Hurtado, M.-A. Aceves-Fernández, and C.-A. Ramos-Arreguin, "Fuzzy Logic Hardware Implementation for Pneumatic Control of One DOF Pneumatic Robot," in *Advances in Soft Computing SE - 43*, vol. 6438, G.

- Sidorov, A. Hernández Aguirre, and C. Reyes García, Eds. Springer Berlin Heidelberg, 2010, pp. 500–511, doi:10.1007/978-3-642-16773-7_43, ISBN:978-3-642-16772-0.
- [85] V. Blagojević, “Prilog razvoju energetske efikasne upravljanja pneumatskim izvršnim organima, Doktorska disertacija,” Univerzitet u Novom Sadu, 2010.
- [86] S. Čajetinac, “Prilog razvoju modela odlučivanja za izbor elektropneumatskog upravljanja, Doktorska disertacija,” Univerzitet u Novom Sadu, 2012.
- [87] D. Petrovački, “Regulatori,” Novi Sad, 2002.
- [88] A. Voice and A. Wilkins, “PID Tuning - Classical Methods,” 2007, Available: <http://goo.gl/lLisld> (pristup: april 2015.).
- [89] National Instruments, “Chien-Hrones-Reswick Autotuning Method (PID and Fuzzy Logic Toolkit),” 2012. [Online]. Available: <http://goo.gl/snVyRX> (pristup: maj 2015.).
- [90] D. Dubois and H. Prade, “Fuzzy Sets and Systems,” *SIAM Rev.*, vol. 27, no. 2, pp. 270–274, 1985, Available: <http://www.jstor.org/stable/2030767>.
- [91] V. Novák, I. Perfilieva, and J. Močkoř, *Mathematical principles of fuzzy logic*. Dordrecht, Netherlands: Kluwer Academic Publishers, 1999, ISBN:0-7923-8595-0.
- [92] G. L. Djordjević, “FPGA,” Niš, 2013, Available: <http://goo.gl/NZF51l> (pristup: maj 2015.).
- [93] E. Monmasson, L. Idkhajine, M. N. Cirstea, I. Bahri, A. Tisan, and M. Naouar, “FPGAs in Industrial Control Applications,” *Industrial Informatics, IEEE Transactions on*, vol. 7, no. 2, pp. 224–243, 2011, doi:10.1109/TII.2011.2123908, ISBN:1551-3203.
- [94] R. Obermaisser and P. Gutwenger, “Model-based development of MPSoCs with support for early validation,” *Industrial Electronics, 2009. IECON '09. 35th Annual Conference of IEEE*, pp. 2867–2873, 2009, doi:10.1109/IECON.2009.5415397, ISBN:1553-572X.
- [95] P. P. Pande, C. Grecu, M. Jones, A. Ivanov, and R. Saleh, “Performance evaluation and design trade-offs for network-on-chip interconnect architectures,” *Computers, IEEE Transactions on*, vol. 54, no. 8, pp. 1025–1040, 2005, doi:10.1109/TC.2005.134, ISBN:0018-9340.
- [96] W. H. Wolf, *FPGA-Based System Design*. Englewood Cliffs, NJ: Prentice-Hall, 2004.
- [97] FESTO, “Linear drives DGPL,” 2015, Available: <http://goo.gl/E1vJF1> (pristup: maj 2015.).
- [98] FESTO, “Standard cylinders DNC, ISO 15552,” 2015, Available: <http://goo.gl/wib5d5> (pristup: maj 2015.).
- [99] FESTO, “Displacement encoders,” 2014, Available: <http://goo.gl/s8lz3H> (pristup: maj 2015.).
- [100] FESTO, “Proportional directional control valves MPYE,” 2015, Available: <http://goo.gl/Ouxtyq> (pristup: maj 2015.).
- [101] FESTO, “Universal valves CPE,” 2015, Available: <http://goo.gl/UHsMzF> (pristup: maj 2015.).

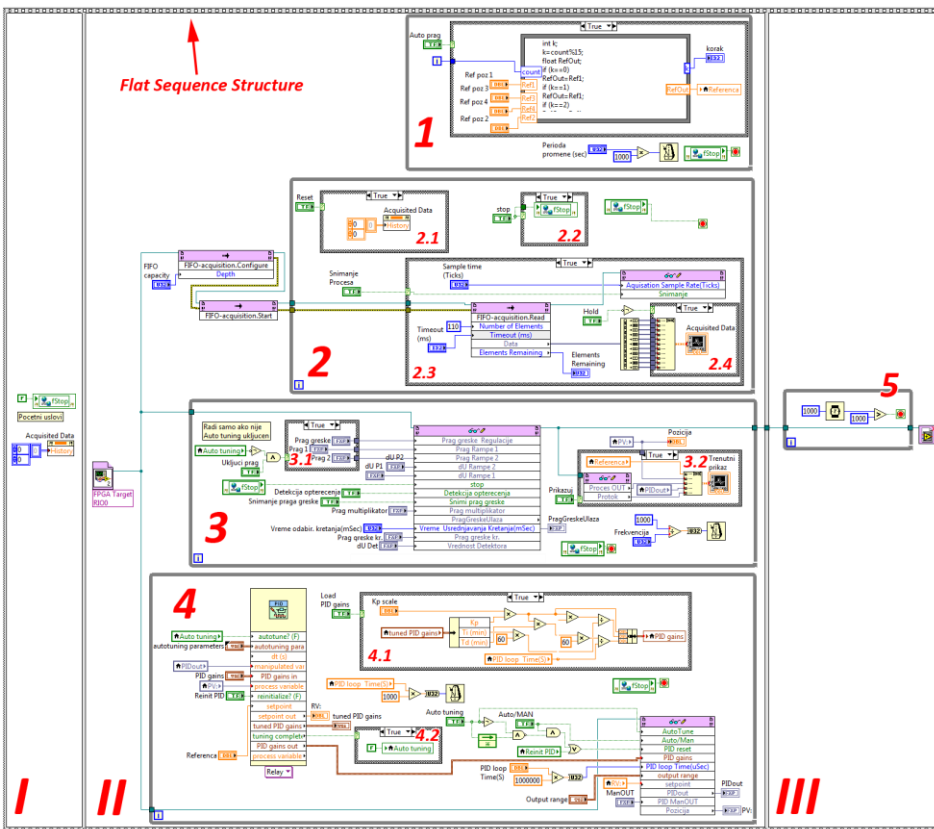
- [102] FESTO, "Flow sensors SFAB," 2014, Available: <http://goo.gl/tKoiMa> (pristup: maj 2015.).
- [103] Danfoss, "Pressure transmitter for general industrial purposes Type MBS 3000 and MBS 3050," 2014, Available: <http://goo.gl/mPZtDW> (pristup: maj 2015.).
- [104] Dunkermotoren, "ServoTube Actuator - models STA2504-2510," DS01088/L, 2011, Available: <http://goo.gl/2tV43C>.
- [105] Festo, "Supplementary description for Soft Stop SPC11," *Festo P.BE-SPC11-DNCI-EN en 1208a English*, 2012. [Online]. Available: <http://goo.gl/Nmiekk>.
- [106] Copley Controls, "Xenus XTL - digital servo drive for brushless/brush motors," 20 Dan Road, Canton, MA 02021, USA, 2015, Available: <http://goo.gl/lqKmlz> (pristup: maj 2015.).
- [107] FESTO, "Cushioning components," 2015, Available: <http://goo.gl/b40yCn> (pristup: maj 2015.).
- [108] National Instruments, "NI sbRIO-960x/962x/963x OEM Instructions & Specifications," 2014, Available: <http://goo.gl/qYO8BU> (pristup: maj 2015.).
- [109] S. Stankovski, G. Ostojic, L. Tarjan, D. Skrinjar, and M. Lazarevic, "IML Robot Grasping Process Improvement," *IJST, Trans. Mech. Eng.*, vol. 35, no. M1, pp. 61–71, 2011, Available: <http://goo.gl/cCHzD6>.
- [110] J. Jonnes, *Empires of Light: Edison, Tesla, Westinghouse, and the Race to Electrify the World*. Random House, 2004, ISBN:978-0-375-75884-3.
- [111] M. Burgan, *Nikola Tesla: Inventor, Electrical Engineer*. Mankato, Minnesota: Capstone, 2009, ISBN:978-0-7565-4086-9.
- [112] P. A. Laplante, *Comprehensive Dictionary of Electrical Engineering*. Springer, 1999, ISBN:9783540648352.
- [113] M. Došenović, *NIKOLA TESLA njegov život i njegovo delo - 9. izdanje (e-book)*. 2013, Available: <http://goo.gl/jqqXH1> (pristup: februar 2015.).
- [114] All About Circuits, "Pulse Width Modulation," *All About Circuits, Volume III - Semiconductors*, 2015. [Online]. Available: <http://goo.gl/FKmwVF> (pristup: maj 2015.).
- [115] M. R. Stojić, *Digitalni sistemi upravljanja*. Beograd: Nauka, 1994, ISBN:86-7621-017-9.
- [116] A. Mielke and T. Roubíček, "A Rate-Independent Model for Inelastic Behavior of Shape-Memory Alloys," *Multiscale Model. Simul.*, vol. 1, no. 4, pp. 571–597, Jan. 2003, doi:10.1137/S1540345903422860, ISSN:1540-3459.
- [117] J. R. Tinklepaugh and W. B. Crandal, *Cermets*. New York: Reinhold Publishing Corp., 1960.
- [118] A. Zečević, "Grejov kod," Beograd, 2011, Available: <http://goo.gl/KfDzIC> (pristup: maj 2015.).
- [119] D. J. Acheson, *Elementary Fluid Dynamics*. Clarendon Press - Oxford, 1990, ISBN:0-19-859679-0.
- [120] V. I. Utkin, "Sliding mode control design principles and applications to electric drives," *Industrial Electronics, IEEE Transactions on*, vol. 40, no. 1. pp. 23–36, 1993, doi:10.1109/41.184818, ISBN:0278-0046.

Prilozi

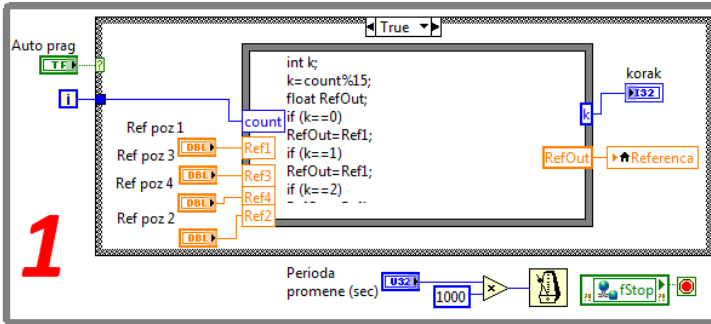
Prilog 1. Detaljan program upravljačke jedinice realizovanog na FPGA kolu

P1.1 Detaljan program korisničkog interfejsa

U ovom prilogu je dat izgled blok dijagrama korisničkog interfejsa koji se izvršava na RT kontroleru i predstavlja spregu između korisnika i FPGA kola na kojem se izvršava upravljačka logika. Detaljan opis dat je u *Poglavlju 3.2.1*, a u nastavku slede blok dijagrami programa (*RT_Panel_Advanced.vi*).



Blok dijagram celog programa interfejsa

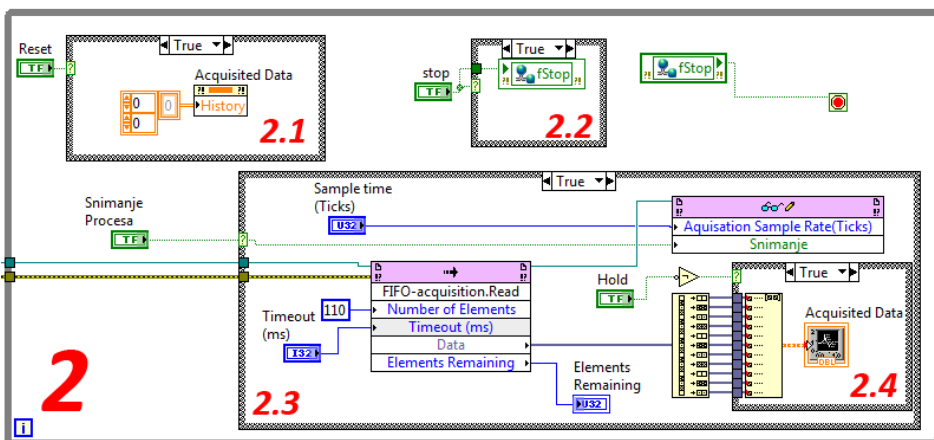


Blok dijagram petlje 1 - za automatizovano zadavanje referentnih pozicija

```

int k;
k=count%15;
float RefOut;
if (k==0)
    RefOut=Ref1;
if (k==1)
    RefOut=Ref1;
if (k==2)
    RefOut=Ref1;
if (k==3)
    RefOut=Ref3;
if (k==4)
    RefOut=Ref1;
if (k==5)
    RefOut=Ref2;
if (k==6)
    RefOut=Ref1;
if (k==7)
    RefOut=Ref2;
if (k==8)
    RefOut=Ref4;
if (k==9)
    RefOut=Ref2;
if (k==10)
    RefOut=Ref3;
if (k==11)
    RefOut=Ref2;
if (k==12)
    RefOut=Ref3;
if (k==13)
    RefOut=Ref4;
if (k==14)
    RefOut=Ref3;
    
```

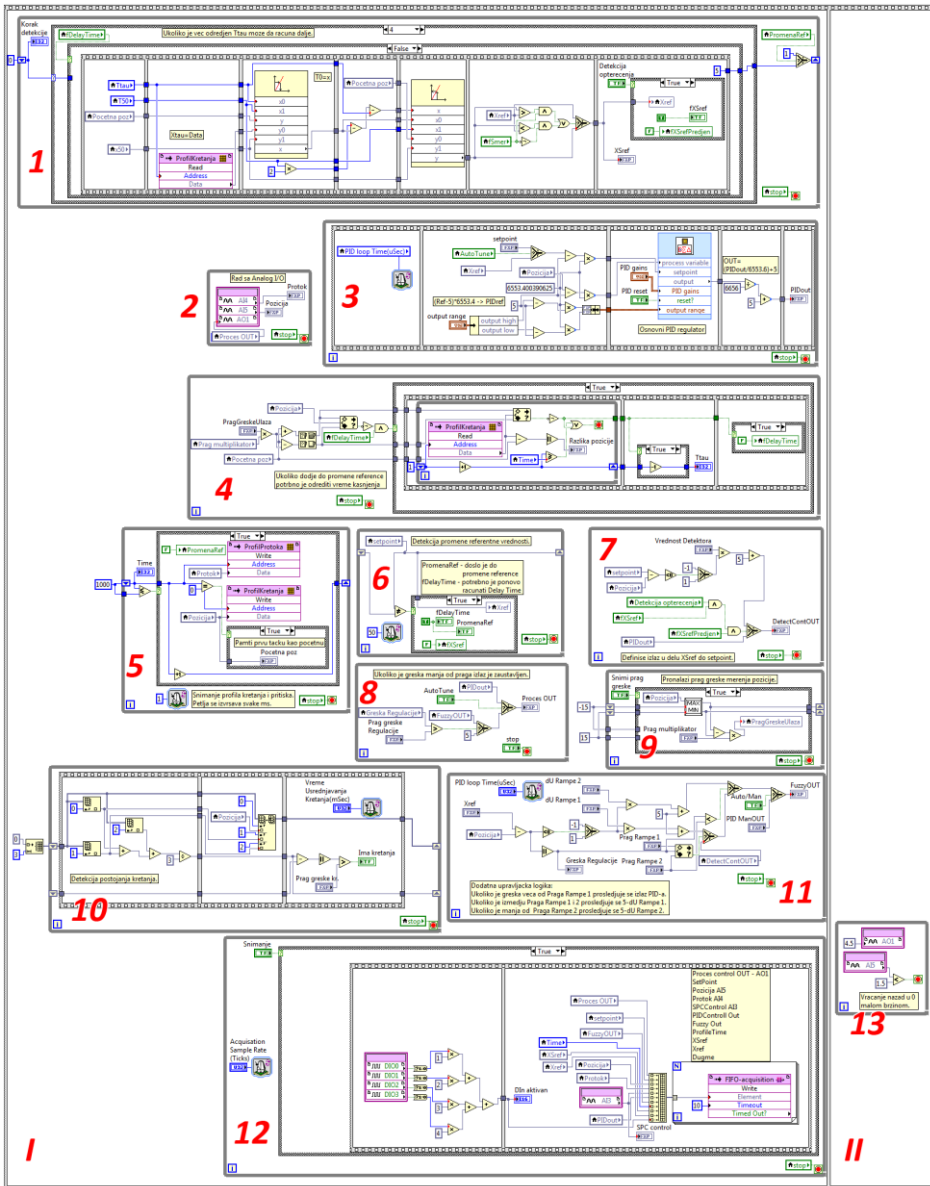
Programski kod unutar *Formula Node*-a u okviru petlje 1



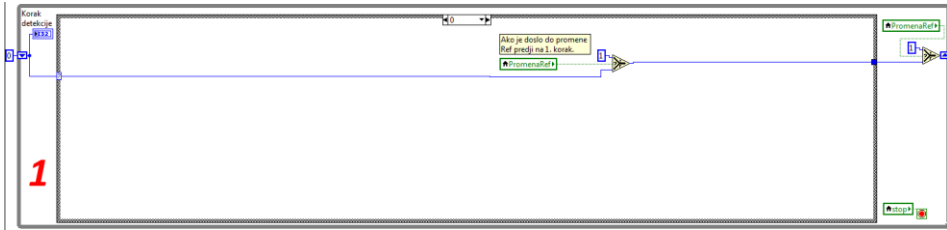
Blok dijagram za prikazivanje akviziranih podataka – petlja 2

P1.2 Detaljan program upravljačkog sistema na FPGA kolu

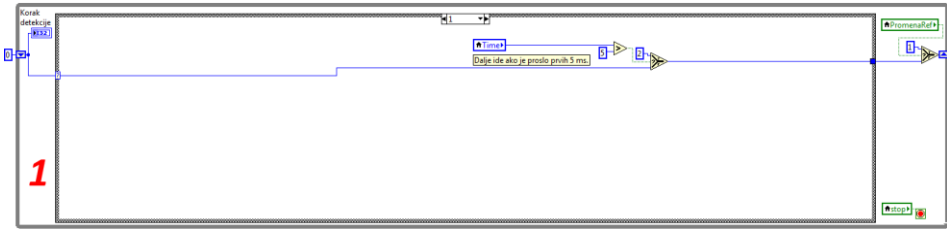
U ovom prilogu je dat izgled blok dijagrama programa upravljačkog sistema koji se izvršava na FPGA kolu. Detaljan opis dat je u Poglavlju 3.2.1, a u nastavku slede blok dijagrami programa (RT_Panel_Advanced.vi).



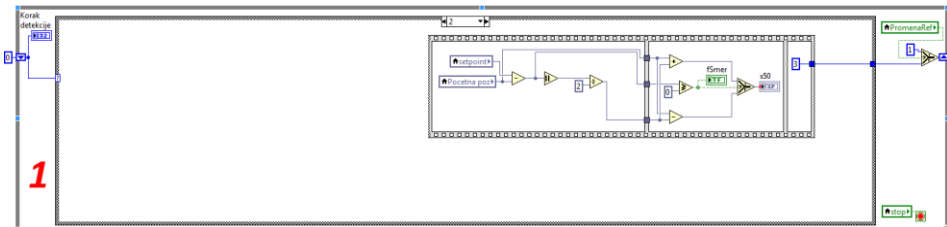
Blok dijagram celog upravljačkog programa



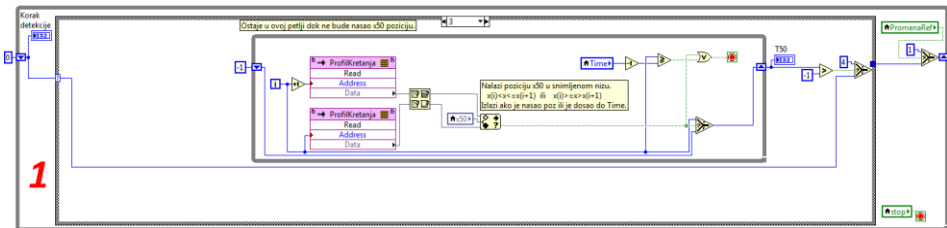
Blok dijagram algoritma za detekciju opterećenja – Case(0) – petlja 1



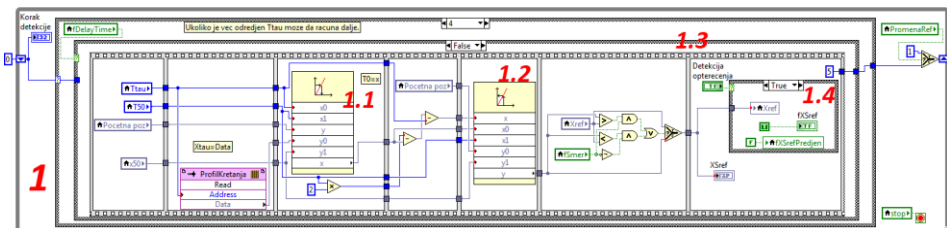
Blok dijagram algoritma za detekciju opterećenja – Case(1) – petlja 1



Blok dijagram algoritma za detekciju opterećenja – Case(2) – petlja 1



Blok dijagram algoritma za detekciju opterećenja – Case(3) – petlja 1



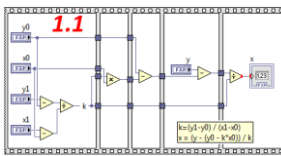
Blok dijagram algoritma za detekciju opterećenja – Case(4) – petlja 1

Podprogram 1.1 je funkcija sa jednačinom prave koja na osnovu dve tačke (x_0, y_0) i (x_1, y_1) , i poznatu vrednost y računa vrednost x .

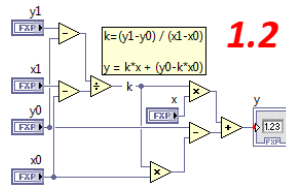
Podprogram 1.2 je funkcija sa jednačinom prave koja na osnovu dve tačke (x_0, y_0) i (x_1, y_1) , i poznatu vrednost x računa vrednost y .

IF struktura 1.3, koja je uslovljena sa flegom $fDelayTime$, u „True“ opciji ima samo vod koja signal Korak prespaja sa ulaza na izlaz (u slučaju „False“ izlaz koraka je 5).

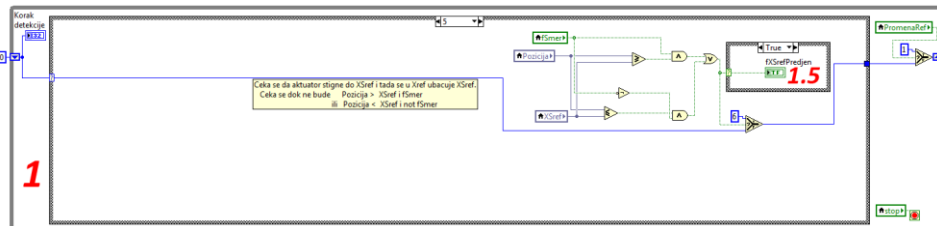
IF struktura 1.4 za „False“ nije definisana.



Podprogram 1.1 – Case(s) – petlja1

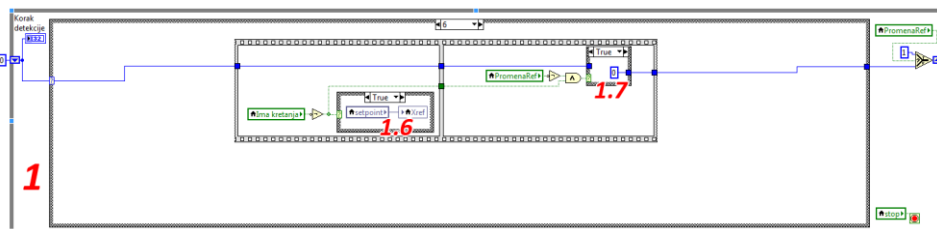


Podprogram 1.2 – Case(s) – petlja1

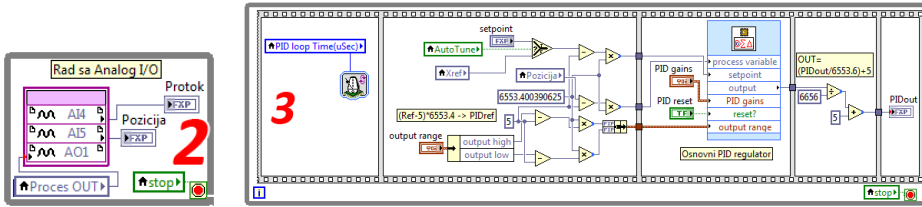


Blok dijagram algoritma za detekciju opterećenja – Case(5) – petlja 1

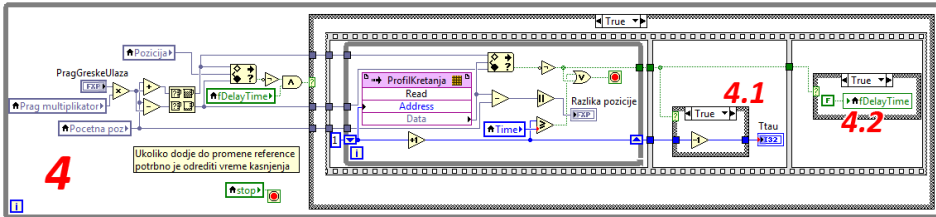
IF strukture 1.5, 1.6 i 1.7 za „False“ nisu definisane.



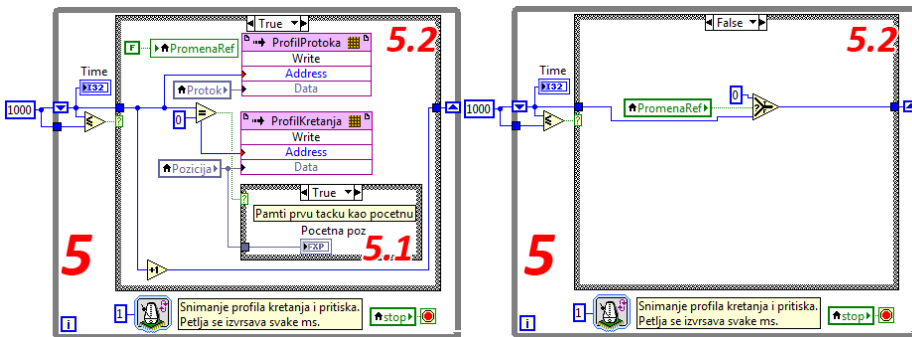
Blok dijagram algoritma za detekciju opterećenja – Case(6) – petlja 1



Blok dijagrami: Rad sa analognim U/I – petlja 2; PID regulator – petlja 3

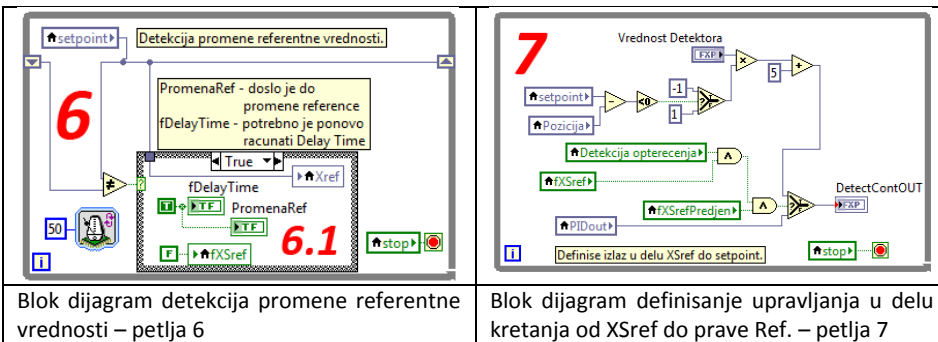


Blok dijagram za određivanja vremena Ttau – petlja 4



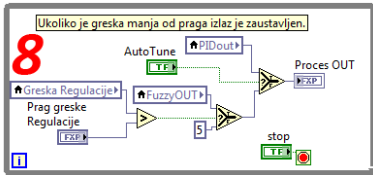
Blok dijagram funkcije za snimanje profila kretanja i protoka – petlja 5

IF strukture 5.1 i 6.1 za „False“ nisu definisane.

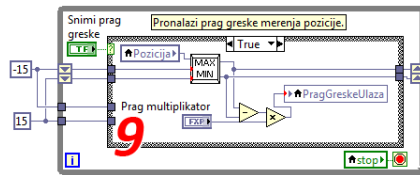


Blok dijagram detekcija promene referentne vrednosti – petlja 6

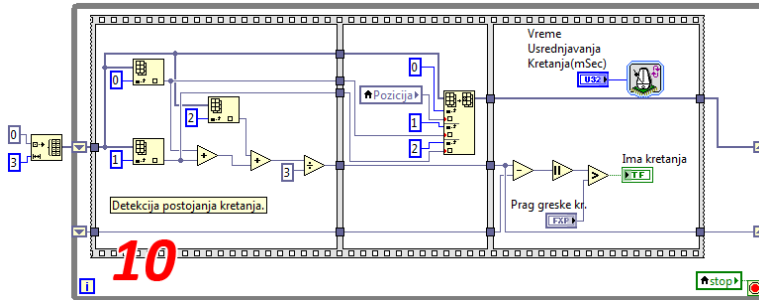
Blok dijagram definisanje upravljanja u delu kretanja od XSref do prave Ref. – petlja 7



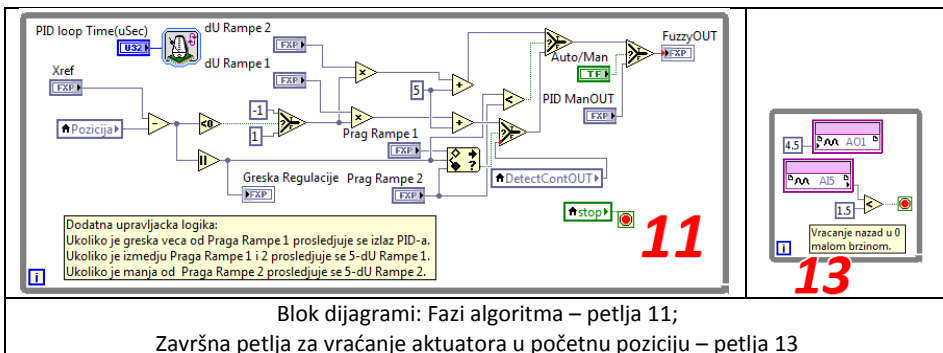
Blok dijagram uključivanje/isključivanje upravljanja na osnovu greške – petlja 8



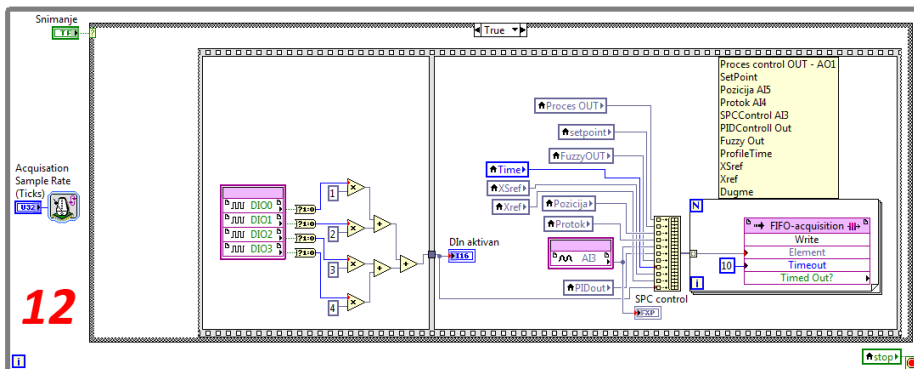
Blok dijagram algoritma za nalaženje praga greške analognog ulaza – petlja 9



Blok dijagram algoritma za detekciju postojanja pomeranja – petlja 10



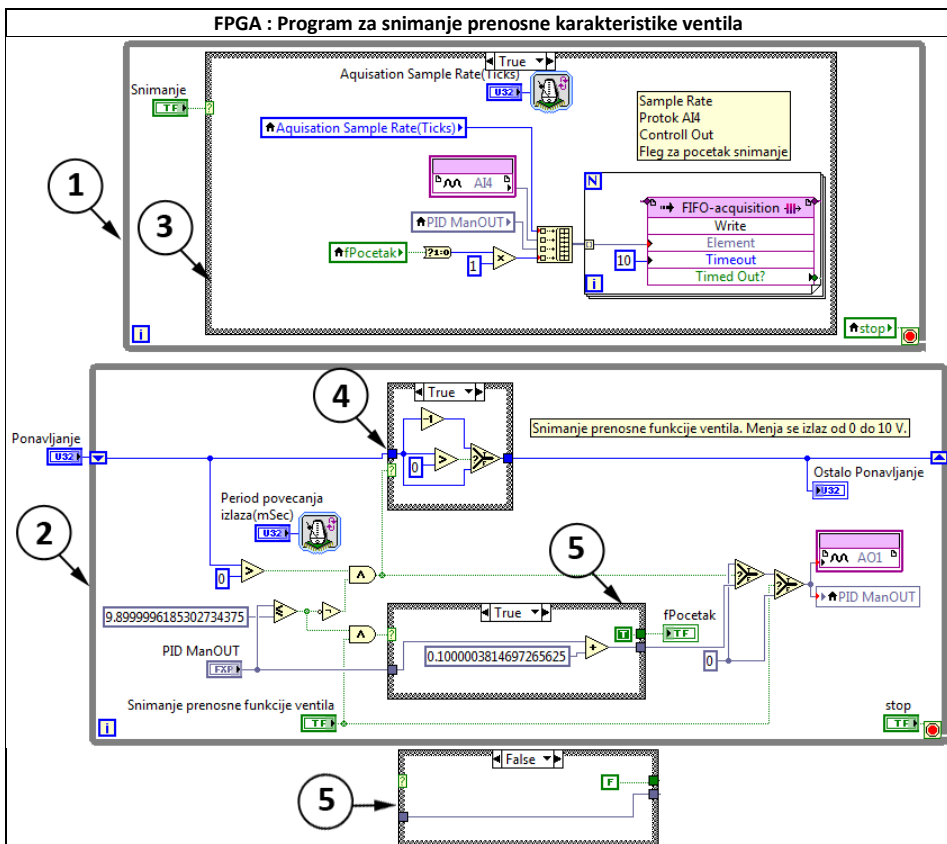
Blok dijagrami: Fazi algoritma – petlja 11;
 Završna petlja za vraćanje aktuatora u početnu poziciju – petlja 13



Blok dijagram petlje za akviziciju podataka – petlja 12

Prilog 2. Program za snimanje prenosne karakteristike proporcionalnog ventila

Program za snimanje prenosne karakteristike proporcionalnog ventila, koji je korišćen u eksperimentalnom delu, realizovan je u *LabVIEW 2011* okruženju, i predviđen je za *sbRIO 9636*, proizvođača National Instrument. Program se sastoji iz dva dela, izvrsni deo koji je realizovan na FPGA i korisnički deo koji je realizovan na RT kontroleru.

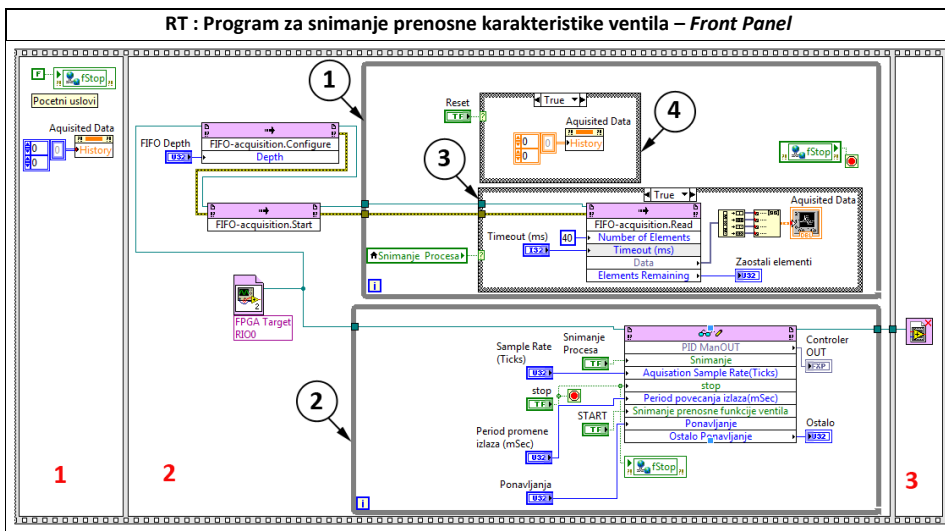


Program na FPGA kolu se sastoji iz dve beskonačne *while* petlje koji se izvršavaju sve dok se pritiskom na taster **stop** ne zaustave. Petlja [1] vrši akviziciju i prenos signala na RT kontroler pomoću *FIFO-acquisition* registra, na

kom je podešen DMA prenos podataka. Snimaju se sledeći signali: napon na ventilu (*PID ManOUT*), protok vazduha (*A14*), fleg koji označava početak snimanja (*fPocetak*), i podešena perioda uzorkovanja (*Aquisition Sample Rate*). Snimanje se započinje pritiskom na taster **Snimanje**.

Petlja [2] vrši kontrolu izlaznog upravljačkog napona koji se nakon uključivanja prekidača **Ponavljanje** menja od 0 do 10 V u koracima od 0,1 V na svakih 50 ms (perioda povećavanja izlaza se podešava pomoću parametra *Period povecanja izlaza*). Snimanje se ponavlja 30 puta (parametar *Ponavljanja*).

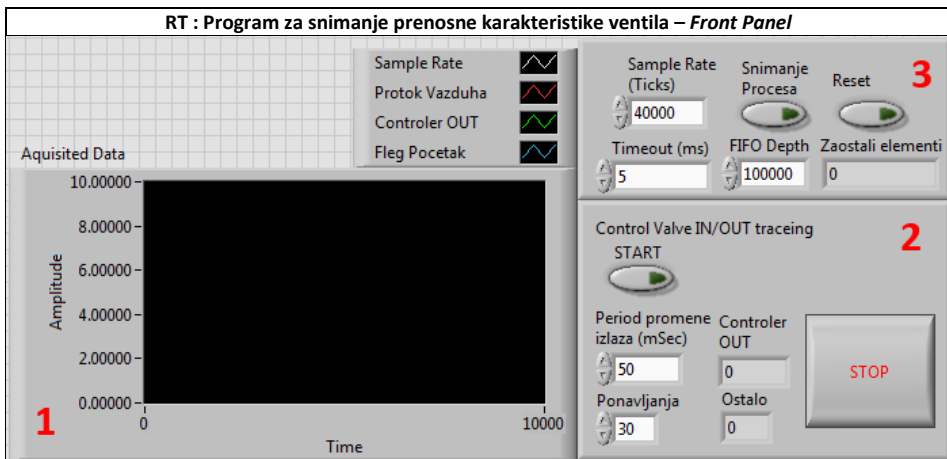
Program na RT kontroleru je podeljen u tri segmenta. U prvom segmentu (1) se inicijalizuju promenljive, nakon čega se odmah prelazi na drugi segment (2) u kome se nalaze dve beskonačne *while* petlje koje se izvršavaju sve dok se pritiskom na taster **stop** ne zaustave. U segmentu (2) se dešava komunikacija sa FPGA delom programa. U bloku *FPGA Target RIO0* je definisan VI za FPGA, a promenljive i registri koji se posmatraju na RT kontroleru se prenose preko *Read/Write Control* bloka u slučaju petlje [2] ili preko FIFO registra u slučaju petlje [1].



Petlja [1] vrši akviziciju podataka sa FPGA preko FIFO registra *FIFO-acquisition* i primljene podatke prikazuje u bloku *Aquisition Data* odakle se podaci lako mogu izvesti u eksel tabelu. Iščitavanje podataka iz FIFO registra se dešava u *if strukturi* [3], dok *if struktura* [4] služi za resetovanje očitanih podataka pritiskom na dugme **Reset**. U slučaju *if struktura* [3 i 4] definisane su samo „True” vrednosti.

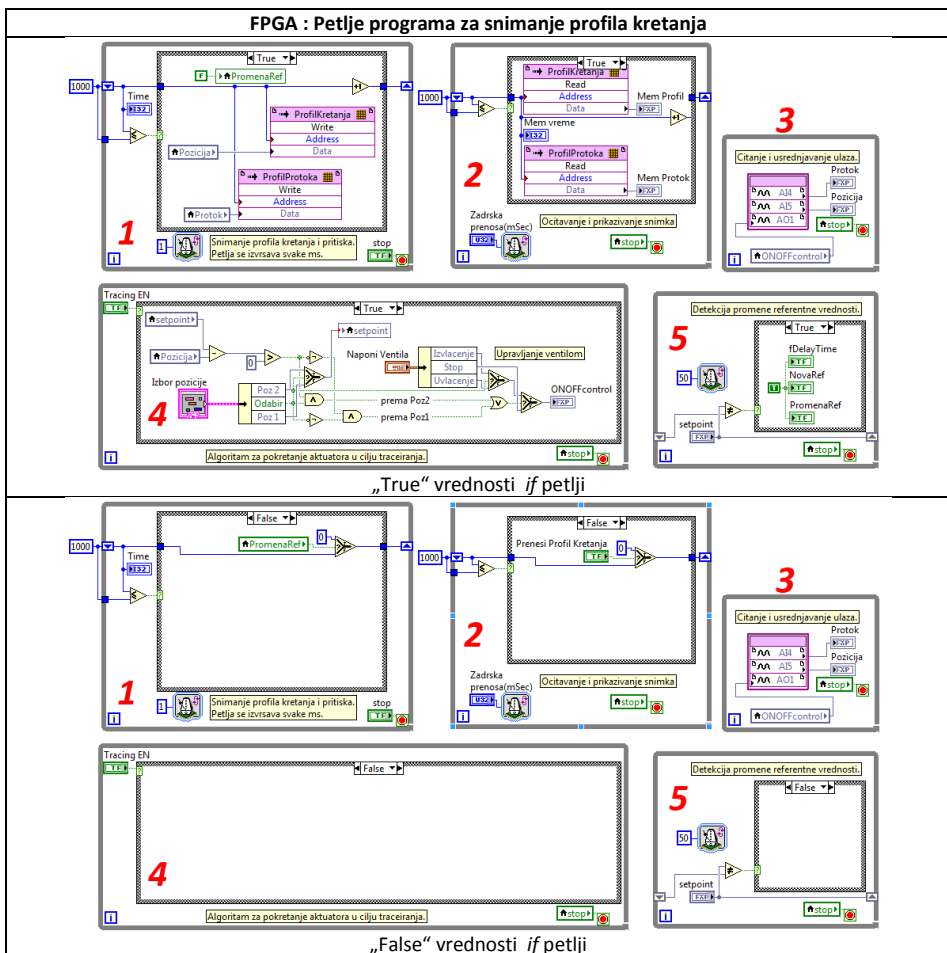
Nakon zaustavljanja petlji [1 i 2] unutar segmenta (2) izvršava se segment (3) u kome se vrši zatvaranje programa koji se izvršava na FPGA platformi.

Korisnički interfejs (eng. *Front Panel*) koji se izvršava na RT kontroleru, služi za zadavanje parametara i komandi, kao i za prikaz snimljenih podataka. Sastoji se iz tri segmenta. Segment (1) je monitor za prikaz snimljenih podataka. Segment (2) služi za definisanje parametara koje određuju promenu izlaznog upravljačkog signala kojim se ventil upravlja, kao što su: dužine trajanja upravljačkog napona jedne vrednosti (*Period promene izlaza*); broj ponavljanja ciklusa promene napona od 0 - 10 V (*Ponavljjanja*). Segment (3) služi za podešavanje parametara akvizicije: periode snimanja (*Sample Rate*) koja se zadaje u taktovima (1 takt = 25 ns); dužine FIFO registra (*FIFO Depth*); dozvoljeno vreme za prenos podataka (*Timeout*).



Prilog 3. Program za snimanje krive kretanja aktuatora pod različitim opterećenjem

Program za snimanje profila kretanja aktuatora pod različitim opterećenjem, koji je korišćen u eksperimentalnom delu, realizovan je u *LabVIEW 2011* okruženju, i predviđen je za *sbRIO 9636*, proizvođača National Instrument. Program se sastoji iz dva dela, izvrsni deo koji je realizovan na FPGA i korisnički deo koji je realizovan na RT kontroleru.



Program na FPGA kolu se sastoji iz četiri *while petlje* koje se paralelno izvršavaju.

Petlja 1 služi za snimanje trenutne vrednosti pozicije i protoka u prvih 1000 ms od trenutka promene referentne pozicije. Referentna pozicija se menja pomoću dugmeta *Odabir* unutar *petlje 4*, a moguće pozicije se upisuju u promenljive *Poz1* i *Poz2*.

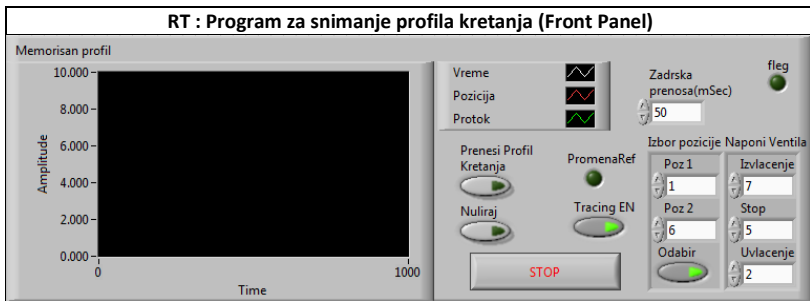
Petlja 2 služi za prenos snimljenih profila na Front Panel programa koji se izvršava na RT kontroleru, odakle se podaci mogu izvesti u eksel tabelu. Prenos vrednosti se obavlja preko indikatorskih promenljivih *Mem Profil* i *Mem Pritisak*. Brzina izvršavanja *petlje* se podešava pomoću promenljive *Zadrška prenosa*.

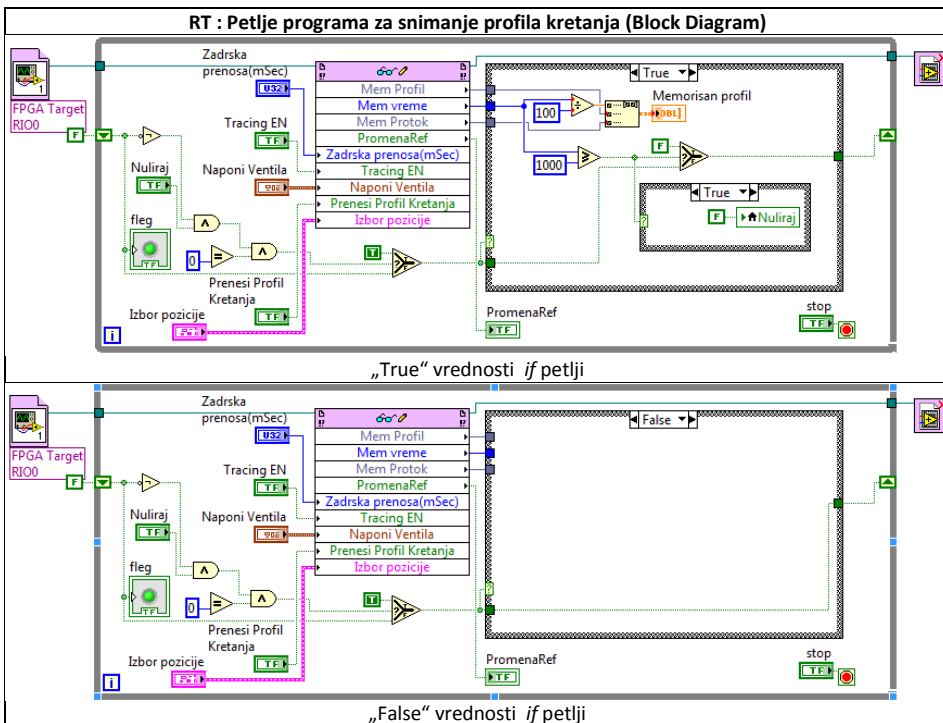
Petlja 3 služi za rad sa analognim ulazima i izlazima, tj. za čitanje vrednosti pozicije i protoka sa analognih ulaza i postavljanje upravljačkog signala na analogni izlaz. Ova *petlja* se stalno izvršava, sve dok je program uključen.

Petlja 4 je namenjena za zadavanje referentne pozicije i formiranje izlaznog upravljačkog signala. Vrednosti upravljačkih signala se definišu u promenljivoj *Naponi Ventila*, preko koje se definiše napon za izvlačenje, uvlačenje i zaustavljanje. Ukoliko se zada nova referentna pozicija, uključuje se upravljanje i aktuator počinje da se kreće. Nakon dostizanja pozicije, upravljački signal se isključuje, a aktuator se zaustavlja.

Petlja 5 vrši detekciju promene referentne vrednosti pozicije. Promenu referentne pozicije ostalim delovima programa saopštava pomoću flega *NovaRef*.

Drugi deo programa je program na RT kontroleru. Zadatak ovog programa je da prenese zadate parametre na FPGA kolo, kao i da iz promenljivih *Mem Profil*, *Mem Protok* i *Mem Time* preuzme vrednosti, i ukoliko je uključeno dugme *Prenesi Profil*, prikaže na virtualnom osciloskopu *Memorisan Profil*, odakle se podaci mogu izvesti u eksel datoteku.





Prilog 4. Program za zadavanje reference upravljačkoj jedinici SPC11

Program je napisan za PLK Siemens S7-1200 u okruženju TIA Portal Step 7 u programskom jeziku **SCL** (eng. *Structured Control Language - SCL*). Upravljački program se sastoji od dva programa tipa Organizacioni block (eng. *Organization block*):

- **OB100** (Startup) – program koji inicijalizuje sistem i izvršava se samo jednom nakon pokretanja PLK.
- **OB1** (Program cycle) – program koji se ciklično izvršava i predstavlja glavni program za zadavanje referentne tačke. Ciklus ponavljanja se pokreće uključivanjem prekidača S1, i u zavisnosti od uključenosti prekidača S2 prelazi između pozicija se ponavljaju 100 puta (S2 – uključen) ili 5 puta (S2 – isključen).

U programu su definisana dva vremenska brojača (eng. *tajmer*):

- **T1**: tip TON, vreme 0,8 s - na osnovu ovog vremena se taktuje promena referentne tačke,
- **T2**: tip TON, vreme 100 ms – na osnovu ovog vremena se definiše trajanje signala za zadavanje reference na izlazima PLK.

Alokaciona lista promenljivih

Ime	Tip	Adresa	Komentar
S1	Bool	%I0.0	Pokretanje ciklusa
S2	Bool	%I0.1	Redovni / trening
Poz1	Bool	%Q0.0	Pozicija 1
Poz2	Bool	%Q0.1	Pozicija 2
Poz3	Bool	%Q0.2	Pozicija 3
Poz4	Bool	%Q0.3	Pozicija 4
K	Int	%MW0	Trenutni Korak
Ciklus	Int	%MW2	Trenutni ciklus
BrCiklusa	Int	%MW4	Ukupan broj ciklusa

OB100 Startup program

```
"K":=0; // inicijalizacija flega za korak  
"Poz1":=0; // inicijalizacija izlaza 1  
"Poz2":=0; // inicijalizacija izlaza 2  
"Poz3":=0; // inicijalizacija izlaza 3  
"Poz4":=0; // inicijalizacija izlaza 4
```

OB1 Glavni program

```
IF NOT "S2" THEN
  "BrCiklusa":=5-1; //5 ponavljanja svake kombinacije
ELSE
  "BrCiklusa":=100-1; //100 ponavljanja svake kombinacije za učenje SPC
END_IF;

// perioda promena reference
"T1".TP(IN:="Poz1" OR "Poz2" OR "Poz3" OR "Poz4", PT:=0.8s);
// vreme trajanja signala za poziciju (izlaza)
"T2".TON(IN:="Poz1" OR "Poz2" OR "Poz3" OR "Poz4", PT:=100ms);

IF NOT "S1" THEN "K":=0; END_IF;

CASE "K" OF
  0: //inicijalizacija
    "Poz1":=0; "Poz2":=0; "Poz3":=0; "Poz4":=1;
    IF "S1" THEN "K":=1; "Ciklus":=0; END_IF;
  ;
  1: // 1-2.1 prva pozicija
    "Poz1":=1; "Poz2":=0; "Poz3":=0; "Poz4":=0;
    IF ("Poz1" OR "Poz2" OR "Poz3" OR "Poz4") AND "T2".Q THEN
      "Poz1":=0; "Poz2":=0; "Poz3":=0; "Poz4":=0;
    END_IF;
    IF NOT ("Poz1" OR "Poz2" OR "Poz3" OR "Poz4") AND NOT "T1".Q THEN
      "K":=2;
    END_IF;
  ;
  2: // 1-2.2 druga pozicija
    "Poz1":=0; "Poz2":=1; "Poz3":=0; "Poz4":=0;
    IF ("Poz1" OR "Poz2" OR "Poz3" OR "Poz4") AND "T2".Q THEN
      "Poz1":=0; "Poz2":=0; "Poz3":=0; "Poz4":=0;
    END_IF;
    IF NOT ("Poz1" OR "Poz2" OR "Poz3" OR "Poz4") AND NOT "T1".Q THEN
      IF "Ciklus"<"BrCiklusa" THEN
        "K":=1;
        "Ciklus":="Ciklus"+1;
      ELSE
        "Ciklus":=0;
        "K":=3;
      END_IF;
    END_IF;
  ;
  //-----
  3: // 1-3.1 prva pozicija
    "Poz1":=1; "Poz2":=0; "Poz3":=0; "Poz4":=0;
    IF ("Poz1" OR "Poz2" OR "Poz3" OR "Poz4") AND "T2".Q THEN
      "Poz1":=0; "Poz2":=0; "Poz3":=0; "Poz4":=0;
    END_IF;
    IF NOT ("Poz1" OR "Poz2" OR "Poz3" OR "Poz4") AND NOT "T1".Q THEN
      "K":=4;
    END_IF;
  ;
  4: // 1-3.2 druga pozicija
    "Poz1":=0; "Poz2":=0; "Poz3":=1; "Poz4":=0;
    IF ("Poz1" OR "Poz2" OR "Poz3" OR "Poz4") AND "T2".Q THEN
      "Poz1":=0; "Poz2":=0; "Poz3":=0; "Poz4":=0;
    END_IF;
    IF NOT ("Poz1" OR "Poz2" OR "Poz3" OR "Poz4") AND NOT "T1".Q THEN
      IF "Ciklus"<"BrCiklusa" THEN
        "K":=3;
        "Ciklus":="Ciklus"+1;
      ELSE
        "Ciklus":=0;
        "K":=5;
      END_IF;
    END_IF;
  ;
;
```

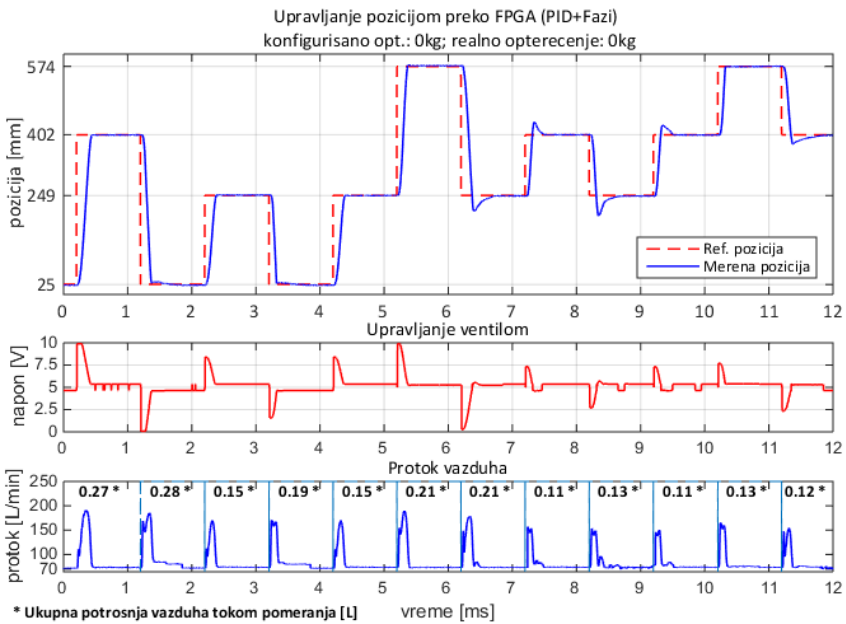
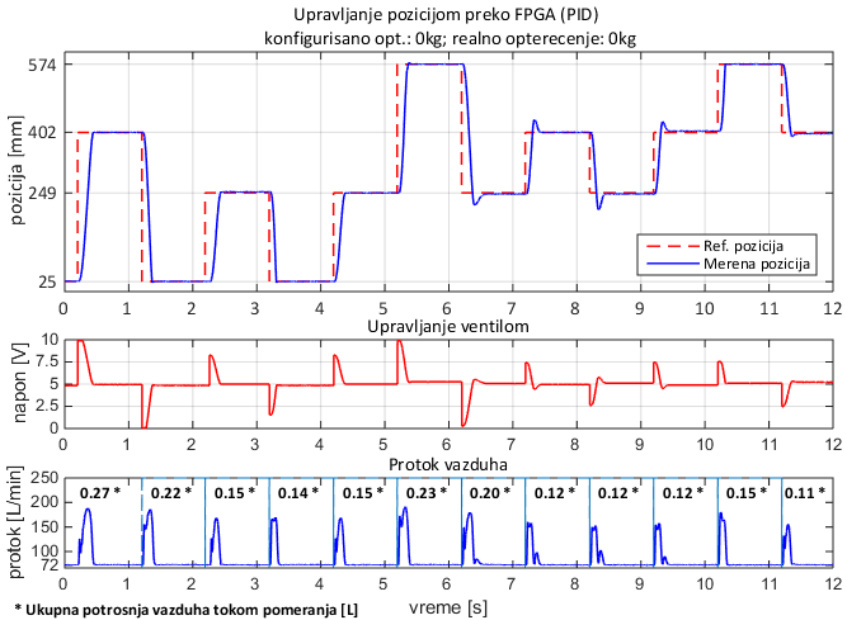
```

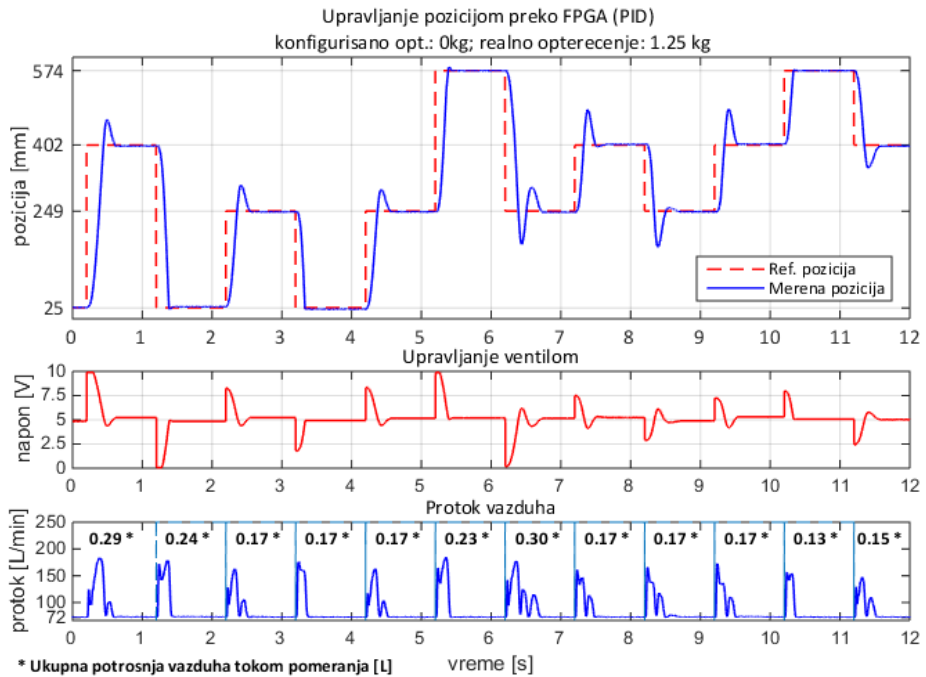
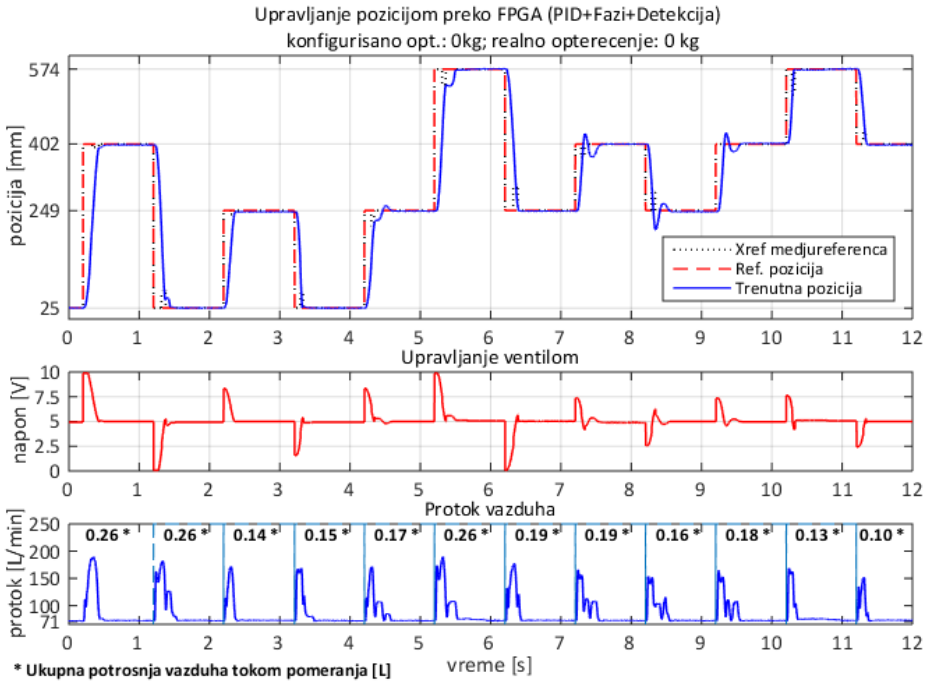
//-----
5: // 1-4.1   prva pozicija
   "Poz1":=1;   "Poz2":=0;   "Poz3":=0;   "Poz4":=0;
   IF ("Poz1" OR "Poz2" OR "Poz3" OR "Poz4") AND "T2".Q THEN
       "Poz1":=0;   "Poz2":=0;   "Poz3":=0;   "Poz4":=0;
   END_IF;
   IF NOT ("Poz1" OR "Poz2" OR "Poz3" OR "Poz4") AND NOT "T1".Q THEN
       "K":=6;
   END_IF;
;
6: // 1-4.2   druga pozicija
   "Poz1":=0;   "Poz2":=0;   "Poz3":=0;   "Poz4":=1;
   IF ("Poz1" OR "Poz2" OR "Poz3" OR "Poz4") AND "T2".Q THEN
       "Poz1":=0;   "Poz2":=0;   "Poz3":=0;   "Poz4":=0;
   END_IF;
   IF NOT ("Poz1" OR "Poz2" OR "Poz3" OR "Poz4") AND NOT "T1".Q THEN
       IF "Ciklus"<"BrCiklusa" THEN
           "K":=5;
           "Ciklus":="Ciklus"+1;
       ELSE
           "Ciklus":=0;
           "K":=7;
       END_IF;
   END_IF;
;
//-----
7: // 2-3.1   prva pozicija
   "Poz1":=0;   "Poz2":=1;   "Poz3":=0;   "Poz4":=0;
   IF ("Poz1" OR "Poz2" OR "Poz3" OR "Poz4") AND "T2".Q THEN
       "Poz1":=0;   "Poz2":=0;   "Poz3":=0;   "Poz4":=0;
   END_IF;
   IF NOT ("Poz1" OR "Poz2" OR "Poz3" OR "Poz4") AND NOT "T1".Q THEN
       "K":=8;
   END_IF;
;
8: // 2-3.2   druga pozicija
   "Poz1":=0;   "Poz2":=0;   "Poz3":=1;   "Poz4":=0;
   IF ("Poz1" OR "Poz2" OR "Poz3" OR "Poz4") AND "T2".Q THEN
       "Poz1":=0;   "Poz2":=0;   "Poz3":=0;   "Poz4":=0;
   END_IF;
   IF NOT ("Poz1" OR "Poz2" OR "Poz3" OR "Poz4") AND NOT "T1".Q THEN
       IF "Ciklus"<"BrCiklusa" THEN
           "K":=7;
           "Ciklus":="Ciklus"+1;
       ELSE
           "Ciklus":=0;
           "K":=9;
       END_IF;
   END_IF;
;
//-----
9: // 2-4.1   prva pozicija
   "Poz1":=0;   "Poz2":=1;   "Poz3":=0;   "Poz4":=0;
   IF ("Poz1" OR "Poz2" OR "Poz3" OR "Poz4") AND "T2".Q THEN
       "Poz1":=0;   "Poz2":=0;   "Poz3":=0;   "Poz4":=0;
   END_IF;
   IF NOT ("Poz1" OR "Poz2" OR "Poz3" OR "Poz4") AND NOT "T1".Q THEN
       "K":=10;
   END_IF;
;
10: // 2-4.2   druga pozicija
   "Poz1":=0;   "Poz2":=0;   "Poz3":=0;   "Poz4":=1;
   IF ("Poz1" OR "Poz2" OR "Poz3" OR "Poz4") AND "T2".Q THEN
       "Poz1":=0;   "Poz2":=0;   "Poz3":=0;   "Poz4":=0;
   END_IF;
   IF NOT ("Poz1" OR "Poz2" OR "Poz3" OR "Poz4") AND NOT "T1".Q THEN
       IF "Ciklus"<"BrCiklusa" THEN
           "K":=9;
           "Ciklus":="Ciklus"+1;
       ELSE
           "Ciklus":=0;
       END_IF;
   END_IF;

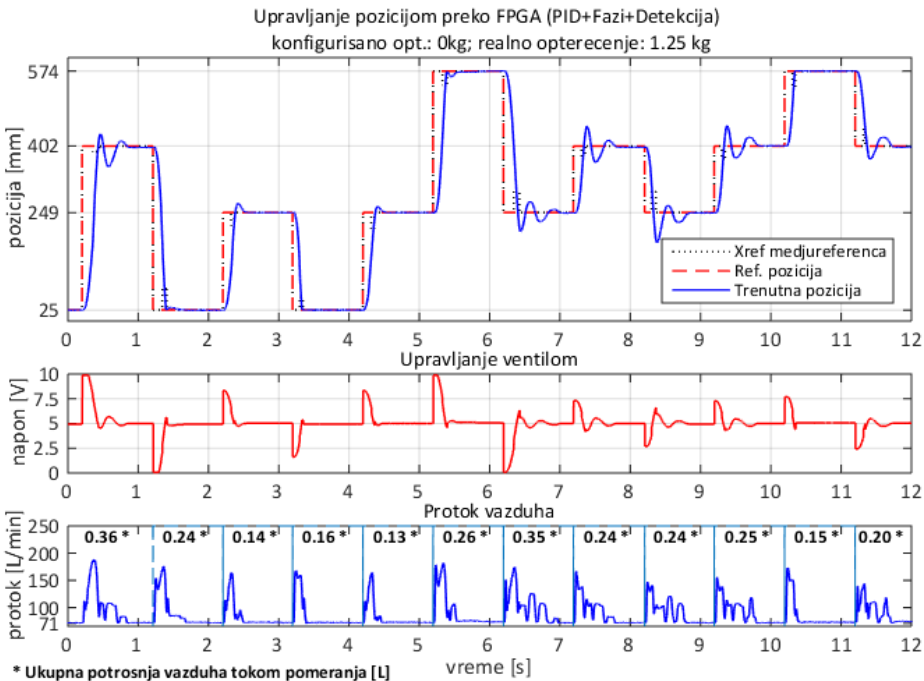
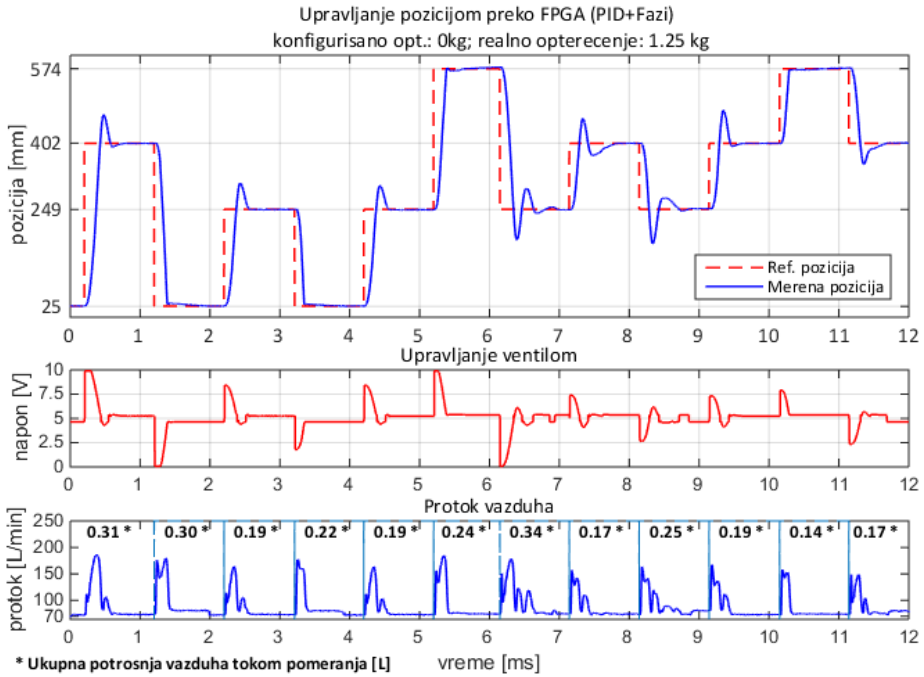
```

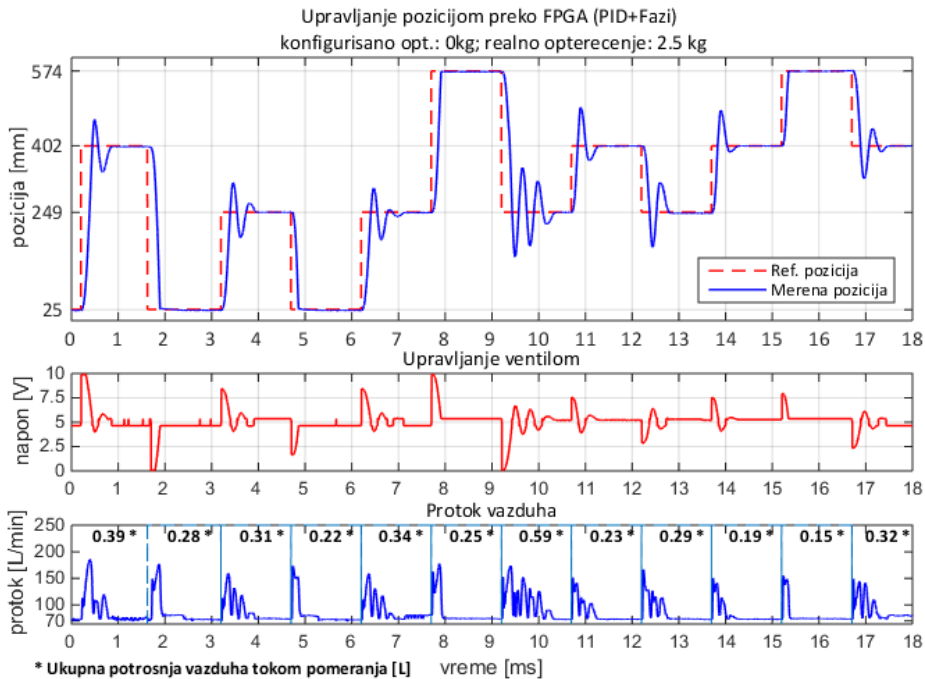
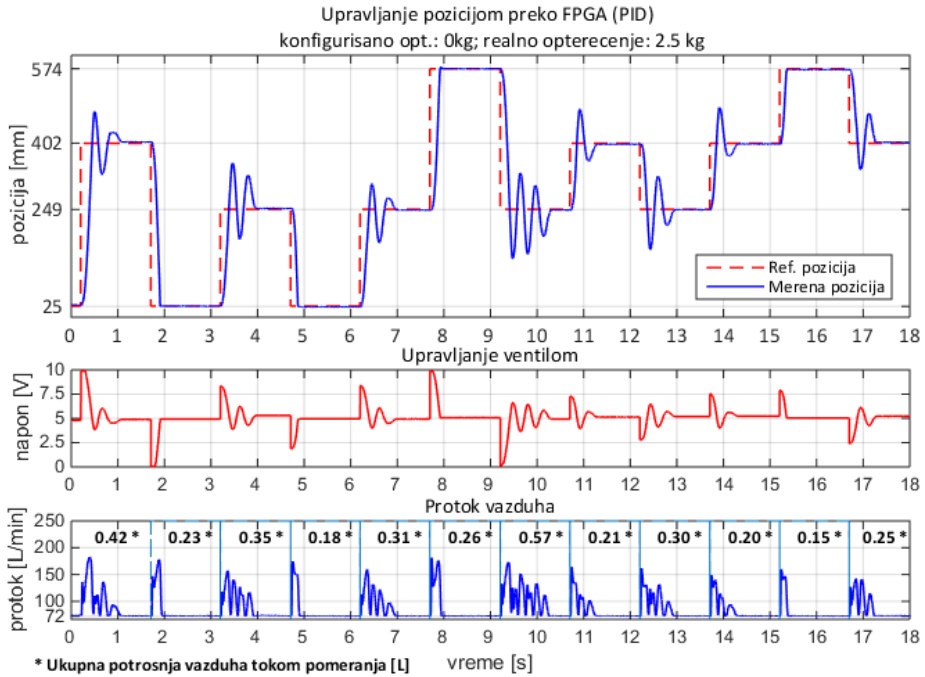
```
        "Ciklus":=0;
        "K":=11;
        END_IF;
    END_IF;
;
//-----
11: // 3-4.1   prva pozicija
    "Poz1":=0;    "Poz2":=0;    "Poz3":=1;    "Poz4":=0;
    IF ("Poz1" OR "Poz2" OR "Poz3" OR "Poz4") AND "T2".Q THEN
        "Poz1":=0;    "Poz2":=0;    "Poz3":=0;    "Poz4":=0;
    END_IF;
    IF NOT ("Poz1" OR "Poz2" OR "Poz3" OR "Poz4") AND NOT "T1".Q THEN
        "K":=12;
    END_IF;
;
12: // 3-4.2   druga pozicija
    "Poz1":=0;    "Poz2":=0;    "Poz3":=0;    "Poz4":=1;
    IF ("Poz1" OR "Poz2" OR "Poz3" OR "Poz4") AND "T2".Q THEN
        "Poz1":=0;    "Poz2":=0;    "Poz3":=0;    "Poz4":=0;
    END_IF;
    IF NOT ("Poz1" OR "Poz2" OR "Poz3" OR "Poz4") AND NOT "T1".Q THEN
        IF "Ciklus"<"BrCiklusa" THEN
            "K":=11;
            "Ciklus":="Ciklus"+1;
        ELSE
            "Ciklus":=0;
            "K":=100;
        END_IF;
    END_IF;
;
//-----
100://kraj snimanja
    IF NOT "S1" THEN // kad se iskljuci S1
        "K":=0; //
    END_IF;
;
END_CASE;
```

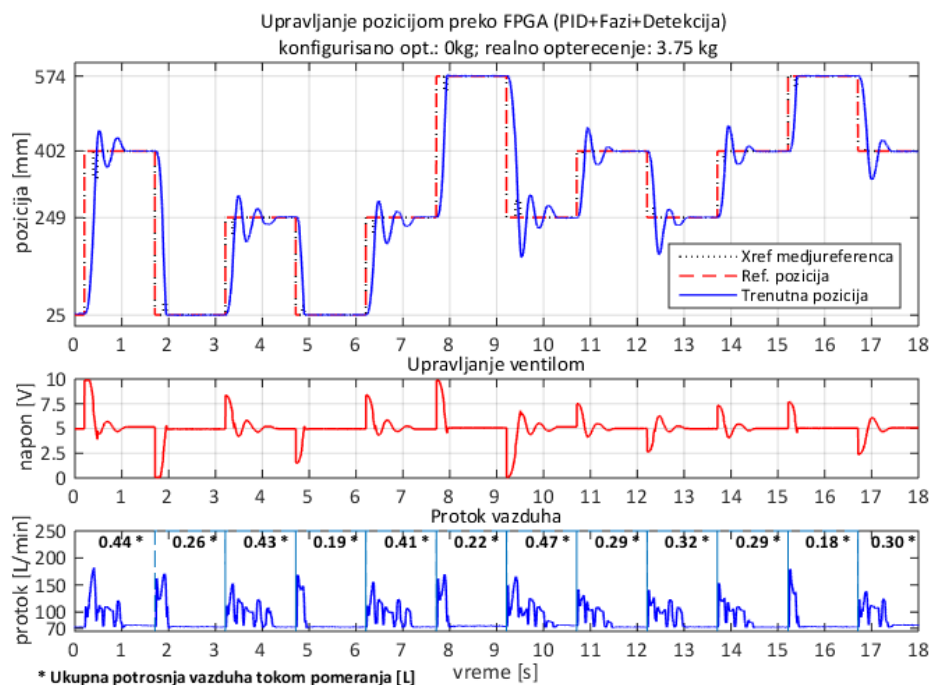
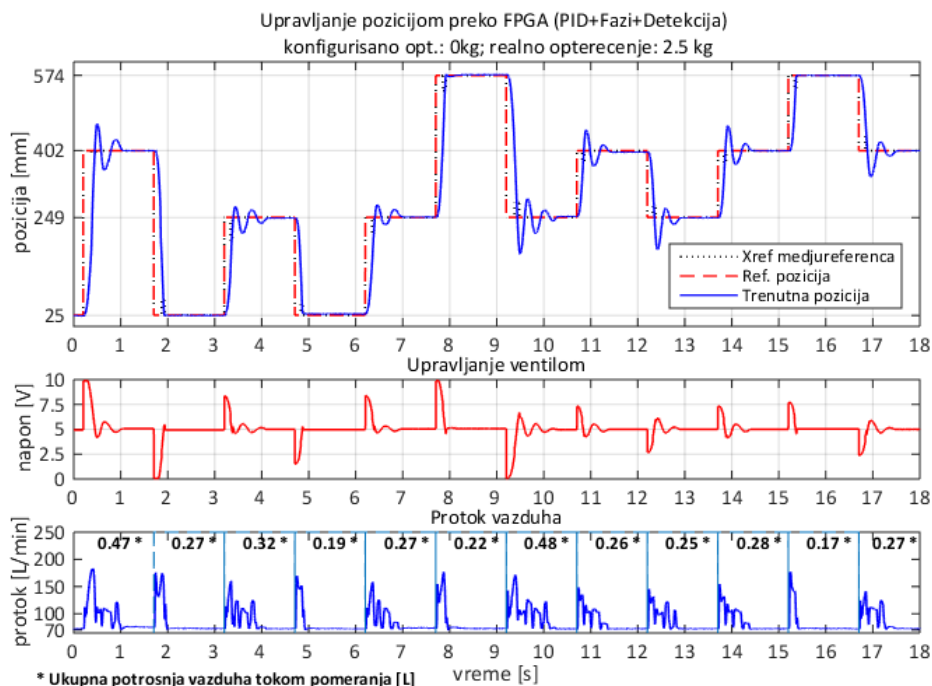

Prilog 5. Dijagrami kretanja linearnog aktuatora upravljanog pomoću FPGA

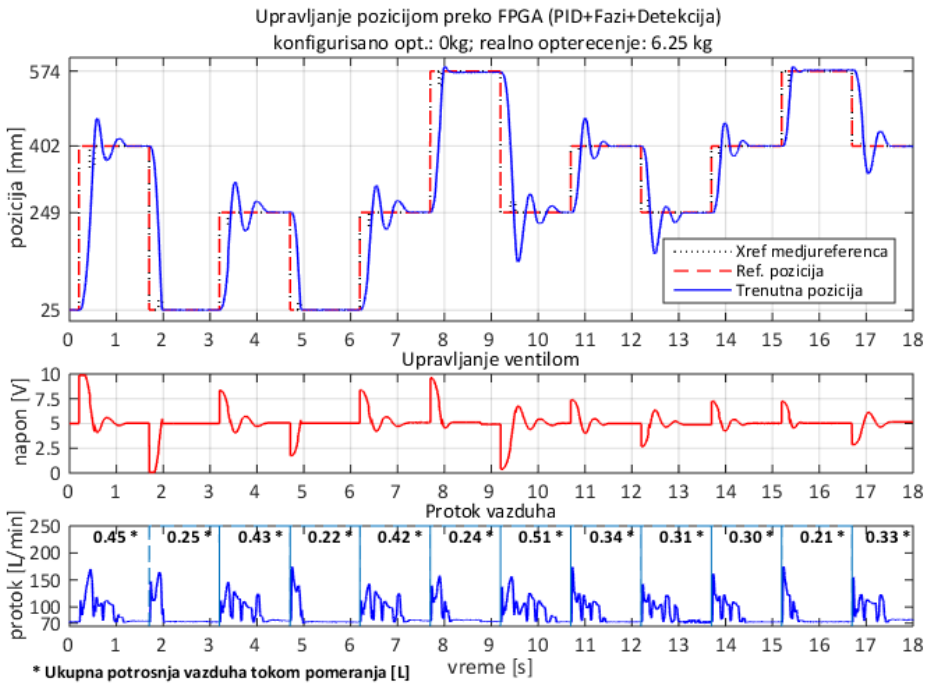
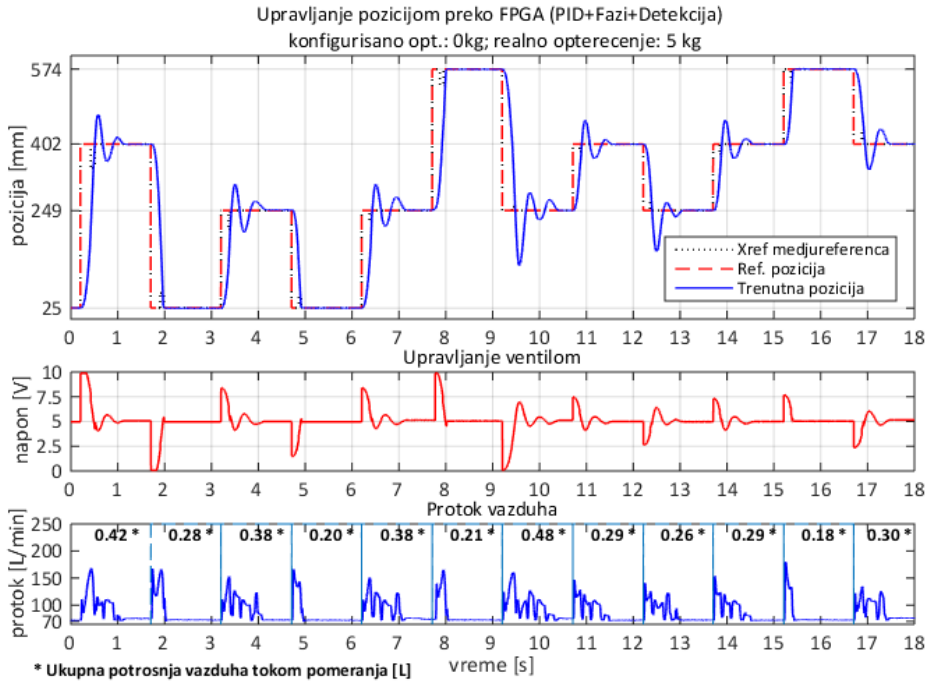


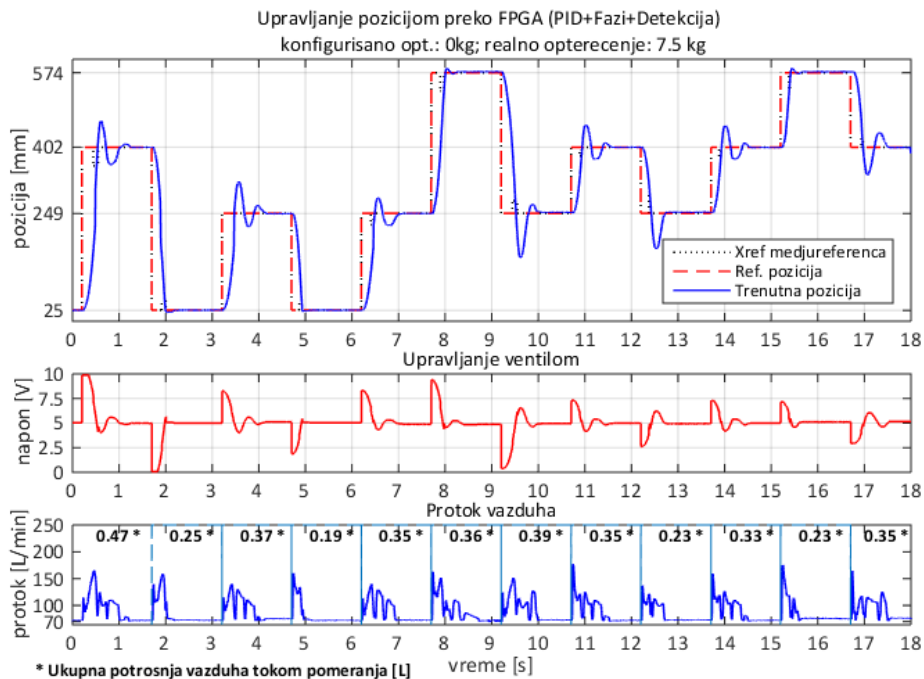












Prilog 6. Način merenja određenih fizičkih veličina u zavisnosti od tipa senzora

Tipovi senzora	Način merenja posmatrane veličine						
	Ubrzanje, Vibracija	Protok	Sila	Pozicija, Udaljenost, Pomeraj	Pritisak	Temperatura	Brzina
Rezistivni, otpornički	Masa, opruga i merenje deformacije	Anemometar / Termistor	Merenje deformacija	Magneto-resistor / Potenciometar / Merenje deformacije	Bourdonova cev i potencio-metar / Dijagrafma i merenje deformacija	RTD / Termistor	
Kapacitivni	Masa, opruga i promenljivi kondenzator		Kpacitivno merenje deformacija	Diferencijalni kondenzator	Dijagrafma i promenljiv kondenzator		
Induktivni / elektromagnetni	Masa, opruga i LVDT	Faradejev zakon / Merenje rotacije i LVDT	Čelija sa opterećenjem i LVDT / Magneto-strikcija	Vrtložne struje / Holov efekat / LVDT / sinhroni resolver / Magneto-strikcija	Dijagrafma i LVDT / Dijagrafma i promenljiva reluktansa		Vrtložne struje / Holov efekat / Faradejev zakon / LVDT
Samogenerišući	Masa, opruga i piezo električni senzor	Prenos temperature i termopar	Piezo električni senzor		Piezo električni senzor	Piro električni senzor / Termopar	
Digitalni		Propeler, turbina / Pozitivni pomeraj		Enkoder	Bourdonova cev i enkoder	Kvarcni oscilator	Inkrementalni enkoder
PN spoj				Fotoelektrični senzor	Bourdonova cev ili mehovi i kvarcni rezonator / Dijagrafma i vibrirajuća žica	Dioda / Bip. tranzistor / Temperatura-Struja konverter	
Optički		Laserska anemometrija			Dijagrafma i refleksija svetlosti		
Ultra-zvučni		Doplerov efekat / Vreme transporta		Vreme transporta			Doplerov efekat
Ostalo		Razlike pritiska / Podeš. zapremina i merenje nivoa ili pomeraja			Manometar za tečnost i senzor nivoa		

Izvor: [68]

Prilog 7. Uporedni pregled tehnologija senzora

Tehnologija	Apsolutni	Bez kontakti	Radni vek	Rezolucija	Opseg	Stabilnost
Rezistivni	Da	Ne	Kratak	Srednji	Srednji	Srednja
Kapacitivni	Da	Neki modeli	Dugačak	Od malih do velikih	Mali	Mala
Induktivni	Da	Da	Dugačak	Srednji	Srednji	Mala
LVDT	Da	Da	Dugačak	Velika	Srednji	Srednja
Holov efekat	Da	Da	Dugačak	Velika	Mali	Mala
Magneto resistivni	Da	Da	Dugačak	Velika	Mali	Mala
Magneto striktivni	Da	Da	Dugačak	Velika	Veliki	Velika
Enkoderi	Neki modeli	Neki modeli	Srednji	Od malih do velikih	Srednji	Velika

Izvor: [67]

Prilog 8. Osnovne karakteristike rezistivnog i magnetnih senzora

Tehnologija	Rezolucija	Nelinearnost	Merni opseg	Robustnost
Magnetostruktivni	Velika	Mala	10 mm – 20 m	Velika
LVDT	Velika	Srednja	2 mm – 200 mm	Velika
Induktivni	Srednja	Srednja	2 mm – 500 mm	Velika
Encoderski	Srednja	Mala	10 mm – 2 m	Mala
Ultrazvučni	Mala	Velika	100 mm – 20 m	Srednja
Rezistivni	Srednja	Srednje	10 mm-500 mm	Srednja

Izvor: [67]