



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



Jovan Šulc

**POVIŠENJE ENERGETSKE EFIKASNOSTI
PROGRAMABILNOG PNEUMATSKOG
MANIPULATORA U KONTAKTNIM ZADACIMA**

Doktorska disertacija

Novi Sad, 2016



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:	msc Јован Шуљц
Ментор, МН:	др Драган Шешлија, ред. проф.
Наслов рада, НР:	Повишење енергетске ефикасности програмабилног пнеуматског манипулатора у контактним задацима
Језик публикације, ЈП:	српски
Језик извода, ЈИ:	српски / енглески
Земља публикавања, ЗП:	Република Србија
Уже географско подручје, УГП:	Аутономна Покрајина Војводина
Година, ГО:	2016
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)	8/155/77/13/76/-/4
Научна област, НО:	Мехатроника
Научна дисциплина, НД:	Пнеуматско управљање
Предметна одредница/Кључне речи, ПО:	Ширинска модулација импулса, пропорционално управљање, енергетска ефикасност, пнеуматски манипулатор, ПЛК,
УДК	
Чува се, ЧУ:	Библиотека Факултета техничких наука, Нови Сад, Србија
Важна напомена, ВН:	Нема
Извод, ИЗ:	Дат је преглед могућности за повишење енергетске ефикасности пнеуматског програмабилног манипулатора примењеног у контактним задацима. Пројектовано је и реализовано испитно постројење. Посебно је указано на могућности пројектовања различитих управљачких система. Развијени су примери PWM и пропорционалног управљања. Испитана су предложена решења из различитих аспеката енергетске ефикасности и квалитета праћења трајекторије при коришћењу различитих врста материјала и алата. Извучени су потребни закључци.
Датум прихватања теме, ДП:	
Датум одбране, ДО:	
Чланови комисије, КО:	Председник: др Бранислав Боровац, ред. проф. Члан: др Илија Ковачевић, ред. проф. Члан: др Љубомир Миладиновић, ред. проф. Члан: др Марин Гостимировић, ред. проф. Члан: др Слободан Дудић, доцент Члан, ментор: др Драган Шешлија, ред. проф.
	Потпис ментора



KEY WORDS DOCUMENTATION

Accession number, ANO :	
Identification number, INO :	
Document type, DT :	Monographic documentation
Type of record, TR :	Textual printed material
Contents code, CC :	PhD thesis
Author, AU :	msc Jovan Šulc
Mentor, MN :	Professor Dragan Šešlija, PhD
Title, TI :	Increasing energy efficiency of programmable pneumatic manipulator in contact tasks
Language of text, LT :	Serbian
Language of abstract, LA :	Serbian / English
Country of publication, CP :	Republic of Serbia
Locality of publication, LP :	Vojvodina
Publication year, PY :	2016
Publisher, PB :	Author's reprint
Publication place, PP :	Trg Dositeja Obradovića 6, Novi Sad
Physical description, PD : (chapters/pages/ref./tables/pictures/graphs/appendixes)	8/155/77/13/76/-/4
Scientific field, SF :	Mechatronics
Scientific discipline, SD :	Pneumatic control
Subject/Key words, S/KW :	PWM, proportional control, energy efficiency, pneumatic manipulator, PLC,
UC	
Holding data, HD :	Library of Faculty of Technical Sciences, Trg D. Obradovića 6, Novi Sad, Serbia
Note, N :	
Abstract, AB :	This paper contains an overview of possibilities for increasing the energy efficiency of programmable pneumatic manipulator in contact tasks. Experimental station is designed and realized as a testbed. Especially, point is on possibilities of designing of new control systems. Examples of PWM and proportional control are developed. Proposed solutions are examined from aspects of energy efficiency and quality of trajectory tracking, by using various types of materials and tools. Necessary conclusions are drawn.
Accepted by the Scientific Board on, ASB :	
Defended on, DE :	
Defended Board, DB :	President: Professor Branislav Borovac, PhD
	Member: Professor Ilija Kovačević, PhD
	Member: Professor Ljubomir Miladinović, PhD
	Member: Professor Marin Gostimirović, PhD
	Member: Assistant Professor Slobodan Dudić, PhD
	Member, Mentor: Professor Dragan Šešlija, PhD
	Mentor's sign

Sadržaj

Rezime	iii
Zahvalnica	v
Spisak slika.....	vi
Spisak tabela	ix
Spisak skraćenica	x
1. Uvod	1
1.1 Karakteristike pneumatskih sistema.....	2
1.2 Energetska efikasnost pneumatskih sistema.....	3
1.3 Predmet istraživanja.....	5
1.4 Cilj istraživanja i očekivani rezultati.....	5
1.5 Hipoteze	6
1.6 Pregled disertacije	6
2. Teorijske osnove i pregled literature	8
2.1 Pregled vladajućih stavova u literaturi	8
2.2 Sistemski prilaz	14
2.3 Kontaktne zadaci	15
2.3.1 Uvod u kontaktne zadatke.....	15
2.3.2 Podjela kontaktnih zadataka	15
2.3.3 Kontaktne zadaci u industriji.....	16
2.3.4 Obrada rendisanjem.....	17
2.4 Kvalitet obrade.....	22
2.5 Proporcionalno upravljanje.....	26
2.6 PWM upravljanje.....	31
3. Razvoj i projektovanje eksperimentalne stanice za analizu i sintezu upravljačkih zakona u kontaktu sa dinamičkom okolinom	35
3.1 Opis sistema	35
3.2 Materijal koji se obrađuje	36
3.3 Laboratorije i oprema za eksperimentalni rad	37
3.3.1 Uređaj za merenje potrošnje vazduha pod pritiskom	44

3.3.2 Uređaj za određivanje kvaliteta obrađene površine	50
3.4 Upravljanje pneumatskim aktuatorima.....	51
3.4.1 PWM upravljanje	54
3.4.2 Proporcionalno upravljanje.....	60
3.4.3 Pokretanje manipulatora	62
4. Poređenje karakteristika upravljanja pri različitim realizacijama upravljačkog sistema.....	64
4.1 Postupak programabilnog rendisanja	64
4.2 Poređenje upravljanja po različitim kriterijumima	65
4.2.1 Karakteristike proporcionalnog upravljanja u procesu rezanja	66
4.2.2 Karakteristike PWM upravljanja u procesu rezanja	71
4.3 Poređenje potrošnje VPP.....	75
4.3.1 Proces rezanja žljeba	75
4.3.2 Kvalitet praćenja trajektorije	76
4.3.3 Kvalitet obrađene površine.....	77
4.3.4 Tehno ekonomska analiza.....	78
5. Pravci daljeg istraživanja.....	83
6. Zaključak.....	85
7. Literatura.....	87
Prilozi.....	93
Prilog A - Kod – PLK, PWM upravljanje.....	93
Prilog B – Kod – PLK, proporcionalno upravljanje – cpx - cmax.....	110
Prilog C – Parametrizacija u FCT.....	116
Prilog D – Rezultati merenja – potrošnja VPP	154

Rezime

Prema široko prihvaćenoj definiciji Instituta za Robotiku u Americi, robot je reprogramabilni multifunkcionalni manipulator, konstruisan tako da može da pomera materijale, delove, alate ili specijalne uređaje korišćenjem lako izmenljivih programa za kretanje pri obavljanju različitih zadataka. Takva definicija se pojavila 1980. godine i predstavlja trenutno stanje robotike i tehnologije. Po svojoj programabilnosti, industrijski robot predstavlja tipičan primer programabilnog automatizovanog sistema.

Shodno tome, ovaj rad je posvećen razvoju programabilnog automatizovanog sistema koji koristi vazduh pod pritiskom kao energiju za izvršenje kontaktnog zadatka. Cilj je povišenje energetske efikasnosti programabilnog pneumatskog manipulatora korišćenjem različitih vrsta upravljanja pri realizaciji kontaktnih zadataka.

Projektovana je i praktično razvijena radna stanica (programabilni pneumatski manipulator) na kojoj je moguće vršiti sintezu i analizu upravljačkih zakona pri radu manipulatora u kontaktu sa dinamičkom okolinom i ispitivati probleme vezane za procese obrade. Analiziranjem eksperimentalno dobijenih podataka, iz aspekta energetske efikasnosti i kvaliteta praćenja trajektorije dobijeni su određeni rezultati i izvučeni su odgovarajući zaključci koji omogućavaju precizno modeliranje relevantnih parametara kontaktnih procesa kao i izbor najpogodnijeg zakona upravljanja. Prema dostupnim informacijama, relativno je malo radova ovog tipa koji imaju i praktičnu realizaciju, što predstavlja jedan od osnovnih doprinosa ovog rada.

Da bi se objasnili osnovni pojmovi energetske efikasnosti pri korišćenju vazduha pod pritiskom, kao i prednosti i nedostaci metoda kojima se to radi, istraživanje je započeto sa teorijskim osnovama vezanim za karakteristike vazduha kao glavnog izvora i prenosioca energije. Kako ova oblast teži sve većem razvoju, teorijske osnove su u nekim delovima detaljno objašnjene. Namera je bila da se ovaj deo materijala izloži jasno i sistematski, do nivoa koji bi razumeo širi krug korisnika sistema vazduha pod pritiskom.

Centralni deo ovog rada je deo koji je obuhvatio razvoj realizovane eksperimentalne stanice koja simulira proces obrade rendisanjem. U tu svrhu korišćeni su pneumatski cilindri, pneumatski razvodnici, odgovarajuće upravljačke jedinice, noževi sa pravom drškom različitih dimenzija itd. Za predmete rada koji se obrađuju izabrani su mekši materijali, plastike različite tvrdoće.

Korišćenjem laboratorijske merne opreme dobijeni su podaci o količini vazduha pod pritiskom koja se troši u postupku obrade rendisanjem, kada je vršeno skidanje viška materijala sa predmeta rada. U tom cilju, analizirane su karakteristike softvera i hardvera i izložene su dve varijante upravljanja razvijenom eksperimentalnom stanicom. Takođe, korišćenjem posebno razvijenog uređaja, meren je kvalitet praćenja trajektorije koju ostvaruje vrh noža tokom procesa rezanja.

Nakon toga izvršena su merenja i analiziranja gubitaka vazduha pod pritiskom u eksperimentalnom sistemu za različite vrste upravljanja. Pored toga, kvalitet obrađenih površina dobijen kao posledica realizovanih trajektorija noža za rendisanje treba da posluži kao jedan od elemenata pri poređenju upravljačkih zakona. U okviru ovog dela samo su nagoveštene neke mogućnosti kao i prednosti i mane aktuatora i razvodnika koji su se koristili. Vrste upravljanja koje se u ovom radu koriste su proporcionalno i upravljanje pomoću širinsko impulsne modulacije (PWM). Sve je prikazano grafički i tabelarno a posebna pažnja je posvećena uporednoj analizi različitih vrsta upravljanja koje su praktično primenjene.

Na osnovu dobijenih rezultata izvučeni su odgovarajući zaključci.

Zahvalnica

Želja, volja, odricanje i drugačiji pogled na svet vode ka uspehu.

Ova doktorska disertacija, predstavlja rezultat višegodišnjeg istraživačkog rada u oblasti energetske efikasnosti i pneumatskih sistema, koja se razvila u jednu od značajnih i atraktivnih oblasti kako pneumatskog upravljanja, tako i proizvodnih sistema. Svakako da su mi na tom putu pomoć i podršku pružili brojni prijatelji i kolege na čemu sam im zahvalan.

Sa posebnim zadovoljstvom želim da izrazim svoju duboku zahvalnost mentoru, prof. dr Draganu Šešliji, na njegovoj svestranoj pomoći, usmeravanju i podsticanju u toku izrade disertacije.

Posebnu zahvalnost dugujem dr Stanimiru Čajetincu koji je bio uključen u neke segmente ove disertacije. Njegova stručnost, znanje i bezrezervna podrška su umnogome doprineli kvalitetu ove teze.

Članovima komisije dugujem zahvalnost na saradnji, stručnoj pomoći, savetima pri tumačenju rezultata kao i na sadržajnim sugestijama pri konačnom formulisanju ove teze.

Izdvojio bih dr Iliju Kovačevića koji u mom životu zauzima posebno mesto.

Kolegama Ivani Milenković, Vuletu Reljiću, Brajanu Bajčiju, Jovici Tasevskom, kao i ostalim kolegama koje nisam naveo zahvaljujem, na velikoj pomoći. Bili su tu uvek kada je trebalo da se pomogne a pre svega da se sasluša o problemima vezanim za doktorsku disertaciju.

Svim svojim prijateljima dugujem zahvalnost na razumevanju, jer im nisam uvek bio na raspolaganju tokom poslednjih nekoliko godina. Rođaku Žaretu puno zahvaljujem, jer nikada nije odbio da pomogne kada je trebao da se izradi deo neophodan za eksperimente.

Ogromnu zahvalnost dugujem svojim roditeljima i bratu na stalnoj i nesebičnoj podršci, koju su mi pružali tokom izrade ove disertacije. Bili su moj vetar u leđa.

Njena harizma me je usmeravala i vodila...

U situacijama kada mi je bilo najteže ona je uvek bila tu...

I nesebično mi je pružala ljubav...

Imala puno strpljenja i razumevanja za mene...

Moja desna ruka i podrška u životu...

Posvećeno mojoj verenici Vanji,

s ljubavlju i poštovanjem.

Spisak slika

Slika 1. Prikaz procesnog lanca za sistem vazduha pod pritiskom.....	4
Slika 2. Faktori od uticaja na izvršavanje kontaktnih zadataka	14
Slika 3. Osnovni kontaktni zadaci	16
Slika 4. Faktori od uticaja pri procesu rendisanja.....	18
Slika 5. Kretanje kod kratkohodne rendisaljke.....	19
Slika 6. Nož za horizontalno rendisanje: a) pravi i savijeni; b) savijeni nož za žljebove.....	20
Slika 7. Obrada procesom rendisanja: a),b) ravnih i kosih površina; c),d) pravih i T žljeb	22
Slika 8. Podela tolerancija	22
Slika 9. Mikrogeometrijske karakteristike obrađene površine.....	23
Slika 10. Profil površine.....	24
Slika 11. a) srednja visina elementa; b) srednja aritmetička vrednost odstupanja	24
Slika 12. Prikaz profila valovitosti sa parametrima od značaja, korak i visina.....	25
Slika 13. Elektropneumatsko upravljanje krajnjim pozicijama cilindra	27
Slika 14. Odziv pri pozicioniranju u krajnjim položajima	27
Slika 15. Servo pneumatski pogon cilindra.....	29
Slika 16. Odziv pri pozicioniranju kod proporcionalnog upravljanja.....	30
Slika 17. Kombinacija linearnih osa	30
Slika 18. Izgled PWM signala sa različitim vrednostima faktora ispune.....	31
Slika 19. Realizacija PWM signala	32
Slika 20. Ponašanje realnog i idealnog ventila za zadati PWM signal	33
Slika 21. Ilustracija izbora frekvencije PWM signala - ponašanje prelazne karakteristike pritiska u komori cilindra.....	34
Slika 22. 3D CAD model eksperimentalne stanice.....	36
Slika 23. Različiti materijali predmeta rada: a) PP; b) PE; c) PA;	37
Slika 24. Spolji izgled cilindra bez klipnjače i njegov poprečni presek	37
Slika 25. Analogna merna letva Festo - MLO-POT-225-TLF	38
Slika 26. CPX terminal za upravljanje pneumatskim osama	38
Slika 27. Proporcionalni razvodni ventil, Festo – VPWP-6-L-5-Q8-10-E-G	39
Slika 28. Interfejs merne letve Festo - CASM-S-D2-R3	39
Slika 29. Kontroler Fatek – FBs – 24MAT2 – D24.....	41
Slika 30. Dodatni analogni modul Fatek - FBs – 4A2D.....	42
Slika 31. Pneumatski razvodnik Festo MHE3-MS1H-3/2G-1/8.....	43
Slika 32. Izrađeni noževi za rendisanje	43
Slika 33. Kompresor za snabdevanje vazduhom pod pritiskom.....	44
Slika 34. Merač protoka AirBox	45

Slika 35. Priklučci Air Box uređaja.....	46
Slika 36. Dijagramski prikaz parametara dobijenih dinamičkim merenjem protoka vazduha pod pritiskom sa uređajem AirBox	48
Slika 37. Uređaj za merenje odstupanja od željenog profila	50
Slika 38. Izgled profila za materijal PE, nož 3 mm	50
Slika 39. Višepoložajni cilindar.....	51
Slika 40. Algoritam dostizanja željene pozicije kod PWM upravljanja.....	52
Slika 41. Programirana putanja manipulatora	53
Slika 42. Upravljanje povratnom spregom sa PID regulatorom	54
Slika 43. Arhitektura upravljačkog sistema kod PWM upravljanja.....	56
Slika 44. Pneumatska šema PWM upravljanja	57
Slika 45. Realizacija pneumatskih upravljačkih šema	59
Slika 46. Arhitektura upravljačkog sistem kod proporcionalnog upravljanja.....	60
Slika 47. Pneumatska šema proporcionalnog upravljanja	61
Slika 48. Različiti oblici profila materijala koji je odstranjivan rezanjem	64
Slika 49. Predmet rada nakon procesa rezanja.....	65
Slika 50. Izgled predmet rada i strugotine nakon izrade klasičnog žljeba	66
Slika 51. Praćenje referentnih trajektorija proporcionalnim upravljanjem dvoosnim manipulatorom, širina noža 3 mm, materijal PE	67
Slika 52. Kvalitet obrađene površine (valovitost) - proporcionalno upravljanje, širina noža 3 mm, materijal PE.....	67
Slika 53. Uvećani prikaz segmenta sa slike 52.....	67
Slika 54. Izgled obratka napravljenog od PE i strugotine posle eksperimentalne obrade rendisanjem, proporcionalno upravljanje, nož širine 3 mm: a) obradak; b) strugotina;	68
Slika 55. Potrošnja vazduha pod pritiskom za jedan ciklus \square 35 s, proporcionalno upravljanje, širina noža 3 mm, materijal PE	68
Slika 56. Praćenje referentnih trajektorija proporcionalnim upravljanjem dvoosnim manipulatorom, širina noža 3 mm, materijal PP	69
Slika 57. Kvalitet obrađene površine (valovitost) - proporcionalno upravljanje, širina noža 3 mm, materijal PP.....	69
Slika 58. Izgled obratka napravljenog od PP i strugotina posle eksperimentalne obrade rendisanjem, proporcionalno upravljanje, nož širine 3 mm: a) obradak; b) strugotina;	69
Slika 59. Praćenje referentnih trajektorija proporcionalnim upravljanjem dvoosnim manipulatorom, nož 3 mm, materijal PA	70
Slika 60. Kvalitet obrađene površine (valovitost)- proporcionalno upravljanje, širina noža 3 mm, materijal PA	70
Slika 61. Izgled obratka napravljenog od PA i strugotina posle eksperimentalne obrade rendisanjem, proporcionalno upravljanje, nož širine 3 mm: a) obradak; b) strugotina;	70
Slika 62. Praćenje referentnih trajektorija PWM upravljanjem dvoosnim manipulatorom, nož 3 mm, materijal PE.....	71
Slika 63. Kvalitet obrađene površine (valovitost)- PWM upravljanje, širina noža 3 mm, materijal PE.....	71

Slika 64. Izgled obratka napravljenog od PE i strugotine posle eksperimentalne obrade rendisanjem, PWM upravljanje, nož širine 3 mm: a) obradak; b) strugotina;	72
Slika 65. Potrošnja vazduha pod pritiskom za jedan ciklus \square 35 s, PWM upravljanje, širina noža 3 mm, materijal PE	72
Slika 66. Praćenje referentnih trajektorija PWM upravljanjem dvoosnim manipulatorom, nož 3 mm, materijal PP	73
Slika 67. Kvalitet obrađene površine (valovitost) – PWM upravljanje, širina noža 3 mm, materijal PP	73
Slika 68. Izgled obratka napravljenog od PP i strugotina posle eksperimentalne obrade rendisanjem, PWM upravljanje, nož širine 3 mm: a) obradak, b) strugotina	73
Slika 69. Praćenje referentnih trajektorija PWM upravljanjem dvoosnim manipulatorom, nož 3 mm, materijal PA	74
Slika 70. Kvalitet obrađene površine (valovitost) – PWM upravljanje, širina noža 3 mm, materijal PA.....	74
Slika 71. Izgled obratka napravljenog od PA i strugotina posle eksperimentalne obrade rendisanjem, PWM upravljanje, nož širine 3 mm: a) obradak; b) strugotina;	74
Slika 72. Grafički prikaz rezultata za isti nož i različite vrste materijala	76
Slika 73. Uvećani prikaz udubljenja u predmetu rada nastalog procesom rezanja.....	78
Slika 74. Potrošnja VPP programabilnog pneumatskog manipulatora u kompleksnoj automatizovanoj proizvodnoj ćeliji korišćenjem proporcionalnog upravljanja	80
Slika 75. Potrošnja VPP programabilnog pneumatskog manipulatora u kompleksnoj automatizovanoj proizvodnoj ćeliji korišćenjem PWM upravljanja	81
Slika 76. Komponente kompleksne automatizovane proizvodne ćelije	83

Spisak tabela

Tabela 1. Uglovi noža za rendisanje	20
Tabela 2: Klase površinske hrapavosti	25
Tabela 3. Pregled klasa kvaliteta obrađene površine koje se postižu pojedinim postupcima obrade.....	26
Tabela 4. Karakteristike Fatek – FBs – 24MAT2 – D24 modula	41
Tabela 5. Karakteristike dodatnog analognog modula Fatek - FBs – 4A2D	42
Tabela 6. Tabelarni prikaz nepravilnosti usled opterećenja sistema	46
Tabela 7. Tabelarni prikaz rezultata merenja potrošnje vazduha pod pritiskom.....	49
Tabela 8. Specifikacija pneumatskih komponenti.....	58
Tabela 9. Vrsta materijala, širina noža i oblik profila žljeba	66
Tabela 10. Potrošnja VPP kod proporcionalnog upravljanja za različite vrste materijala	75
Tabela 11. Potrošnja VPP kod PWM upravljanja za različite vrste materijala	75
Tabela 12. Cene komponenti ugrađenih za različite vrste upravljanja.....	79
Tabela 13. Uštede u potrošnji VPP sa primenom PWM upravljanja	82

Spisak skraćenica

VPP – Vazduh pod pritiskom

PLC – Programabilni logički kontroler

PWM – Pulse Width Modulation – širinsko impulsna modulacija

CIM – Computer Integrated Manufacturing – računarski integrisani proizvodni sistem

HSS – High Speed Steel – brzorezni čelik

PP – Polipropilen

PE – Polietilen

PA – Poliamid

HSPWM – High Speed PWM – brza širinsko impulsna modulacija

NC – Numerical Control - numeričko upravljanje

FCT – Festo Configuration Tool

C-APC – Complex Automated Production Cell – kompleksna automatizovana proizvodna ćelija

1. Uvod

U cilju rešavanja složenih proizvodnih problema, na početku 21. veka, uočena su postojeća ograničenja za razvoj i primenu novih proizvodnih tehnologija. Neka od ograničenja su, na primer, potreba za, u što većoj meri, prilagođenim (kustomizovanim) proizvodima, potreba za proizvodima sa specifičnim karakteristikama (posebno obrađene površine, različite boje, oblici, itd.) koje treba proizvesti brzo i relativno jeftino. Ovakvi zahtevi se ne mogu rešavati masovnom proizvodnjom i pokušava se da se problem rešava integracijom što većeg broja manjih, distribuiranih, proizvodnih kapaciteta koji koriste savremene proizvodne i komunikacione tehnologije. Tehnologije kao što su "cloud computing", računarstvo visokih performansi, internet stvari, itd. su razvijene i uveliko se koriste za rešavanje nekih od gore navedenih ograničenja.

Kustomizacija proizvodnje zahteva da se određene, male, količine nekih proizvoda prilagode potrebama specifičnih korisnika. Sa druge strane je prisutna sve veća primena plastičnih i drugih, manje tvrdih, materijala kao što su aluminijum i različite lako obradive legure što omogućava primenu netradicionalnih postupaka obrade.

Osnovni problem koji se postavlja je kako obezbediti automatizaciju obrade proizvoda koji se izrađuju u količinama koje nisu dovoljno velike da bi ekonomski bilo isplativo primeniti namenske automate (hard automation). Primena industrijskih robota i drugih programabilnih manipulatora u procesima obrade je, u tim slučajevima, preporučljiva. Zahtevi za proizvodnjom male količine proizvoda koji se prave u velikom broju varijanti dovode do potrebe primene programabilno automatizovanih mašina i uređaja koji će dobro odgovoriti na postavljene zahteve. Naročito je interesantan, iz aspekta upravljanja, slučaj kada se programabilni uređaji (standardni industrijski roboti, programabilni pneumatski ili hidraulični manipulatori, itd.) koriste za potrebe izvođenja nekih operacija mašinske obrade. To mogu biti operacije:

- obaranja ivica,
- odstranjivanja srha,
- čišćenja površina od rđe i ostataka prethodne obrade,
- dubljenja žlebova,
- obrade ravnih površina sa zahtevom za dobijanje odgovarajućih profila,
- itd.

U ovim slučajevima se govori o klasi kontaktnih zadataka jer se manipulator, umesto slobodnog kretanja njegovog krajnjeg organa, dovodi u vezu (kontakt) sa okolinom i, pri tome, treba da ispolji dejstvo odgovarajuće sile na nju.

Naravno, uvođenje programabilne automatizacije je skopčano sa dosta problema koje je potrebno rešiti radi povećanja nivoa pouzdanosti, autonomnosti u radu kao i njihove ekonomičnosti. Posebno je interesantna primena programabilnih manipulatora koji za

pogon koriste vazduh pod pritiskom jer je poslednjih godina njihova preciznost znatno poboljšana a cena je smanjena. Pri njihovoj primeni naročito treba voditi računa o potrošnji energije. Naime, opšte je poznata činjenica da vazduh pod pritiskom predstavlja relativno skup izvor energije. Zbog toga je od značaja pronaći i primeniti upravljačke koncepte koji pružaju mogućnost povećanja energetske efikasnosti pneumatskih komponenti i sistema prilikom njihovog korišćenja. Smanjenje potrošnje energije, pored ekonomskog ima i značajne pozitivne ekološke prednosti.

Ovaj rad opisuje različite prilaze u projektovanju pneumatskih upravljačkih šema i načina upravljanja pneumatskim aktuatorima u kontaktnim zadacima sa ciljem smanjenja potrošnje vazduha pod pritiskom. Smanjenje energetske potrošnje na globalnom nivou, kao i efikasna primena energije usvajanjem energetski efikasnih režima rada predstavljaju neosporne ciljeve kojima se danas teži. Ova činjenica predstavlja sastavni element internacionalnih protokola potpisanih od strane industrijski najrazvijenijih svetskih zemalja, koji podrazumevaju smanjenje ukupne emisije štetnih gasova u atmosferu.

1.1 Karakteristike pneumatskih sistema

Osnovna ideja primene pneumatskih sistema je korišćenje potencijalne energije vazduha pod pritiskom (VPP) i njeno prevođenje u mehaničku energiju radi izvršenja potrebnog zadatka. Uobičajena primena pneumatskih sistema je u industriji, u procesu proizvodnje i montaže proizvoda. Kod ovakvih zadataka se zahteva da pneumatski sistem bude u mehaničkom kontaktu sa drugim objektima a da se pri tome dejstvuje izvesnim silama na njih.

Vazduh pod pritiskom je jedan od najrasprostranjenijih oblika energije korišćenih u industriji. Pored industrije, pneumatski sistemi se primenjuju i u mnogim drugim oblastima ljudskog delovanja [1]. Prednosti pneumatskih sistema ogledaju se u brzini aktuatora, dostupnosti vazduha, eksplozivnoj sigurnosti, čistoći, sigurnosti od preopterećenja itd. Međutim, pored prednosti neki od nedostataka vazduha pod pritiskom, jesu stišljivost vazduha i visoka cena vazduha pod pritiskom.

Vazduh, kao medijum za prenos snage u pneumatskim sistemima, ima osobinu kompresibilnosti, što ga čini pogodnim za primenu u robotizovanom hvatanju i rukovanju predmetima rada, gde je često snagu potrebno preneti postepeno. Kompresibilnost vazduha omogućuje upravljani dodir između aktuatora i predmeta rada, što je teže ostvariti drugačijim tipovima aktuatora.

Prednosti pneumatskih aktuatora su povoljan odnos cene i težine, povoljan odnos cene i zapremine, zadovoljavajuća brzina izvršnih mehanizama i mogućnost ostvarenja sila koja odgovaraju specifičnim potrebama [2].

Pneumatski sistemi se bezbedno koriste u zapaljivim i eksplozivnim sredinama, dok to predstavlja problem kod elektromehaničkih i elektrohidrauličkih sistema.

Vazduh kao radni fluid pneumatskih sistema je bezopasan i uvek raspoloživ za razliku od hidrauličkih sistema gde gubitak radnog fluida znači kraj funkcionisanja i opasnost po

životnu sredinu. Svi navedeni razlozi čine pneumatske sisteme čistim i komfornim za rukovanje.

Pneumatski sistemi su manje osetljivi na temperaturne promene, za razliku od hidrauličkih, u kojima viskoznost radnog fluida jako zavisi od temperature.

Pored nabrojanih kvaliteta i dobrih osobina, pneumatski sistemi imaju i nedostatke uglavnom vezane za upravljanje takvim sistemima. Za razliku od hidrauličkih i elektro mehaničkih aktuatora, pneumatski sistemi se opisuju sistemima višeg reda, što čini realizaciju upravljanja složenijom.

Kompresibilnost vazduha uzrokuje loše prigušenje i slabu krutost sistema. Kod hidrauličkih sistema radni fluid vrši podmazivanje pokretnih delova. Pošto vazduh ne vrši podmazivanje, kod pneumatskih sistema se javljaju problemi sa statičkim i viskoznim trenjem između pokretnih delova, što takođe predstavlja problem kod upravljanja pneumatskim izvršnim organima.

Protok vazduha pod pritiskom je nelinearnog karaktera, što zajedno sa kompresibilnošću vazduha čini da su pneumatske komponente ponašaju izrazito nelinearno sa stanovišta upravljanja. Nelinearnost ograničava dostizanje visokih performansi bez obzira na upotrebljen regulator.

I pored navedenih nedostataka, stalni napredak u teoriji i primeni nelinearnih sistema omogućava prevazilaženje ovih nedostataka i čini da pneumatski sistemi imaju sve veći značaj i primenu u industriji.

1.2 Energetska efikasnost pneumatskih sistema

Vazduh pod pritiskom je jedan od najrasprostranjenijih oblika energije.

Vazduh pod pritiskom je često najskuplji oblik energije za obavljanje rada u industrijskim sistemima.

Energetska efikasnost pneumatskih sistema se postiže dobrim projektovanjem samog sistema, uz obezbeđivanje minimalnih gubitaka pritiska u distributivnom sistemu kao i odstranjivanjem zagađivača iz vazduha: vode, prljavštine, kompresorskog ulja, rđe, raznih čestica, itd.

Neefikasan sistem za proizvodnju, pripremu i distribuciju vazduha pod pritiskom dovodi do povećanja troškova po jedinici proizvedenog vazduha pod pritiskom, neodgovarajućeg ili neravnomernog rada pneumatskog alata, smanjenja radnog veka komponenti, smanjenja kapaciteta i formiranja rđe i mulja u glavnim i sporednim vodovima.

Najveći problem svakako predstavlja voda, kao i neprečišćen vazduh. U savremenim industrijskim sistemima je uočena potreba za obezbeđivanjem boljeg kvaliteta vazduha pod pritiskom i formulisani su odgovarajući standardi.

Kompresori za proizvodnju vazduha pod pritiskom troše veliku količinu električne energije. Da bi se povećala produktivnost, poboljšao kvalitet vazduha, smanjilo održavanje i zastoji potrebno je dobro upravljati sistemom za proizvodnju, pripremu i distribuciju vazduha

pod pritiskom. Svakom delu pneumatskog sistema mora biti dopremljeno onoliko vazduha pod pritiskom koliko je za njega potrebno, da bi se izvršile projektovane operacije rada.

Tri su važna razloga zbog kojih se isplati uložiti vreme i napore u povećanje energetske efikasnosti vazduha pod pritiskom:

- ušteda energije i novca zbog utvrđivanja i eliminisanja gubitaka,
- poboljšanje pouzdanosti i performansi pneumatskog sistema i
- smanjenje negativnih uticaja na okolinu kroz smanjenje utroška električne energije i smanjenje emisije ugljendioksida kao posledica toga.

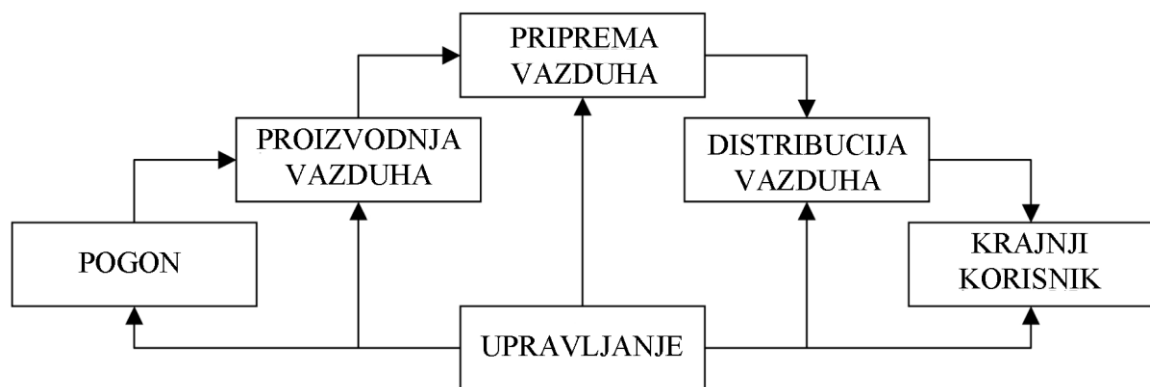
Korišćenje vazduha pod pritiskom nailazi na sve veću primenu u proizvodnim i uslužnim delatnostima, jer je njegova proizvodnja, rukovanje i primena sigurna i laka. Za proizvodnju vazduha pod pritiskom troši se prosečno oko 10 % od ukupne potrošnje električne energije u industriji. Česta je primena VPP i za pokretanje pneumatskih alata, čišćenje radnih mesta i pneumatski transport. Veliki broj ovih primena je energetske neefikasan i optimizacija ovih aplikacija predstavlja veliki potencijal za uštedu energije.

Pri sprovođenju postupaka za povišenje energetske efikasnosti zahteva se značajan nivo nadzora rada sistema kao i odgovarajuće održavanje kako bi se uspešno realizovali procesi i dovelo do značajnog povećanja pouzdanosti rada proizvodnog sistema.

Takođe se smanjuju zastoji u radu, sprečava gubitak sirovina a i povećava se mogućnost upravljanja kvalitetom proizvoda. U nekim slučajevima može da se desi da sporedni efekti primenjenih mera za povećanje energetske efikasnosti imaju veću vrednost nego sama ušteda energije.

Najčešći problemi u radu pneumatskog sistema su izazvani viškom vlage i neodgovarajućim pritiskom. Pouzdanost sistema predstavlja značajan kriterijum pri nabavci kompresora, jer kvar sistema znači prestanak proizvodnje čime se stvaraju veliki gubici. Kvalitet vazduha pod pritiskom je bitan da ne bi došlo do kvarova na proizvodnoj opremi a u nekim slučajevima vazduh pod pritiskom i direktno ulazi u proizvod.

U pneumatskim sistemima se ostvaruje tok energije koji povezuje izvor energije sa krajnjim potrošačem, kako je prikazano na slici 1.



Slika 1. Prikaz procesnog lanca za sistem vazduha pod pritiskom

Rad sistema zavisi od svakog elementa ponaosob a još više od kvaliteta celokupnog projekta.

Sledeće mere mogu poboljšati funkcionisanje procesnog lanca sistema vazduha pod pritiskom [3]:

- poboljšanje pogona,
- optimalan izbor tipa kompresora,
- poboljšanje tehnologije kompresora,
- primena sofisticiranih upravljačkih sistema,
- regeneracija otpadne toplote za upotrebu u drugim funkcijama,
- poboljšanje pripreme vazduha pod pritiskom,
- smanjenje pritiska i gubitka energije u procesu hlađenja, sušenja i filtriranja i optimizacija prema potrebama korisnika i temperaturnim uslovima,
- primena energetski efikasnijih konstrukcija komponenti,
- projekat sistema,
- redukcija padova pritiska zbog trenja u cevovodima,
- redukcija curenja vazduha,
- optimizacija rada uređaja (ili zamena) koji troše vazduh pod pritiskom,
- merenje i praćenje performansi sistema.

Za istraživanja prikazana u ovoj disertaciji najveći uticaj su imale sledeće mere: projekat sistema, optimizacija rada uređaja, merenje i praćenje performansi upravljačkog sistema, ali i ostale mere nisu zanemarene.

1.3 Predmet istraživanja

Predmet istraživanja doktorske disertacije je ispitivanje uticaja različitih vrsta pneumatskog upravljanja na povišenje energetske efikasnosti pneumatskog upravljačkog sistema sa ciljem određivanja najefikasnijeg upravljanja za pneumatski programabilni manipulator primenjen u kontaktnim zadacima. Pod pojmom programabilni pneumatski manipulator će se u ovom radu podrazumevati manipulator sa najmanje dva spregnuta kretanja realizovana pneumatskim pogonom koji je u stanju da ostvari proizvoljnu programabilnu trajektoriju u svom radnom prostoru.

Pri automatizaciji ovog postupka upravljački sistem treba da omogući tehnološkim postupkom zahtevano odstranjivanje proizvoljne količine materijala realizacijom upravljanja po poziciji.

1.4 Cilj istraživanja i očekivani rezultati

Cilj istraživanja ove doktorske disertacije je izbor optimalnog načina upravljanja programabilnim pneumatskim manipulatorom pri ostvarivanju kontaktnih zadataka, sa stanovišta energetske efikasnosti.

Neophodno je izvršiti izbor optimalne varijante pneumatskog upravljanja na osnovu definisanih kriterijuma za izbor najpogodnijeg upravljanja. Na osnovu rezultata dobijenih eksperimentalnim putem treba izvršiti poređenje po različitim kriterijumima i unaprediti realizovani mehatronički sistem radi dobijanja što efikasnijeg načina upravljanja

programabilnim manipulatorom u kontaktnim zadacima. Očekuje se da će uključivanje više realnih parametara u regulacioni algoritam dovesti do boljih performansi sistema, imajući u vidu pre svega:

- kvalitet praćenja trajektorije,
- kvalitet obrađene površine,
- energetske efikasnost upravljačkih sistema.

U toku istraživanja identifikovani su mogući načini upravljanja programabilnim linearnim pneumatskim aktuatorima u kontaktnim zadacima, radi utvrđivanja energetske efikasnosti sistema. Izvršena su poboljšanja postojećih algoritama, modifikovanjem i dodavanjem delova drugih algoritama, u cilju povišenja energetske efikasnosti sistema. Primena rešenja razvijenih ovim istraživanjima je verifikovana na konkretnim primerima. Poređenje zasnovano na eksperimentima u kojima se koristi komercijalno raspoloživa oprema treba da pokaže primenljivost i efikasnost ovih metoda kao i nivo uštede u potrošnji energije.

1.5 Hipoteze

Pri izradi ove doktorske disertacije istraživanja su započeta na osnovu sledećih hipoteza:

- Uz korišćenje digitalnog upravljanja može se realizovati servoupravljanje pneumatskim manipulatorom pomoću brzih pneumatskih razvodnika sa dva krajnja položaja – otvoren, zatvoren (on/off) položaj.
- Ovako upravljanje moguće je realizovati tako da bude energetski efikasnije u poređenju sa proporcionalnim upravljanjem i na taj način je moguće ostvariti uštedu vazduha pod pritiskom.
- Upravljanje može da se realizuje na više različitih načina tako da može da se izvrši poređenje načina upravljanja. Na osnovu prethodno definisanih kriterijuma moguće je izvršiti ocenjivanje i izvršiti izbor upravljanja u skladu sa zahtevima pojedinačnih zadataka.

1.6 Pregled disertacije

U uvodnom delu disertacije, dat je pregled karakteristika vazduha pod pritiskom (VPP), i prikazane su prednosti i mane. Pored toga definisan je problem istraživanja, određeni su ciljevi i prikazane hipoteze.

U poglavlju 2 dat je pregled dosadašnjih rezultata koji se mogu naći u literaturi. Prikazan je razvoj programabilnih manipulatora u kontaktnim zadacima. Prikazan je pregled i data je podela kontaktnih zadataka u industriji. Posebno je dat akcenat na izabrani i realizovani postupak mašinske obrade rendisanjem. Detaljno je objašnjena analiza određivanja kvaliteta obrađene površine koja se javlja kao posledica obrade procesom rendisanja. Takođe su izložene i detaljno objašnjene vrste upravljanja koje će se koristiti u ovoj disertaciji.

U glavi 3 je dat i grafički prikazan razvoj eksperimentalne stanice namenjene za ispitivanje sintetizovanih zakona upravljanja pneumatskim manipulatorom u kontaktnim zadacima

kao i za njihovu analizu. Prikazana je trenutno dostupna oprema sa glavnim karakteristikama, koja je implementirana. Definisane su upravljačke strukture čija realizacija je ostvarena na osnovu prikazanih pneumatskih šema. Takođe je prikazan primenjen postupak obrade rendisanjem pri prodiranju alata u pojedine materijale. Ispitivanja su izvršena korišćenjem sintetizovanih upravljačkih kodova za PLK – ove.

Na osnovu identifikacionih modela iz prethodnih glava u četvrtoj glavi se prikazuje čitav niz rezultata upravljanja programabilnim dvoosnim pneumatskim manipulatorom proporcionalnom i PWM tehnikom. Opisano je eksperimentalno ponašanje okoline od interesa u postupcima mašinske obrade predmeta rada, čiji su rezultati prikazani grafički za pojedine slučajeve. Prikazane su vrednosti merenja, kvalitet praćenja trajektorije pneumatskih osa i potrošnja vazduha pod pritiskom za različite slučajeve.

Glava 5 daje generalni osvrt na disertaciju sa izloženim zaključcima.

U poslednjoj glavi se predlaže koncepcija kompleksne automatizovane proizvodne ćelije za dinamičku sintezu i analizu upravljačkih zakona u kontaktnim zadacima. Prikazani su mogući pravci daljih istraživanja u oblastima kojima se bavila ova disertacija.

2. Teorijske osnove i pregled literature

Na osnovu pregleda literature je ustanovljeno da je razvoj programabilnih pneumatskih manipulatora za primene u klasi kontaktnih zadataka relativno neistraženo područje i da je potreban dalji rad na povišenju energetske efikasnosti kao i povišenju nivoa pouzdanosti, autonomnosti u radu i ekonomičnosti samog sistema. Naime, klasična realizacija ovakvih upravljanja podrazumeva primenu proporcionalnih pneumatskih osa koje su se pokazale kao značajan potrošač VPP zbog samog principa na osnovu kog funkcionišu. Stalna curenja vazduha pod pritiskom koja se javljaju kod proporcionalnih razvodnika a koji su u proporcionalnoj funkciji sa ulaznim signalom, nastaju usled kontinualnog otvaranja i zatvaranja priključaka (portova) na samom razvodniku a čime se utiče na poziciju i brzinu samih pneumatskih osa. Zbog toga je značajno utvrditi mogućnosti smanjenja potrošnje VPP pri realizaciji ovakvih zadataka i adekvatno ih kvantifikovati.

2.1 Pregled vladajućih stavova u literaturi

U poslednjim godinama prošlog veka i početkom ovog veka ponašanje robota i manipulatora u kontaktnim zadacima je jedna od najinteresantnijih tema u oblasti mehatronike, robotike i automatizacije. U radu [4] je opisano trenutno stanje razvoja robota u klasi kontaktnih zadataka, pri različitim vrstama obrada. Prikazana su istraživanja u oblastima razvoja sistema robotizovane mašinske obrade, robotizovane obrade praćenjem trajektorije. Preko dinamičkih modela i modela krutosti su analizirane vibracije i odstupanja sistema, izvršene su kompenzacije grešaka, uključujući pri tome i praćenje trajektorije. Na osnovu dostupnih informacija, cilj je da se poboljša tačnost i efikasnost sistema pri robotizovanim mašinskim obradama, i da se obezbede korisne reference tako da se razvoj sistema robotizovane mašinske obrade što više približi CNC mašinama. Predložena su poboljšanja i dat je akcenat na to da buduća istraživanja u oblasti robotizovane obrade treba da obuhvate i analizu iz aspekta energetske efikasnosti i organizacione strukture linijske robotizovane obrade.

Neka istraživanja pokazuju da roboti mogu veoma dobro da obavljaju zadatke obrade poliranjem [5, 6, 7], brušenjem [8, 9, 10, 11] i čišćenje žičanom četkom [12, 13].

Detaljna ispitivanja sile pri prodiranju alata u različite materijale i modelovanja krutosti i prigušenja su predstavljena u [14, 15].

Upravljanje pneumatskim aktuatorom pomoću širinske impulsne modulacije je relativno nov princip i buduća istraživanja treba da daju odgovor na probleme izbora optimalnog tipa i konfiguracije razvodnika kao i načina upravljanja pneumatskim servosistemom.

Pregledom dostupne literature nailazi se na brojne studije koje su u vezi sa tematikom koja se bavi upravljanjem robotima i manipulatorima po poziciji i/ili sili u procesu robotizovane obrade različitih vrsta i oblika predmeta rada. U radovima se uočava da dosta različitih parametara ima uticaj na efikasnost upravljačkog sistema a prikazano je više različitih prilaza pri rešavanju problema upravljanja po poziciji i/ili sili. Prikazane su različite vrste upravljanja, izbora parametara regulacije, modelovanje mehaničkih delova, vršena je njihova analiza i kreirane su različite vrste upravljanja. Pregledom stanja u oblasti uočeni su karakteristični problemi i potom su u narednom delu prikazani rezultati istraživanja.

Prvi radovi na modelovanju, analizi i sintezi regulatora za pneumatske aktuatora pojavljuju se 1960-ih godina dvadesetog veka [16, 17, 18] Prikazan je razvoj regulatora, kod kojih se linearizacija vrši oko zadate radne tačke. U radovima [18, 19] je ispitivano upravljanje pneumatskim aktuatorom pomoću sinteze linearnih modela proporcionalno diferencijalnih - PD regulatora.

Međutim, kod primene klasičnog PID regulatora javlja se problem podešavanja parametara u uslovima promene opterećenja i promene pritiska. Takav linearizovani regulator dobro radi u uslovima projektovanog režima, ali izvan njega može pokazivati neočekivane osobine. Pored toga, mana je i visoka cena pneumatskih servo razvodnika.

Osamdesetih godina prošlog veka je lansirana ideja zamene skupih servo razvodnika jeftinim prekidačkim pneumatskim razvodnicima.

Primena širinsko impulsne modulacije (Pulse Width Modulation - PWM) u upravljanju pneumatskim sistemima opisana je u radovima [20, 21], koji pokazuju da je moguće ostvariti upravljanje pneumatskim aktuatorom sa povratnom spregom, bez korišćenja servo razvodnika.

Drugi autori pokazuju da je moguće postići dobru tačnost pozicioniranja pneumatskog aktuatora korišćenjem PWM upravljanja, bez mehaničkih graničnika [22]. Utvrđena je korelacija između PWM signala i protoka vazduha, i dobijeni su dobri rezultati korišćenjem PID regulatora na eksperimentalnom cilindru [23, 24, 25].

Autori [25] su u svom radu korišćenjem PWM algoritama pokazali da je moguće ostvariti tačno upravljanje po poziciji pneumatskim aktuatorom korišćenjem ON/OFF elektropneumatskih razvodnika. Preko PID regulatora su definisali parametre širinsko - impulsnih signala koji se dovode na ON/OFF razvodnik, uzimajući u obzir i silu trenja i otvorenu spregu upravljanja po poziciji i na taj način ostvarili tačnije i stabilnije pozicioniranje u odnosu na grešku od 0,21 mm koja se javljala ranije.

U cilju izučavanja dinamičkog ponašanja pneumatskog servo sistema i ispitivanja uticajnih parametara, u radu [23] je izvršeno usrednjavanje delovanja PWM upravljanja i linearizacija promene pritiska u komori tako da je sistem tretiran kao linearan. Prednost takvog pristupa je mogućnost korišćenja dobro razvijenih metoda za analizu i sintezu linearnih sistema upravljanja.

PWM upravljanje pneumatskim aktuatorima, preko upravljivih ON/OFF razvodnika, kao i veza matematičkog modela sa dinamikom ponašanja pneumatskog aktuatora je prikazana u radu [26].

PWM upravljanje je samo po sebi nelinearno, a i procesi u aktuatoru su nelinearni. Nelinearnosti nastaju zbog:

- promene pritiska u komori, što je posledica različitog masenog protoka podzvučnom i nadzvučnom brzinom,
- promene graničnih vrednosti pritiska prilikom promene smera strujanja u komoru ili iz komore,
- kompresibilnosti vazduha,
- zanemarenih efekata trenja,
- varijacije opterećenja,
- nelinearne promene površine isticanja itd.

Pošto se pokazalo da regulatori sa fiksnim pojačanjem imaju ograničene performanse u upravljanju pneumatskim aktuatorom, pojavljuju se moderniji pristupi u sintezi regulatora [27].

U radu [28] je prikazan razvoj brzog, tačnog i jeftinog pneumatskog aktuatora, za upravljanje po poziciji koji je primenjen u različitim praktičnim aplikacijama gde je bilo neophodno izvršiti što tačnije pozicioniranje pri različitim opterećenjima. Prikazan je modifikovan način PWM upravljanja (PWM modulation) pomoću kojeg su poboljšane performanse PWM upravljanja. Kontinualno upravljanje je modelovano tako što je opšta povratna sprega realizovana objedinjavanjem upravljanja povratnom spregom po poziciji, brzini i ubrzanju. Predložen je novi algoritam za upravljanje parametrima LVQNN (Learning Vector Quantization Neural *Network* - kvantizacija neuronskih mreža vektorskim učenjem), na osnovu kojih je izvršena klasifikacija spoljašnjih opterećenja na pneumatskom cilindru.

Veliki napredak u razvoju regulatora za upravljanje pneumatskim sistemima postignut je korišćenjem regulatora promenljive strukture (Variable Structure Control, VSC), poznatih kao slajding regulatori [29, 30].

U disertaciji [30] razvijen je slajding regulator i primenjen na pneumatski aktuator sa jednim stepenom slobode kretanja, pri čemu je korišćen usrednjen PWM signal i potpun nelinearan opis pneumatskog sistema što je prikazano i u radu [31].

U radu [32] razvijen je novi slajding regulator sa povratnom spregom, koji je posebno namenjen za pneumatske aktuatore. Na osnovu prethodno detaljno razvijenog matematičkog modela pneumatskog sistema, gde su uključeni i dinamički parametri ventila, pomoću razvijenih algoritama je obezbeđeno nezavisno upravljanje po sili i krutosti. Analizirana je asimptotska stabilnost po Ljapunovu koja se koristila za praćenje pritiska u svakoj komori cilindra. Eksperimentalno je primenjena na pneumatskom aktuatoru, koji je implementiran na manipulatoru, pri obavljanju različitih vrsta zadataka.

Stepen interesovanja za razvoj upravljanja pneumatskim sistemima, uz primenu različitih vrsta regulatora, pokazuje i veći broj magistarskih i doktorskih radova iz te oblasti [33, 34, 35].

U narednim radovima prikazane su razne metode i do sada razvijeni različiti alati u cilju ostvarivanja upravljanja pri kontaktu u procesima mašinske obrade predmeta rada.

U radu [36] autori su imali za cilj da pri procesu poliranja predmeta rada na alatu za poliranje zadrže konstantnu silu. To je uspešno realizovano preko napona koji su se javljali u materijalu. Napon materijala koji se obrađuje deterministički pruža informaciju o kvalitetu obrade predmeta rada, a ne konstantna sila na alatu, jer su površine i geometrije predmeta rada različite za različite vrste materijala. Pri delovanju alata konstantnom silom u tački kontakta primenjen je princip Košijevih napona. Na osnovu napona koji su se javljali napravljena je mapa pritisaka. Uzeti su u obzir brzina obrtanja alata i moment koji se javljao. Mape su zatim iskorišćene za generisanje tačke podešavanja sile alata i napravljen je takav model upravljanja da naponi materijala budu konstantni. Pri upravljanju se koristila otvorena petlja.

U radu [37] opisuje se jedno od mogućih konstrukcijskih rešenja pneumatskih manipulatora kod pravolinijskih (linearnih) i krivolinijskih (ugaonih) pozicioniranja. Prikazana je jedna varijanta energetski efikasnog upravljanja. Korišćeni su standardni i fazi logički kontroleri.

Fazi logički kontroler primenjuje se u upravljanju pneumatskim sistemima samostalno, ili češće kao hibridni (neuro-fazi, fazi - PID), [38, 39, 40]. Ovaj način upravljanja uključuje iskustveni pristup u upravljanju pneumatskim aktuatorom, ali bez strogog analitičkog pristupa koji utvrđuje stabilnost i performanse regulatora.

U literaturi [41] se navodi da je pomoću fazi regulatora sa korektno podešenim parametrima dostignuta tačnost pozicioniranja od $\pm 0,1$ mm. U disertaciji [35] se navodi da je pomoću PID regulatora ostvarena tačnost pozicioniranja od $\pm 0,3$ mm. Kod nelinearnih sistema kao što su pneumatski, dolaze do izražaja prednosti fazi regulatora, jer se koristi znanje eksperta i nije potreban tačan model sistema.

Na osnovu hibridnog upravljanja po sili/brzini implementiran je alat za obradu ivica predmeta nepravilnog oblika na SCARA robotu sa dva stepena slobode [42].

Moguće je realizovati više načina upravljanja korišćenjem digitalnih elektromagnetnih razvodnika [43]: numeričko impulsnu modulaciju (pulse number modulation, PNM), impulsno kodnu modulaciju (pulse code modulation, PCM), impulsno frekventnu modulaciju (pulse frequency modulation, PFM), širinsko impulsnu modulaciju (pulse width modulation, PWM). Postoje kompanije koje nude ventilske module za realizaciju ovakvih upravljanja kao i radovi koji opisuju njihovu primenu [44, 45].

U radu [46] prikazan je razvoj strategijskog nivoa upravljanja servosistemom, u cilju ostvarivanja što veće preciznosti pri upravljanju. Regulacijom brzine razvodnika kao i smanjivanjem broja razvodnika, kojeg karakteriše vreme odziva od 10 do 20 ms, pokušalo se sa izbegavanjem upotrebe velikog broja razvodnika sa sporim vremenskim odzivom. Takođe su razmotreni i definisani kriterijumi pri izboru tipa razvodnika, a u

eksperimentalnim rezultatima uzeta je u obzir i regulacija pritiska u rezervoaru vazduha pod pritiskom.

U radu [47] je na osnovu modela sistema razvijeno upravljanje adaptivnim regulatorom koje kompenzuje parametre trenja i opterećenja koja se pojavljuju u servo - pneumatskom sistemu. Da bi se osigurala stabilnost između slajding regulatora sile i adaptivnog regulatora, definisana je propusna moć upravljanja parametrima. Na osnovu praćenja parametara određena je optimalna brzina propusnog opsega. Eksperimentom su prikazani rezultati praćenja pozicije sa i bez opterećenja sistema. Korišćen je dvoosni manipulator koji radi na principu hvatanja i premeštanja (pick and place).

Jedan od zanimljivih načina upravljanja je i prediktivan način upravljanja i regulisanja pritiska pomoću ON/OFF elektropneumatskih razvodnika u cilju praćenja željene trajektorije pritiska koji je prikazan u radu [48]. Na osnovu dinamike sistema i vremena kašnjenja ulaznih signala, upravljanje je osmišljeno tako da svaki naredni ulazni signal koji se pojavi, treba da se poredi sa parametrima koji prate željenu trajektoriju pritiska. Na taj način, vrši se izbor nove ulazne vrednosti parametara po principu najbliže odgovarajuće vrednosti željenog pritiska.

Kod kontaktnih zadataka dvoosnog pneumatskog manipulatora (pick and place) razvijen je pseudo graf model [49] koji spaja komandni razvodnik cilindra i aktivnu silu na cilindru. Upravljanjem sa otvorenom petljom izbegnut je pasivan način upravljanja pneumatskim cilindrom preko 4/2 komandnog razvodnika. Ako se upravljanje ostvaruje preko zatvorene petlje tada se može realizovati i pasivan način upravljanja. Eksperimentima su dokazani zakoni upravljanja po sili i tačnost razvijenog pseudo graf modela. Pseudo graf model je namenjen za analizu pasivnog načina upravljanja i razvoj regulatora za aplikacije koje služe za aktiviranje pneumatskih aktuatora gde se zahteva stabilnost u kontaktu sa okolinom (pasivnom).

Metod impedansnog upravljanja pneumatskim manipulatorom u zadacima ubacivanja osovine u rupu bez korišćenja senzora sile prikazan je u radu [50]. Metod upravljanja zasniva se na međusobnoj zavisnosti vrednosti sile na slajding regulatoru i sumi adaptivnih pritisaka, na osnovu kojih se upravlja pneumatskim aktuatorom. Realizacija je izvršena korišćenjem proporcionalnog razvodnika sa tri priključka umesto sa četiri, za svaki stepen slobode manipulatora. Analizirana je kombinacija unutrašnje krutosti koja se javlja usled kompresibilnosti VPP i krutosti usled impedansnog upravljanja po zatvorenoj petlji. U skladu sa željenim zakonom impedansnog upravljanja uspešno je prikazan nežan način prelaza iz bezkontaktnog u kontaktno stanje bez korišćenja senzora sile. Takođe je i demonstrirano upravljanje po sili u zadacima preciznog pozicioniranja gde pozicija otvora nije poznata.

U radu [51] je predstavljen metod za impedansno upravljanje linearnim pneumatskim aktuatorom u kontaktnim zadacima. Kod impedansnog upravljanja obično se koristi senzor sile za određivanje sile interakcije. Prednost prikazane metode koja se koristi u radu je ta što se ne koristi senzor sile, već se, umesto toga, merenja sile pri velikom propusnom opsegu zamenjuju merenjima ubrzanja pri malom propusnom opsegu. Kreirane su dve upravljačke petlje, unutrašnja i spoljašnja. Na osnovu predložene metode, da bi se

odredila aktivna sila na izlazu pneumatskog cilindra, koristila se unutrašnja petlja, čija je uloga upravljanje pritiskom na oba radna priključka cilindra u cilju dostizanja željenog pritiska. Pored unutrašnje petlje, kreirana je i spoljašnja petlja čiji je zadatak da obezbedi komunikaciju između interakcijske (spoljašnje) sile i kretanja i upravljanja u okviru unutrašnje petlje. Upravljanje VPP na priključnim vodovima pneumatskog cilindra ostvareno je korišćenjem proporcionalnih razvodnika 3/2 umesto konvencionalnih 4/2 razvodnika. Prikazani su rezultati praćenja upravljanja pri promeni pritiska - zadatak unutrašnje petlje, kao i rezultati impedansnog upravljanja korišćenjem spoljašnje petlje pri slobodnom (bezkontaktom) kretanju a posle toga i nakon ostvarivanja kontakta.

Pneumatski aktuatori u odnosu na elektro i hidrauličke imaju višestruke prednosti u aplikacijama pozicioniranja. Međutim, aktuatori su izloženi velikim silama trenja, postoje određeni mrtvi prostori kao i mrtva vremena a sve su to parametri koji utiču na tačnost pri pozicioniranju. U radu [52] predstavljena je identifikacija upravljanja, upravljanje, regulacija i projektovanje jednog takvog pneumatskog sistema. Napravljena je korelacija između matematičkog modela pneumatskog aktuatora i upravljačkog sistema. Sakupljanje podataka, ulaznih i izlaznih signala sistema, izvršeno je na osnovu eksperimenta. Testiranje je izvršeno na osnovu različitih opterećenja u realnom vremenu. Pri upravljanju su korišćeni PID regulatori i LQR (Linear Quadratic Regulator).

U radu [44] pokazano je da se PLC može koristiti za realizaciju PWM upravljanja pneumatskim aktuatorom. Zbog široke primene PID regulatora neki proizvođači ugrađuju u PLC taj regulator i na taj način se olakšava upravljanje složenim sistemima. Na taj način je olakšano podešavanje parametara i lako je promeniti strukturu regulatora. Izvršeno je praćenje referentnog impulsnog i sinusnog signala. Frekventne karakteristike sistema su definisane eksperimentalnim i računskim putem.

Zamenom klasičnog četvorosmernog proporcionalnog servo razvodnika sa dva trosmerna, veliki broj parametara može da se modeluje nezavisno od aktivne sile aktuatora. Na osnovu ove promene autori u radu [53] predlažu simultano upravljanje aktivnom silom aktuatora i njegovom krutošću. Kako su ova dva parametra međusobno povezana, autori su prikazali i upravljački zakon koji obezbeđuje maksimalnu ili minimalnu krutost aktuatora za zadate pomeraje i izlaznu željenu silu.

Shen i Goldfarb su predstavili upravljački algoritam u radu [54], koji je realizovan na osnovu MIMO (Multiple Input Multiple Output) slajding regulatora i koristi se za nezavisnu regulaciju krutosti i sile pneumatskog aktuatora. Na ovaj način se otklanja nestabilnost koja se javlja usled ostvarivanja kontakta koristeći krutost ili impedansno upravljanje silom pri interakciji sa krutim okruženjem.

Za razliku od adaptivnog regulatora koji sadrži interni model sistema, regulator sa učenjem (Iterative Learning Control, ILC) sadrži interni model poremećaja duž specificirane trajektorije. Opisan je i primenjen u radu [55]. U radu [56] ILC je iskorišćen za praćenje pozicije kod dvoosnog pneumatskog sistema ($X - Y$), korišćenjem proporcionalnog razvodnika. Eksperimentom je dokazano praćenje željene trajektorije pomoću P regulatora, pri različitim brzinama.

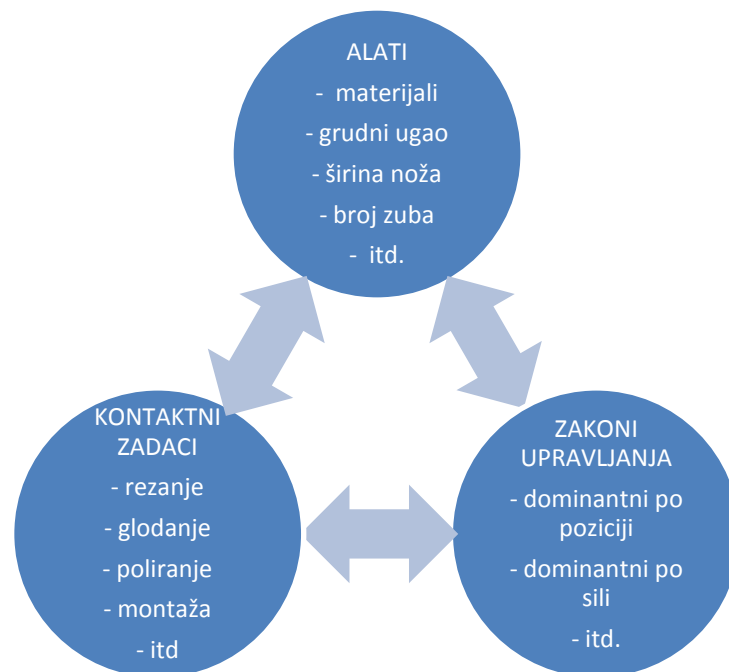
U radu [57] predstavljeno je rešenje podesivog modula (stopera) u cilju dostizanja tačnog položaja pneumatskog aktuatora. Pozicioniranje mehaničkog stopera se vrši na osnovu električnog aktiviranja pneumatskog razvodnika i služi za zaustavljanje, tj. manuelno podešavanje dužine hoda cilindra. Ovakav sistem se može implementirati na bilo koji pneumatski aktuator i na taj način je moguće ostvariti bolje dinamičke karakteristike.

U radu [58] je ispitan i analiziran model upravljanja povratnom spregom po sili servopneumatskog cilindra. Dinamičko ponašanje pneumatskog cilindra opisano je nelinearnom funkcijom. Napravljen je matematički model, zatim su ispitane matematičke karakteristike modela, veze koje postoje i stanja pojedinih promenljivih veličina. Dokazano je da upravljanje izlazne povratne sprege u stanju saturacije može da se ostvari praktičnim praćenjem referentne trajektorije.

2.2 Sistemski prilaz

Na slici 2 su prikazani faktori od uticaja čijom spregom i istraživanjem treba da se omogućiti takva veza da se primenjeni zakoni upravljanja u kontaktnim zadacima što bolje realizuju.

Prilikom projektovanja uređaja za obavljanje određenog zadatka važni faktori na koje je potrebno obratiti pažnju jesu cena, tačnost i ponovljivost istog. Jedan od ciljeva ovog rada je razvoj funkcionalnog uređaja za ispitivanje upravljačkih zakona pri obavljanju kontaktnih zadataka.



Slika 2. Faktori od uticaja na izvršavanje kontaktnih zadataka

Pri projektovanju takvog uređaja treba zadovoljiti kriterijume niske cene koštanja a da se pri tome postigne odgovarajuća tačnost pozicioniranja. U tu svrhu, korišćeni su programabilno logički kontroler (PLK), standardne merne letve, brzi pneumatski razvodnici za realizaciju PWM upravljanja kao predstavnici jeftinije varijante,

proporcionalni ventili i zasebni kontroleri pneumatskih osa sa interfejsima mernih letvi za realizaciju proporcionalnog upravljanja, kao predstavnici skuplje varijante.

Na ovaj način je omogućeno poređenje jednog namenskog kontrolera, kontrolera pneumatskih osa, i jednog standardnog industrijskog kontrolera koji ima mogućnost PWM upravljanja, kao i njihovih odgovarajućih softvera.

U postupku mašinske obrade predmeta rada još uvek postoji dosta nerešenih problema i ostavljen je prostor za istraživanja u oblastima upravljanja i regulacije, modelovanja konstrukcija i izbora komponenti.

2.3 Kontaktni zadaci

2.3.1 Uvod u kontaktne zadatke

U toku razvoja CIM – a (Computer Integrated Manufacturing) projektanti proizvodnog sistema su se često suočavali sa problemima realizacije obrade koju je ponekad neophodno uraditi pri završnoj montaži realizovanoj u fleksibilnim montažnim ćelijama. Pristup koji je zasnovan na grupnoj tehnologiji nameće da se ove operacije izvode na istom mestu, u okviru iste ćelije, gde se sprovodi proces montaže. Međutim, pošto je za ovu vrstu mašine bitno da bude uključena – aktivna (glodalice, brusilice itd.) a da pri tome vreme trajanja u završnoj fazi obrade nije veliko, došlo se do zaključka da ove mašine neće biti dobro iskorišćene. Pored toga, predmet rada bi morao biti oslobođen od montažne opreme, premešten do mašine za obradu, pozicioniran i orijentisan ponovo, a nakon obrade vraćen nazad, pozicioniran i orjentisan još jednom i pričvršćen u opremu za montažu, što sve zajedno značajno produžava vreme montaže.

Najefikasniji način je da predmet, posle montaže, ostane u uređaju za stezanje, tako da se mašinske operacije mogu obavljati sličnom opremom, pri čemu će manipulator nositi alat za obradu (alat za glodanje, rendisanje, brušenje, poliranje itd.) i vršiti obradu (obrađivati) u sklopu. Ovo nije uvek moguće, ali u nekim slučajevima, posebno kada je obrada u pitanju koja ne zahteva preterano velike sile (skidanje srha, doterivanje ivica, obrada mekih materijala kao što je plastika, aluminijum, legure itd.) može biti urađeno. Naravno, takva koncepcija dovodi do mnogobrojnih problema koje treba rešiti pre svega pri integraciji nepoznatog procesa i parametara obrade sa manipulatorom i vrstom materijala koji se može obraditi na taj način.

U ovim zadacima, koji pripadaju klasi kontaktnih zadataka, specifično i veoma važno pitanje je upravljanje manipulatorom. Upravljanje manipulatorom pri takozvanom ograničenom kretanju kao što su zadaci u kojem manipulator dolazi u kontakt sa okolinom, privlači dosta pažnje u poslednjih 20 godina.

2.3.2 Podela kontaktnih zadataka

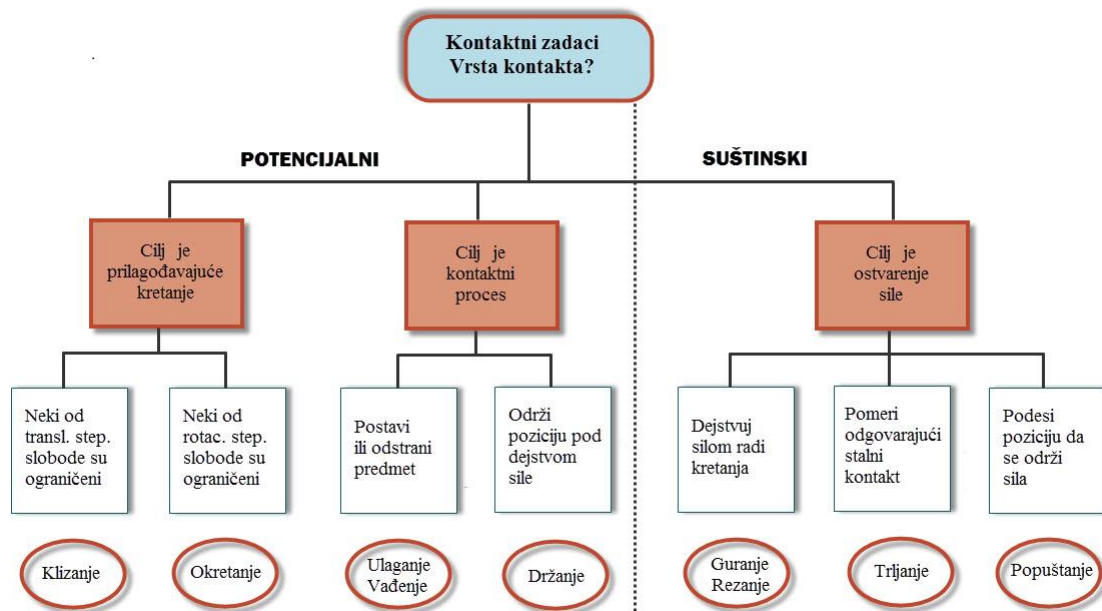
U zadacima mašinske obrade, kao što su rezanje, obaranje ivica ili poliranje, pojava sila u pravcu rezanja je nerazdvojni deo procesa. Ovakvi zadaci predstavljaju osnovne kontaktne zadatke zatvorenog tipa. Primeri takvih zadataka su postupci rezanja (struganje, brušenje, glodanje, rendisanje, brušenje, poliranje is sl.), jer se pri tome zahteva da manipulator

bude u mehaničkom kontaktu sa drugim objektima. Poseban problem koji se javlja pri izvršavanju navedenih operacija obrade, delimično ili potpuno automatizovanih, je upravljanje manipulatorom koji nosi alat, određenih karakteristika, pomoću kojeg je potrebno izvršiti zahtevanu vrstu obrade. Kod zadataka otvorenog tipa, ili bezkontaktnih zadataka, manipulator se kreće slobodno, bez kontakta sa okolinom. Pri tome, mogu da se jave neželjene sile a tipičan primer je proces montaže osovine. Problem upravljanja manipulatorom se svodi u suštini na problem tačnosti pozicioniranja. Ako se obezbedi dovoljna preciznost kretanja manipulatora, tj. ako su odnosi preciznosti upravljačkog sistema, tolerancije otvora i osovine usklađeni, neće doći do kontakta, pa bi u tom slučaju važile sve zakonitosti kao i za bezkontaktnu zadatke. Međutim, usled nedostataka svojstvenih procesu, senzorskom i upravljačkom sistemu, ove zadatke najčešće prati pojava neželjenog kontakta sa ograničavajućim površinama, a čiji je rezultat pojava sila reakcije. Merenje dejstva sile obezbeđuje korisnu informaciju za ustanovljavanje grešaka i odgovarajuću promenu prethodno definisanog kretanja manipulatora.

2.3.3 Kontaktni zadaci u industriji

Nekoliko elementarnih kontaktnih zadataka koji se javljaju u industriji prikazani su u klasifikaciji na slici 3.

Procesi gde se manipulatori već uveliko primenjuju u industriji su postupci rezanja (struganje, bušenje, glodanje, brušenje, poliranje i sl.), kao i oni procesi koji tek počinju da se razvijaju a to su obrada obaranjem oštih ivica, mehaničko čišćenje površina itd.



Slika 3. Osnovni kontaktni zadaci

U radu [59] je prikazan efikasan metod za proces skidanja materijala brušenjem na osnovu razvijenog novog pneumatskog alata. Metod uzima u obzir sile interakcije između alata, manipulatora i predmeta rada. Razvijen je model upravljanja koji spaja dinamiku alata sa svim procesnim informacijama vezanim za skidanje viška materijala. Pri realizaciji

pneumatskog alata, korišćen je cilindar jednosmernog dejstva sa pasivnom komorom kako bi se prilagodile i redukovale pojave prouzrokovane kompresibilnošću VPP. Razvijen je metod upravljanja po koordinatama i usvojena su dva hijerarhijska nivoa regulacije: regulacija rada manipulatora i regulacija rada alata. Robusna linearizacija povratne sprege iskorišćena je za minimizaciju nepoželjnih spoljašnjih efekata kao što su Kulonovo trenje i nelinearno prilagođavanje pneumatskog cilindra koje se javlja kao posledica kompresibilnosti vazduha. Eksperimentima su pokazani efikasni načini upravljanja u funkciji brzine i tačnosti skidanja (obrade) materijala.

Za potrebe skidanja viška materijala i poliranja određenih površina predmeta rada realizovan je model procesa obrade i primenjen odgovarajući proces upravljanja [60]. Pomoću tri pneumatska cilindra i integracijom sa odgovarajućim sensorima sile i linearnim enkoderima omogućeno je prilagođavajuće kretanje. U procesu poliranja primenjena je PID regulacija parametara sile preko senzora sile, a za proces skidanja viška materijala PID regulator za tačno pozicioniranje alata.

U tom kontekstu, od navedenih kontaktnih zadataka, za potrebe ove disertacije će se detaljnije proučavati procesi novog tipa programabilnog rendisanja pomoću programabilnog pneumatskog manipulatora.

2.3.4 Obrada rendisanjem

Tehnologija obrade materijala zauzima centralno mesto u okviru tehnologije mašinogradnje i obuhvata široko područje primene u savremenoj industriji. Obuhvata postupke čiji je osnovni cilj izrada mašinskih delova promenom oblika i dimenzija priprema nekom vrstom mašinske obrade, sa uklanjanjem ili bez uklanjanja viška materijala.

Tehnologija obrade skidanjem materijala obuhvata sve postupke obrade kod kojih se obrada i izrada delova ostvaruje skidanjem materijala usled mehaničkog dejstva reznog alata na predmet obrade.

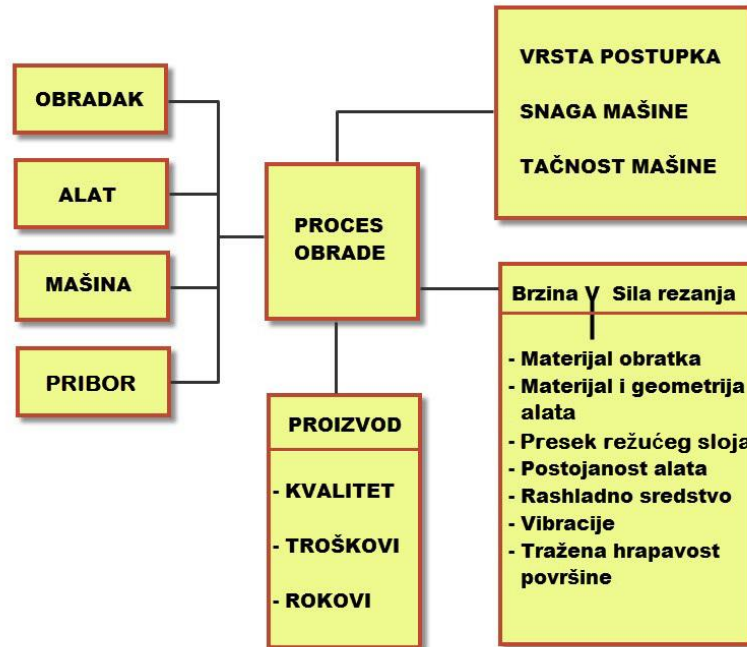
Na proces obrade skidanjem strugotine deluje veliki broj uticajnih faktora promenljivog karaktera od kojih su glavni prikazani na slici 4.

Obrada rendisanjem predstavlja jedan od postupaka obrade predmeta rada skidanjem strugotine.

Rendisaljki ima više različitih vrsta i konstrukcija, s obzirom na vrstu radova pri kojima se primenjuju. Međutim glavna podela je izvršena prema tome da li alat ili predmet obavljaju glavno kretanje, i na osnovu toga mogu da se podele u četiri grupe:

- kratkohodne rendisaljke – koriste se za rendisanje malih i kratkih predmeta. Postoji dva tipa kratkohodnih rendisaljki, horizontalne i vertikalne (dubilice),
- dugohodne rendisaljke – primenjuju se za obradu radnih predmeta sa dugačkim ravnim površinama. Ove mašine alatke se realizuju sa jednim ili više nosača alata, čime se omogućuje istovremena obrada više površina,
- rendisaljke kod kojih alat izvodi glavno i pomoćno kretanje i
- specijalne rendisaljke.

Kod kratkih rendisaljki sam proces obrade karakteriše kretanje alata koje je pravolinijsko i predstavlja glavno kretanje. Ukoliko kretanje izvodi predmet obrade onda je u pitanju dugohodna rendisaljka, pri čemu su u oba slučaja ta kretanja periodična – sa različitim promenama brzine u toku povratnog i radnog hoda.



Slika 4. Faktori od uticaja pri procesu rendisanja

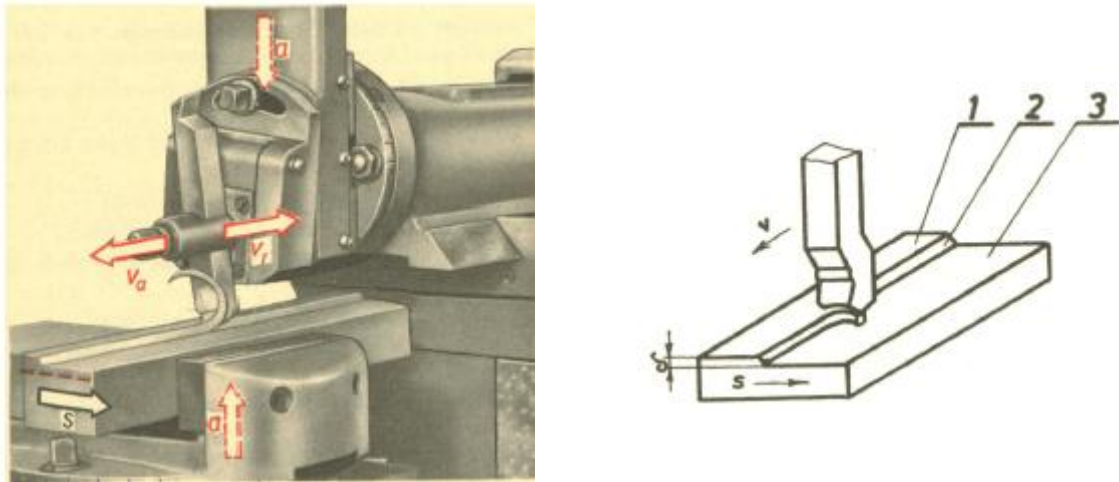
Pri postupku obrade rendisanjem mogu da se dobiju različite ravne horizontalne, vertikalne i kose površine, da se izrade žljebovi i kanali, vođice, kod mašina alatki i slični predmeti. Alat prilikom obrade može biti postavljen horizontalno ili vertikalno u zavisnosti da li se želi ostvariti funkcija horizontalne ili vertikalne rendisaljke. Ova obrada je slična obradi struganjem a osnovna razlika se ogleda u tome što je kod rendisanja glavno kretanje pravolinijsko i periodično – sa promenama brzine u toku radnog i povratnog hoda dok je kod struganja glavno kretanje obrtno i kontinualno. Rendisanje može biti grubo i fino. Grubim rendisanjem se postižu klase kvaliteta površine od N9 do N14, a finim od N6 do N8. Za razliku od glodanja proces obrade rendisanjem ima manju produktivnost pri obradi predmeta rada, pa se sve ređe upotrebljava, pogotovo ako se zahteva skidanje velike količine materijala. Najpogodnije je za obradu dugačkih a uskih predmeta rada.

Kratkohodne rendisaljke

Za realizaciju eksperimenta izabran je primer obrade kao kod rada kratkohodnih rendisaljki, slika 5, gde oznake 1, 2, 3 redom predstavljaju neobrađenu površinu, površinu rezanja i obrađenu površinu.

Glavno kretanje alata se izvodi pravolinijski u pravcu brzine rezanja v . Veličina s predstavlja korak nakon izvođenja radnog i povratnog hoda kada se alat vraća u početni položaj. Izvodi se na završetku povratnog hoda, zbog čega je periodičnog tipa. Vertikalnim

pomeranjem se zauzima dubina rezanja. Za slučaj eksperimentalnog postrojenja, dubina rezanja (žljeb δ) je programski podešena i alat pozicioniran u polaznu tačku radnog hoda.



Slika 5. Kretanje kod kratkohodne rendisaljke

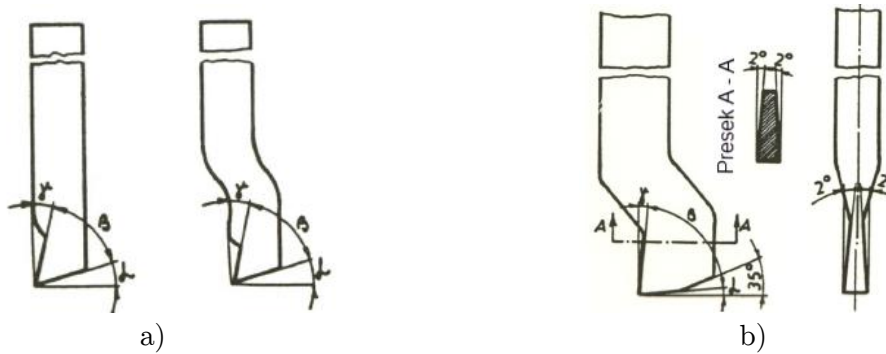
Kratkohodne, horizontalne rendisaljke spadaju u grupu alatnih mašina sa malom proizvodnošću, zbog čega se u serijskoj proizvodnji uglavnom ne koriste. Upravo zbog toga se ukazuje potreba za primenom namenskih programabilnih uređaja koji bi mogli da realizuju kontaktne zadatke (rendisanje) u malim serijama, sa relativno velikom promenljivošću zahtevanih zahvata obrada (npr. žljebovi promenljive dubine, obrada površine promenljivog profila, itd.).

Pogodne su naročito za obradu kratkih horizontalnih i kosih površina, žljebova i sl. Dužina hoda nosača alata nalazi se najčešće u granicama od 300 do 1500 mm. Prema načinu ostvarivanja pogona razlikuju se kratkohodne rendisaljke sa mehaničkim i hidrauličnim pogonom. Kako pneumatski pogon, zbog relativno malih sila koje može da ostvari, praktično ne postoji u realizaciji rendisaljki ova eksperimentalna istraživanja dobijaju na još većem značaju u ovoj oblasti.

Alati za obradu rendisanjem

Oblik alata za rendisanje je u osnovi sličan strugarskom nožu, jer je obrada rendisanjem slična obradi struganjem, ali je alat za rendisanje sa nešto većim dimenzijama poprečnog preseka noža. U zavisnosti od položaja površine koja se obrađuje, razlikuju se alati za horizontalnu i alati za vertikalnu obradu rendisanjem. Noževi za horizontalno rendisanje razlikuju se od noževa za vertikalno rendisanje po položaju ledne i grudne površine. Kako su za ovaj rad bitni samo noževi za horizontalno rendisanje tako je i izgled noževa za horizontalno rendisanje prikazan na slici 6.

Oblik noževa za rendisanje (poprečni presek) može biti pravougaoni i kvadratni, standardnih dimenzija i dužina. Najčešće se za upotrebu preporučuju kvadratni ($a = 10, 16, 20$ i 25 mm) i pravougaoni ($b \times h = 6 \times 10, 10 \times 6, 16 \times 25, 20 \times 30$ i 32×50 mm), dužine od 50 do 400 mm.



Slika 6. Nož za horizontalno rendisanje: a) pravi i savijeni; b) savijeni nož za žljebove. Veličina poprečnog preseka noža bira se u zavisnosti od veličine otpora materijala koji se obrađuje i od režima obrade. Na osnovu odnosa visine i širine noža (e), može se odrediti slobodna dužina noža (l_n). Kod navedenih noževa kvadratnog i pravougaonog preseka $e = 1 \div 1,6$, pa se slobodna dužina noža može odrediti po obrascu

$$l_n = e \cdot h \text{ (mm)} \quad (1)$$

Neke standardne veličine uglova reznog dela noža za rendisanje prikazane su u tabeli 1.

Uglovi noža za rendisanje						
Materijal koji se obrađuje	Brzorezni čelik				Tvrđi metal	
	Gruba obrada		Završna obrada		Grudni ugao γ°	Leđni ugao α°
	Grudni ugao γ°	Leđni ugao α°	Grudni ugao γ°	Leđni ugao α°		
Čelik do 400 N/mm ²	25	10	20	13	20	10
Čelik do 600 N/mm ²	20	9	18	11	14	8
Čelik do 800 N/mm ²	12	7	10	9	10	6
Čelik legirani od 800-1000 N/mm ²	10	7	8	9	7	6
Čelični liv	10	7	12	8	5	5
Sivi liv 120 N/mm ²	11	9	9	9	10	7
Sivi liv 140 N/mm ²	11	9	9	9	10	7
Sivi liv 180 N/mm ²	5	7	3	7	5	5
Sivi liv 260 N/mm ²	5	7	3	7	5	5
Bronza	5	5	3	7	1	3
Aluminijum čist	27	11	22	9	22	9

Tabela 1. Uglovi noža za rendisanje [61]

Brzorezni čelik (HSS - High Speed Steel) se koristi kao materijal za izradu noževa za rendisanje. Glavne karakteristike ovog materijala su velika žilavost i otpornost na udare koji se javljaju pri rendisanju. U posljednje vreme mnogo se koriste noževi u obliku pločica napravljenih od tvrdog metala čije su karakteristike velika tvrdoća i smanjena vrednost žilavosti. Pločice se pričvršćuju na telo noža tvrdim lemljenjem i mehaničkim stezanjem pomoću zavrtnja u određeno ležište u telu noža.

Elementi režima obrade pri rendisanju

Poznavanje elemenata režima rezanja je veoma važno, jer oni predstavljaju bitne faktore od kojih zavisi ekonomičnost obrade i kvalitet obrađene površine. Pri izboru režima obrade treba težiti da izabrani elementi obezbede prvenstveno propisani kvalitet, a zatim što potpunije iskorištenje alata i mašine. Osim toga, pri izboru režima obrade treba voditi računa i o visini troškova procesa obrade, ukupnom vremenu trajanja operacije, rentabilnosti obrade i drugim zahtevima tehničko - tehnološko – ekonomske prirode.

Slično kod drugih postupaka obrade rezanjem, elementi režima obrade pri rendisanju su: brzina rezanja (v), korak pomoćnog kretanja – pomak (s) i dubina rezanja (δ).

Brzina rezanja je brzina pravolinijskog glavnog kretanja nosača alata kratkohodne rendisaljke, odnosno brzina glavnog kretanja obratka dugohodne rendisaljke, a izražava se u m/min . To je brzina kojom se skida strugotina. Brzina rezanja određuje se u zavisnosti od vrste materijala koji se obrađuje, materijala noža i vrste obrade (gruba ili završna). Kratkohodne rendisaljke sa mehaničkim pogonom, jednostavnije konstrukcije, imaju brzinu rezanja između 5 i 15 m/min , dok kod modernijih mašina brzina rezanja pri gruboj obradi može dostići vrednost i do 30 m/min , a pri završnoj obradi i do 60 m/min . Kratkohodne rendisaljke sa hidrauličkim pogonom dostižu brzinu rezanja do 45 m/min . Dupli hod predstavlja zbir radnog i povratnog hoda. Broj duplih hodova mašine za jedan minut zavisi od brzine radnog i povratnog hoda i dužine predmeta. Pomak (korak) je veličina pomeranja alata ili predmeta po završetku duplog hoda. Izražava se u milimetrima po duplom hodu alata ili obratka (mm/dh). Korak zavisi od: vrste obrade (gruba ili fina), vrste materijala alata i predmeta, geometrije alata, snage mašine itd. Ako je u pitanju gruba obrada, korak se određuje na osnovu otpornosti alata, kvaliteta obrađene površine i krutosti mašine. Dubina rezanja je sloj materijala koji skida nož u jednom prolazu. Izražava se u milimetrima. Ukoliko nije moguće celu dubinu skinuti u jednom prolazu, određuje se broj prolaza, prema obrascu:

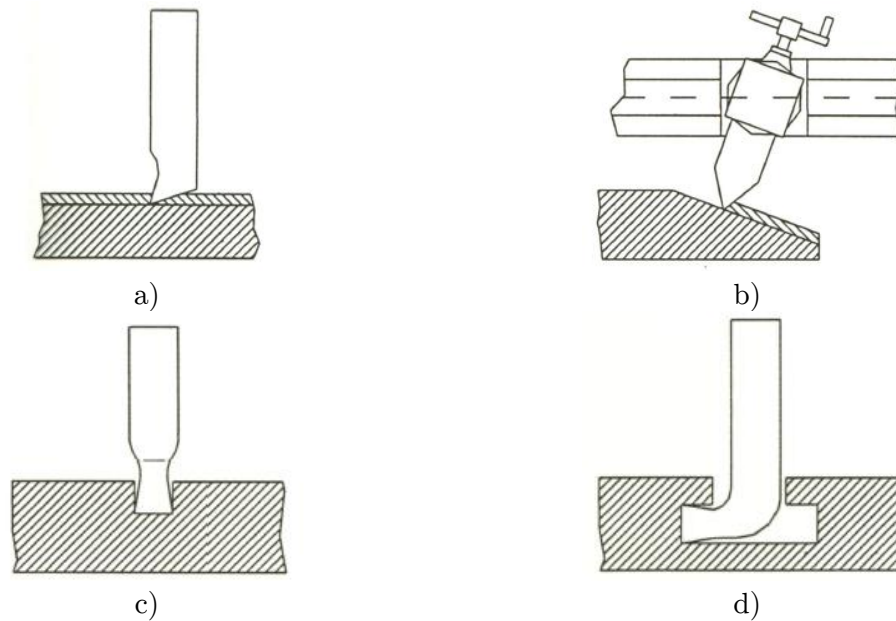
$$i = \frac{\delta'}{\delta} \quad (2)$$

gde je δ' - ukupna dubina koju treba skinuti,

δ - dubina rezanja pri jednom prolazu.

Vrste obrada rendisanjem

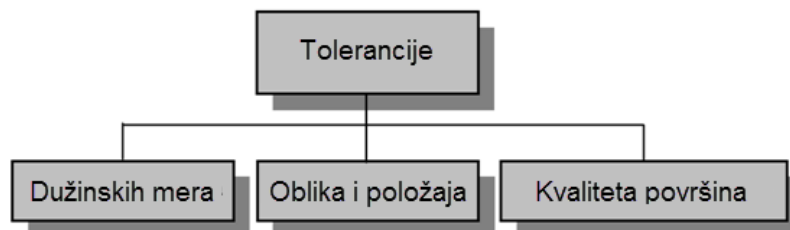
Na rendisajlkama može da se obavlja obrada ravnih i kosih površina, slika 7a) i 7b), pravih i T - žljebova, slika 7c) i 7d). Pri obradi kosih površina neophodno je da se izvrši zakretanje nosača reznog alata.



Slika 7. Obrada procesom rendisanja: a), b) ravnih i kosih površina; c), d) pravih i T žljeb

2.4 Kvalitet obrade

Jedan od osnovnih uslova da se proizvod održi što duže na tržištu i bude konkurentan jeste nivo njegovog kvaliteta. U tom smislu, svaki proizvod mora da ispuni zahtevani kvalitet. Važne komponente kvaliteta proizvoda – mašinskih proizvoda su tačnost dimenzija, oblika i položaja i kvalitet obrađenih površina. Za njihovo ispravno funkcionisanje, apsolutna tačnost mera, oblika, položaja i kvaliteta površina, ne samo da nije neophodna, nego je i neostvariva. Granice kvaliteta obrade definisane su funkcionalnim i ekonomskim ograničenjima. Na osnovu ovih ograničenja propisuju se granice – tolerancije u kojima treba da budu dimenzije, oblici i položaji i kvalitet površina mašinskih delova, slika 8. Prema tome, tolerancije su unapred propisana dozvoljena odstupanja: dužinskih mera, oblika, položaja i parametara hrapavosti obrađenih površina od nazivne veličine – mere.



Slika 8. Podela tolerancija

Površine mašinskih delova nikada ne mogu biti idealno glatke, one uvek imaju mikroneravnine u obliku bregova, koje nastaju kao posledica obrade.

Ove mikrogeometrijske nepravilnosti površina mašinskih delova nazivaju se hrapavost i valovitost obrađene površine.

Kvalitet obrađenih površina u velikoj meri utiče na radnu sposobnost mašinskih delova.

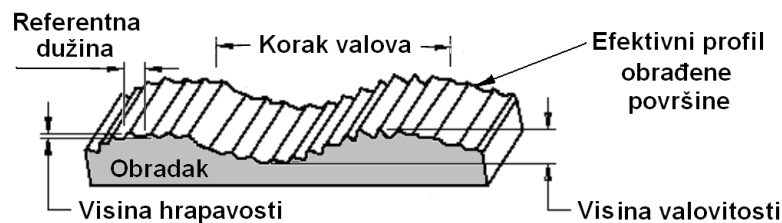
Neravnine na površini mašinskog dela ne mogu se izbeći jer nastaju kao posledica primene odgovarajućeg postupka izrade.

Za određenu površinu se u odnosu na njenu funkciju definiše optimalan kvalitet obrade, jer se zahtevima za finije obrađenim površinama poskupljuje proizvodnja.

Kvalitet obrađenih površina utiče na:

- smanjenje trenja kod kliznih površina,
- sprečavanje pojave koncentracije napona,
- hermetičnost,
- otpornost na koroziju i
- estetski izgled proizvoda.

Ukoliko se obrađena površina u poprečnom preseku uveća mogu da se uoče mikrogeometrijske nepravilnosti površine, kao što je prikazano na slici 9, u odnosu na geometrijski idealno ravnu površinu.



Slika 9. Mikrogeometrijske karakteristike obrađene površine [62]

Za određenu površinu se u odnosu na njenu funkciju definiše optimalan kvalitet obrade.

Kvalitativna metoda kontrole površinske hrapavosti zasnovana je na poređenju obrađenih površina sa etalonom.

Kvantitativna metoda kontrole je zasnovana na merenju mikrogeometrije specijalnim priborom.

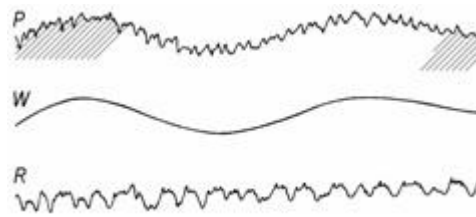
Površinska hrapavost je skup mikrogeometrijskih nepravilnosti na površini predmeta (koje su mnogo puta manje od površine celog predmeta), a prouzrokovane su postupkom obrade ili nekim drugim uticajima. Hrapavost obrađene površine definiše standard ISO 4287.

Valovitost obrađene površine podrazumeva periodične površinske neravnine koje se u obliku talasa uočavaju na relativno većim dužinama. Pod valovitošću se podrazumevaju neravnine kod kojih je odnos koraka i visine valovitosti veći od 40. Valovitost obrađene površine definiše standard ISO 11562 [62], odnosno njegova zamena ISO 16610-21:2011.

Na slici 10 mogu da se vide različite vrste profilnih površina. Profil površine predstavlja presek realne površine sa određenom ravninom.

Postoji više različitih profilnih površina a neke od njih su:

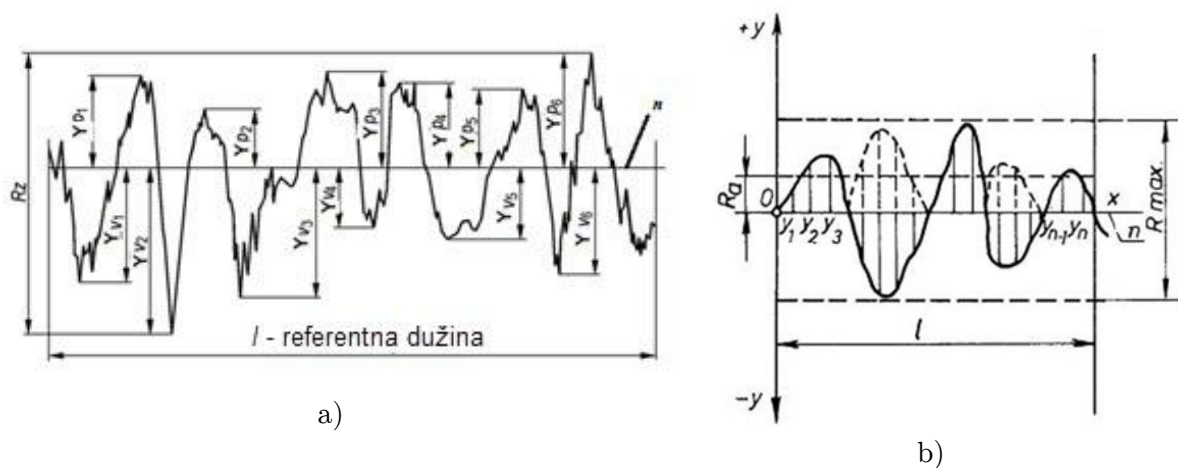
- profil hrapavosti (R) - osnova za merenje parametara hrapavosti profila,
- profil valovitosti (W) - profil koji proizilazi iz primarnog profila (P) hrapavosti.



Slika 10. Profil površine

Na slici 11 mogu da se vide parametri od uticaja srednjeg odstupanja od idealne linije površine a ti parametri su:

- referentna dužina l (dužina uzorka) - dužina u pravcu X ose koja se koristi za utvrđivanje nepravilnosti koje karakterišu profile koji se mere,
- najveća visina neravnina, R_{max} - zbir visine najveće izbočine profila Y_p i najveće dubine udubljenja profila Y_v na dužini vrednovanja l
- srednja visina neravnin u 10 tačaka, R_z - srednja vrednost elementa profila Y_p - najviših i Y_v - najnižih tačaka profila na referentnoj dužini.



Slika 11. a) srednja visina elementa; b) srednja aritmetička vrednost odstupanja

Sa slike 11a) sledi:

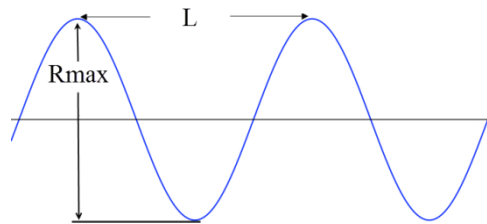
$$R_z = \frac{(Y_{p1} + Y_{p2} + Y_{p3} + Y_{p4} + Y_{p5}) - (Y_{v1} + Y_{v2} + Y_{v3} + Y_{v4} + Y_{v5})}{5} \quad (3)$$

Srednje aritmetičko odstupanje profila od srednje linije R_a , svih tačaka efektivnog profila u odnosu na srednju liniju n , na referentnoj dužini l , slika 11b), računa se po obrascu:

$$R_a = \frac{\sum_{i=1}^n |y_i|}{n} \quad (4)$$

i predstavlja srednje odstupanje od profila koje se najčešće koristi kao parametar za određivanje kvaliteta obrade površine (klase hrapavosti). Klase površinske hrapavosti se određuju na osnovu srednje aritmetička vrednost odstupanja.

Sa slike 12 se mogu uočiti parametri od značaja pri proračunu valovitosti obrađene površine.



Slika 12. Prikaz profila valovitosti sa parametrima od značaja, korak i visina
Za razliku od hrapavosti, valovitost obrađene površine se računa po sledećem obrascu:

$$W = \frac{L}{R_{max}} \quad (5)$$

gde parametar L predstavlja korak valova a parametar R_{max} maksimalnu visinu valovitosti.

Manji broj pokazuje finiji kvalitet obrađene površine. Klase hrapavosti obrađene površine su prikazane u tabeli 2.

$R_{a\max} (\mu m)$	Broj klase površinske hrapavosti
0,025	N1
0,05	N2
0,1	N3
0,2	N4
0,4	N5
0,8	N6
1,6	N7
3,2	N8
6,3	N9
12,5	N10
25	N11
50	N12

Tabela 2: Klase površinske hrapavosti

U tabeli 3 su prikazane klase kvaliteta obrađene površine mašinskih delova pri pojedinim postupcima obrade materijala.

GRADACIJE ⇔	NAJFINIJA OBRADA				FINA OBR.		PRETHOD. OBR.*			GRUBA OBRADA		
KLASA ⇔ KVALITETA VRSTA Ra ↓ OBRADE (µm)	N1/▽	N2/▽	N3/▽	N4/▽	N5/▽	N6/▽	N7/▽	N8/▽	N9/▽	N10/▽	N11/▽	N12/▽
	0,025	0,05	0,1	0,2	0,4	0,8	1,6	3,2	6,3	12,5	25	50
GRUBO RENDIS.												
FINO RENDISANJE												
GRUBO STRUG.												
PRETHOD. STRUG.												
FINO STRUGANJE												
NAJFINIJE STRUG.												
BUŠENJE												
UPUŠTANJE												
RAZVRTANJE												
FINO RAZVRTANJE												
NAJFINIJE RAZVRT.												
GRUBO GLODANJE												
PRETHOD. GLOD.												
FINO GLODANJE												
NAJFINIJE GLOD.												
PROVLAČENJE												
FINO PROVLAČ.												
GRUBO BRUŠENJE												
NORMALNO BRUŠ.												
FINO BRUŠENJE												
NAJFINIJE BRUŠ.												
HONOVANJE												
FINO HONOVANJE												
NAJFINIJE HONOV.												
GRUBO LEPOVANJE												
PRETHOD. LEPOV.												
FINO LEPOVANJE												
NAJFINIJE LEPOV.												

*Prethodna ili srednja obrada čini prelaz između izrazito fine i izrazito grube obrade.

Tabela 3. Pregled klasa kvaliteta obrađene površine koje se postižu pojedinim postupcima obrade [63]

2.5 Proporcionalno upravljanje

Najčešće primenjeno pneumatsko upravljanje je upravljanje po krajnjim položajima ili bang bang upravljanje kako se naziva na engleskom jeziku.

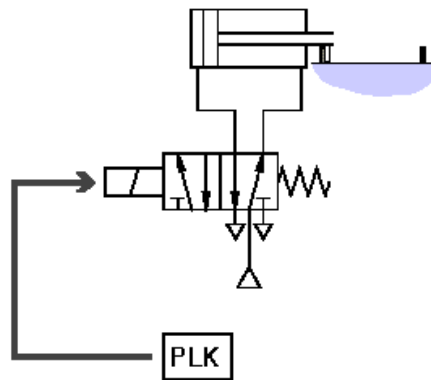
Upravljanje po krajnjim položajima cilindrom dvosmernog dejstva je moguće ostvariti jednim razvodnikom i na taj način se omogućava realizacija dva krajnja položaja. Kako bi se ostvario dug životni vek cilindra na krajevima hoda je neophodno obezbediti prigušenje pri kretanju. To je moguće uraditi na dva načina:

- primenom cilindra koji u sebi već imaju ugrađen sistem prigušenja na krajevima hoda,
- ugradnjom posebnih amortizera za prigušenje udara.

Kod elektropneumatskog upravljanja krajnjim pozicijama, slika 13, sledeća ograničenja treba uzeti u obzir:

- ovakav pogon moguće je primeniti samo tamo gde su potrebne dve pozicije,
- ako se pojavi potreba za drugim položajem između ove dve pozicije onda se ili postojeći cilindar montira u drugu poziciju (kada je potreban kraći hod) ili se mora ugraditi drugi cilindar (kada je potreban duži hod).

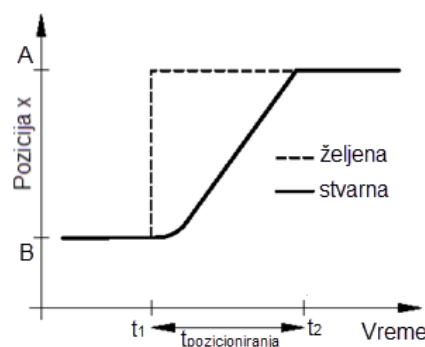
Tipične primene ovakvog upravljanja su izuzimanje delova iz magacina ili utiskivanje oznaka na predmetima rada.



Slika 13. Elektropneumatsko upravljanje krajnjim pozicijama cilindra

Na slici 14 prikazan je odziv pneumatskog upravljanja sa pozicioniranjem u krajnjim položajima na upravljački signal koji menja stanje komandnog razvodnika. Slika prikazuje tok ostvarivanja pozicije klipa u funkciji vremena.

- Na početku kretanja, klip cilindra stoji u krajnjoj levoj poziciji (uvučen - pozicija A).
- U trenutku t_1 komandni razvodnik dobija signal od PLK za promenu stanja. Leva komora cilindra se dovodi pod pritisak, desna komora se odzračuje. Pritisak u levoj komori ostaje dok se u desnoj gubi. On svojim dejstvom na površinu klipa ostvaruje radnu silu.
- Klip se izvlači do krajnje desne pozicije (izvučen - pozicija B).
- Kočenje se ostvaruje dejstvom prigušnika na kraju hoda ili posebnim spoljnim prigušnikom udara.



Slika 14. Odziv pri pozicioniranju u krajnjim položajima

Razvodnici vazduha pod pritiskom se prvenstveno koriste za uspostavljanje protoka u željenom pravcu. Na taj način se omogućava međusobna distribucija vazduha pod pritiskom između komponenti u pneumatskom sistemu. Poseduju relativno mali broj stabilnih stanja (do tri) koja se menjaju u zavisnosti od ulaznih binarnih signala koji se dovode na razvodnik. Pri promeni stanja razvodnika javljaju se unutrašnji otpori koji utiču na protok VPP i pri tome dolazi do neželjenih efekata.

Za razliku od običnih razvodnika, proporcionalni razvodnici poseduju neograničen broj stabilnih stanja koji su u proporcionalnoj zavisnosti sa ulaznim analognim signalom. On može bit npr. naponski, vrednost napona se kreće u opsegu od -10 do $+10$ V, ili strujni, vrednost struje se kreće u opsegu od 4 mA do 20 mA. Postoje različite vrste proporcionalnih razvodnika a neki od njih su:

- proporcionalni razvodnici upravljivi po poziciji: pozicija razvodnika je proporcionalna ulaznom električnom signalu,
- proporcionalni razvodnici upravljivi po pritisku: izlazni pritisak je proporcionalan ulaznom električnom signalu,
- proporcionalni razvodnici koji upravljaju protokom: maseni protok je proporcionalan ulaznom električnom signalu.

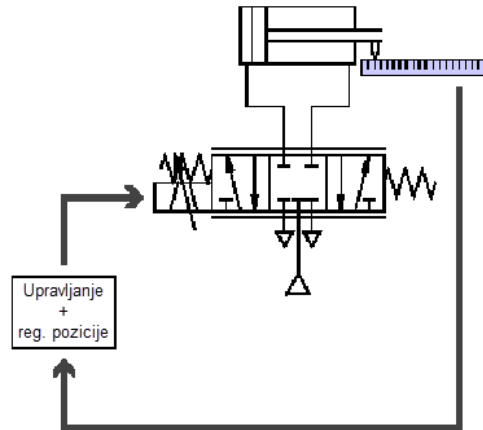
Razvodnici za proporcionalno upravljanje protokom se obično koriste u sistemima gde se zahteva bojenje sprejevima zatim u sistemima koji zahtevaju zapreminsko punjenje, kod doziranja tečnosti ili pri upravljanju protokom u rezervoarima pod pritiskom ali se ne koriste za aktuatorne. Razvodnici koji mogu proporcionalno da upravljaju pritiskom se obično koriste u procesima pneumatskog kočenja, mogu da imaju ulogu vazdušnih ležajeva ili mogu da služe za oduvavanje rastresitih vrsta materijala. Takođe, mogu da se implementiraju u sistemima kod tačkastog zavarivanja, generišući proporcionalnu silu, i u procesima gde se zahteva zatezanje papira ili stezanje različitih vrsta predmeta rada.

U prošlosti, pneumatski aktuatori su služili za premeštanje opterećenja sa jedne fiksne pozicije do druge fiksne pozicije. U današnje vreme, razvoj kompjutera doveo je do mogućnosti realizacije sistema sa zatvorenim petljom upravljanja po poziciji, i na taj način je omogućeno zaustavljanje u bilo kojoj tački unutar početne i krajnje pozicije, i to sa velikom preciznošću. Ovakvi sistemi se nazivaju servo sistemi i obično koriste razvodnike koji mogu kontinualno da se otvaraju i zatvaraju menjajući pravac protoka VPP. Na takav način, kontinualno se utiče na vrednosti brzine i pozicije cilindra. Ovakva vrsta ventila se koristi kod hidrauličnih servo sistema, nekoliko decenija unazad, i obično se naziva hidraulični servo razvodnik [64]. Pod istim uslovima može da se koristi i kao pneumatski razvodnik i tada dobija ime proporcionalni razvodnik. Ostala terminologija koja se koristi za ove razvodnike je: analogni razvodnik, servo razvodnik ili proporcionalni razvodnik [65].

Za razliku od upravljanja krajnjim pozicijama cilindra, pneumatska osa mora biti opremljena posebnim komponentama da bi moglo da se ostvaruje tzv. proporcionalno upravljanje. Takvo upravljanje je prikazano na slici 15 i sastoji se od sledećih komponenti:

- upravljanja i regulacije pozicije,

- proporcionalnog ventila,
- cilindra,
- sistema za merenje pozicije.



Slika 15. Servo pneumatski pogon cilindra

Dve bitne prednosti proporcionalnog upravljanja u odnosu na upravljanje krajnjim pozicijama su da:

- može realizovati proizvoljan broj položaja unutar radnog hoda cilindra,
- ako je potrebno primeniti cilindar za drugu aplikaciju, nije potrebno prepravljati sistem. Umesto toga, potrebno je samo napisati novi program za upravljanje.

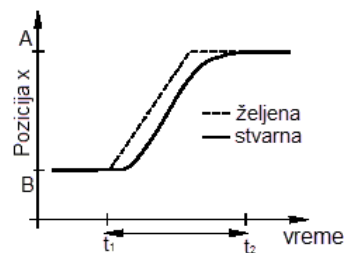
Kod proporcionalnog upravljanja se vrednost željene pozicije klipa cilindra zna unapred. Željena pozicija se kao vrednost prosleđuje do regulatora položaja. U regulatoru se željena pozicija upoređuje sa stvarnom pozicijom klipa cilindra (regulaciona veličina). Na osnovu rezultata poređenja se generiše odgovarajući upravljački signal namenjen za komandni razvodnik.

Na slici 16 je prikazano ostvarivanje kretanja kod proporcionalnog upravljanja cilindrom. Pozicije A i B ne moraju biti krajnje pozicije klipa cilindra, odnosno mogu biti bilo koje dve proizvoljne tačke unutar hoda klipa cilindra. Željena pozicija predstavlja korektnu vrednost a stvarna pozicija se predstavlja vrednostima kako je postignuta.

- Na početku i željena i stvarna pozicija imaju vrednost A. Ventil je zatvoren. Klip stoji u datom položaju.
- Vrednost željene pozicije će od A preći u B. Ventil će od strane regulatora biti tako upravljan da se leva komora cilindra dovodi pod pritisak dok se desna komora odzračuje. Pritisak vazduha deluje na površinu klipa i ostvaruje radnu silu.
- Klipnjača cilindra se pomera na desnu stranu i pojavljuje se razlika između željene i stvarne pozicije. Pozicija klipa će polako pobeći u odnosu na vrednost iz regulatora. Regulator registruje smanjenje regulacione razlike i prekida upravljanje razvodnika.
- Klipnjača će se punjenjem desne komore cilindra zakočiti. Kočenje se ostvaruje znatno mekše nego kod upravljanja prema krajnjim položajima.

- U trenutku t_2 će odstupanje između željene vrednosti B i stvarne vrednosti klipnjače biti manje od unapred zadate tolerisane vrednosti. Regulator šalje povratnu informaciju upravljanju da je nova vrednost pozicije ostvarena.

Tačnost pozicioniranja se ostvaruje pragom tolerancije. Prag tolerancije će zavistiti od potreba korisnika za ostvarivanje unapred date pozicione tačnosti. Najčešće vrednosti su u rasponu od 0,1 do 1 mm.



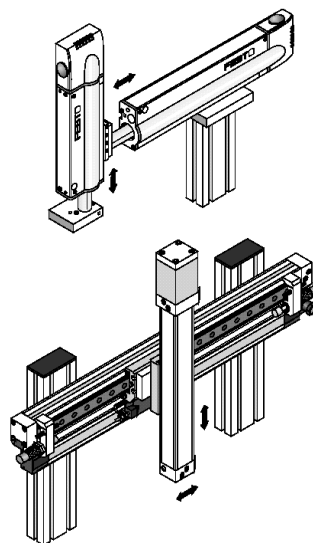
Slika 16. Odziv pri pozicioniranju kod proporcionalnog upravljanja

Tipične primene za proporcionalno upravljanje su sledeće:

- postavljanje elektronskih komponenti na ploču,
- paletiranje,
- montaža modularnih proizvoda,
- rukovanje materijalom itd.

Primer realizacije jednog dvoosnog manipulatora sa proporcionalnim upravljanjem cilindrima prikazan je na slici 17, gde je prikazan uređaj sa međusobnom kombinacijom dve NC (Numerical C ontrol) ose, sa dva različita konstrukcijska povezivanja.

Pri realizaciji mnogih upravljačkih zadataka predmet rada ili alat se mora naći u više različitih položaja koji nisu koaksijalni. To su slučajevi kada se moraju primeniti kombinacije dve ili tri proporcionalne NC - ose. Ose mogu ali ne moraju biti povezane na početnim ili krajnjim pozicijama cilindra ili se mogu povezati pomoću klizača sa drugom jedinicom.



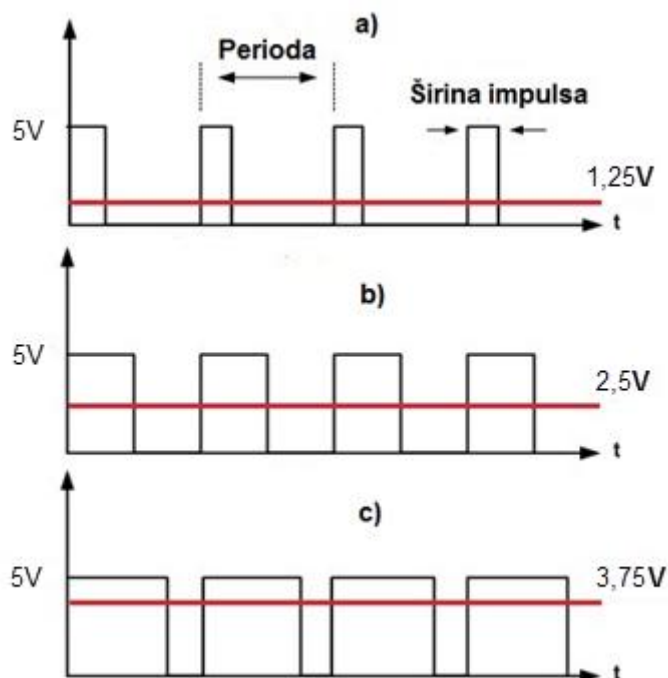
Slika 17. Kombinacija linearnih osa [66]

2.6 PWM upravljanje

S obzirom da pojam širinsko impulsne modulacije u ovom radu zauzima dosta važno mesto, u cilju njegovog što boljeg razumevanja u nastavku ovog poglavlja izneće se i objasniti osnovne činjenice vezane za ovaj pojam.

Širinsko impulsna modulacija je vrsta upravljanja koja predstavlja način da se od digitalnog signala napravi signal analogne vrednosti. Korišćenjem brojača visoke rezolucije, odnos impuls/pauza se moduliše da odgovara specificiranom nivou analognog signala. U literaturi se često naziva i PWM, po skraćenici od engleskog naziva: Pulse Width Modulation. Amplituda širinsko impulsno modulisanog signala je najčešće fiksna i nije od značaja, ali se u nekim slučajevima može koristiti za prenos dodatnih informacija. U suštini, širinsko impulsna modulacija predstavlja način digitalnog kodiranja nivoa analognih signala. PWM signal se smatra digitalnim jer je u svakom trenutku nivo signala ili na nuli ili na maksimumu, slika 18.

Glavna prednost korišćenja širinsko impulsno modulisanih signala u praksi, predstavlja povećanje vrednosti koeficijenta korisnog dejstva. To doprinosi boljoj energetskej efikasnosti sistema u kojima se oni koriste. Takođe, dodatna pogodnost je ta što signal ostaje digitalan celim putem od procesora do primaoca, tako da DA (digitalno-analogni) konverzija nije potrebna. Korišćenjem čisto digitalnog signala efekat šuma se minimizuje, što je velika prednost u odnosu na analogni prenos i upravljanje. Šum može da utiče na digitalni signal samo ako je toliko jak da promeni logičku nulu na jedinicu ili obrnuto. Zbog toga se širinsko impulsna modulacija u nekim slučajevima koristi i za komunikaciju.



Slika 18. Izgled PWM signala sa različitim vrednostima faktora ispune [67]

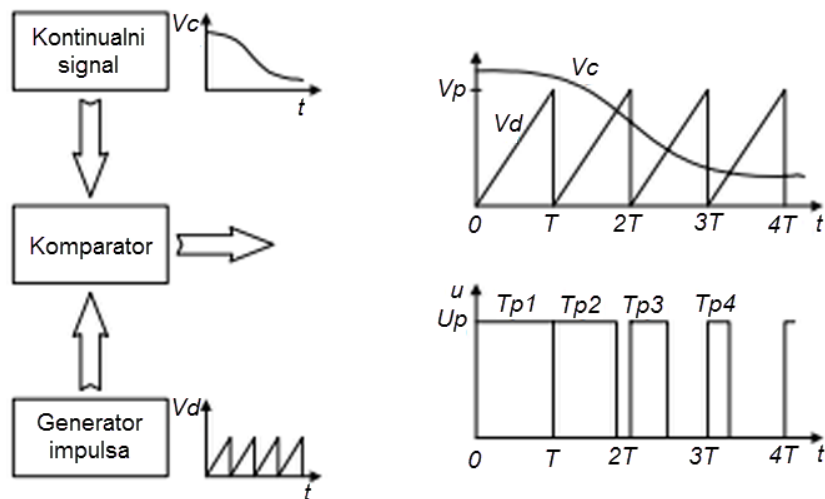
Kada se govori o PWM signalu bitno je da se obrati pažnja na jednu od najvažnijih karakteristika – faktor ispune. Faktor ispune je definisan kao odnos širine impulsa i

periode signala i upravo ova karakteristika definiše analognu vrednost signala. Na slici 18a) prikazan je PWM signal sa faktorom ispune 25%, slika 18b) prikazuje faktor ispune 50% dok na slici 18c) vidi se faktor ispune od 75%.

Pravljenjem PWM signala teži se da se postigne kvazikontinualno upravljanje pneumatskim sistemom, da bi se dobio upravljački signal što više sličan upravljanju pneumatskim sistemom sa proporcionalnim ventilima.

Kod širinsko impulsne modulacije trajanje impulsa je proporcionalno amplitudi kontinualnog signala, a visina i period ponavljanja impulsa su konstantni. Prednost ovakvog načina modulacije signala je smanjivanje broja preklapanja ventila. Način realizacije PWM signala i vremenski dijagram prikazan je na slici 19.

Generator impulsa generiše periodični signal V_d , koji je najčešće testerastog oblika, konstantne amplitude V_p i periode T . Poređenjem kontinualnog signala V_c sa periodičnim signalom V_p dobija se PWM signal u . Pri tome generator impulsa treba da šalje periodični signal koji se menja brže od kontinualnog signala.



Slika 19. Realizacija PWM signala [68]

PWM signal se može matematički opisati sledećom relacijom [69]:

$$U_{pwm}(t) = \begin{cases} U_p & \text{za } V_c(t) \geq V_d \\ 0 & \text{za } V_c(t) < V_d \end{cases} \quad (6)$$

pri čemu je $V_d(t) = [t - (j-1)T] \frac{V_p}{T}$, za $(j-1)T \leq t < jT$, $j = 1, 2, \dots, n$, gde je j predstavlja j -ti period modulacije.

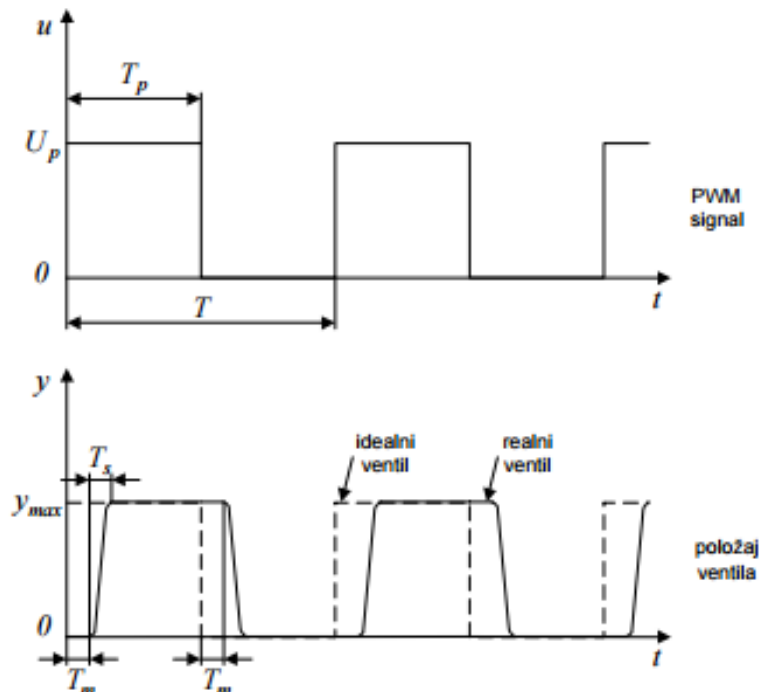
Ako bi se elektromagnetni ventil posmatrao kao idealna komponenta, dovođenjem PWM signala, ventil bi se otvarao u vremenu kada signal dostigne vrednost U_p , odnosno zatvarao kada ima vrednost 0. To bi se matematički moglo zapisati na sledeći način:

$$y(kT) = \begin{cases} y_{\max} & , \quad U(kT) = U_p \\ 0 & , \quad U(kT) = 0 \end{cases} \quad (7)$$

U realnom slučaju ako je vreme PWM signala T_{pj} manje od iznosa mrtvog vremena ventila T_m , tj. $T_{pj} < T_m$ ventil neće otvoriti i omogućiti uspostavljanje protoka vazduha ka cilindru. Isto tako, ukoliko je vreme trajanja signala PWM T_{pj} veće od razlike perioda T i zbira mrtvog vremena T_m i vremena otvaranja ventila T_s , tj. $T_{pj} > T - (T_m + T_s)$, ventil neće zatvoriti prolaz vazduha pod pritiskom prema cilindru i ostaće otvoren do sledećeg ciklusa. Ova konstatacija se može zapisati sledećim izrazom:

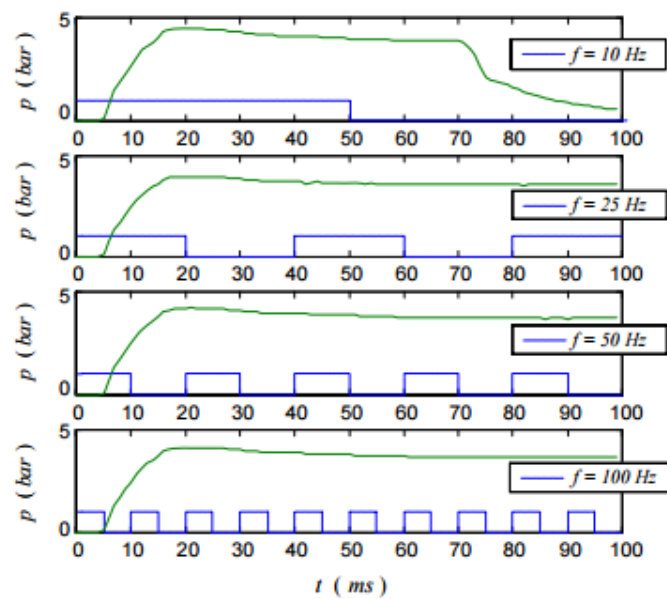
$$y(kT) = \begin{cases} 0 & , \quad T_p \leq T_m \\ y_{\max} \frac{U(kT)}{U_{\max}} & , \quad T_m < T_p < T - (T_m + T_s) \\ y_{\max} & , \quad T_p \geq T - (T_m + T_s) \end{cases} \quad (8)$$

Način reagovanja idealnog i realnog ventila na PWM signal u upravljačkom sistemu prikazan je na slici 20.



Slika 20. Ponašanje realnog i idealnog ventila za zadati PWM signal [70]

Ilustracija izbora frekvencije PWM signala prikazana je na slici 21.



Slika 21. Ilustracija izbora frekvencije PWM signala - ponašanje prelazne karakteristike pritiska u komori cilindra [68]

Zbog prisutnog mrtvog vremena kod otvaranja i zatvaranja ventila, ventil neće reagovati na brze promene upravljačkog signala. Zbog toga je jako bitno izabrati pravu frekvenciju PWM signala. Na osnovu eksperimentalnih ispitivanja ventila za različite frekvencije PWM signala, može se zaključiti da frekvencije PWM signala manje od 10 Hz nisu dobar izbor, jer zbog velikog mrtvog vremena zatvaranja ventila (približno 2 ms), ne može doći do odzračivanja vazduha pod pritiskom iz cilindra. U literaturi se može naći preporuka da period PWM signala mora biti najmanje 5 puta veći od mrtvog vremena ventila.

3. Razvoj i projektovanje eksperimentalne stanice za analizu i sintezu upravljačkih zakona u kontaktu sa dinamičkom okolinom

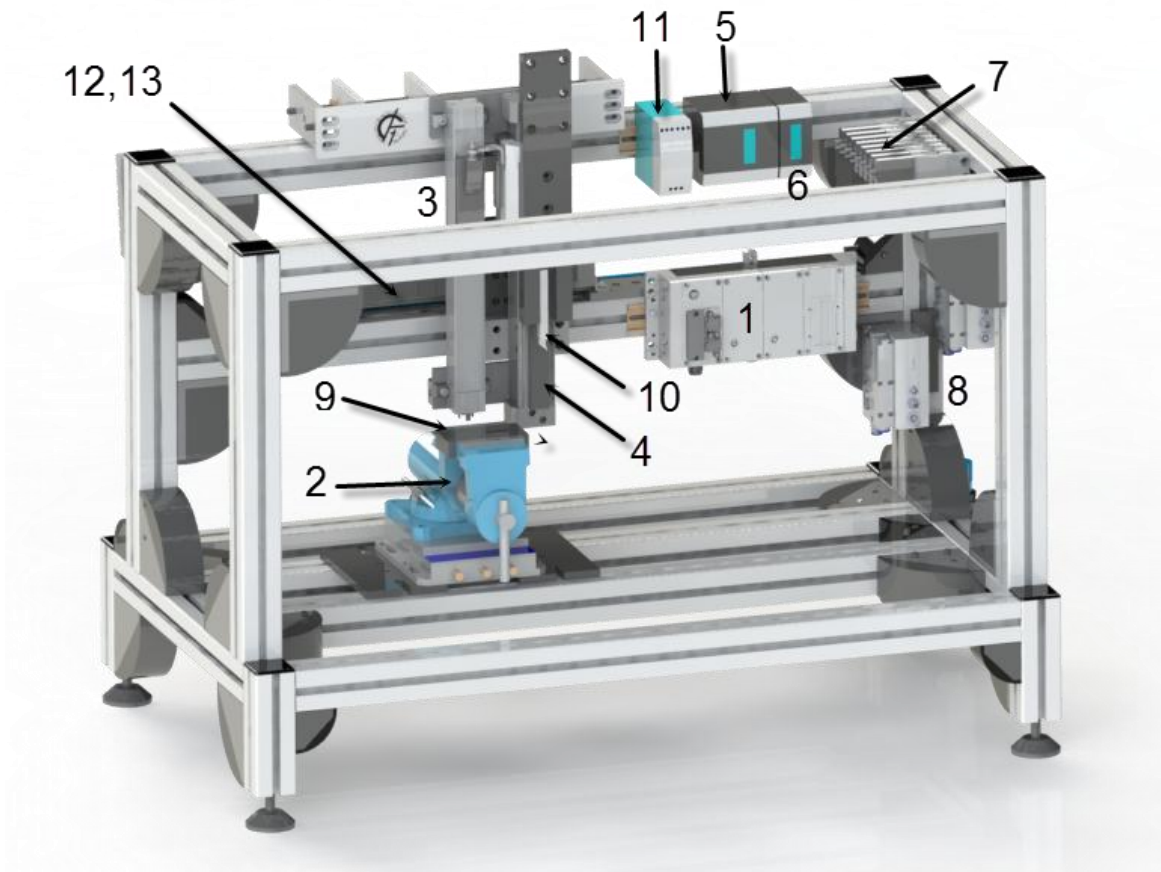
Za potrebe potvrde teorijskih postavki u ovom istraživanju će se koristiti dvoosni programabilni pneumatski manipulator. Dvoosni programabilni pneumatski manipulator predstavlja minimalno potrebnu konfiguraciju pomoću koje mogu da se istraže različiti upravljački zakoni pri prodiranju alata u određene materijale. Dvoosni manipulator čini mehatronički sistem, jer je sačinjen od mašinskih, pneumatskih i elektronskih komponenti kao i od odgovarajućeg upravljačkog sistema. Mehatronički sistemi bazirani na ovako integrisanoj tehnologiji mogu da se koriste za upravljanje pozicijom, silom, brzinom, pritiskom, kao i međusobnoj kombinaciji ovih zahteva. Kvalitetno upravljanje manipulatorom, u smislu dobrog praćenja trajektorije i/ili ostvarivanja tačno određenih, željenih sila na okolinu, od velikog je značaja u procesima mašinske obrade, jer se na taj način ostvaruje željeni kontaktni zadatak.

Pošto je, kako je već ranije naglašeno, cilj rada povišenje energetske efikasnosti sistema VPP, koji služe za pogon programabilnog manipulatora u kontaktnim zadacima bilo je neophodno osmisliti, projektovati i realizovati takav uređaj koji će biti u stanju da realizuje kontaktni zadatak i na kome će se moći vršiti sva merenja. Rezultat ovog procesa se može videti na slici 22, a u nastavku je dat njegov detaljan opis.

3.1 Opis sistema

Razvijen model eksperimentalne stanice prikazan je na slici 22, a glavne elemente predstavljaju dva međusobno spregnuta cilindra bez klipnjače (pozicija 4 i 12). Pomoću cilindra 4 izvršava se vertikalno kretanje u smeru prema dole ili u smeru prema gore dok se sa drugim cilindrom koji je horizontalno postavljen (pozicija 12) može ostvariti kretanje u levu ili desnu stranu. Pozicije 13 i 3 predstavljaju merne letve koje su u krutoj vezi sa klipom cilindra i u svakom trenutku preko njih može da se odredi tačna pozicija cilindra bez klipnjače. Na vertikalnom cilindru se nalazi nosač sa alatom za rendisanje, pozicija 10. Terminal sa kontrolerom za proporcionalno upravljanje zauzima poziciju 1 dok za PWM upravljanje služe pozicije 5 i 6, gde je 5 glavni kontroler a 6 predstavlja dodatni modul za akviziciju signala sa mernih letvi. Njima odgovarajući razvodnici su na pozicijama 7 i 8, dok 11 predstavlja napajanje od 24 VDC kojim se snabdeva ceo sistem. Mesto gde se smešta predmet rada je pozicija 2 – stega, dok se predmet rada nalazi na poziciji 9. Konstrukcija uređaja je napravljena od Bosch – ovih profila dimenzija 45 x 45 mm a da bi bila kruća ojačana je ugaonicima. Gabaritne dimenzije uređaja su 600 x 1280 x 1000 mm a

radni hod je 200 mm po horizontalnoj osi i 200 mm po vertikalnoj osi. Ovakvom konstrukcijom je omogućena izrada žljebova proizvoljne dubine, unutar radnog hoda i mogućih sila obrade i sa promenljivim uzdužnim profilom žljeba. Pri pritisku od 6 bar realizovane sile se kreću u opsegu do 200 N, u vertikalnom pravcu i 350 N, u horizontalnom pravcu.



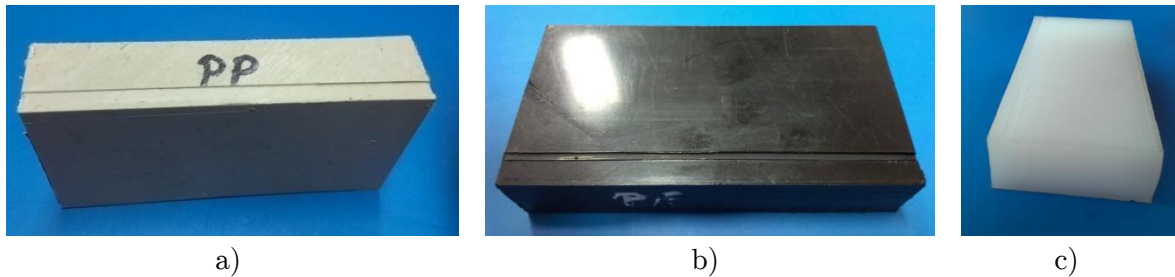
Slika 22. 3D CAD model eksperimentalne stanice

3.2 Materijal koji se obrađuje

Kako je programabilni pneumatski manipulator realizovan za potrebe ovog istraživanja prvenstveno namenjen ispitivanjima karakteristika upravljanja, nije neophodno da ostvaruje velike sile. Prethodno spomenuti opseg sila je uslovio i izbor materijala na kojem će se vršiti eksperimenti. U preliminarnim ispitivanjima je vršeno rezanje žljebova na aluminijumu ali je to bilo moguće samo sa veoma uskim nožem (2 mm), tako da se opseg ispitivanih materijala suzio na različite vrste plastike.

Materijali koji su izabrani za proces obrade prilikom eksperimentalnih ispitivanja su prikazani na slici 23, polipropilen (PP) koji ima gustinu $0,905 \text{ g/cm}^3$ i radnu temperaturu u opsegu $-20 \div 100^\circ\text{C}$, polietilen (PE) koji ima gustinu $0,94 \text{ g/cm}^3$ i radnu temperature u opsegu $-200 \div +80^\circ\text{C}$ i poliamid (PA) koji ima gustinu $1,15 \text{ g/cm}^3$ i radnu temperaturu u opsegu $-40 \div 100^\circ\text{C}$.

Za dimenzije predmeta rada na kojima se vrši ispitivanje odabrane su veličine 50 x 20 x 100 mm.



Slika 23. Različiti materijali predmeta rada: a) PP; b) PE; c) PA;

3.3 Laboratorije i oprema za eksperimentalni rad

Eksperimentalni rad je obavljen u prostorijama Fakulteta tehničkih nauka, odnosno u laboratorijama za automatizaciju procesa rada, u zgradi Mašinskog instituta.

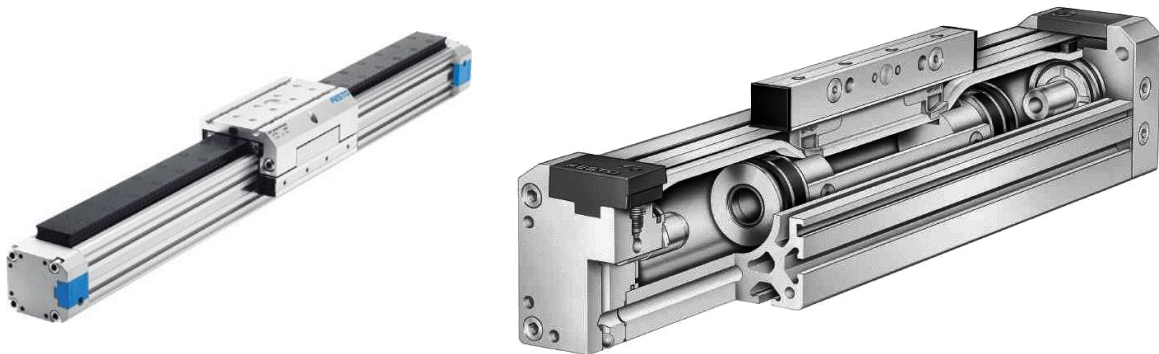
Za realizaciju eksperimenata je korišćena sledeća oprema:

Cilindar bez klipnjače – Festo - DGPL-25-200-PPV-A-B-KF-KU-SH-D2

U oba slučaja upravljanja kao izvršni organ (aktuator) koriste se, međusobno spregnuti pneumatski cilindri dvosmernog dejstva kompanije Festo, kataloške oznake DGPL-25-200-PPV-A-B-KF-KU-SH-D2. Bitna karakteristika ovog cilindra jeste da on nema klipnjaču, tako da su površine klipa na koje deluje vazduh pod pritiskom sa obe strane komora cilindra jednake.

Cilindar bez klipnjače se sastoji od dve trake, gornje i donje, kako je prikazano na slici 24. Pored njih, nalaze se točkići pod oprugom koji sastavljaju te dve trake. Postoji veza klipa sa nosačem opterećenja i dokle god se on nalazi unutar gabarita cilindra ostali deo je stisnut sa te dve trake.

Ovakav tip cilindra bez klipnjače je najviše primenjivan u praksi. Daje stabilnu i kompaktnu strukturu. Relativno je jeftin i pravi se od standardnih cilindara tako što se uzdužno napravi žljeb, postavle se dve trake i vrši se zaptivanje pomoću točkića i opruga. Radni hod je unutar gabarita samog cilindra.



Slika 24. Spoljni izgled cilindra bez klipnjače i njegov poprečni presek

Analogna merna letva - Festo - MLO-POT-225-TLF

Senzor koji se koristi kako bi se odredila trenutna pozicija cilindra je merna letva (slika 25.). Merna letva je potencijometar (razdelnik napona) čiji je srednji kraj povezan za klip cilindra koji je pokretan, pri čemu je on vođen duž merne letve vođicom koja je paralelna sa hodom cilindra. Na ovaj način, promena pozicije cilindra direktno i proporcionalno utiče na promenu odgovarajućeg napona na potencijometru, koju je neophodno beležiti, čime se ostvaruje neposredno merenje pozicije.



Osnovne karakterisitike

- Analogni senzor
- Proizvođač Festo
- Dužina merne letve 200 mm
- Rezolucija merenja je 0,01 mm
- Maksimalna vrednost dozvoljene brzine je 10 m/s
- Maksimalno dozvoljeno ubrzanje je 200 m/s²

Slika 25. Analogna merna letva Festo - MLO-POT-225-TLF

Kontroler za upravljanje pneumatskim osama - Festo - 50E-T06GCQST21T21YJ-Z (CPX) – za proporcionalno upravljanje

Konceptualno ovaj terminal se sastoji od nekoliko nezavisnih celina, modula, koji su neophodni za efikasno upravljanje ovakvim sistemom. Pored glavnog kontrolera CPX – CEC tu se još nalaze i dodatni kontroleri koji služe za upravljanje pneumatskim osama, slika 26. Ove nezavisne celine napaja jedan izvor konstantnog napajanja od 24 VDC, koji se napaja preko kućišta terminalnog bloka. Takođe se na kontrolerima pneumatskih osa nalazi LCD displej na kojima mogu da se očitaju razne vrednosti od značaja pri radu sistema kao što su greška, pozicija itd. Pored ovih modula nalazi se još i modul sa digitalnim ulazima i izlazima. Svaki ovaj modul može da se skinе i da se zameni sa nekim drugim modulom i nakon toga u programskom okruženju izvrši prepoznavanje istih.



Slika 26. CPX terminal za upravljanje pneumatskim osama

Proporcionalni ventil za pneumatske ose - Festo - VPWP-6-L-5-Q8-10-E-G

Ovaj proporcionalni razvodnik, slika 27, ima ugrađen integrirani regulator za podešavanje pozicije klipa cilindra. Princip rada je sledeći: meri se pozicija klipa razvodnika i preko regulatora se poredi sa ulaznim signalom. Strujno pojačanje neće u ovom slučaju direktno upravljati na osnovu upravljačkog signala razvodnika već će se upravljanje vršiti na osnovu izlaznog signala iz regulatora. Sa promenama vrednosti upravljačkog signala dolazi do pomeranja klipa unutar razvodnika u levu ili desnu stranu. Na taj način se uspostavlja strujanje vazduha pod pritiskom ka radnom vodu. Što je veći poprečni presek otvora ostvariće se veći protok vazduha pod pritiskom kroz ventil. Na ovaj način je moguće ostvariti ne samo velike protoke već i male, u okviru maksimalnih mogućnosti otvaranja jednog ventila. Pri malim protocima moguće je ostvariti visoku preciznost pozicioniranja klipa cilindra u regulacionom krugu. U tom slučaju on se ponaša kao klasični razvodnik sa ekstremno malim otvorom, što predstavlja bitnu prednost proporcionalnog razvodnika. Pri realizaciji ovog eksperimenta korišćen je proporcionalni razvodnik veličine porta 6 i mogućim protokom VPP od 700 l/min.



Osnovne karakteristike

- 5/3 proporcionalni ventil
- Služi u aplikacijama gde je neophodan Soft Stop i precizno pozicioniranje
- Potpuno digitalizovan – integričan senzor pritiska.
- Veličine portova na razvodniku su 4, 6, 8 sa mogućnošću ostvarivanja protoka od 350, 700 i 1400 l/min
- Brzo i jednostavno povezivanje sa CPX kontrolerom

Slika 27. Proporcionalni razvodni ventil, Festo – VPWP-6-L-5-Q8-10-E-G

Interfejs merne letve - Festo - CASM-S-D2-R3

Senzorski interfejs CASM (slika 28) se koristi za aktiviranje pneumatskih aktuatora preko analognih mernih letvi koje služe za detekciju pozicije kontrolerom CPX - CMAX ili CPX - CMPX. On uspostavlja vezu između merne letve i direktno upravljivog proporcionalnog razvodnog ventila VPWP



Slika 28. Interfejs merne letve Festo - CASM-S-D2-R3

Kontroler za PWM upravljanje – Fatek – FBs – 24MAT2 – D24

Programabilni logički kontroler - PLK predstavlja namenski elektronski uređaj, koji je u stanju da izvrši razne upravljačke zadatke, putem mikroprocesora koji je integrisan u njegovoj unutrašnjosti. Pored osnovnih upravljačkih zadataka, PLK je u stanju da izvršava i aritmetičke operacije, zadatke sa vremenskim promenljivim intervalima, preko funkcije brojača da prebrojava, generiše diskretne i analogne signale a pored svega toga može i da komunicira sa drugim PLK uređajima. Pošto je PLK koncipiran i projektovan za jedan relativno uzan i jasno definisan obim zadataka vezanih za nadzor i upravljanje pojedinim uređajima, to ima za posledicu njegovu izuzetnu efikasnost i jednostavnost. Njegov operativni sistem je jednostavniji i pruža komparativno manje mogućnosti od računara opšte namene. PLK kontroler se razlikuje od računarskog sistema opšte namene po tome što nema spoljnu memoriju (diskove), kao i niz standardne ulazno/izlazne opreme. Pored toga, razlika je i što korišćenje PLK - a ne zahteva od korisnika gotovo nikakvo predznanje o arhitekturi mikroracunarskih sistema i programiranju. Drugim rečima, korisnik PLK - a je u najvećoj mogućoj meri oslobođen rešavanja različitih problema vezanih za čisto računarski aspekt, kao što su promena ili dodavanje ulazno/izlaznih jedinica, vezivanje u računarsku mrežu, razmena podataka i sl. i može da se u punoj meri koncentriše na projektovanje same aplikacije [71].

Hardver i softver su prilagođeni za rad u industrijskim uslovima, tako da se lako programiraju i ugrađuju u postojeće industrijske sisteme. Istorijski gledano, PLK kontroleri vode poreklo od upravljačkih sistema baziranih na elektro mehaničkim relejima. Međutim, upravljanje bazirano na PLK - u poseduje sposobnost lakog reprogramiranja, jednostavnost, brzinu, fleksibilnost i pouzdanost što nisu karakteristike relejnih sistema.

Za programiranje PLK kontrolera koristi se nekoliko programskih jezika, a među prvima se razvilo programiranje pomoću lestvičastih logičkih dijagrama (ladder diagram). Oni su dugi niz godina u upotrebi u industriji pri projektovanju logičkih i sekvencijalnih relejnih uređaja te su zbog toga lako razumljivi industrijskim inženjerima.

Naziv lestvičasti dijagrama potiče otuda što je svaka linija u programu na oba kraja spojena sa dve vertikalne linije pa zbog toga ima izgled lestvice. Svaka programska linija (rang) na levoj strani ima uslov izražen u formi prekidačke logike, dok se na desnoj strani nalazi akcija koja treba da se izvrši ukoliko je uslov ispunjen (true). Program se izvršava u toku ciklusa koji se zove sken ciklus (scan cycle). Jedan sken ciklus ima tri dela: sken ulaza, sken programa i sken izlaza. Za vreme sken ulaza ispituje se stanje na ulaznim linijama i to stanje upisuje u ulaznu datoteku (input image file). U toku programskog dela sken ciklusa ispituje se istinitost uslova i ukoliko je uslov istinit izvršavaju se odgovarajuće naredbe u desnom delu linije. Vrednosti izlaza neće biti promenjene odmah nego se samo menjaju vrednosti promenljivih smeštenih u datoteku izlaza (output image file). Tek kasnije, za vreme izlaznog dela sken ciklusa, sve promenljive iz datoteke izlaza biće prenete na odgovarajuće izlazne linije i fizički izlazi biće promenjeni. Ulazni moduli PLK kontrolera prihvataju ulazne signale iz periferijskih jedinica i štite procesorsku jedinicu od spoljnog sveta. Ulazni modul konvertuje logičke nivoe napona iz spoljnog sveta u logičke nivoe koje zahteva procesorska jedinica. Zaštita se obavlja tako što je procesorska jedinica galvanski odvojena od ulazno/ izlaznih jedinica pomoću opto - kaplera [72].

Analogni ulazni moduli prihvataju analognu informaciju sa analognih senzora (pozicije, pritiska, temperature i dr.) i konvertuju u digitalnu informaciju za dalju obradu u PLK kontroleru.

U ovoj realizaciji korišćen je PLK firme FATEK, slika 29. Ovaj tip PLK - a ima četiri ugrađena brza PWM izlaza čije se karakteristike mogu podešavati. Njegove karakteristike su prikazane u tabeli 4. Frekvencija PWM signala se može podešavati o čemu će biti više reči u narednom poglavlju.



Slika 29. Kontroler Fatek – FBs – 24MAT2 – D24

Specifikacija			FBs - 24MAR	FBs - 24MAT/J
Digitalni Ulaz	24 VDC	Visoka brzina (100 KHz)	2 tačke	
		Srednja brzina (20 KHz)	6 tačaka	
		Srednja brzina (5 KHz)	6 tačaka	
Digitalni Izlaz	Relej		10 tačaka	
	Tranzistor	Visoka brzina (100KHz)		2 tačke
		Srednja brzina (20KHz)		6 tačaka
		Niska brzina		2 tačke
Komunikacioni Port		Ugrađen	1 port (Port0, USB or RS232)	
		Potrošan	2 porta (Port1 □ 2 , RS485 or RS232 or Ethernet)	
Ugrađeno napajanje			SPW24-AC/D 12/D24	
Dimenzija			7.62 mm fiksni terminalni blok	

Tabela 4. Karakteristike Fatek – FBs – 24MAT2 – D24 modula

Analogni ulazni modul za merne letve – Fatek - FBs – 4A2D

Za potrebe realizacije pneumatskog pozicionog servosistema korišćen je ulazno/izlazni modul FBs – 4A2D sa četiri analogna ulaza i dva izlaza, slika 30.



Slika 30. Dodatni analogni modul Fatek - FBs – 4A2D

Njegove glavne karakteristike su date u tabeli 5.

Specifikacija		FBs - 4A2D
Ulazna tačka		4 tačke
Izlazna tačka		2 tačke
Ulaz/Izlaz vrednost		-8192□ 8191 ili 0□ 16383 (14bit)
Ulaz/Izlaz	Bipolar	Napon: -10□ 10 V ili -5□ 5 V Struja: -20□ 20 mA ili -10□ 10 mA
	Unipolar	Napon: 0□ 10 V ili 0□ 5 V Struja: 0□ 20 mA ili 0□ 10 mA
Maksimalna rezolucija		Napon: 0,3 mV (5 V/16384) Struja: 0,61 μA (10 mA/16384)
Tačnost		±1%
Vreme konverzije		Konverzija za svako skeniranje
Maksimalan ulazni signal		Ulazna napon: ±15 V Ulazna struja: ± 30mA
Dozvoljen opterećenja	opseg	Izlazni napon: 500 Ω□ 1 MΩ Izlazna Struja: 0□ 500 Ω
Ulazna impedansa		Ulazni napon: 63,2 KΩ Ulazna Struja: 250 Ω
Metod izolacije		Transformator (snaga), 500 VAC, 1 minut, nema izolacije između svakog kanala
Snaga potrošnje		24 VDC-15%/+20%, 3,2 W max
Mehanizam povezivanja		7,62 mm fiksni terminalni blok

Tabela 5. Karakteristike dodatnog analognog modula Fatek - FBs – 4A2D

Brzi razvodnici za realizaciju PWM upravljanja

Korišćeni 3/2, normalno zatvoreni, elektromagnetni pneumatski razvodnici su takođe kompanije Festo, i imaju katalošku oznaku MHE3-MS1H-3/2G-1/8 (slika 31). Oni spadaju u specijalnu kategoriju pneumatskih razvodnika, zbog njihovog izuzetno kratkog vremena otvaranja, koje iznosi 2,8 ms i kratkog zatvaranja od 2,3 ms. Ovaj razvodnik odlikuju male dimenzije, kao i izuzetno lagana i kompaktna konstrukcija, kako bi se neutralizovali negativni uticaji inercije pri njegovom radu. Elektromagneti pomoću kojih se aktiviraju, operativni su na jednosmernom naponu od 24 VDC, dok vrednost nominalnog protoka iznosi 200 l/min.



Osnovne karakteristike

- Vreme otvaranja 2,8 ms, vreme zatvaranja 2,3 ms
- Maksimalna radna frekvencija 280 Hz
- Nominalni protok 200 Nl/min.
- Napajaju se sa 24 VDC

Slika 31. Pneumatski razvodnik Festo MHE3-MS1H-3/2G-1/8

Noževi za rendisanje

Za potrebe eksperimenata izrađena su tri noža od istog materijala, brzoreznog čelika, različitih dimenzija. Na slici 32 može da se vidi da su grudni i leđni uglovi isti za sva tri noža dok je različita samo širina noža koja je određena da bude 2, 3 i 4 mm kako bi se mogao ispitivati odziv upravljanja i kvalitet obrađene površine pri različitim otporima materijala predmeta rada pri procesu rendisanja.



Slika 32. Izrađeni noževi za rendisanje

- 1) Grudni ugao $\square 10^{\circ}$
- 2) Leđni ugao $\square 15^{\circ}$
- 3) Širina noža: 2, 3, 4 mm

Bočni uglovi imaju vrednost od $1 \div 2$ stepena kako ne bi došlo do trenja materijala i noža prilikom produblivanja žljebova.

Odabrani su i izrađeni noževi sa navedenim parametrima uglova i širine jer u tablicama standardnih veličina uglova noževa za rendisanje ne postoji nož koji je namenjen za

obrađivanje predmeta rada koji je od plastike. Napravljen je kompromis pri izradi i usvojene su približne vrednosti uglova noža pri obradi materijala sa najmanjom tvrdoćom.

Kompresor – Fiac - NEWHISPER VS 204

Fiac - NEWHISPER kompresor (slika 33) je okarakterisan maksimalnim protokom od 200 l/min, pritiskom od 8 bar i niskim pragom buke. Ovaj kompresor korišćen je za obezbeđivanje dovoljne količine vazduha pod pritiskom u eksperimentalnom delu istraživanja.



Slika 33. Kompresor za snabdevanje vazduhom pod pritiskom

Ostala oprema

Pored navedene opreme korišćene su pomoćne pneumatske komponente kao što su regulatori pritiska, razne vrste priključaka, pneumatska creva, prigušnice, Bosch profili – noseća konstrukcija, itd.

3.3.1 Uređaj za merenje potrošnje vazduha pod pritiskom

Mnogi pneumatski sistemi imaju instalirane stalne merače protoka. Merač protoka omogućava da se prati potrošnja vazduha pod pritiskom na pojedinim komponentama, proizvodnja vazduha pod pritiskom kao i curenja u sistemu.

Za potrebe ovog istraživanja korišćen je uređaj Air Box tipa GHDA-FQ-M-FDMJ-A, slika 34, proizvođača Festo koji se odlikuje sledećim karakteristikama:

- Jednostavan i brz za instalaciju.
- Tačno pozicioniranje na cev.
- Precizno merenje vrednosti čak i sa veoma malom potrošnjom.
- Brzo vreme odziva na maksimalnu potrošnju.
- Tekuća potrošnja i sveobuhvatne mere u m^3/h i m^3 .
- Tačnost do 2% izmerene vrednosti.
- Moguće povezivanje sa računarnom.
- Utvrđuje potrošnju vazduha pod pritiskom u zavisnosti od karakterističnih vrednosti protoka.
- Automatsko čuvanje podataka.
- Maksimalan pritisak na ulazu u AirBox je 10 bar, sa odstupanjem manjim od 100 mbar.



Slika 34. Merač protoka AirBox

Pomoću AirBox-a može se vršiti merenje protoka (Flow measurement) i testirati kvalitet vazduha pod pritiskom (Air quality test), dok je u ovom slučaju, korišćen samo za merenje protoka VPP.

Instaliranje i podešavanje opreme za statičko merenje količine protoka vazduha pod pritiskom vrši se na sledeći način:

1. Povezati pripremnu grupu sa ulazom u AirBox
2. Priključiti AirBox u struju
3. Dovedi crevo na ulaz u AirBox
4. Drugi kraj spojiti sa sistemom, kako bi se zatvorio krug
5. Potrebno je najpre izabrati Flow measurement u glavnom meniju
6. Prilikom merenja protoka potrebno je prvo izabrati veličinu protoka, podešavanjem ručice ventila poz. 10. (slika 35)
 - Low (10-200 l/min)/High (100-5000 l/min).
7. Odabrati mod pri merenju Static/Dynamic.
 - Statički mod podrazumeva da se protok meri dok je mašina pod pritiskom, ali bez opterećenja. U principu vrši se merenje curenja vazduha (koristi se u eksperimentalnom delu).
 - Dinamički mod podrazumeva da je mašina pod pritiskom i u radu opterećena (nije važno da li je puno opterećenje ili delimično). Vrši se merenje potrošnje vazduha pod pritiskom.
8. Na displeju podesiti veličinu protoka Low-flow/High-flow.
 - AirBox inicijalno namešta low flow-Lo za statičko merenje i high flow-Hi za dinamičko merenje protoka.
 - Na početku merenja sistem ne sme biti opterećen (tabela 6). Ukoliko se želi dinamičko merenje protoka, nakon izbora Dynamic u glavnom meniju, opterećuje se mašina.

protok	nepravilnost	AirBox
Lo	iznad dozvoljenih vrednosti Over-range	na displeju O.Flow
Lo	ispod dozvoljenih vrednosti Under-range	displej trepti
Hi	iznad dozvoljenih vrednosti Over-range	na displeju O.Flow
Hi	ispod dozvoljenih vrednosti Under-range	na displeju trepti 0

Tabela 6. Tabelarni prikaz nepravilnosti usled opterećenja sistema

5. Merenje počinje pritiskom kontrolnog dugmeta, poz. 11.

- Na displeju su prikazani veličina protoka, pritisak i temperatura vazduha.

6. Za prestanak merenja neophodno je pritisnuti ponovo kontrolno dugme, poz. 11.

7. Dobijeni podaci čuvaju se u određenom fajlu.

- Za statička merenja fajlovi imaju ekstenziju **CSV**, a za dinamička **csv**.

Pomeranjem kontrolnog dugmeta na gore, može se menjati ime fajla.

Na slici 35 detaljno su prikazani svi priključci uređaja za merenje protoka VPP.



Slika 35. Priključci Air Box uređaja

Priključci Air Box uređaja su:

1. Power supply (snabdevanje energijom).
2. Data transmission connection RS 232 (povezivanje sa računarom).
3. Supply air flow measurement (merač protoka ulaznog vazduha).
4. Exhaust air flow measurement (merač protoka izduvnog vazduha).
5. Ascertainment of supply air quality (dovod vazduha za merenje kvaliteta).
6. Water test - merenje vlage od 5 do 2000 mg/m³.
7. Oil test – merenje ulja od 0,1 do 5 mg/m³.
8. Oil test – merenje ulja od 1 do 10 mg/m³.
9. Purging air adjusting knob (dugme za podešavanje vazduha za čišćenje).
10. Valve for switching amongst various air channels (ventil za usmeravanje vazduha prema određenom protokomeru).
11. Control button for menu navigation (kontrolno dugme za kretanje po meniju).
12. Menu navigation display (displej za meni – prikazuje protok u l/min pri standardizovanoj temperaturi od 15°C).
13. Low flow rate display (displej za male protoke - prikazuje protok u l/min pri standardizovanoj temperaturi od 0°C).
14. High flow displej (displej za velike protoke - prikazuje protok u l/min pri standardizovanoj temperaturi od 0°C).

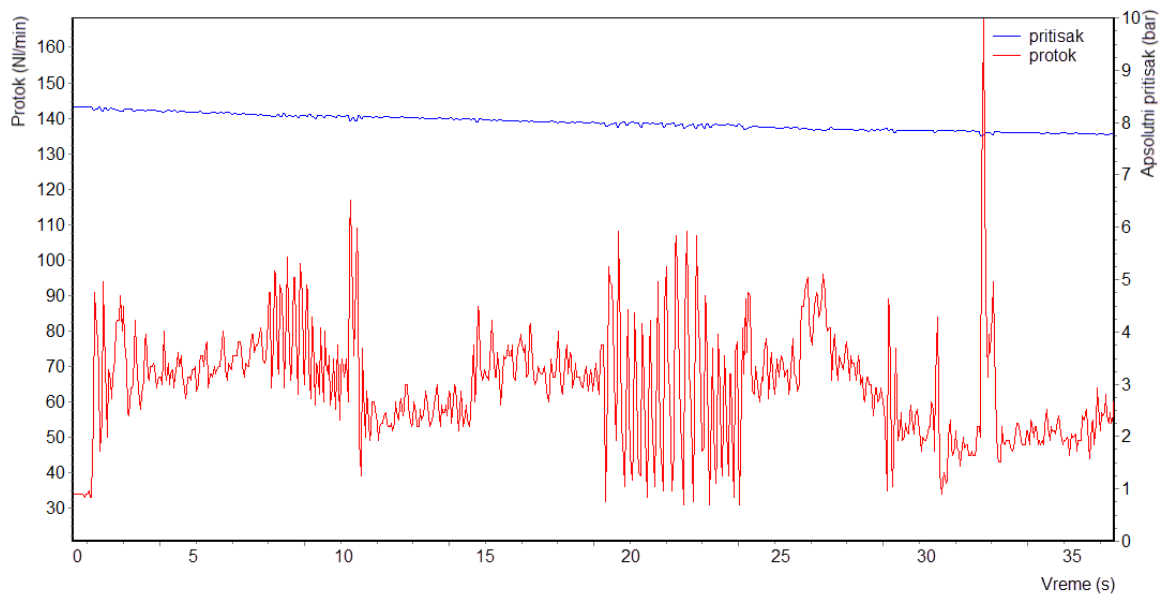
Podaci dobijeni merenjem se smeštaju u data logger, uređaj za automatsko čuvanje podataka.

Pri korišćenju ovog uređaja potrebno je voditi računa i o sledećem:

- AirBox se uvek postavlja na onu stranu sa koje nema priključaka.
- AirBox se ne sme postavljati na klizavu površinu.
- Ne smeju se ispitivati gasovi koji su zapaljivi, korozivni i agresivni.
- Kondenzovana voda, uljna magla i čvrste čestice oštećuju senzore u AirBox - u.
- Minimalna klasa vazduha koja se može propustiti u Air Box je 5.4.3 prema ISO 8573-1 standardu.

AirBox izmerene parametre prilikom merenja protoka prikazuje u obliku dijagrama, slika 36, ili u obliku brojčanih vrednosti u Excel tabeli, tabela 7.

Kao primer će se prikazati način obrade podataka pri dinamičkom merenju potrošnje vazduha pod pritiskom za predmet rada od polietilena, pri prodiranju noža širine 3 mm.



Slika 36. Dijagramski prikaz parametara dobijenih dinamičkim merenjem protoka vazduha pod pritiskom sa uređajem AirBox

Ukupna potrošnja vazduha se izračunava po sledećoj formuli:

$$Q = \frac{1}{2} \sum_{i=1}^n (t_i - t_{i-1}) \cdot (q_i + q_{i-1}) = \frac{4636,021}{2 \cdot 60} = 38.6335 \text{ l} \quad (9)$$

gde je:

Q - ukupna potrošnja,

t_i - vreme merenja,

t_{i-1} - prethodno vreme merenja,

q_i - potrošnja u t_i ,

q_{i-1} - potrošnja u t_{i-1} .

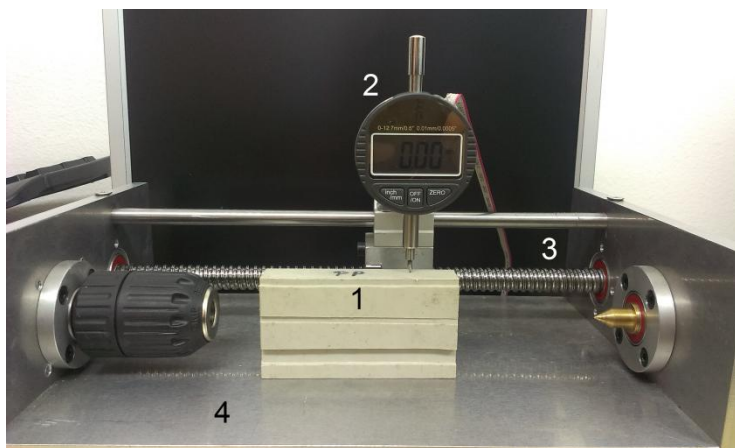
vreme t (s)	protok q (l/min)	pritisak (bar)*	$t_i - t_{i-1}$	$q_i + q_{i-1}$	$(t_i - t_{i-1}) \cdot (q_i + q_{i-1})$
...
36.55664	50	7.793	/	/	/
36.60645	50	7.793	0.04981	100	4.981
36.65625	51	7.8	0.04981	101	5.03081
36.70605	46	7.8	0.04981	97	4.83157
36.75586	49	7.791	0.04981	95	4.73195
36.80566	49	7.791	0.04981	98	4.88138
36.85547	49	7.783	0.04981	98	4.88138
36.90527	56	7.783	0.04981	105	5.23005
36.95508	55	7.777	0.04981	111	5.52891
37.00488	57	7.777	0.04981	112	5.57872
37.05469	58	7.783	0.04981	115	5.72815
37.10449	48	7.783	0.04981	106	5.27896
37.1543	44	7.777	0.04981	92	4.58252
37.2041	54	7.777	0.04981	98	4.88138
37.25391	55	7.793	0.04981	109	5.42929
37.30371	48	7.793	0.04981	103	5.13043
37.35352	54	7.768	0.04981	102	5.08062
37.40332	64	7.768	0.04981	118	5.87758
37.45313	59	7.783	0.04981	123	6.12663
37.50293	52	7.783	0.04981	111	5.52891
37.55273	57	7.783	0.04981	109	5.42929
37.60254	56	7.783	0.04981	113	5.62853
37.65234	57	7.771	0.04981	113	5.62853
37.70215	62	7.771	0.04981	119	5.92739
37.75195	56	7.775	0.04981	118	5.87758
37.80176	54	7.775	0.04981	110	5.4791
37.85156	57	7.784	0.04981	111	5.52891
37.90137	54	7.784	0.04981	111	5.52891
...
* Absolutni pritisak	$\sum (t_i - t_{i-1}) \cdot (q_i + q_{i-1})$				4636.02

Tabela 7. Tabelarni prikaz rezultata merenja potrošnje vazduha pod pritiskom

3.3.2 Uređaj za određivanje kvaliteta obrađene površine

Za potrebe merenja kvaliteta obrađene površine predmeta rada, razvijen je uređaj modularnog tipa, slika 37. U radu [73], autori su pokazali mogućnost primene uređaja u svrhu merenja kružnosti cilindričnih predmeta rada. U ovom istraživanju, merenje se vrši kontaktnom metodom, tako što se igla mernog instrumenta automatski kreće po obrađenoj površini u jednom prolazu.

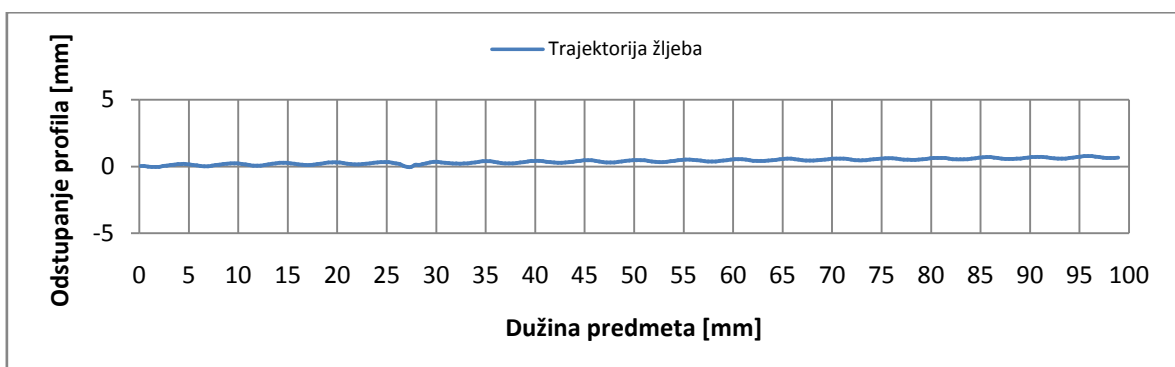
Predmet rada, prizmatičnog oblika postavlja se na postolje uređaja i predstavlja merni objekat (1) dok se kao merni instrument (2) koristi digitalni merni sat. Kretanje mernog sata omogućeno je DC motorom, dok se praćenje pozicije ostvaruje enkoderom, uz pomoć zavojnog vretena (3). Konstantno, u toku kretanja mernog sata izvršava se akvizicija podataka. Upravljanje sistemom, slika 37, omogućeno je pomoću razvojnog okruženja Arduino.



1. Merni objekat – predmet rada
2. Merni instrument – digitalni merni sat
3. Sistem za pokretanje mernog instrumenta
4. Postolje

Slika 37. Uređaj za merenje odstupanja od željenog profila

Korišćenjem mernog instrumenta, digitalnog mernog sata, pozicija 2 na slici 37, izmerene su vrednosti obrađene površine dobijene procesom ulaska alata u predmet rada koji time pravi žljeb. Nakon toga, vrednosti su obrađene kako bi mogle da se identifikuju neravnine, odredi profil i da se odredi kvalitet obrađene površine, slika 38.



Slika 38. Izgled profila za materijal PE, nož 3 mm

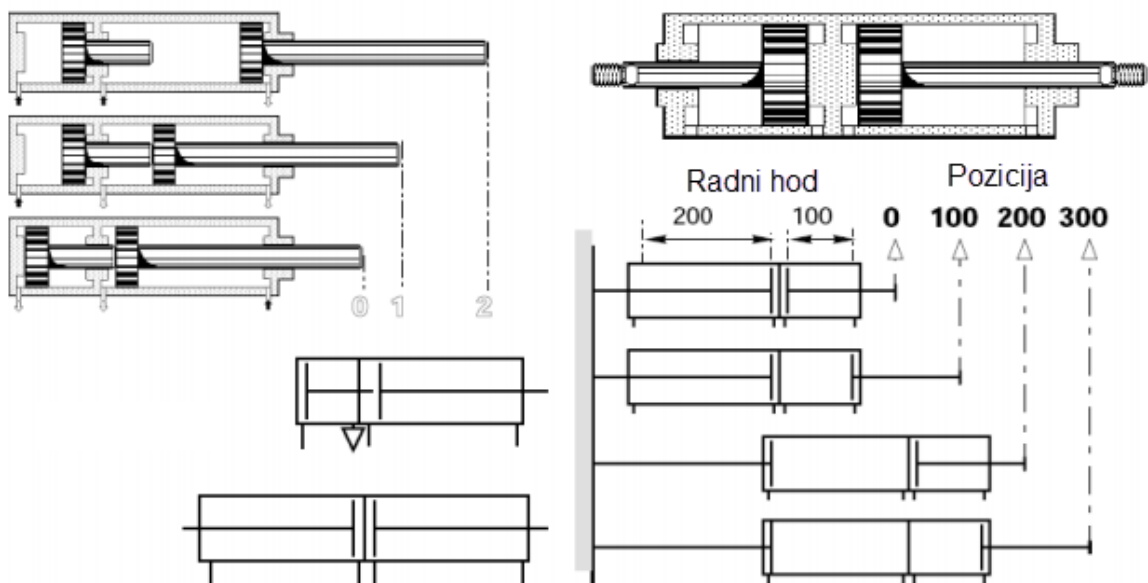
3.4 Upravljanje pneumatskim aktuatorima

U literaturi se često upotrebljava termin proporcionalni razvodnik i servo razvodnik. Uobičajeno je da se termin servorazvodnik odnosi na razvodnik koji ima zatvorenu petlju upravljanja pozicijom klipa razvodnika. Kod proporcionalnog, pozicijom klipa upravlja se u otvorenoj petlji. Nova rešenja elektronike za upravljanje proporcionalnim razvodnikom rade se integrirano sa samim razvodnikom, tako da se gubi razlika između proporcionalnog i servo upravljanja [35].

Iz tog razloga se kao opcije servopneumatskog upravljanja postavljaju dva tipa upravljanja: proporcionalno i PWM upravljanje.

Kada su u pitanju sistemi sa pneumatskim cilindrima kao izvršnim organima, najčešća je realizacija upravljanja sa pozicioniranjem u dva krajnja položaja. Međutim, sve je češća potreba za pozicioniranjem cilindara u više tačaka, što se sa razvojem tehnike upravljanja može postići na više načina.

Najjednostavniji sistem je formiranje višepoložajnog cilindra kako je pokazano na slici 39. Na taj način se postiže mogućnost za pozicioniranjem u nekoliko tačaka, tri ili četiri, koje su fiksne i zavise od dužine hoda pojedinih cilindara. Ovakvi sistemi imaju najveću tačnost i ponovljivost, ali nisu fleksibilni i projektuju se za tačno određen zadatak.



Slika 39. Višepoložajni cilindar [74]

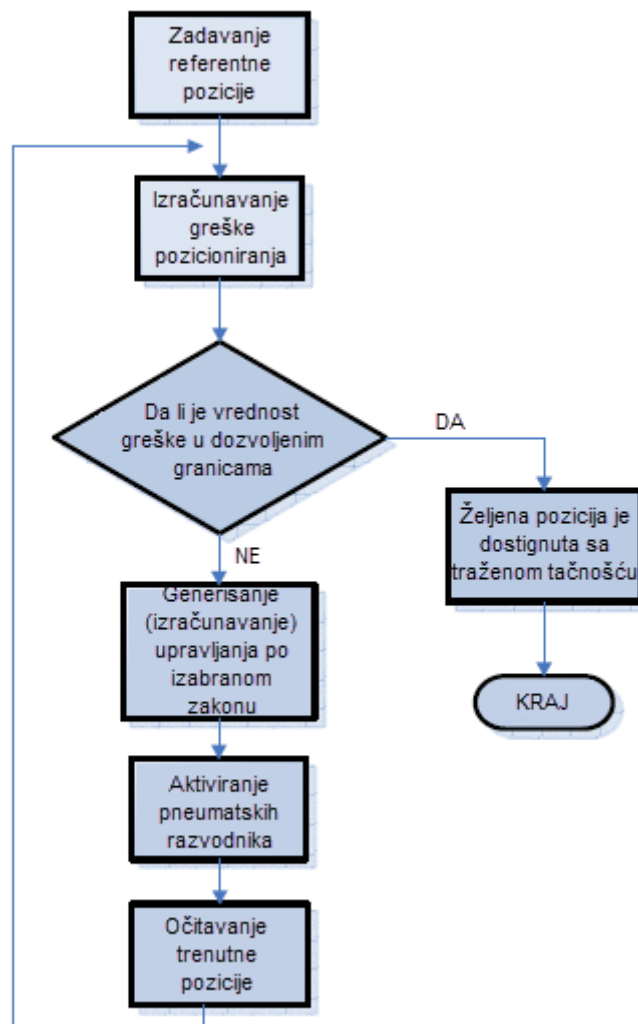
Postavljanjem merne letve duž ose cilindra i korišćenjem podataka sa nje za upravljanje postižu se najbolji rezultati. Prilikom izbora komponenti za ovakav jedan sistem na raspolaganju su analogne i digitalne merne letve. Kako bi se postigla tačnost pozicioniranja, potrebno je koristiti i dodatne kontrolere sa složenim upravljačkim algoritmima, određene razvodne ventile i prateću opremu, što dodatno poskupljuje sistem. Opisanim rešenjem postiže se pozicioniranje pneumatskih cilindara u bilo koju tačku duž radnog hoda. Pri projektovanju opisanih sistema često se na cilindar postavlja alat za obavljanje zadatka. Pored postizanja određene pozicije, važan faktor predstavlja i brzina

dovođenja alata u tu poziciju. Jedan od načina postizanja različitih brzina alata jeste korišćenje analognih (proporcionalnih) razvodnih ventila. U tom slučaju, na osnovu vrednosti analognog signala, razvodni ventil propušta više ili manje vazduha pod pritiskom u određene komore cilindra.

Drugi način, koji je i izabran za realizaciju u ovom radu, jeste korišćenje PWM signala.

Na slici 40, kroz formu algoritma, prikazan je sam princip realizacije upravljanja za dostizanje željene pozicije. Korišćenjem PWM upravljanja lako se uočava da ovaj algoritam predstavlja jedan regulacioni krug, tačnije regulaciju sa zatvorenom povratnom spregom. Na dijagramu se vide svi najvažniji procesi, koji se odvijaju unutar tako struktuiranog regulacionog kruga. Ovaj proces se odvija svaki put pri dostizanju željene pozicije sve dok se ne ostvari zadovoljavajuća tačnost pri pozicioniranju.

Korišćeni algoritam za dostizanje željene pozicije, korišćenjem PWM upravljanja, dat je na slici 40.



Slika 40. Algoritam dostizanja željene pozicije kod PWM upravljanja

Samo programiranje upravljačkog dela zavisi od izabranog kontrolera kao i njemu odgovarajućeg okruženja. Za PWM upravljanje koristilo se WinProLadder okruženje dok

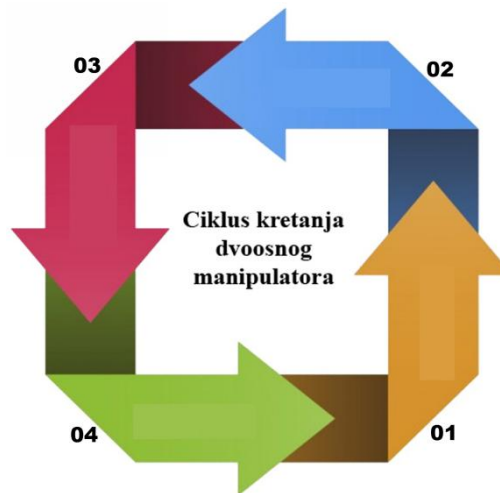
je za potrebe proporcionalnog upravljanja i odgovarajućeg hardvera to bilo Codesys okruženje. Zbog velikog broja različitih korišćenih programa (kodova), oni su u ovom radu dati u prilogu. U ovom odeljku razmatraće se princip funkcionisanja dvoosnog pneumatskog programabilnog manipulatora, u obliku algoritma, kroz koji je realizovano upravljanje.

Na slici 41, prikazana je željena putanja alata u procesu obrade predmeta rada rendisanjem.

Kao što je već rečeno, u procesu rendisanja postoje dva različita slučaja. Prvi slučaj je kada predmet obavlja glavno kretanje a alat pomoćno kretanje i drugi slučaj kada alat obavlja glavno kretanje a predmet pomoćno kretanje, što je razmatrano u ovom istraživanju. Oba kretanja su pravolinijska. Nož skida strugotinu samo za vreme kretanja u jednom smeru – radni hod, dok se povratni hod naziva neradni hod jer u povratku nož ne reže. Rendisanjem se uglavnom obrađuju ravne površine i prave se pravi žljebovi.

Jedna od glavnih postavki ovog istraživanja je da se razvije takav sistem koji kao energent koristi VPP i da se omogući ispitivanje različitih vrsta upravljanja, u procesu rendisanja.

Dvoosni pneumatski manipulator predstavlja minimalnu konfiguraciju pomoću koje mogu da se ispituju različite vrste upravljačkih zakona, pri spregnutom kretanju više osa radi realizacije neke trajektorije.



Slika 41. Programirana putanja manipulatora

Oznake na slici 41 predstavljaju:

01 – početni (nulti) položaj pneumatskih osa.

Mesto odakle počinje ciklus. Izvršava se vertikalno kretanje pneumatskog cilindra prema gore dok horizontalni cilindar miruje.

02 – kada se završi pozicioniranje vertikalnog cilindra u određenoj gornjoj tački izvršava se kretanje horizontalnog cilindra u pravcu sa desna na levo. U tom period vertikalni cilindar miruje.

03 – po dostizanju tačno definisane pozicije horizontalnog cilindra može da se započne sa kretanjem vertikalnog pneumatskog cilindra iz gornjeg položaja ka dole - spuštanje. Ovaj

deo kretanja je jako važan jer kod pozicioniranja vertikalnog cilindra pri spuštanju zavisi da li će manipulator moći uspešno da obavi u narednom koraku proces rendisanja, skidanje strugotine i na taj način odstrani materijal sa predmeta.

04 – nakon uspešnog spuštanja vertikalnog cilindra, horizontalni cilindar se kreće u smeru sa leva na desno i izvršava radni hod – skidanje strugotine sa predmeta obrade.

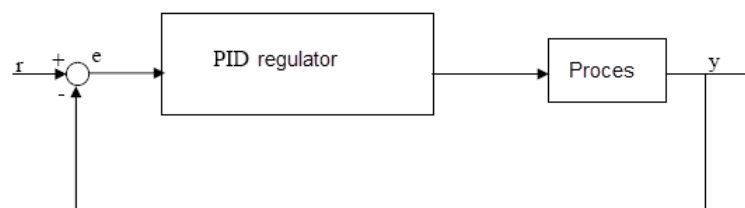
Na ovaj način je opisan jedan ciklus kretanja alata programiranog dvoosnog pneumatskog manipulatora u procesu rendisanja.

3.4.1 PWM upravljanje

Svaki sistem automatskog upravljanja koristi određeni zakon upravljanja. Zakon upravljanja predstavlja matematičku zavisnost na osnovu koje upravljački uređaj obrađuje relevantne signale (informacije) i generiše odgovarajuća upravljačka dejstva.

Najčešća forma ovakvih upravljačkih uređaja se naziva regulator. Postoji veliki broj različitih tipova regulatora, ali ako se razmatraju regulatori u kontinualnim linearnim sistemima, onda se njihova klasifikacija najčešće vrši na osnovu vrste zakona upravljanja. Kod osnovnih zakona upravljanja njihovo dejstvo može da linearno zavisi od greške, njenog integrala ili prvog izvoda greške po vremenu [75]. Na bazi ove činjenice sledi podela regulatora na proporcionalni, integralni i izvodni (diferencijalni) regulator. Pomoću navedenih osnovnih regulatora moguće je formirati složenije proporcionalno - integralne i proporcionalno diferencijalne regulatore, kao i najsloženije proporcionalno – integralno - diferencijalne regulatore. Bez obzira na tip regulatora i način njegove realizacije, osnovni zahtevi koji se postavljaju pred svaki regulisani sistem su: stabilnost, tačnost i brzina odziva. Tri navedena zahteva su i osnovni problemi regulacije pa teorija automatskog upravljanja prvenstveno treba da odgovori na ta pitanja.

Regulator je uređaj ili skup uređaja kojim se postiže automatsko regulisanje fizičkih veličina (automatska regulacija). Regulator formira upravljački signal, na osnovu informacije o odstupanju regulisane veličine od njene zadate vrednosti, koji potom šalje ka objektu upravljanja (proces), kao što je prikazano na slici 42.



Slika 42. Upravljanje povratnom spregom sa PID regulatorom

Na ulaz regulatora deluju dve veličine, stvarna i zadata, a na izlazu se dobija upravljačka veličina. Kontinualnim regulatorima se nazivaju regulatori kod kojih je signal upravljanja kontinualna (neprekidna) funkcija signala greške. Ovi regulatori na svako odstupanje regulisane veličine od njene željene vrednosti reaguju tako da proizvode kontinualne signale, koje pojačavaju i pomoću njih izvode pomeraje izvršnih organa sve dotle dok regulisanu veličinu ne stabilišu na željenoj vrednosti. S obzirom na karakter dejstva dele se na:

- proporcionalne (P) regulatore,
- integralne (I) regulatore,
- diferencijalne (D) regulatore i
- kombinovane (PI, PD i PID) regulatore.

Prilikom mnogih analiza, u većem broju već objavljenih radova, korišćeni su različiti tipovi regulatora u cilju dobijanja što boljih odziva. U ovom radu izabran je proporcionalni regulator (P regulator) na osnovu kojeg je zasnovan i izgrađen algoritam upravljanja. Na osnovu empirijski dobijenih podataka i izvršenih oglada ovaj tip regulatora ostvario je najbolje rezultate.

Kod ovog najjednostavnijeg oblika regulatora je realizovan proporcionalni zakon upravljanja $u(t)$, koji je dat sledećom relacijom:

$$u(t) = K_p e(t) \quad (10)$$

Ovde je K_p faktor proporcionalnog dejstva ili pojačanja regulatora, a $e(t)$ je signal greške.

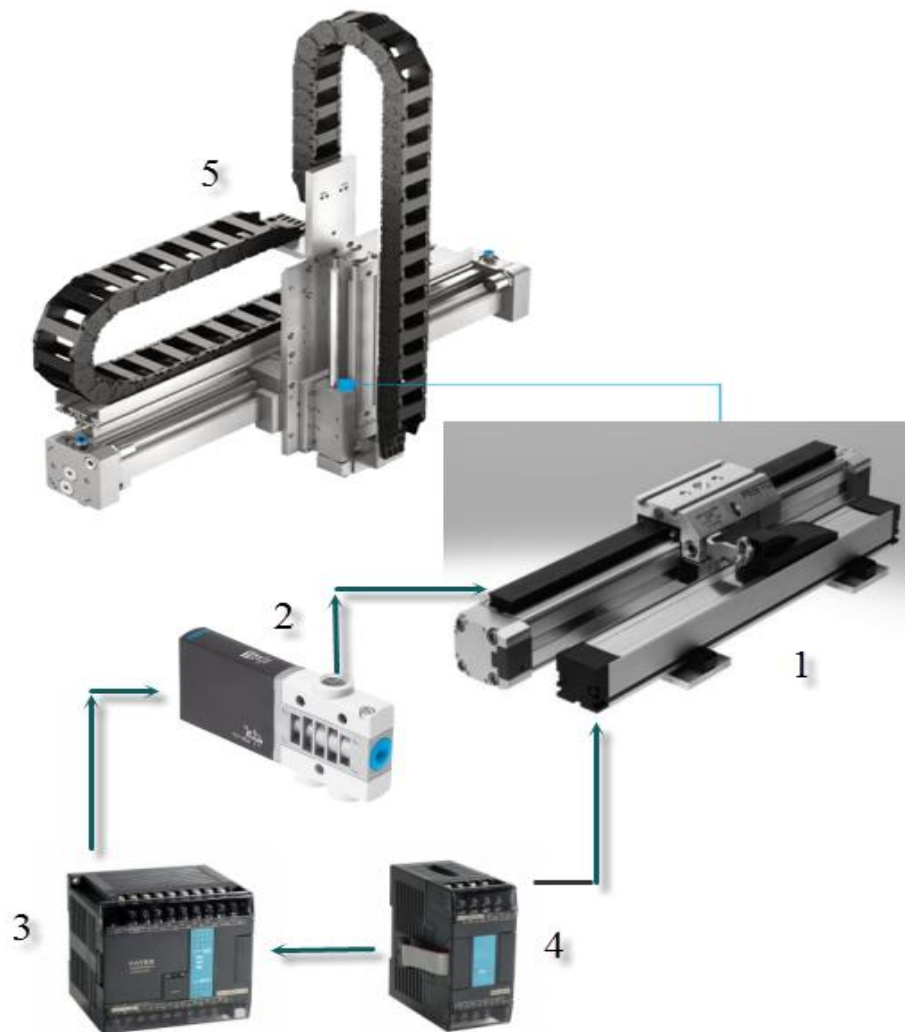
Funkcija prenosa proporcionalnog regulatora ima tada sledeći oblik:

$$G_p(s) = \frac{U(s)}{E(s)} = K_p \quad (11)$$

Svaki proporcionalni regulator se odlikuje 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 . Povećanjem pojačanja, K_p odnosno smanjenjem proporcionalnog područja, se konstantno odstupanje upravljane promenljive, od njene zadate vrednosti, smanjuje. U isto vreme se povećava brzina reagovanja i smanjuje pretek stabilnosti sistema.

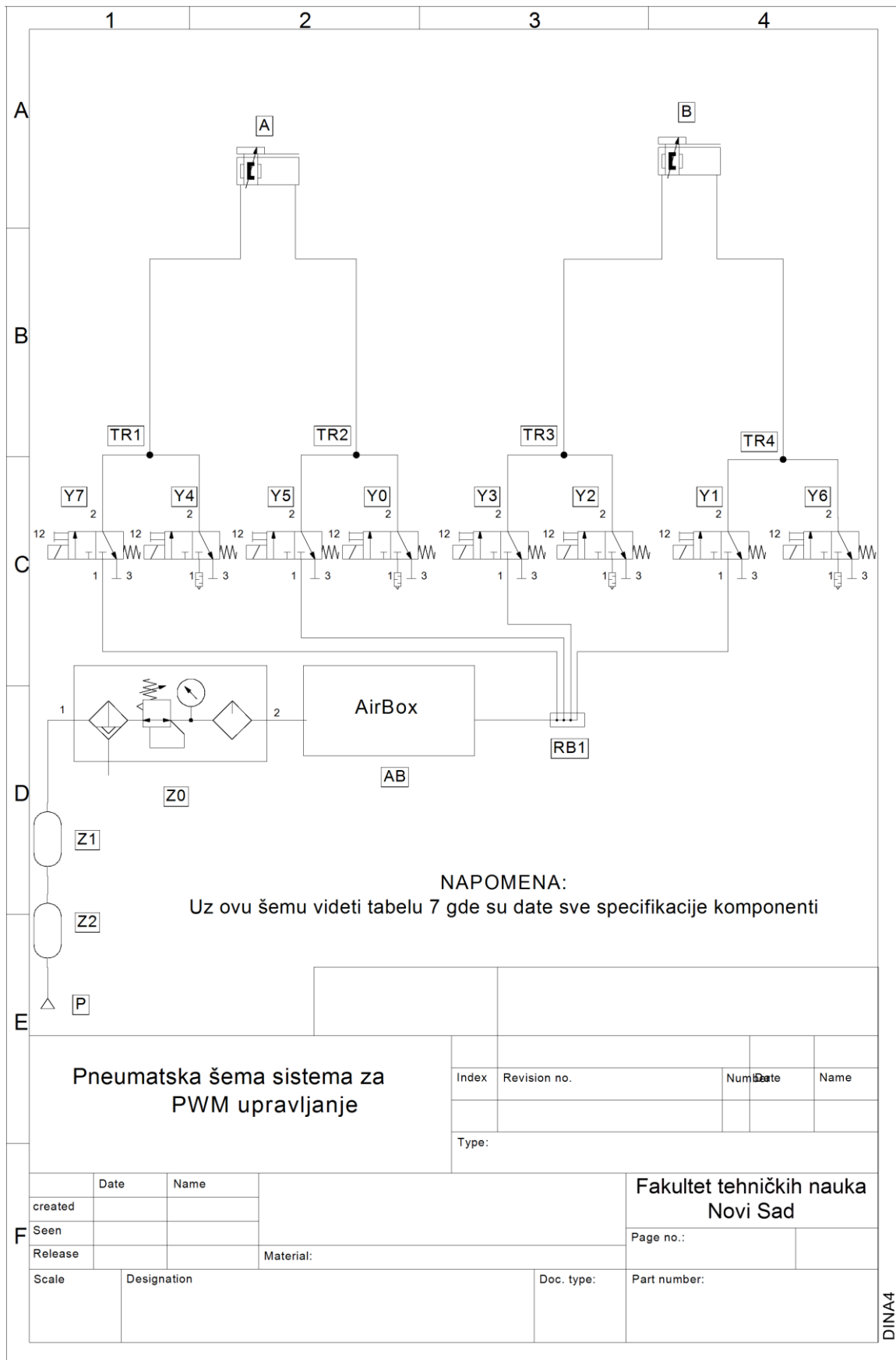
Na slici 43, je prikazana arhitektura spajanja komponenti koja je realizovana za PWM upravljanje. Oznake na slici su:

1. Veza merne letve i cilindra bez klipnjače.
2. Razvodnik 3/2 monostabilni kome je blokirana odzraka tako da ima funkciju 2/2, preko kojeg se uspostavlja protok ka cilindru ili ka atmosferi.
3. Glavna upravljačka jedinica sa ugrađenim HSPWM izlazima.
4. Dodatni modul za akviziciju signala sa analogne merne letve.
5. Spregnuta dva cilindra bez klipnjače.



Slika 43. Arhitektura upravljačkog sistema kod PWM upravljanja

Kod PWM upravljanja koriste se brzi 2/2 monostabilni, električno aktivirani, u početnom položaju zatvoreni razvodnici. Normalno zatvoreni pneumatski razvodnik znači da kada se na njegov elektromagnet ne dovede nikakav upravljački signal, kroz sebe ne propušta VPP. Na ovaj način se, direktno pomoću njih, omogućava postavljanje pritiska u komorama pneumatskog cilindra na vrednosti atmosferskog ili radnog pritiska (6 bar), sve u zavisnosti kako se želi da se klip cilindra pomera. Pomeranje klipa, odnosno njegovo izvlačenje ili uvlačenje, moguće je ostvariti istovremenim aktiviranjem dva odgovarajuća pneumatska razvodnika, jednog u levoj, a drugog u desnoj grani pneumatske šeme cilindra A (slika 44), tako da oni rade u paru. Pri tome jedan razvodnik postavlja vrednost radnog pritiska u jednoj komori cilindra, dok se druga komora odzračuje (njen pritisak se izjednačava sa atmosferskim pritiskom). U skladu sa datim oznakama na slici 44, to bi značilo da su za izvlačenje cilindra A zaslužni razvodnici Y7 i Y0, a za njegovo uvlačenje Y4 i Y5.



Slika 44. Pneumatska šema PWM upravljanja

U tabeli 8, su prikazane specifikacije pneumatskih komponenti koje su primenjene pri realizaciji PWM upravljanja.

r.b.	Oznaka na šemi	Komponenta	Tip komponente	Proizvođač
1	A	Cilindar dvosmernog dejstva bez klipnjače	DGPL-25-200-PPV-A-B-KF-KU-SH-D2	Festo
2	B	Cilindar dvosmernog dejstva bez klipnjače	DGPL-25-200-PPV-A-B-KF-KU-SH-D2	Festo
3	Y0	Razvodni ventil cilindra A	MHE3-MS1H-3/2G-1/8	Festo
4	Y1	Razvodni ventil cilindra B	MHE3-MS1H-3/2G-1/8	Festo
5	Y2	Razvodni ventil cilindra B	MHE3-MS1H-3/2G-1/8	Festo
6	Y3	Razvodni ventil cilindra B	MHE3-MS1H-3/2G-1/8	Festo
7	Y4	Razvodni ventil cilindra A	MHE3-MS1H-3/2G-1/8	Festo
8	Y5	Razvodni ventil cilindra A	MHE3-MS1H-3/2G-1/8	Festo
9	Y6	Razvodni ventil cilindra B	MHE3-MS1H-3/2G-1/8	Festo
10	Y7	Razvodni ventil cilindra A	MHE3-MS1H-3/2G-1/8	Festo
11	RB1	Razvodni blok VPP	/	Festo
12	P	Kompresor	NEWHISPER VS 204	Fiac
13	Z0	Pripremna grupa	FRC-1/4-D-5M-MIDI-A	Festo
14	Z1	Rezervoar	40 litara	/
15	Z2	Rezervoar	40 litara	/
16	AB	Air Box	GHDA-FQ-M-FDMJ-A	Festo
17	TR1	T račva - push in	QST- 8	Festo
18	TR2	T račva - push in	QST- 8	Festo
19	TR3	T račva - push in	QST- 8	Festo
20	TR4	T račva - push in	QST- 8	Festo

Tabela 8. Specifikacija pneumatskih komponenti

Na slici 45 prikazana je realizacija pneumatske upravljačke šeme sa slike 44, kao i prikaz svih uključenih komponenti.

Izlazna frekvencija HSPWM (high speed pulse width modulation) je računata po sledećoj formuli:

$$f_{pwm} = 18432 / (P_n + 1) \quad (12)$$

gde je P_n - vrednost izlazne frekvencije i može da se kreće u opsegu $0 \leq 255$.

Izabrana rezolucija sistema je 0,1 % tj. vrednost registra $R_s = 1/1000$, dok 18432 u formuli predstavlja maksimalnu moguću frekvenciju koju može da ostvari PLK Fatek sa izabranom rezolucijom.

Perioda se računa po formuli: $T(\text{period}) = 1/f_{pwm}$

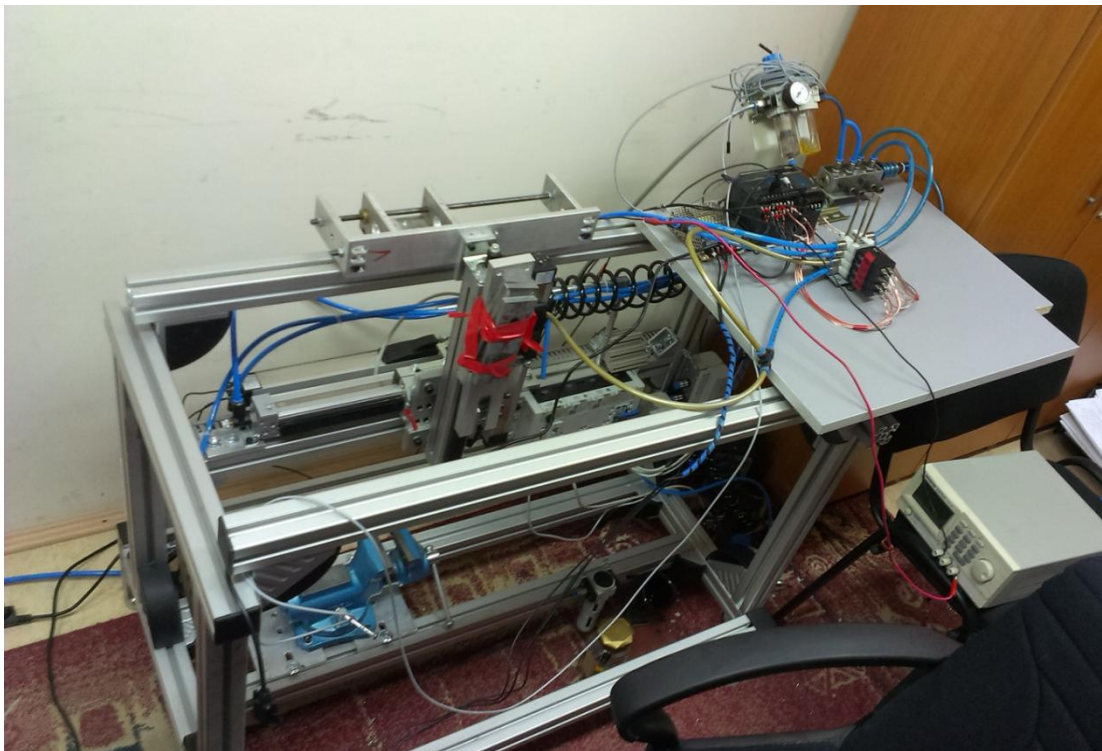
Kod PWM upravljanja vrednost izlazne frekvencije je proporcionalna greški sistema koja automatski, preko P regulatora, podešava vrednost P_n registra u HSPWM funkciji PLK Fatek. Na taj način se direktno utiče na količinu vazduha pod pritiskom koja se izbacuje u atmosferu prilikom pozicioniranja klipa cilindra.

Za ispitivanje PWM upravljanja eksperimentalnim putem je ispitana i određena početna vrednost registra P_n koja je najbolja za horizontalni i vertikalni cilindar. Za horizontalni to je vrednost 210 dok je za vertikalni 213 (videti prilog).

Odatle sledi da je vremenska perioda za horizontalni cilindar 11,45 ms, dok je za vertikalni 11,61 ms.

Pneumatska šema koja je prvo realizovana i dobijeni podaci prikazani, data je na slici 44. Odnosi se na pozicioniranje klipova cilindara pomoću 8 razvodnika u PWM režimu rada. Kako bi mogla da se ustanovi analogija između različitih pneumatskih šema i načina upravljanja koji se razmatraju, u ovoj analizi za sve šeme posmatračće se izvršenje identičnog ciklusa, koji podrazumeva dostizanje dve pozicije (vrednosti pozicija su 30 mm i 170 mm), sa tim što će kod vertikalnog cilindra jedna pozicija varirati zbog preciznosti postavljanja predmeta u stezni alat. Po dostizanju svake pozicije, klip cilindra će se određeni vremenski interval zadržati u njima.

Na slici 45 prikazana je eksperimentalna realizacija PWM upravljačke šeme.



Slika 45. Realizacija pneumatskih upravljačkih šema

3.4.2 Proporcionalno upravljanje

Drugo primenjeno upravljanje je standardno, komercijalno dostupno proporcionalno upravljanje čiji je proizvođač kompanija Festo. Ono u sebi sadrži kontroler oznake CPX – CEC sa zasebnim modulima za upravljanje pneumatskim osama CPX-CMAX-C1-1 i VPWP – 6, 5/3 proporcionalnim pneumatskim razvodnikom. Arhitektura povezivanja električnog dela komponenti ovog sistema nalazi se na slici 46, dok je na slici 47 predstavljena detaljna pneumatska upravljačka šema.

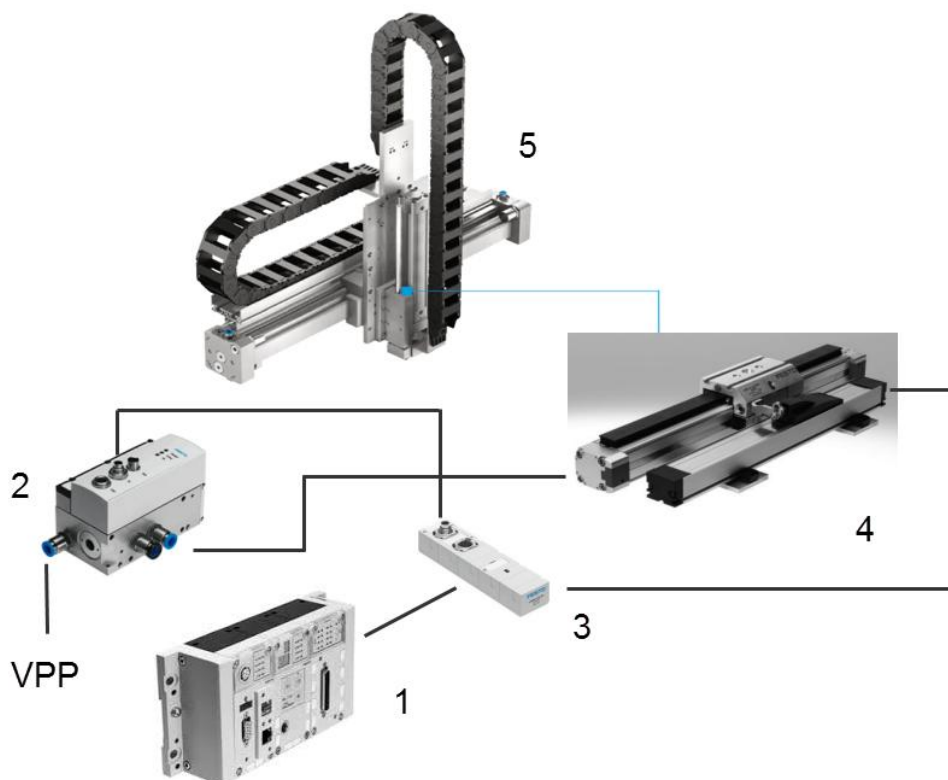
Proporcionalnim upravljanjem pneumatskog cilindra trebaju da se ostvare sledeći zahtevi:

- odvesti klip cilindra na unapred zadatu željenu poziciju sa tačnošću stotog dela milimetra,
- poziciju dostići brzo i bez prebačaja
- održati visoku krutost u odnosu na dejstvo spoljnog opterećenja.

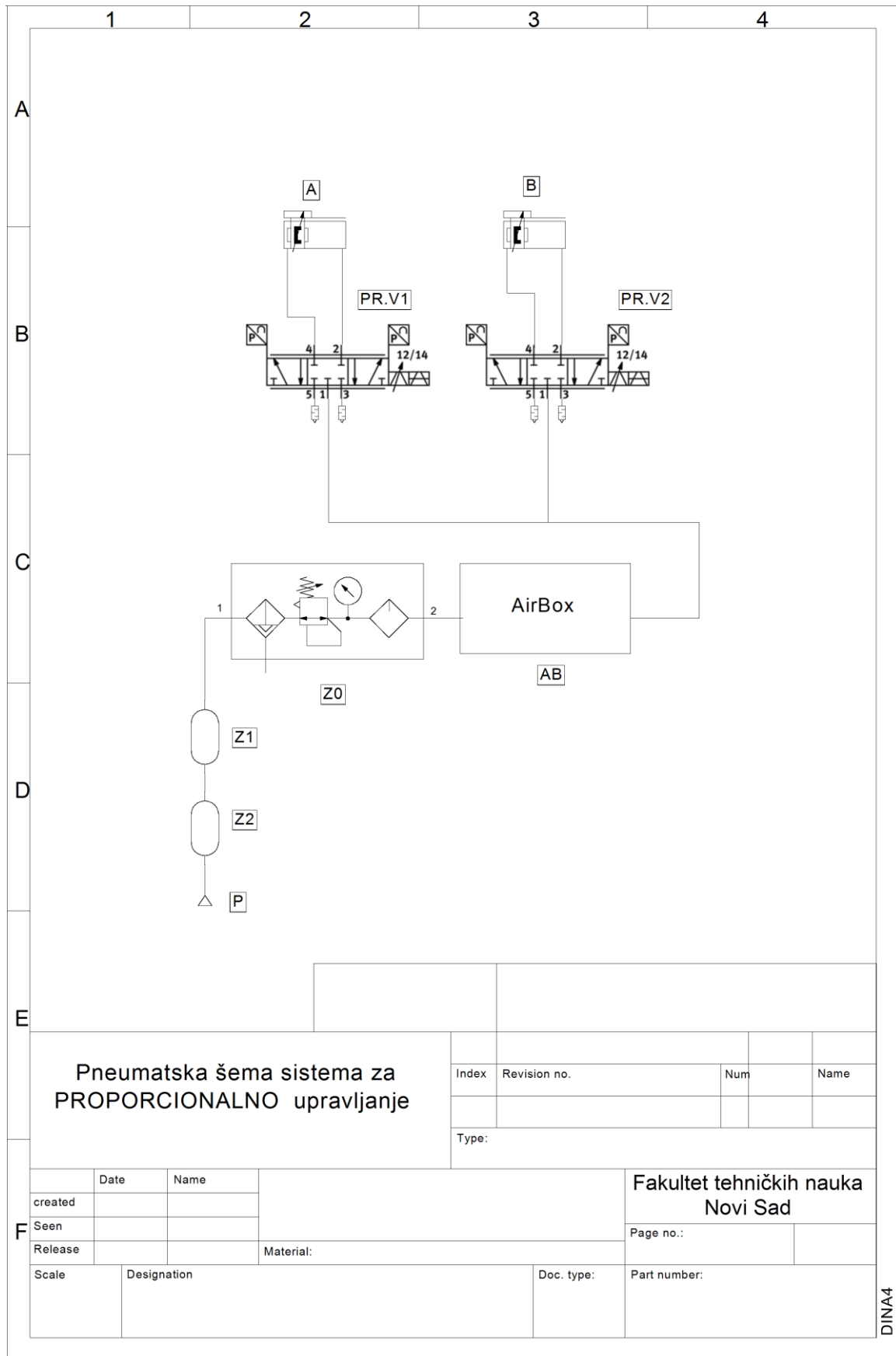
Ovi zadaci se mogu samo onda ispuniti kada se primene dobro podešen regulator i odgovarajući proporcionalni razvodnik.

Na slici 46, je prikazana arhitektura spajanja komponenti koja je realizovana za proporcionalno upravljanje. Oznake na slici su:

1. Kontroler CPX - CAX.
2. Proporcionalni razvodnik VPWP.
3. Interfejs merne letve CASM.
4. Cilindar bez klipnjače DGPL u sprezi sa analognom mernom letvom MLO - POT.
5. Spregnuta dva cilindra bez klipnjače.



Slika 46. Arhitektura upravljačkog sistem kod proporcionalnog upravljanja



Slika 47. Pneumatska šema proporcionalnog upravljanja

Na osnovu vrednosti koje daje merna letva i izabраниh parametara, kontroler CPX-CEC generiše analogni izlaz koji upravlja otvorenošću proporcionalnog razvodnika, koji dalje, definiše poziciju klipa cilindra. Na ovaj način je realizovan regulacioni krug. Ovaj tip kontrolera ima više radnih mogućnosti, što je i predstavljeno u nastavku. Ovakav sistem nudi gotovo rešenje problema pozicioniranja klipa cilindra sa već pomenutim ograničenjem, pri čemu se nudi velika tačnost i pouzdanost u radu. Jedna od bitnih mana koja karakteriše sisteme ovog tipa jeste što je neophodno i u stacionarnom stanju koristiti VPP da bi se zadržala data pozicija, zbog same prirode razvodnika. Ova karakteristika u određenim primenama može da uzrokuje dosta veliku potrošnju energije.

3.4.3 Pokretanje manipulatora

CPX-CMAX-C1-1 osni kontroler ima 6 radnih mogućnosti/operacija:

- 1) Record mode - kontroler ima mogućnost da zapamti 64 tačke tj. pozicije i da ih koristi u programu. Kretanje se ostvaruje na osnovu unapred zadatih vrednosti pozicije.
- 2) Direct mode, position control - free profile - kontroler ne može koristiti tačke koje je zapamtio, već korisnik mora da mu eksplicitno navede u kojoj tački želi da pozicionira klip cilindra. Nema mogućnosti podešavanja brzine kretanja klipa cilindra. Klip se kreće brzinom koja je podešena u parametrizaciji.
- 3) Direct mode, position control - auto profile - slično kretanje gore navedenom, osim što je ovde omogućena regulacija brzine kretanja klipa cilindra.
- 4) Direct mode, pressure/force control - kretanje je u funkciji sile. Korisnik ima mogućnost da zada vrednost sile, koju želi da ostvari na klipu cilindra. Moguća je regulacija brzine kretanja klipa cilindra.
- 5) Parametrisation - parametrizacija, podešavanje regulatora. Ova opcija se koristi ukoliko se ne uradi parametrizacija u Festo Configuration Tool (FCT) softveru. U suprotnom je nema potrebe koristiti.
- 6) Commissioning - sistemska provera. Ocenjuje se rad i stanja radnih elemenata, pripremne jedinice, proveravaju se priključci, slanje i primanje signala itd. Postoje dva testa Movement i Identification test. Oba se mogu odraditi i u FCT softveru.

U ovom radu je korišćeno upravljanje pod tačkom 2: Direct mode, position control - free profile.

2) Direct mode, position control - free profile

Uključuje se postavljanjem na jedinicu ili klikom na simulacioni blok na sledeće promenljive: Stop, EnableDrive, OperationModeB1.

U programu ili u vizuelnom bloku se eksplicitno zadaju vrednosti položaja klipa. Vrednosti se unose u polju Setvalue2. Kretanje se vrši uzlaznom ivicom StartTask - a. Ovde nije tačno određen broj pozicija kao u Record modu. Očekuje se da se zadaje brzina kretanja klipa.

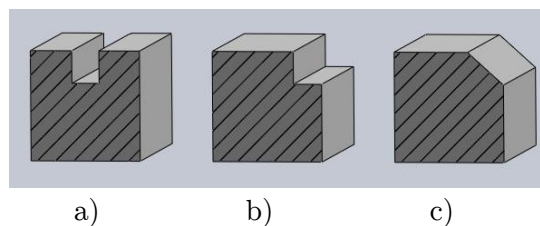
Na displeju kontrolera će se ispisivati simboli sa sledećim redosledom: broj 3 i brojevi koji predstavljaju položaj klipa u milimetrima. Tačan položaj klipa se takođe može videti na polju Actualvalue2.

O ostalim modovima sa detaljnim primerima pogledati u prilogu ovog rada.

4. Poređenje karakteristika upravljanja pri različitim realizacijama upravljačkog sistema

4.1 Postupak programabilnog rendisanja

Iako je oblast primene manipulatora u kontaktnim zadacima veoma velika, istraživanja u ovom radu su sprovedena samo u procesima obrade materijala procesom rendisanja. Pri procesu programabilne obrade rendisanjem (skidanje materijala sa predmeta rada linearnim kretanjem noža pomoću programabilnog uređaja), manipulator drži nož za rendisanje i zajedno sa tim nožem, deluje na površinu predmeta koja se obrađuje, skidajući pri tom neravne površine ili režući žljebove. Na ovaj način mogu se praviti žljebovi određenih dubina i za razliku od klasičnog rendisanja, proizvoljnog oblika, ali u granicama maksimalnih sila obrade koje može da ostvari manipulator. U okviru istraživanja koja su sprovedena, rezan je materijal i realizovani su žljebovi različitih oblika što je prikazano na slici 48.



Slika 48. Različiti oblici profila materijala koji je odstranjivan rezanjem

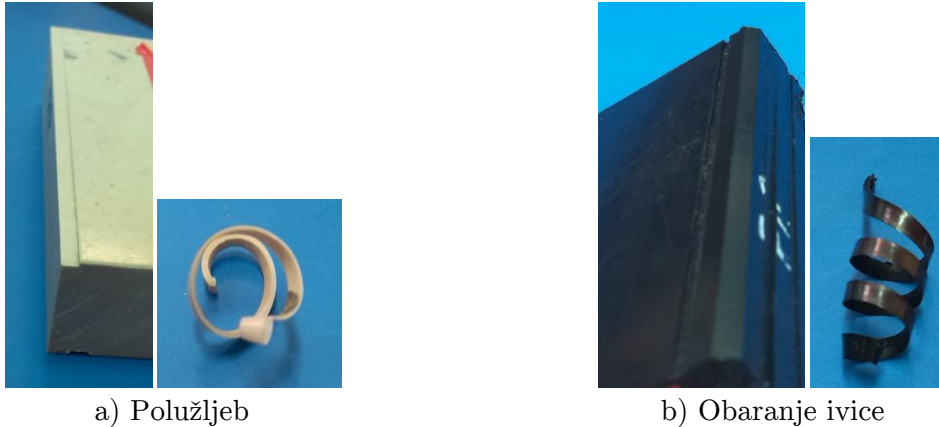
Kao što je poznato, pneumatski aktuatori su karakterisani relativno malim silama pogotovo ako se poredi sa hidrauličnim. Na taj način je i primena pneumatskih manipulatora u procesima odstranjivanja materijala rezanjem ograničena maksimalnim silama koji daju aktuatori mogu da ostvare. Zbog toga je, pomoću pneumatskog manipulatora, programabilno automatizovan proces rezanja moguće primeniti tamo gde se ne zahtevaju velike sile pri rezanju, kao što je slučaj pri prodiranju alata u materijale manje tvrdoće kao što su: drvo, plastika, kompozitni materijali, aluminijum i sl.

Proces upravljanja je eksperimentalno ispitivan pri različitim realizacijama odstranjivanja materijala rezanjem pomoću programabilnog dvoosnog manipulatora kako je definisano na slici 48.

Postupak izrade polužljeba kako je prikazano na slici 48b) je uspešno realizovan sa oba postupka upravljanja i primer takve obrade je prikazan na slici 49a). Međutim, zbog nedovoljno preciznog pozicioniranja predmeta rada ivica, po kojoj je pravljen polužljeb se nije uvek poklopila sa pravcem rada manipulatora (pravcem delovanja noža) tako da se dešavalo da nož pri kraju obrade pravi značajno manju ili veću širinu žljeba nego na početku.

Pri obaranju ivica postupak je realizovan i primer oborene ivice nožem širine 4 mm je dat na slici 49b). Ovaj postupak je uspešno ostvaren sa oba upravljačka sistema i za njega je, u daljem radu, potrebno razviti odgovarajući pribor za stezanje i adaptirati uređaj za merenje kvaliteta obrađene površine kako bi se mogle porediti karakteristike svakog procesa upravljanja.

To su bili razlozi da se za poređenje upravljanja odabere proces izrade klasičnog žljeba kako je prikazano na slici 48a), dok se za dalje istraživanje ostavljaju slučajevi 48b) i c).



Slika 49. Predmet rada nakon procesa rezanja

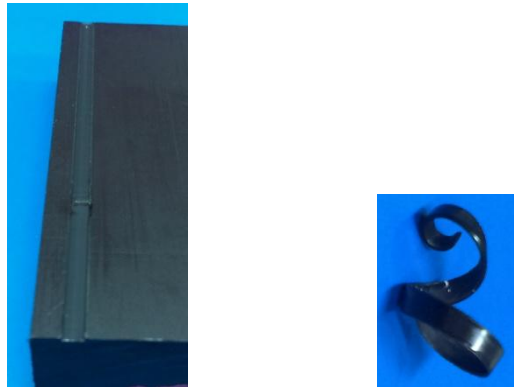
4.2 Poređenje upravljanja po različitim kriterijumima

U laboratorijskim uslovima mereni su parametri od značaja: protok vazduha, kvalitet praćenja trajektorije, valovitost i pritisak sistema.

Laboratorijskim ispitivanjima dobijeni su podaci o potrošnji VPP, vremenu, kvalitetu praćenja trajektorije, kvalitetu obrađene površine u smislu valovitosti i pritisku u sistemu tokom odstranjivanja materijala nožem za rendisanje kojeg nosi pneumatski programabilni dvoosni manipulator. Od interesa su svi ti parametri a posebno potrošnja VPP jer je naglasak u ovom istraživanju na povišenju energetske efikasnosti pri korišćenju VPP u kontaktnim zadacima. U narednom delu prikazani su rezultati za pojedine slučajeve. Na slikama 52, 54 i 55 respektivno mogu da se vide kvalitet obrađene površine (valovitost), izgled jednog obratka i strugotine kao i potrošnja VPP za jedan materijal koji je korišćen u eksperimentu. Na slikama 56 do 61 su prikazani rezultati proporcionalnog upravljanja a na slikama 63 do 71 su prikazani rezultati PWM upravljanja za preostala dva materijala koji su korišćeni u eksperimentima.

Eksperimenti su realizovani na predmetima rada istih dimenzija napravljenim od različitih materijala, kako je prikazano na slici 23. Svaki eksperiment se odvijao po ciklusu upravljanja definisanim na slici 41. Za potrebe ovog ispitivanja realizovani su noževi širine 2, 3 i 4 mm kako je prikazano na slici 32. U preliminarnim ispitivanjima sve širine noževa su korišćene u procesu rezanja i realizovane su obe vrste upravljanja. Međutim, uočeno je da pri ispitivanju kvaliteta obrađene površine (valovitosti) pipak uređaja za merenje kvaliteta obrađene površine zbog svojih dimenzija ponekad zakači ivice žljeba, jer su njegove dimenzije veoma bliske širini žljeba. Zbog toga nisu prikazani ostvareni rezultati

korišćenjem noža od 2 mm. Sa druge strane, kada se koristio nož širine 3 i 4 mm nije bilo problema pri merenju kvaliteta obrađene površine. Međutim, rezanje žljeba korišćenjem noža širine 4 mm na materijalu PA je bilo teško za realizovanje i ne uvek uspešno. Razlog tome je što su dostignute granične vrednosti sile koju može da ostvari ovakav manipulator, što nije dovoljno za kvalitetan proces rezanja žljeba. Na osnovu toga, ovde su prikazani redom rezultati pri procesu rezanja kojim se pravi žleb dubine 0,3 mm i korišćenjem noža širine 3 mm, a jedan realizovan primer klasičnog žljeba prikazan je na slici 50.



Slika 50. Izgled predmeta i strugotine nakon izrade klasičnog žljeba

Prilikom rezanja je ostvarivana prosečna brzina rezanja oko 20 mm/sec, što se može izračunati na osnovu dijagrama prikazanog na slici 51.

Kvalitet obrađene površine je meren pomoću posebno realizovanog uređaja kojim je mereno odstupanje od željenog profila a prikazan je na slici 37. Ovim uređajem nije moguće meriti hrapavost već drugu karakteristiku – valovitost, kako je definisano u [62]. Rezultat ovog merenja je prikazan na slici 38.

Za svaki eksperiment je merena potrošnja VPP korišćenjem uređaja Air Box prikazanog na slici 34.

U poglavlju 4.2.1. prikazane su karakteristike proporcionalnog upravljanja u procesu rezanja a u poglavlju 4.2.2. iste te karakteristike realizovane sa PWM upravljanjem, za vrste materijala, širinu noža i oblik profila žljeba prikazanih u tabeli 9.

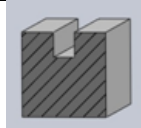
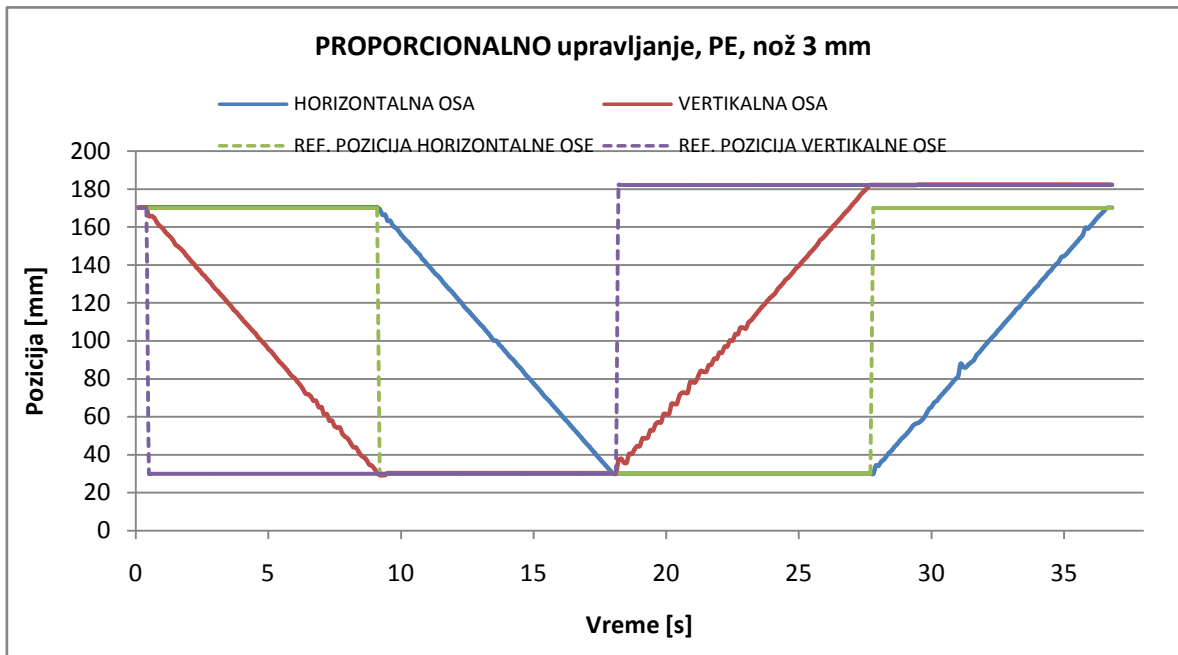
Materijal	Širina noža	Oblik profila
PE, PP, PA	3 mm	

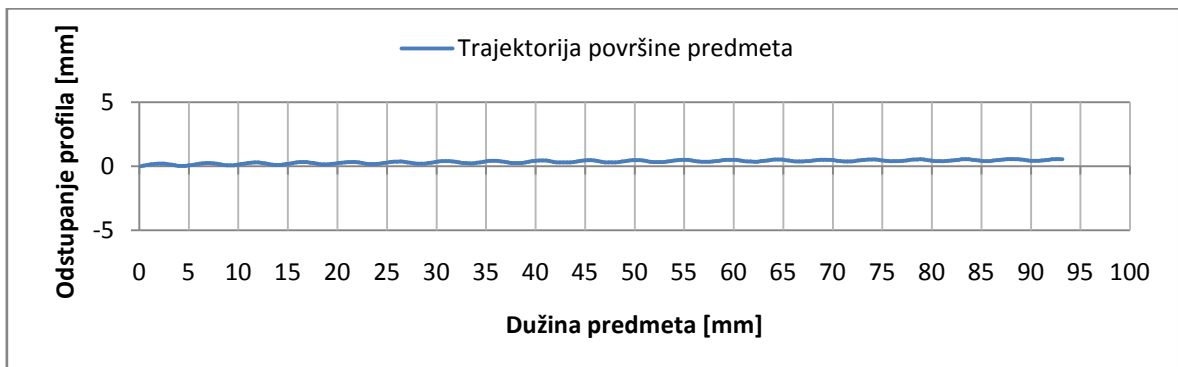
Tabela 9. Vrsta materijala, širina noža i oblik profila žljeba

4.2.1 Karakteristike proporcionalnog upravljanja u procesu rezanja

U slučaju proporcionalnog upravljanja, karakter ponašanja sistema je relativno jednostavan. Samo pozicioniranje klipa cilindra se postiže dosta brzo i sa velikom preciznošću. Na slici 51 može da se vidi kvalitet praćenja trajektorije dobijen uzimanjem podataka sa mernih letvi postavljenih na oba cilindra.

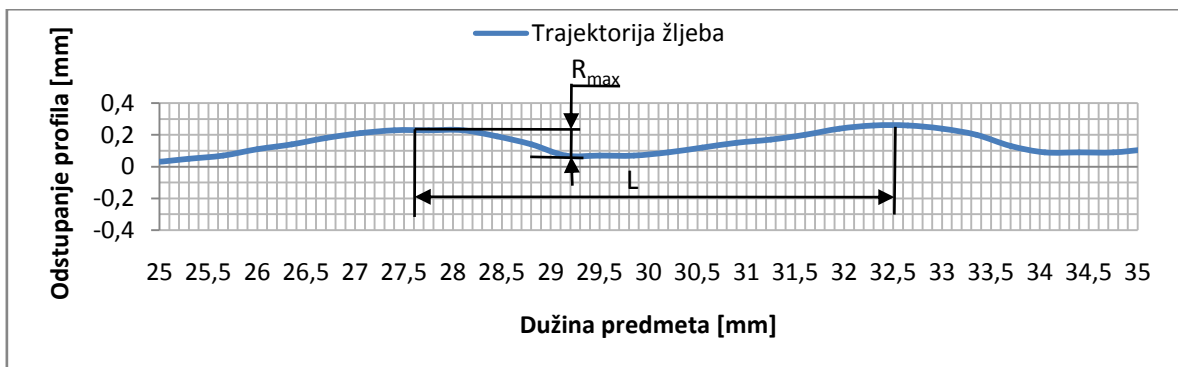


Slika 51. Praćenje referentnih trajektorija proporcionalnim upravljanjem dvoosnim manipulatorom, širina noža 3 mm, materijal PE



Slika 52. Kvalitet obrađene površine (valovitost) - proporcionalno upravljanje, širina noža 3 mm, materijal PE

Na slici 53 se jasno uočava valovitost žljeba nakon obrade rezanjem.



Slika 53. Uvećani prikaz segmenta sa slike 52

Za proračun valovitosti prema definiciji je neophodno odrediti visinu bregova i udubljenja kao i razmak između dva susedna brega. U ovom primeru tražene vrednosti su:

$L = 5$ i $R_{max} = 0,18$ odakle sledi da valovitost iznosi $W = 27,78$.

Kako je valovitost definisana kao odnos između koraka bregova i njihove visine veći od 40 prema 1 može se uočiti da to nije, u potpunosti, slučaj koji je ovde dobijen. Naime, ovde je dobijen odnos od oko 28 prema 1 što treba da bude predmet daljih istraživanja i definisanja u oblasti tehnologije rezanja.



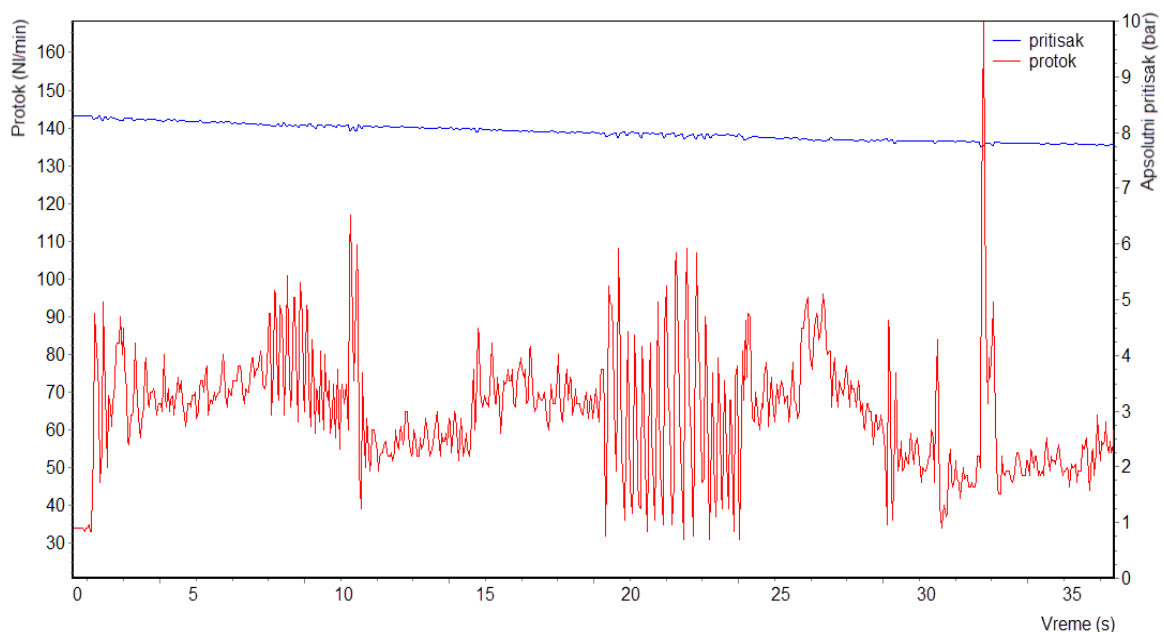
a) Obradak



b) Strugotina

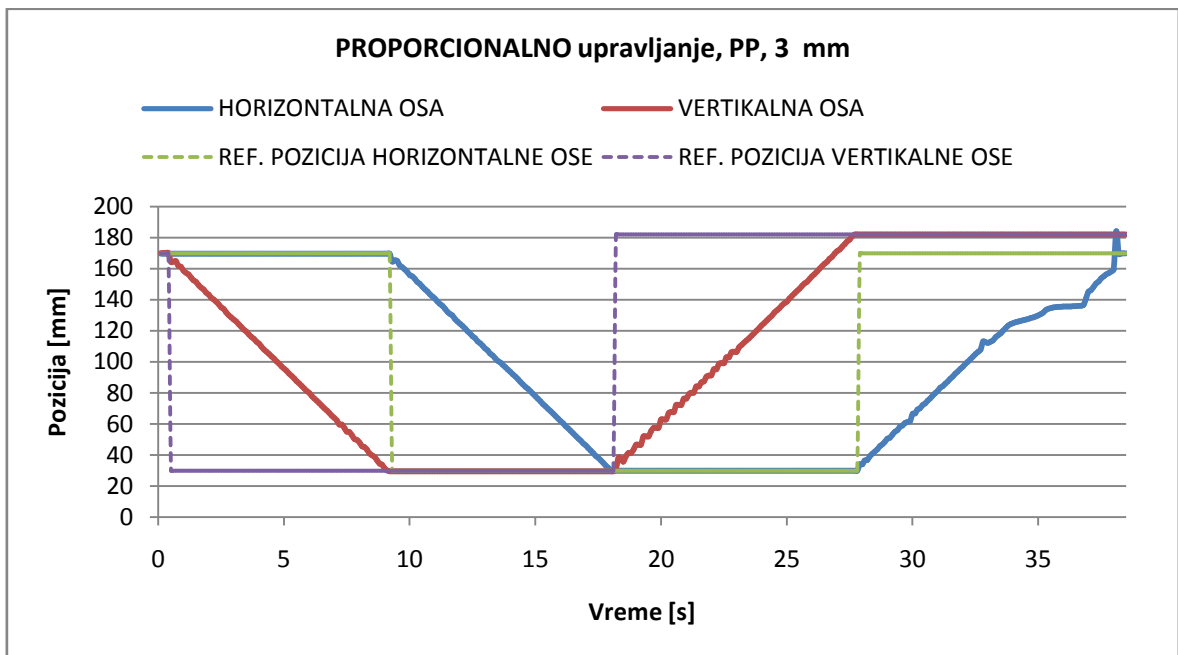
Slika 54. Izgled obradka napravljenog od PE i strugotine posle eksperimentalne obrade rendisanjem, proporcionalno upravljanje, nož širine 3 mm: a) obradak; b) strugotina;

Potrošnja vazduha pod pritiskom za ovo upravljanje je značajno velika i kontinualne je prirode, zbog samih odlika proporcionalnog razvodnika. Na slici 55 je prikazan dijagram potrošnje vazduha pod pritiskom.

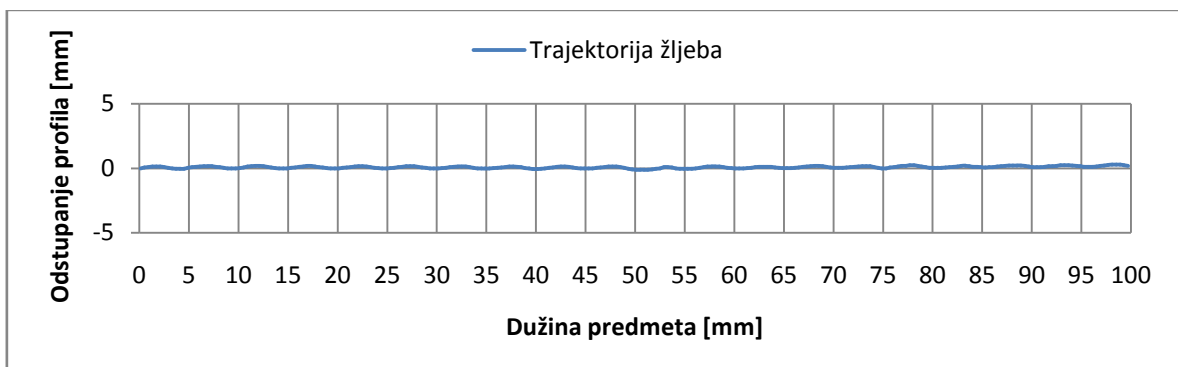


Slika 55. Potrošnja vazduha pod pritiskom za jedan ciklus \square 35 s, proporcionalno upravljanje, širina noža 3 mm, materijal PE

Na osnovu trenutnih vrednosti protoka izračunata je potrošnja VPP pri proporcionalnom upravljanju i ona iznosi 34,69 Nl/ciklusu odnosno prosečna potrošnja VPP je 59,47 Nl/min.



Slika 56. Praćenje referentnih trajektorija proporcionalnim upravljanjem dvoosnim manipulatorom, širina noža 3 mm, materijal PP



Slika 57. Kvalitet obrađene površine (valovitost) - proporcionalno upravljanje, širina noža 3 mm, materijal PP

Valovitost obrađene površine za materijal PP, nakon procesa rezanja korišćenjem noža širine 3 mm iznosi $W = \frac{6}{0,25} = 24$.

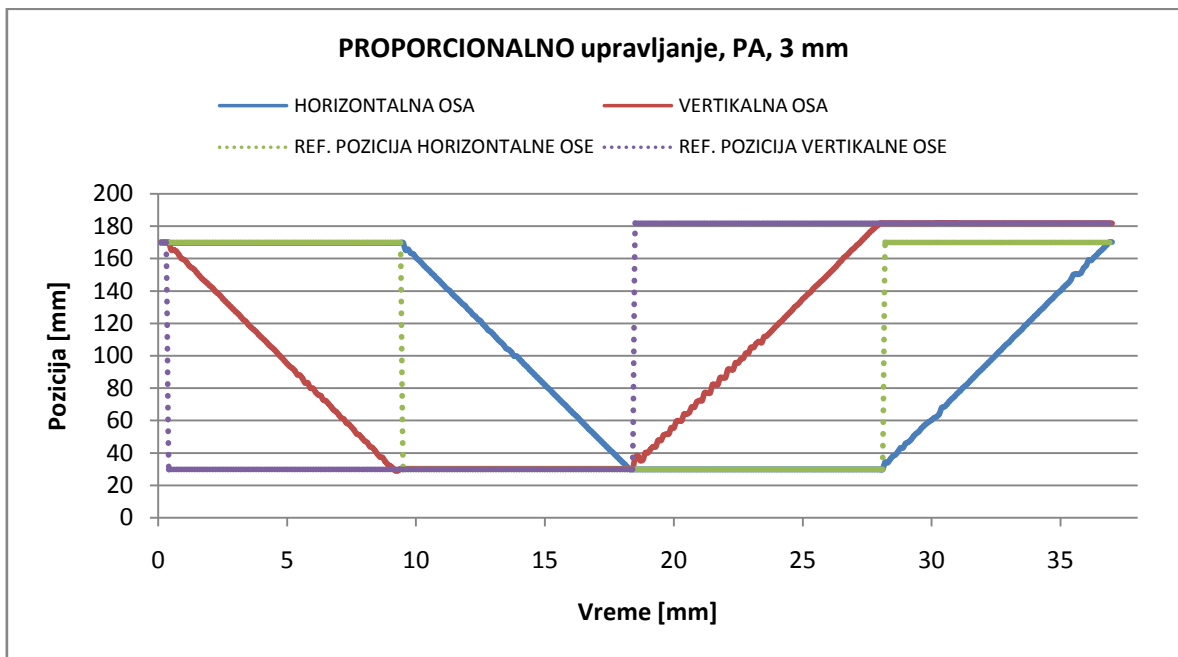


a) Obradak

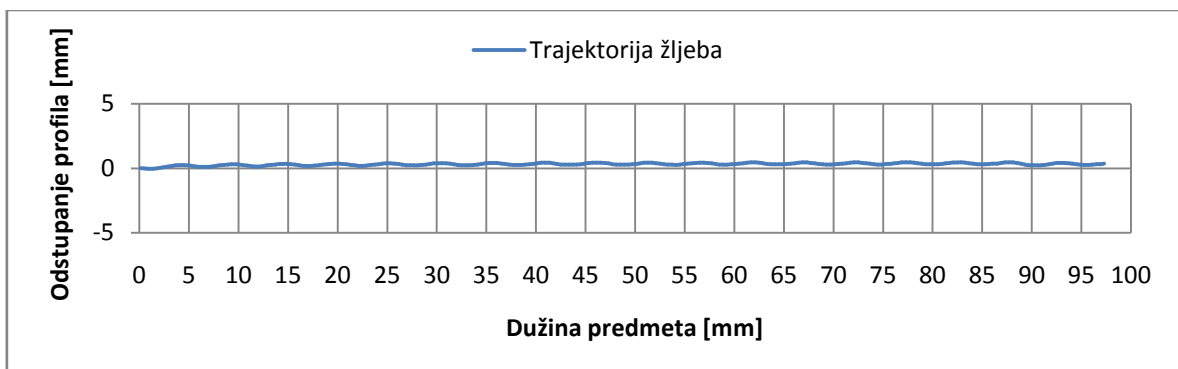


b) Strugotina

Slika 58. Izgled obratka napravljenog od PP i strugotina posle eksperimentalne obrade rendisanjem, proporcionalno upravljanje, nož širine 3 mm: a) obradak; b) strugotina;



Slika 59. Praćenje referentnih trajektorija proporcionalnim upravljanjem dvoosnim manipulatorom, nož 3 mm, materijal PA



Slika 60. Kvalitet obrađene površine (valovitost)- proporcionalno upravljanje, širina noža 3 mm, materijal PA

Valovitost obrađene površine za materijal PA, nakon procesa rezanja korišćenjem noža

širine 3 mm iznosi $W = \frac{5}{0,2} = 25$.



a) Obradak



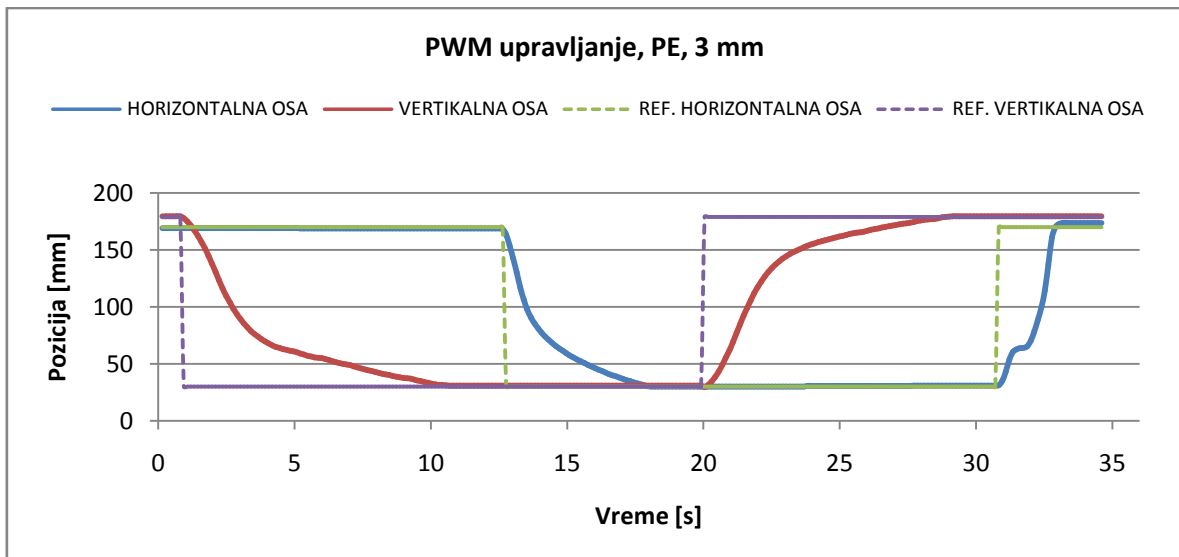
b) Strugotina

Slika 61. Izgled obratka napravljenog od PA i strugotina posle eksperimentalne obrade rendisanjem, proporcionalno upravljanje, nož širine 3 mm: a) obradak; b) strugotina;

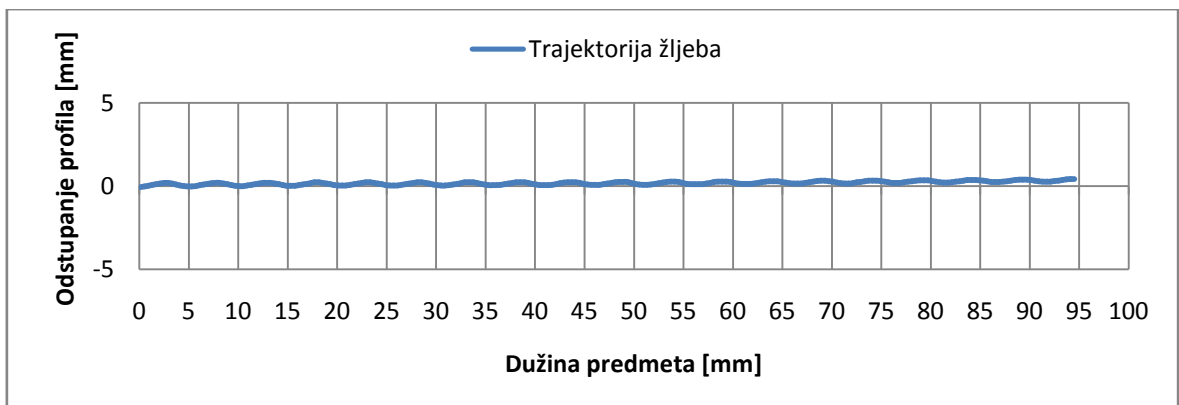
4.2.2 Karakteristike PWM upravljanja u procesu rezanja

U uvodnom delu napomenuto je da je potrošnja VPP naročito velika kod pneumatskih sistema koji koriste proporcionalne ventile za potrebe održavanja pozicije. Razmišljanja iz aspekta energetske efikasnosti bila su usmerena u tom pravcu kako da se poveća energetska efikasnost sistema, a da se pri tome zadrži kvalitetan odziv pri praćenju trajektorije. Predloženo rešenje zahtevalo je korišćenje brzih razvodnika 2/2 koji mogu da rade u PWM režimu.

Sa slike 62 se vidi da je odziv sistema u odnosu na referentni signal veoma dobar. Prilikom dostizanja željenih pozicija potrebno je malo više vremena i ponekad se javi mala greška u stacionarnom stanju, što je i očekivano za P regulator. Vreme smirenja je takođe dosta kratko, u većini slučajeva je trenutno a greška u stacionarnom stanju ne prelazi 2% referentne vrednosti. U procesu rendisanja, kada horizontalni cilindar ostvari kontakt sa predmetom rada, može da se uoči mala oscilacija tj. cilindar pri kontaktu pokušava da savlada otpor predmeta pri rendisanju.



Slika 62. Praćenje referentnih trajektorija PWM upravljanjem dvoosnim manipulatorom, nož 3 mm, materijal PE



Slika 63. Kvalitet obrađene površine (valovitost)– PWM upravljanje, širina noža 3 mm, materijal PE

Valovitost obrađene površine za materijal PE, nakon procesa rezanja korišćenjem noža širine 3 mm iznosi $W = \frac{5,2}{0,22} = 23,64$.

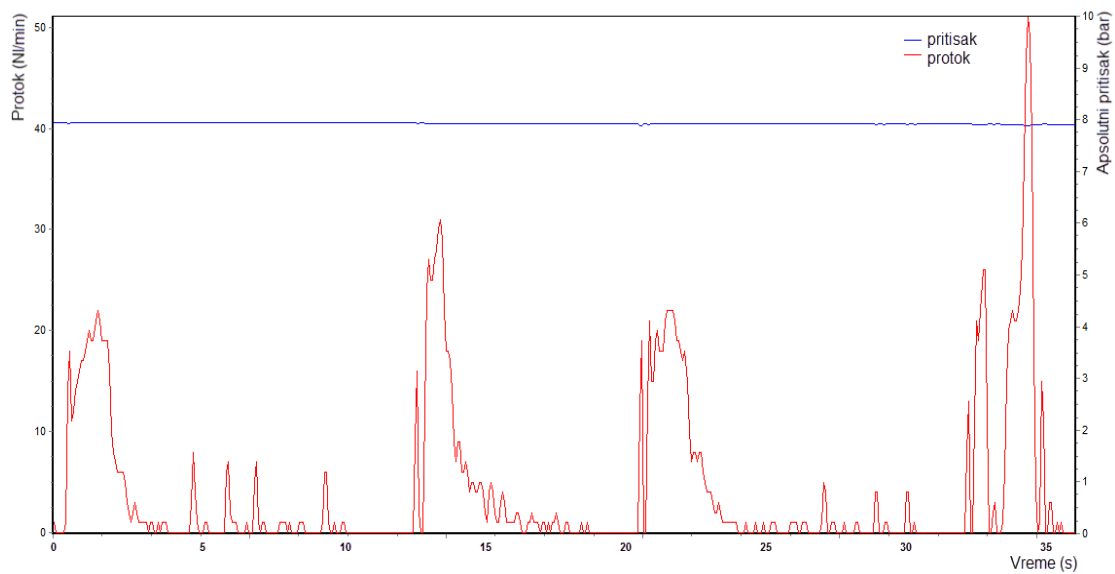


a) Obradak



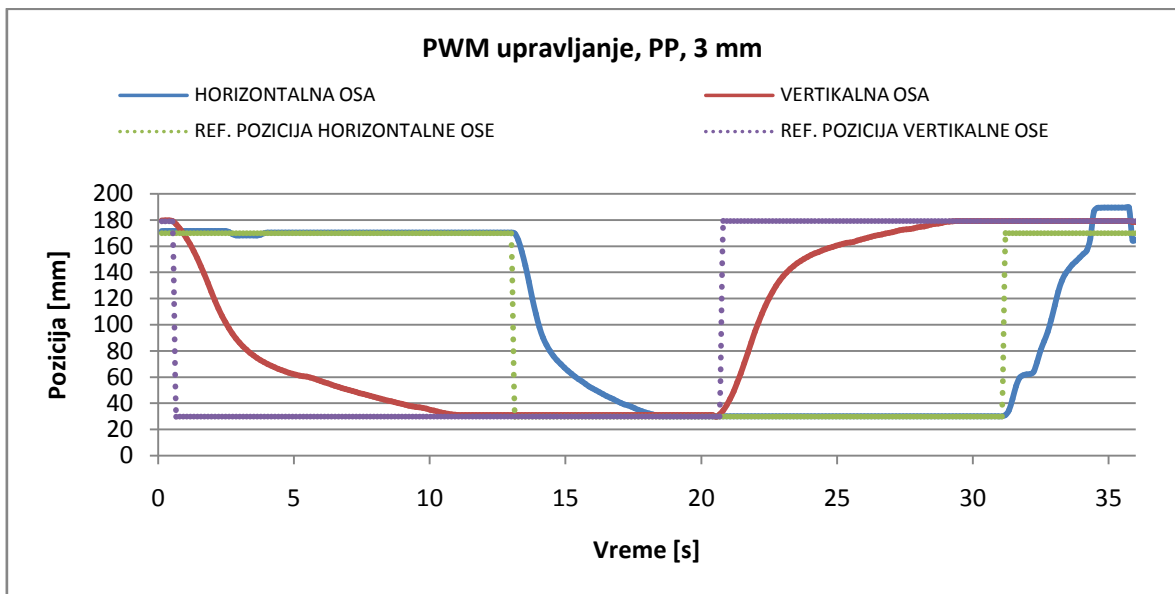
b) Strugotina

Slika 64. Izgled obratka napravljenog od PE i strugotine posle eksperimentalne obrade rendisanjem, PWM upravljanje, nož širine 3 mm: a) obradak; b) strugotina;

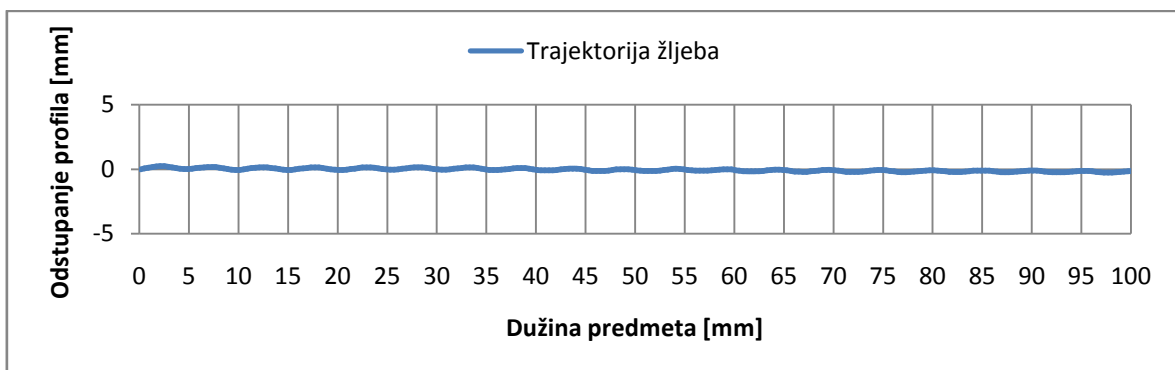


Slika 65. Potrošnja vazduha pod pritiskom za jedan ciklus \square 35 s, PWM upravljanje, širina noža 3 mm, materijal PE

Na osnovu trenutnih vrednosti protoka izračunata je potrošnja VPP pri PWM upravljanju i ona iznosi 1,88 Nl/ciklusu odnosno prosečna potrošnja VPP je 4,54 Nl/min.

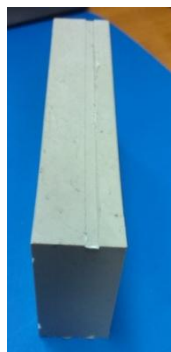


Slika 66. Praćenje referentnih trajektorija PWM upravljanjem dvoosnim manipulatorom, nož 3 mm, materijal PP



Slika 67. Kvalitet obrađene površine (valovitost) – PWM upravljanje, širina noža 3 mm, materijal PP

Valovitost obrađene površine za materijal PP, nakon procesa rezanja korišćenjem noža širine 3 mm iznosi $W = \frac{5}{0,22} = 22,73$.

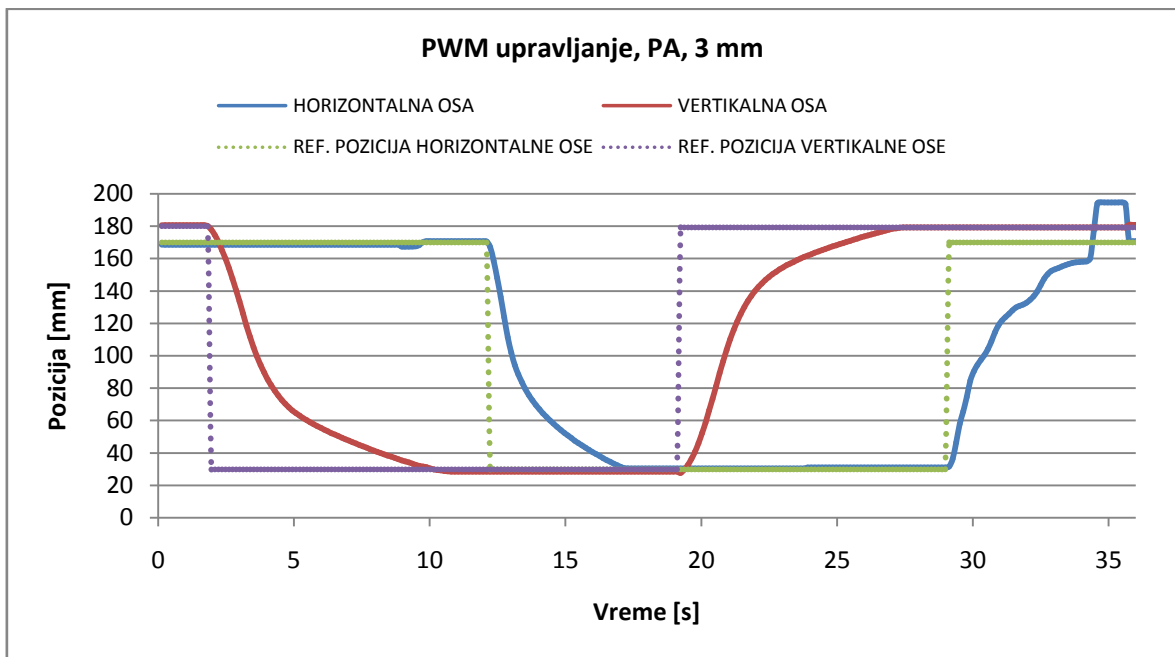


a) Obradak

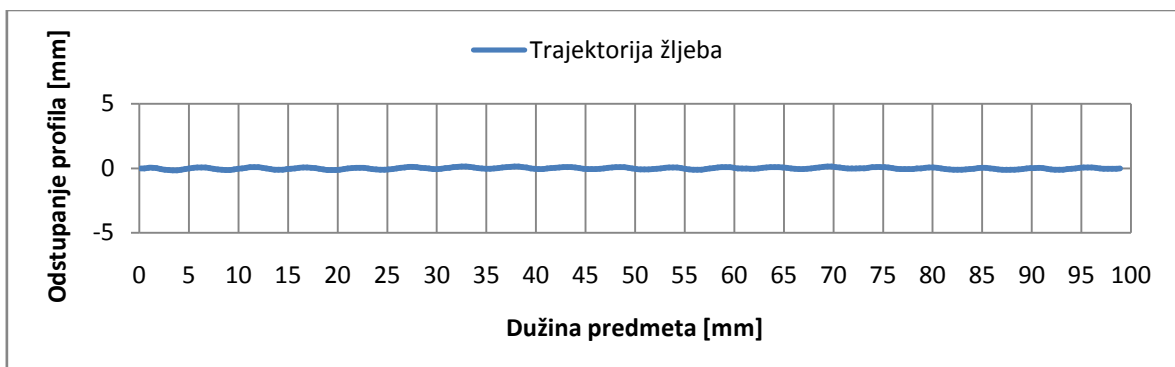


b) Strugotina

Slika 68. Izgled obratka napravljenog od PP i strugotina posle eksperimentalne obrade rendisanjem, PWM upravljanje, nož širine 3 mm: a) obradak, b) strugotina



Slika 69. Praćenje referentnih trajektorija PWM upravljanjem dvoosnim manipulatorom, nož 3 mm, materijal PA



Slika 70. Kvalitet obrađene površine (valovitost) – PWM upravljanje, širina noža 3 mm, materijal PA

Valovitost obrađene površine za materijal PA, nakon procesa rezanja korišćenjem noža širine 3 mm iznosi $W = \frac{5,5}{0,2} = 27,5$.



1. Obradak



a) Strugotina

Slika 71. Izgled obratka napravljenog od PA i strugotina posle eksperimentalne obrade rendisanjem, PWM upravljanje, nož širine 3 mm: a) obradak; b) strugotina;

4.3 Poređenje potrošnje VPP

U ovom poglavlju su, radi lakše preglednosti i izvođenja osnovnih zaključaka, prikazani rezultati koji su dobijeni merenjem potrošnje VPP, tabele 10 i 11.

Posmatrana su dva režima upravljanja: proporcionalno i PWM upravljanje prilikom izvršavanja jednog radnog ciklusa pravljenja žljeba. U obzir su uzete tri različite vrste materijala i jedna širina noža. Takođe su urađeni i eksperimenti za preostale širine noževa i drugih oblika profila žljeba, ali zbog obimnosti studije, rezultati nisu prikazani u ovoj disertaciji.

4.3.1 Proces rezanja žljeba

Nakon izvršenih merenja dobijeni su grafici na osnovu kojih su izračunate vrednosti potrošnje VPP i rezultati se nalaze u narednim tabelama.

Kod proporcionalnog upravljanja potrošnja VPP se nalazi u rasponu od 34,69 □ 36,84 NI/ciklusu, kako je prikazano u tabeli 10.

Kod proporcionalnog upravljanja sistem konstantno troši vazduh pod pritiskom, kako bi održavao klip cilindra u zadatoj poziciji. U tom slučaju, određena količina vazduha iz sistema se ispušta u atmosferu. Tako dolazi do značajnog gubitka VPP.

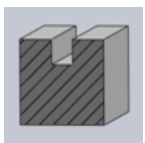
		Potrošnja VPP za proporcionalno upravljanje [NI/ciklusu]		
		Materijal		
		PE	PP	PA
Nož	3mm	34,69	35,37	36,84

Tabela 10. Potrošnja VPP kod proporcionalnog upravljanja za različite vrste materijala

Kod PWM upravljanja potrošnja VPP se kreće u rasponu od 1,88 □ 2,3 NI/ciklusu, kako je prikazano u tabeli 11.

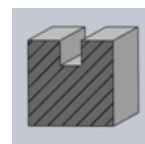
		Potrošnja VPP za PWM upravljanje [NI/ciklusu]		
		Materijal		
		PE	PP	PA
Nož	3mm	1,88	2,01	2,3

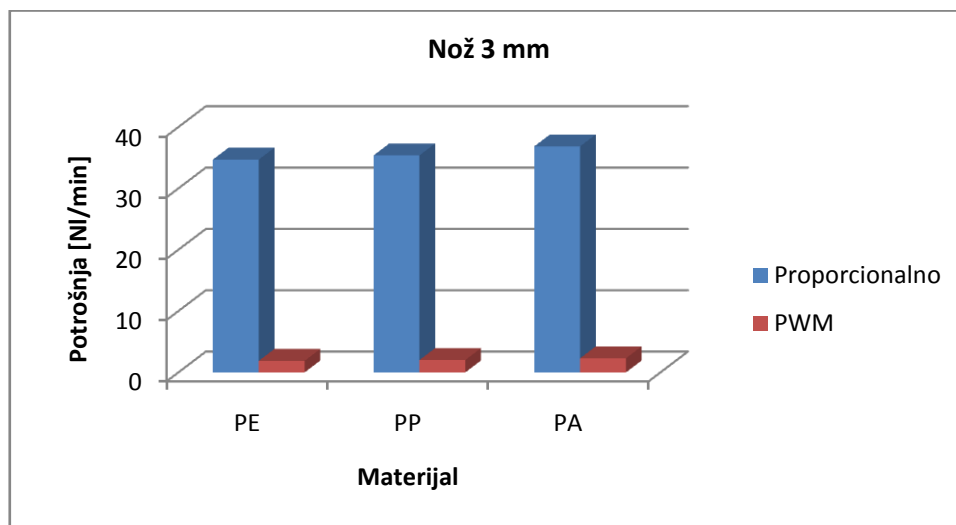
Tabela 11. Potrošnja VPP kod PWM upravljanja za različite vrste materijala

Na osnovu rezultata merenja i jednostavnog proračuna može se uočiti da je potrošnja VPP kod proporcionalnog upravljanja u odnosu na PWM upravljanje približno $15 \div 20$ puta veća.

Na sledećim primerima prikazana je uporedna analiza potrošnje VPP za određene varijante.

Na grafiku prikazanom na slici 72, predstavljeni su rezultati potrošnje VPP proporcionalnog i PWM upravljanja za istu širinu noža i različite vrste materijala.

Predstavljeni su rezultati i izvršena je uporedna analiza potrošnje VPP. Izračunata je potrošnja VPP kod pneumatskog sistema sa PWM upravljanjem i poređena je sa potrošnjom VPP kod sistema sa proporcionalnim upravljanjem.



Slika 72. Grafički prikaz rezultata za isti nož i različite vrste materijala

4.3.2 Kvalitet praćenja trajektorije

Proporcionalnim upravljanjem se tačnije i brže ostvaruje pozicioniranje u zadatu tačku. Izgled trajektorije pri dostizanju željene pozicije kod proporcionalnog upravljanja je linearnog tipa dok kod PWM upravljanja ima izgled krive, zbog dejstva proporcionalnog faktora regulacije.

Naime, kvalitetno realizovano proporcionalno upravljanje, kakvo je ovde korišćeno, ima već ugrađene funkcije održavanja željene brzine kretanja. U realizaciji PWM upravljanja to se, u ovim ispitivanjima, nije tražilo. To se može videti i na dijagramima željenih trajektorija za oba upravljanja (slika 51 kao primer za proporcionalno upravljanje i slika 62 kao primer za PWM upravljanje). U narednim ispitivanjima će se realizovati PWM upravljanje sa ovakvim karakteristikama što će, verovatno, još podići kvalitet ovakvog upravljanja.

Praćenje trajektorije kod PWM upravljanja je bolje kada se ne zahtevaju velike brzine. Kod većih brzina se javljaju veće greške, preskok prilikom dostizanja željene pozicije i tada treba više vremena razvodnicima da odreaguju i dovedu klip cilindra u stacionarno stanje tj. željenu poziciju. Treba uzeti u obzir i unutrašnji otpor, koji se javlja kod cilindara

prilikom kretanja, koji takođe ima bitnu ulogu, kao i relativno veliki protok koji ostvaruju tipovi cilindara koji se koriste u ovoj eksperimentalnoj stanici.

Na ovim primerima je pokazano da se korišćenjem proporcionalnog upravljanja postiže tačnije pozicioniranje u odnosu na PWM upravljanje, ali se, pored toga, treba osvrnuti i na cenu, brzinu i kvalitet obrađene površine predmeta rada.

Preporuke za poboljšanje su:

- usavršiti PWM upravljanje tako da može da parira proporcionalnom upravljanju pri većim brzinama,
- korišćenjem senzora pritiska meriti silu kod obe vrste upravljanja i upoređivati ih pri istim uslovima.

Prednosti proporcionalnog upravljanja su što je ceo sistem modularnog tipa. Može da se kao aktuator koristi i cilindar sa klipnjačom a da se pri tome na veoma jednostavan način izvrši parametrizacija na način koji je prikazan u prilogu ovog rada. Kod PWM upravljanja to bi značilo dorađivanje upravljačkog koda i nova ispitivanja, što zahteva dodatno vreme.

Neki proporcionalni razvodnici u sebi već imaju ugrađen senzor pritiska i softverski, korišćenjem moda za upravljanje po sili, mogu na jednostavan i brz način da implementiraju upravljanje po sili. Kod PWM upravljanja treba ugraditi eksterne senzore pritiska.

4.3.3 Kvalitet obrađene površine

Na slici 52, prikazan je kvalitet obrađene površine u smislu valovitosti za predmet rada napravljen od materijala PE, dobijen ispitivanjem odstupanja obrađene površine od željenog profila površine, nakon rezanja žljeba.

Na slici 52, naročito u desnom delu, se mogu uočiti neravnine koje su posledice nesavršenog upravljanja, podrhtavanja noža kojeg nosi vertikalni cilindar, u toku obrade. Neke od posledica će se ispitivati u daljim istraživanjima, kao što su nepreciznost i rezolucija samog mernog aparata za merenje neravnina. Vibracije konstrukcije koje se javljaju tokom rada direktno utiču na kvalitet obrađene površine. Pomenuta podrhtavanja posledica su sila koje se javljaju u toku obrade, kompresibilnosti vazduha pod pritiskom i težnje upravljačkog sistema da održi klip cilindra u zadatoj poziciji. Amplituda ovih neravnina ide do 0,25 mm dok u proseku iznosi približno 0,15 mm. Ovo su značajne vrednosti odstupanja uzevši u obzir zadatu dubinu žljeba od 0,3 mm. Međutim, svrha ovih ispitivanja je da se započnu istraživanja u ovoj oblasti i da se da dobra osnova za dalji rad. Sa nekim drugim manipulatorom, koji može da ostvari veće sile a time i veće dubine rezanja ovo odstupanje bi imalo značajno manji uticaj. Može se takođe primetiti, u nekim slučajevima (na primer na slici 52), jako mala rastuća (uzlazna) putanja obrađene površine koja je posledica nesavršenog stezanja predmeta rada. Razlika između početne i krajnje dubine žljeba iznosi približno 0,1 mm. Pomenuto predstavlja manu sistema ali se ona može otkloniti razvojem odgovarajućeg steznog pribora.

Takođe, na slici 51, u \approx 32 sekundi ciklusa, vidi se određeno odstupanje od linearne putanje trajektorije horizontalnog cilindra. Analogno toj greški, prilikom praćenja trajektorije, na slici 52, na rastojanju \approx 27 mm od trenutka prodiranja alata u materijal može da se uoči da je uređaj za merenje neravnina detektovao udubljenje što se vidi i na slici 73.



Slika 73. Uvećani prikaz udubljenja u predmetu rada nastalog procesom rezanja

Za razliku od proporcionalnog upravljanja, kod PWM upravljanja amplituda za isti materijal i nož iznosi približno 0,2 mm, kao i njen prosek, dok razlika između početne i krajnje dubine žljeba iznosi 0,2 mm.

Predlog za poboljšanje bi bio sledeci:

- razviti profesionalni koordinantni sto a pre toga predmete rada obraditi i dovesti ih na dovoljnu paralelnost sa podlogom kako bi tačno mogle da se ispituju sile i da se ispita potrošnja VPP pri pravljenju žljeba iste dubine, od ulaza alata u materijal do izlaza alata iz materijala,
- postojeći uređaj za merenje kvaliteta obrađene površine zameniti sa uređajem veće rezolucije, koji može da meri odstupanja veličine μm .

4.3.4 Tehno ekonomska analiza

Treba uzeti u obzir činjenicu da je VPP skup izvor energije, na primer, na pukotini prečnika 3 mm pri pritisku od 6 bar izgubi se na godišnjem nivou oko 6500 EUR.

Gledajući na zadatak iz finansijskog aspekta, neophodno je utvrditi koliki je period otplate sistema koji su realizovani u ovoj disertaciji a zasnovani su na različitim vrstama upravljanja, proporcionalnom i PWM upravljanju. Period otplate u velikoj meri zavisi od procenta (%) uštede VPP kao i od vrednosti komponenti pomoću kojih je realizovan sistem.

U ovoj analizi će se uzeti u obzir samo onaj deo opreme za upravljačke sisteme koji je specifičan za pojedine vrste upravljanja dok se zajednička oprema neće razmatrati. Kod proporcionalnog upravljanja sva korišćena oprema je proizvođača FESTO, za razliku od PWM upravljanje gde se za upravljačke potrebe koristio PLK, proizvođača FATEK.

U tabeli 12. su prikazani osnovni podaci za oba upravljačka sistema koji su potrebni za njihovo poređenje.

R.B.		Proporcionalno upravljanje	PWM upravljanje
1.	Kontroler – CPX terminal sa dva modula za upravljanje pneumatskim osama	2000 EUR	-
2.	Kontroler Fatek	-	160 EUR
3.	CASM – interfejs merne letve (2 kom.)	500 EUR	-
4.	Analogni modul za merne letve	-	200 EUR
5.	VPWP – proporcionalni razvodnik za pneumatske ose (2 kom.)	1300 EUR	
6.	Brzi razvodnici 2/2 (8 kom.)	-	640 EUR
		Σ3800EUR	Σ1000EUR

Tabela 12. Cene komponenti ugrađenih za različite vrste upravljanja

Iz tabele 12, uočava se da je cena komponenti koje su potrebne da bi se ostvarilo proporcionalno upravljanje dvoosnim programabilnim manipulatorom skoro četiri puta skuplja u odnosu na cenu komponenti za PWM upravljanje.

Sistem sa proporcionalnim upravljanjem zahteva velika ulaganja u eksterne komponente da bi se ostvarila veća brzina i tačnost koja ide i do stotog dela milimetra. Ukoliko nisu potrebni takvi zahtevi takav sistem se neće isplatiti u kratkom vremenskom intervalu.

PWM upravljanjem je ostvarena zadovoljavajuća tačnost pozicioniranja i ispunjen je zahtev – da se napravi žljeb određenog kvaliteta sa mnogostruko manjom potrošnjom VPP.

Kada se razmatra potrošnja VPP vidi se da ona iznosi, u statičkom režimu rada, dok cilindar miruje, kod proporcionalnog upravljanja 30 l/min , za razliku od PWM upravljanja kod koje nema potrošnje VPP u ovom režimu rada.

Analiza rada sistema u proizvodnim uslovima

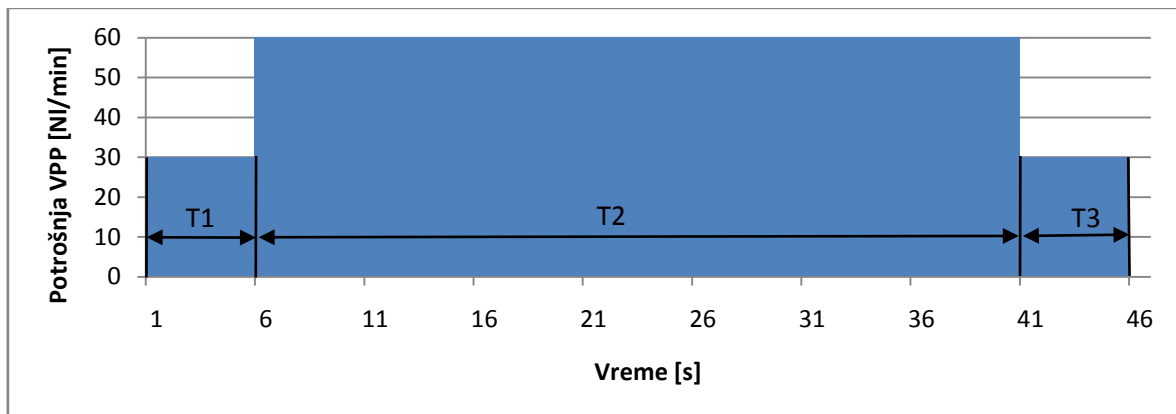
Ako se ovakav sistem integriše zajedno sa industrijskim robotom i pneumatskim kružnim manipulatorom (programabilnim ulazno–izlaznim skladištem) čineći na taj način kompleksnu automatizovanu proizvodnu ćeliju, pomoću koje mogu da se realizuju raznoliki programabilni proizvodni zadaci, mora se uzeti u obzir i način rada takve ćelije kako bi se odredilo vreme ciklusa.

Tako osmišljena kompleksna automatizovana proizvodna ćelija funkcioniše na sledeći način:

1. Programabilno ulazno-izlazno skladište, donosi predmet rada na gornji nivo.
2. Zatim robot, pomoću hvataljke, preuzima predmet rada i prenosi ga do programabilnog pneumatskog manipulatora, radi izrade žljeba.

3. Programabilnim pneumatskim manipulatorom se izvršava rezanje žljeba, polužljeba ili se obara ivica.
4. Nakon toga, robot vraća predmet rada na istu poziciju odakle ga je uzeo i završava se sa radnim ciklusom kompleksne robotizovane ćelije.

Na slici 74. je predstavljen ciklus potrošnje VPP za programabilni pneumatski manipulator koji radi u kompleksnoj automatizovanoj proizvodnoj ćeliji i koristi proporcionalno upravljanje.



Slika 74. Potrošnja VPP programabilnog pneumatskog manipulatora u kompleksnoj automatizovanoj proizvodnoj ćeliji korišćenjem proporcionalnog upravljanja

Oznake sa slike 74 su:

1. T1 - vreme potrebno da robot prenese predmet rada sa kružnog manipulatora do dvoosnog manipulatora,
2. T2 - vreme potrebno da dvoosni programabilni manipulator izradi žleb u predmetu rada i
3. T3 - vreme potrebno da robot vrati predmet rada do kružnog manipulatora.

Navedena vremena su približne vrednosti. U ovom slučaju su posmatrane vrednosti dobijene na osnovu eksperimentalnih ispitivanja primene programabilnog manipulatora u navedenom načinu rada. Za potrebe ove analize, kao realno izvodljiva, uzeta su sledeća vremena:

1. $T1 = 5$ s,
2. $T2 = 35$ s i
3. $T3 = 5$ s.

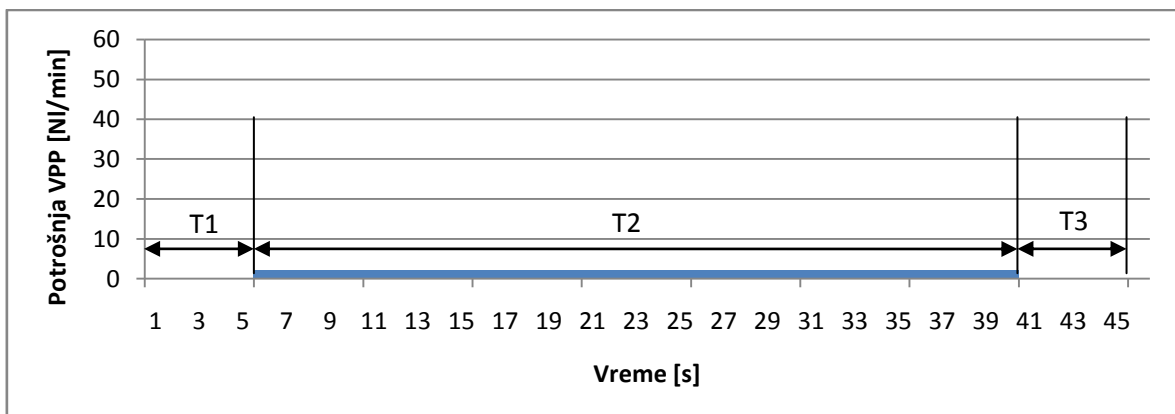
Na taj način je određeno vreme ciklusa od 45 s.

U statičkom režimu rada, za vreme dok manipulator ne obavlja zadatak rendisanja, korišćenjem proporcionalne tehnologije za upravljanje potrošnja VPP je 30 NI/min i to se dešava u periodu T1. Za to vreme robot prenosi predmet rada sa programabilnog ulazno–izlaznog skladišta do programabilnog pneumatskog manipulatora. Nakon toga, za pretpostavljeno vreme obrade materijala od 35 s (T2), manipulator troši u proseku oko 60

Nl/min. Kada se završi proces obrade, robot vraća predmet rada u sistem kretanja programabilnog ulazno-izlaznog skladišta (T3). U toku tog vremena programabilni manipulator se opet nalazi u statičkom režimu rada, sa potrošnjom od 30 Nl/min.

Ako se pretpostavi da je programabilni manipulator u startu bio opremljen sa proporcionalnim upravljanjem i da se to upravljanje može upotrebiti na nekoj drugoj mašini gde je potrebno značajno brže i/ili preciznije realizovanje kretanja onda se zamenom proporcionalnog upravljanja sa PWM upravljanjem ostvaruju sledeće dobiti:

1. Umesto kupovine novog proporcionalnog upravljanja za drugu mašinu kupuju se potrebne komponente za PWM upravljanje a proporcionalno upravljanje sa ovog manipulatora se koristi na drugoj mašini. Time se investicija smanjuje za $(3800 - 1000) = 2800$ EUR.
2. Tokom rada ostvaruju se uštede u potrošnji VPP prikazane u tabeli 13, a računane na osnovu vremena prikazanih na slici 74 i slici 75. Kako se u pretpostavljenoj proizvodnji nalazi miks proizvoda od ispitivanih materijala, za analizu su uzete uprosečene vrednosti potrošnje za oba upravljanja i to sa sledećim iznosima: za PWM upravljanje: 2 Nl/ciklusu i za proporcionalno upravljanje 40 Nl/ciklusu.



Slika 75. Potrošnja VPP programabilnog pneumatskog manipulatora u kompleksnoj automatizovanoj proizvodnoj ćeliji korišćenjem PWM upravljanja

Korišćenjem PWM upravljanja u statičkom režimu rada ne postoji potrošnja VPP, dok je potrošnja VPP u procesu obrade predmeta rada oko 2 Nl/min, što može da se vidi na slici 75.

Analizom potrošnje VPP može se uočiti da je, ukoliko se želi povisiti energetska efikasnost kod primene proporcionalnog upravljanja, potrebno za vreme statičkog rada programabilnog manipulatora, u periodima T1 i T3 isključiti dovod VPP. Na taj način bi se značajno povisio nivo energetske efikasnosti datog upravljanja.

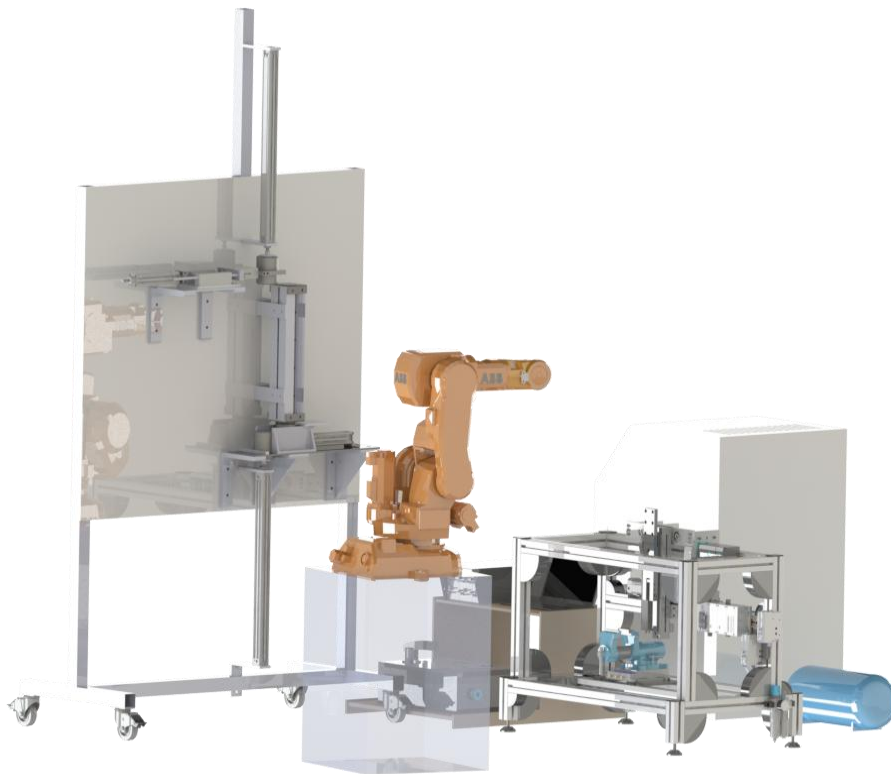
<i>Primer:</i>	<i>PWM upravljanje</i>	<i>Proporcionalno upravljanje</i>
prosečna cena 1m ³ vazduha pod pritiskom	0,020 €	0,020 €
pritisak u sistemu	6 bar	6 bar
proračun potrošnje VPP u jednom ciklusu	$(5/60)*0 + (35/60)*3,43 + (5/60)*0$	$(5/60)*30 + (35/60)*60 + (5/60)*30$
potrošnja VPP u jednom ciklusu	2 Nl/cikl.	40 Nl/cikl.
ukupno smanjenje potrošnje	95 %	-
broj radnih ciklusa u minuti	1,33 cikl./min	1,33 cikl./min
godišnji efektivni kapacitet	180.000 min	180.000 min
broj ciklusa godišnje	240.000 cikl/god	240.000 cikl/god
ukupna godišnja potrošnja VPP	$240.000 * 2 = 480.000 \text{ Nl} = 480 \text{ Nm}^3/\text{god}$	$240.000 * 40 = 9.600.000 \text{ Nl} = 9.600 \text{ Nm}^3/\text{god}$
vrednost potrošenog VPP na godišnjem nivou	9,6 €/god	192 €/god
ušteda	182,4 €/god	-

Tabela 13. Uštede u potrošnji VPP sa primenom PWM upravljanja

5. Pravci daljeg istraživanja

Daljim radom treba da se omogući implementiranje programabilnog pneumatskog manipulatora u kompleksnu automatizovanu proizvodnu ćeliju (Complex Automated Production Cell – C-APC) koja treba da omogući, između ostalih istraživačkih zahvata, dinamičku analizu i sintezu različitih upravljačkih zakona.

Kompleksna automatizovana proizvodna ćelija, slika 76, je zamišljena tako da se pomoću nje mogu demonstrirati različite napredne tehnologije a da se pri tome vodi računa o važnim pitanjima ukupnih karakteristika sistema [76, 77]. Izazov je omogućiti da se njenim radom može upravljati sa daljine koristeći odgovarajući softverski interfejs. Udaljenom korisniku je, na taj način omogućeno da, može da prati rad cele ćelije ili nekog podsistema koristeći odgovarajući interfejs i integrisanu veb kameru. Kako bi se koristila u eksperimentalne svrhe, robotizovana automatizovana proizvodna ćelija treba da ima i odgovarajuće merne uređaje koje je neophodno ugraditi radi merenja potrošnje električne energije i vazduha pod pritiskom, pritiska u sistemu kao i vremena potrebnog za izvršavanje konkretnih zadataka.



Slika 76. Komponente kompleksne automatizovane proizvodne ćelije

Kompleksna automatizovana proizvodna ćelija se sastoji od tri zasebna podsistema a to su programabilno ulazno–izlazno skladište, programabilni manipulator za realizaciju rendisanja i robot. Svi podsistemi se mogu upravljati nezavisno, a zajedno mogu da funkcionišu kao integrisani sistem. Ova struktura je izabrana namerno, kako bi mogli da se uporede uticaji odvojenih tehnika optimizacije i poredi njihov međusobni uticaj na nivou ukupnih performansi sistema. Podsistemi, kao što je prikazano na slici 76, su standardni, električni pogon robota sa dodatnom opremom (hvataljke, alati, radna klupa, itd.), programabilno ulazno-izlazno skladište koje barata sa predmetima rada veće težine u cikličnom kretanju i programabilni pneumatski manipulator koji se sastoji od dve, ili više osa, koji je namenjen za realizaciju kontaktnih zadataka.

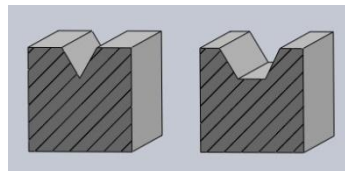
Programabilno ulazno-izlazno skladište

Ovaj uređaj treba da posluži kao osnova za ispitivanje energetske efikasnosti korišćenjem različitih pneumatskih upravljačkih sistema. Na ovaj način mogu da se ispitaju problemi koji se često javljaju u realnim situacijama. Prednost korišćenja ovakvog postrojenja je da je moguće izvršiti komparativnu analizu performansi. U ovom slučaju, različite upravljačke arhitekture pneumatskih sistema namenjene povišenju energetske efikasnosti se primenjuju na istom zadatku, a rezultati merenja mogu se međusobno porediti.

Programabilni pneumatski manipulator

Programabilni pneumatski manipulator je već detaljno opisan u ovom radu a pravci daljeg istraživanja bi bili:

- ispitivanje nestandardnih oblika žljebova,



- projektovanje, izrada i ispitivanje posebnih noževa za izradu nestandardnih žljebova
- implementiranje treće, programabilne, pneumatske ose, kojom će se omogućiti realizacija programabilnog rendisanja cele površine predmeta rada,
- mogućnost automatizovanog menjanja noževa različitih dimenzija pri obradi rezanja,
- upravljanje po sili, pri čemu je neophodno koristiti senzore sile smeštene na predmetu rada ili na alatu kojeg nosi pneumatska osa,
- mogućnost povećanja sile, korišćenjem pneumatskog bustera kako bi moglo da se omogući obrađivanje materijala veće tvrdoće,
- smanjivanje vibracija na samoj konstrukciji, na takav način da se obezbedi još veća krutost između sastavnih elemenata konstrukcije,
- razvoj odgovarajućeg steznog pribora za predmet obrade.

6. Zaključak

U ovoj disertaciji je dokazano da je moguće primeniti programabilne pneumatske manipulatore za realizaciju procesa rezanja i to na konkretnim primerima rezanja žljeba, polužljeba i obaranja ivica.

Realizovan je potpuno nov i jedinstven hardverski deo sistema, koji je kroz odgovarajuće opise i ilustracije detaljno objašnjen.

Prvi put je realizovano PWM upravljanje spregnutim kretanjem dva pneumatska aktuatora u procesu rezanja materijala, korišćenjem standardnog, komercijalno dostupnog, PLK. Na taj način, PWM upravljanje se približava realnoj industrijskoj primeni. Pokazano je da se PLK, sa svojim prednostima lakog rukovanja, robusnošću i pouzdanošću rada u industrijskim uslovima, može primeniti za realizaciju PWM upravljanja u kontaktnim zadacima i implementaciju različitih regulatora. Kvalitet upravljanja ostvaren sa takvim upravljanjem, pri ispitivanim uslovima, ne zaostaje za kvalitetom ostvarenim sa vrhunskim, komercijalno dostupnim, sistemom proporcionalnog upravljanja.

Takođe je dokazano da se primenom PWM upravljanja za spregnuto kretanje dva pneumatska aktuatora u procesima rendisanja žljeba višestruko smanjuje potrošnja VPP. Prosečna potrošnja VPP sa standardnim proporcionalnim upravljanjem iznosi 35 Nl po ciklusu rezanja dok za PWM upravljanje prosečna potrošnja iznosi samo 2 Nl po ciklusu rezanja. Ako se uzmu u obzir i uslovi rada u okviru kompleksne automatizovane proizvodne ćelije, prosečna potrošnja se po jednom ciklusu rada još više razlikuje u korist PWM upravljanja. U tom slučaju, potrošnja VPP kod PWM upravljanja se ne menja, ostaje i dalje 2 Nl za jedan ciklus dok se pri radu sa proporcionalnim upravljanjem potrošnja povećava na 40 Nl za jedan ciklus što znači da je potrošnja kod PWM upravljanja smanjena za čak 95%. Razlog tome je što proporcionalno upravljanje troši VPP i u periodima kada se ne vrši rezanje (periodi kada se donosi i odnosi predmet rada) dok to nije slučaj sa PWM upravljanjem.

Za realizaciju je korišćena industrijska oprema, a prikupljeni podaci su dobijeni na eksperimentalan način. Uporednim analizama dobijenih rezultata iskazane su prednosti i mane korišćenih pneumatskih upravljačkih konfiguracija.

Iskustva razvoja programabilnog pneumatskog manipulatora mogu uspešno da se iskoriste u programabilnoj automatizaciji postupaka mašinske obrade kao što su obaranje ivica, poliranje, udubljivanje žljebova itd. Izvršena su ispitivanja gde je praćena trajektorija pri prodiranju noža za rendisanje u različite vrste materijala. Ispitivani su materijali od polietana, polipropilena i poliamida.

Takođe su određeni parametri kvaliteta obrađenih površina. Ustanovljeno je da se, pri ispitivanim brzinama rezanja (do 20 mm/sec), postiže približno isti kvalitet obrade sa oba ispitivana upravljanja. Za ispitivanje kvaliteta obrađene površine u smislu valovitosti razvijen je poseban uređaj kojim je izvršeno ispitivanje svih realizovanih žljebova.

U laboratorijskim uslovima, za upravljanje pneumatskim aktuatorima i ispitivanje algoritama upravljanja koriste se uglavnom PC računari sa sistemima za akviziciju podataka. U realnom industrijskom okruženju prednost imaju i široko se primenjuju programabilni logički kontroleri. Zbog toga je, kao upravljački organ za realizaciju PWM upravljanja, u ovoj disertaciji korišćen standardni, komercijalno dostupni, PLK. Različite realizacije upravljanja ostvarene su promenom kontrolera i odgovarajućih razvodnika koji se koriste za tu vrstu upravljanja, promenom programa koji je implementiran na PLK-u. Pomoću različitih realizacija upravljanja vršeno je praćenje referentnog signala trajektorije, a kvalitet upravljanja je ispitivan tako što je računato odstupanje od željene trajektorije a takođe je merena i potrošnja vazduha pod pritiskom.

U disertaciji je pokazano da je PWM upravljanje samo po sebi energetski efikasno, a da se efikasnost dodatno može povećati primenom i drugih metoda koje se primenjuju i kod upravljanja proporcionalnom tehnikom.

Ukupni rezultati pokazuju da brzi on/off elektromagnetni razvodnici upravljani širinskom modulacijom impulsa (PWM upravljanje), mogu biti uspešno upotrebljeni za upravljanje pozicijom pneumatskog aktuatora u realizaciji kontaktnih zadataka. Pri tome je moguće ostvariti performanse upravljanja koje su slične onima koje se ostvaruju upotrebom proporcionalnog razvodnika ali po znatno nižoj ceni.

U toku izrade disertacije primenjena je moderna eksperimentalna tehnika zasnovana na akviziciji podataka i upravljanju pomoću računara.

Metodologija istraživanja dominantna u radu je model - eksperiment, što daje pouzdanost dobijenim rezultatima i otvara put primenljivosti u praksi.

Na kraju, u kompaktnoj formi, u vidu grafičkih prikaza prezentovani su eksperimentalno dobijeni podaci i izvršena je detaljna analiza istih. Rezultat svega uloženog predstavljaju nova znanja koja pružaju osnovu za dalja moguća istraživanja u ovoj oblasti.

U daljem radu se može ovaj sistem proširiti na trodimenzionalni slučaj, gde se takođe mogu uzeti u obzir i druge vrste alata i materijala i pokušati da se napravi žljeb sa različitim reljefnim profilima kao i žljebovi nestandardnih oblika profila.

Ovaj rad može poslužiti kao dobar početak mnogima koji žele da više saznaju i da se upoznaju sa sličnom problematikom, ali i kao osnova za dalji rad na razvoju i poboljšanju kako same eksperimentalne stanice tako i kompleksne automatizovane proizvodne ćelije.

7. Literatura

- [1] Šešlija D., Ignjatović I., Dudić S., Lagod B., Potential energy savings in compressed air systems in Serbia, *African Journal of Business Management*, 2011, Vol. 5, No 14, pp. 5637 - 5645
- [2] Hazem, I. A., Mohd Noor, S. B. B., Bashi, S. M., Marhaban, M. H., (2009), A Review of Pneumatic Actuators (Modeling and Control), *Australian Journal of Basic and Applied Sciences*, 3(2), ISSN 1991-8178, pp 440-454.
- [3] Šešlija, D., Milenković, I., Dudić, S., Šulc, J., (2016). Improving Energy Efficiency in Compressed Air Systems – Practical Experiences. *Thermal Science*, January 2016, ISSN 0354-9836
- [4] Chen Y., Dong F., Robot machining: recent development and future research issues, *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 66 (9-12): 1489 - 1497. doi:10.1007/s00170-012-4433-4,2013.
- [5] Kunieda M, Nakagawa T (1985) Robot-polishing of curved surface with magneto-pressed tool and magnetic force sensor. *Twenty-Fifth International Machine Tool Design and Research Conference*; Birmingham; UK; 22–24 Apr. 1985. pp. 193 – 200.
- [6] Takeuchi Y, Ge D, Asakawa N (1993) Automated polishing process with a human-like dexterous robot. *Proc. IEEE International conference on robotics and automation*, Atlanta USA, May 1993, pp. 950–956.
- [7] Lin FY, Lu TS (2005) Development of a robot system for complex surfaces polishing based on CL data. *Int J Adv Manuf Technol* 26:1132–1137.
- [8] Whitney DE (1988) Elements of an intelligent robot grinding system. *Proceedings of the Third ERR*. Gouvieux, France, pp 381–387.
- [9] Liu L, Ulrich BJ, Elbestawi J (1990) Robotic grinding force regulation: design, implementation and benefits. *Proc. IEEE International conference on robotics and automation*. Cincinnati, USA, pp 258–265.
- [10] Dai H, Yuen KM, Elbestawi J (1993) Parametric modelling and control of the robotic grinding process. *Int J Adv Manuf Technol* 8 (3):182–192.
- [11] Rena X, Kuhlenkottera B, Muller H (2006) Simulation and verification of belt grinding with industrial robots. *Int J Mach Tool Manuf* 46:708–716.
- [12] Huang H, Gong ZM, Chen XQ, Zhou L (2002) Robotic grinding and polishing for turbine-vane overhaul. *J Mater Process Technol* 127:140 – 145.
- [13] Pires JN, Ramming J, Rauch S, Araujo R (2002) Force/torque sensing applied to industrial robotic deburring. *Sens Rev* 22(3):232–241.

- [14] Šešlija, D., Vukobratović, M., 1998. On The Environment Dynamics Parameters In Robotic Contact Tasks, Part I: Identification Of Forces, Stiffness And Damping In Robotic contact Tasks. *International Journal of Engineering and Automation*, Moscow, No 4, pp. 26-44.
- [15] Šešlija, D., Vukobratović, M., 1999. On The Environment Dynamics Parameters In Robotic Contact Tasks, Part II: Identification Of Forces, Stiffness And Damping In Robotic contact Tasks. *International Journal of Engineering and Automation*, Moscow, Vol. 1, No 1, pp. 20-36.
- [16] Andersen B.W., 1967. *The analysis and design of pneumatic systems*, John Wiley and Sons, 302 p, New York.
- [17] Blackburn, J.F., Reethof, G., Shearee, J.L., 1960. *Fluid Power Control*. MIT Press, Cambridge, MA.
- [18] Botting, L.R., Eynon, G.T., Foster, K., 1970. The Response of a High Pressure Pneumatic Servomechanism to Step and Sinewave Inputs. *Proc. Instn. Mech Engrs.*, 184(1), pp. 993–1012.
- [19] Liu, S., Bobrow, J.E., 1988. An Analysis of a Pneumatic Servo System and Its Application to a Computer-Controlled Robot. *ASME Journal of Dynamic Systems, Measurement and Control*, 11, pp. 228–235.
- [20] Morita, Y.S., Shimizu, M., Kagawa, T., 1985. An Analysis on Pneumatic PWM and its Application to a Manipulator. *Proc. of International Symposium on Fluid Control and Measurement*, pp. 3–8.
- [21] Noritsugu, T., 1985. Pulse-Width Modulated Feedback Force Control of a Pneumatically Powered Robot Hand. *Proc. of International Symposium on Fluid Control and Measurement*, pp. 47–52.
- [22] Lai, J.Y., Menq, C.H., Singh, R., 1990. Accurate Position Control of a Pneumatic Actuator. *ASME, Journal of Dynamic Systems, Measurements and Control*, 112, pp. 734–739.
- [23] Barth, E.J., Zhang, J., Goldfarb, M., 2003. Control Design for Relative Stability in a PWM-Controlled Pneumatic System. *Journal of Dynamic Systems, Measurement, and Control*, 125(3), pp. 504–508.
- [24] Kawamura, S., 1989. PI-type Hierarchical Feedback Control Scheme for Pneumatic Robots. *Proc. 1989 IEEE Int. Conf. Robotics and Automation*, pp. 1853–1858.
- [25] Van Varseveld, R.B., Bone, G.M., 1997. Accurate Position Control of a Pneumatic Actuator Using On/Off Solenoid Valves. *IEEE/ASME Transactions on Mechatronics*, 2(3), pp. 195–204.
- [26] Messina, A., Giannoccaro, N.I., Gentile, A., 2005. Experimenting and modelling the dynamics of pneumatic actuators controlled by the pulse width modulation (PWM) technique. *Mechatronics*, 15(7), pp. 859–881.

- [27] Chillari, S., Guccione, S., Muscato, G., 2001. An experimental comparison between several pneumatic position control methods. *IEEE Conference on Decision and Control, Orlando, FL*, pp. 1168–1173.
- [28] Ahn, K., Yokota, S., 2005. Intelligent switching control of pneumatic actuator using on/off solenoid valves. *Mechatronics*, 15(6), pp. 683–702.
- [29] Semerci, E.A., Ateşoğlu, Ö., 2006. Nonlinear Modeling and PWM Integrated Controller Design for a Pneumatic Actuator. *The IASTED Conference on Modelling, Identification, and Control, Lanzarote, Canary Islands, Spain*.
- [30] Shen, X., 2006. *Exploiting Natural Characteristics Of Pneumatic Servoactuation Through Multi-Input Control*. Dissertation, Nashville, Tennessee.
- [31] Shen, X. et al, 2006. Nonlinear Model-Based Control of Pulse Width Modulated Pneumatic Servo Systems. *Journal of Dynamic Systems, Measurement, and Control*, 128(3), pp. 663.
- [32] Taheri, B., Case, D., Richer, E., 2012. Design of robust nonlinear force and stiffness controller for pneumatic actuators. *Proceedings of the IEEE Conference on Decision and Control*, (2), pp. 1192–1198.
- [33] Tehrani, M.J., 2008. *Pressure Control of a Pneumatic Actuator Using On/Off Solenoid Valves*. Masters' Degree Project, Stockholm, Sweden.
- [34] Xiang, F., 2001. *Block-Oriented Nonlinear Control of Pneumatics Actuator Systems*. Doctoral Thesis, Stockholm.
- [35] Thomas, M.B., 2003. *Advanced servo control of a pneumatic actuator*. The Ohio State University.
- [36] Roswell, A., Xi, F. (Jeff), Liu, G., 2006. Modelling and analysis of contact stress for automated polishing. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 46(3-4), pp. 424–435
- [37] Rachkov, M.Y., 2002. Positional control of pneumatic manipulators for construction tasks. *Automation in Construction*, 11(6), pp. 655–665.
- [38] Rajendran, S., Bolton, R.W., 2003. Position Control of a Servopneumatic Actuator using Fuzzy Compensation. *Proceedings of the 2003 American Society for Engineering Education Annual Conference & Exposition, American Society for Engineering Education*.
- [39] Shih, M., Hwang, C., 1997. Fuzzy PWM Control of the Positions of a Pneumatic Robot Cylinder Using High Speed Solenoid Valve. *JSME International Journal*, 40(3), pp. 469–476.
- [40] Senchun, C., 2003. Design of Fuzzy PID Control for Pneumatic Cylinder Position Servo System. *Proceedings of the Fourth International Symposium on Fluid Power Transmission and Control, China*.
- [41] Shih, M., Ma, M.A., 1998. Position control of a pneumatic cylinder using fuzzy PWM control method. *Mechatronics*, 8, pp. 241–253.

- [42] Ziliani, G., Visioli, a. & Legnani, G., 2007. A mechatronic approach for robotic deburring. *Mechatronics*, 17(8), pp. 431–441.
- [43] Belforte, G., 2000. New Developments and New Trends in Pneumatics. *The 6th International Symposium on Flow Control, Measurements and Flow Visualiyation, Canada*.
- [44] Čajetinac, S., 2012. PWM control and identification of frequency characteristics of a pneumatic actuator using PLC controller. *Elektronika ir Elektrotehnika*, 123(7), pp. 21–26.
- [45] Qiu, Z.C., 2012. Genetic algorithm based active vibration control for a moving flexible smart beam driven by a pneumatic rod cylinder. *Journal of Sound and Vibration*, 331(10), pp. 2233–2256.
- [46] Belforte, G., Mauro, S., Mattiazzo, G., 2004. A method for increasing the dynamic performance of pneumatic servosystems with digital valves. *Mechatronics*, 14(10), pp. 1105–1120.
- [47] Zhu, Y, Barth, E.J., 2009. Accurate Sub-Millimeter Servo-Pneumatic Tracking Using Model Reference Adaptive Control (MRAC). , pp. 1–14.
- [48] Shields, B.L., Barth, E.J., Goldfarb, M., 2006. Predictive Control for Time-Delayed Switching Control Systems. *Journal of Dynamic Systems, Measurement, and Control*, 128(4), pp. 999.
- [49] Zhu, Y., Barth, E.J., Passivity-Based Impact and Force Control of a Pneumatic Actuator. *Journal of Dynamic Systems, Measurement, and Control*, 2008, 130(2):024501-024501-7.
- [50] Zhu, Y., Barth, E.J., 2005a. Planar peg-in-hole insertion using a stiffness controllable pneumatic manipulator. pp. 1–8.
- [51] Zhu, Y., Barth, E.J., 2005b. Impedance control of a pneumatic actuator for contact tasks. *Proceedings - IEEE International Conference on Robotics and Automation*, 2005(April), pp. 987–992.
- [52] Lai, W.K., Rahmat, M.F., Wahab, N.A., 2012. Modeling and controller design of pneumatic actuator system with control valve. *International Journal on Smart Sensing and Intelligent Systems*, 5(3), pp. 624–644.
- [53] Shen, X., Goldfarb, M., 2007. Simultaneous Force and Stiffness Control of a Pneumatic Actuator. *Journal of Dynamic Systems, Measurement, and Control*, 129(4), pp. 425.
- [54] Shen, X., Goldfarb, M., 2005. Independent stiffness and force control of pneumatic actuators for contact stability during robot manipulation. *Proceedings - IEEE International Conference on Robotics and Automation*, 2005(April), pp. 2697–2702.
- [55] Han, W., 1999. *Iterative Learning Control And Bumpless Transfer For An Electro-Pneumatic Servo System*. Thesis, University of Illinois.

- [56] Chen, C.K., Hwang, J., 2005. Iterative learning control for position tracking of a pneumatic actuated X-Y table. *Control Engineering Practice*, 13(12 SPEC. ISS.), pp. 1455–1461.
- [57] Avram, M., 2013. Positioning System With Adjustable Mechanical Stopper. , pp. 44–46.
- [58] Ilchmann, a., Sawodny, O., Trenn, S., 2006. Pneumatic cylinders: modelling and feedback force-control. *International Journal of Control*, 79(6), pp. 650–661.
- [59] Kim, C., Chung, J.H., Hong, D., 2008. Coordination control of an active pneumatic deburring tool. *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*, 24(3), pp. 462–471.
- [60] Liao, L., Xi, F. (Jeff), Liu, K., 2008. Modeling and control of automated polishing/deburring process using a dual-purpose compliant toolhead. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 48(12-13), pp. 1454–1463.
- [61] Prgomelja M., Stančević S., Tehnologija obrazovnog profila - Analitičar, Udžbenik za II i III razred mašinske škole, 1995, Zavod za udžbenike i nastavna sredstva, Beograd
- [62] Gostimirović M., Milikić D., Sekulić M., Osnove tehnologije obrade skidanjem materijala, Fakultet tehničkih nauka, Novi Sad, 2015.
- [63] Milikić D., Tehnologija obrade rezanjem, opšta i primenjena teorija, Fakultet tehničkih nauka, Novi Sad, 2003.
- [64] Jelali M, Kroll A (2002) Hydraulic servo-systems – modelling, identification and control. Springer, London Berlin Heidelberg New York.
- [65] Beater, P., (2007) Pneumatic drives - System Design, Modelling and Control. Springer, Berlin Heildeberg, New York.
- [66] Eberhardt H. J., Scholz D., Servopneumatisch Positionieren, Arbeitsbuch, Festo Didactic, Denkendorf, 2000, 192503.
- [67] B. Bajči, Modeliranje PWM upravljanja dvoosnim pneumatskim manipulatorom, Fakultet tehničkih nauka, Novi Sad, 2015.
- [68] Šitum Ž., Regulacija pneumatskih servosustava primjenom neizrastog regulatora, doktorska disertacija, Fakultet strojarstva i brodogradnje, Zagreb, 2001.
- [69] Ye, N., Scavarda, S., Betemps, M., Jutard, A., Models of a Pneumatic PWM Solenoid Valve for Engineering Applications, ASME Journal of Dynamic Systems, Measurement and Control, Vol. 114, pp. 680-688, December 1992.
- [70] Czinki, A., Massenstromdosierung mit zeitdiskret getakteten Schaltventilen, Ö+P "Ölhydraulik und Pneumatik" 43, Nr. 1, 1999.
- [71] Jack J., Automating manufacturing systems with PLC, (Version 4.7, April 14, 2005)
- [72] Aleksandrov S., Jovanović Z., Čajetinac S., Stoimenov L., Access to PLC in real - time software package Team Viewer, *X Triennial International SAUM Conference, Systems, Automatic Control and Measurement, SAUM 2010, 10-12 November 2010, ISBN 978-86-6125-020-0 pp. 145-149.*

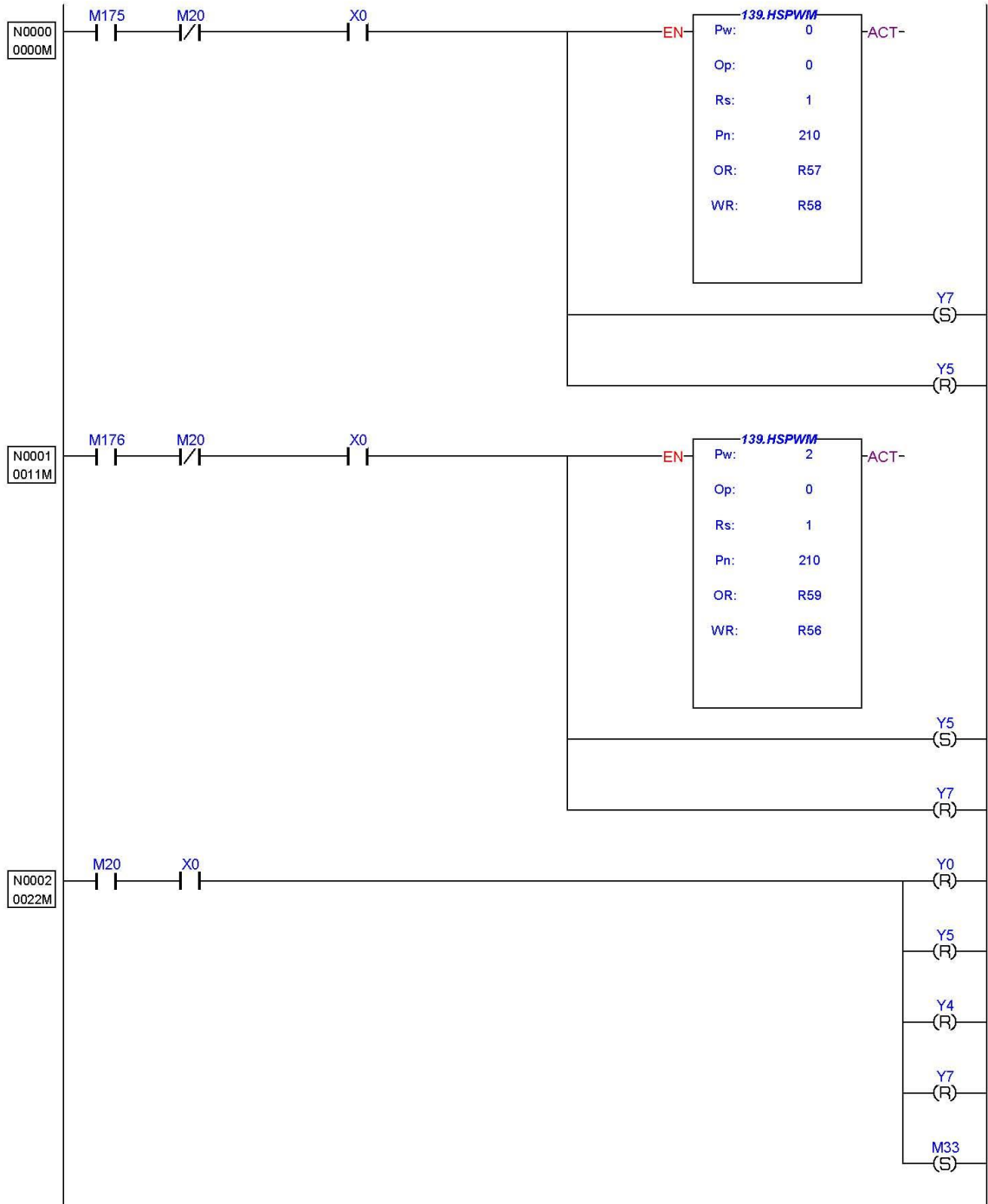
- [73] Bajči B., Dudić S., Šulc J., Milenković I., Šešlija D., Reljić V., Remote system for measuring geometric tolerances: Roundness, 13 International Conference on Remote Engineering and Virtual Instrumentation - REV, Madrid: UNED Madrid, 24-26 Februar, 2016, pp. 279-280, ISBN 978-1-4673-8245-8
- [74] [http:// eacharya.inflibnet.ac.in/data-server/eacharya-documents/55d31af3e413010f24d8f40c_INFIEP_201/1901/ET/201-1901-ET-V1-S1__lecture_37.pdf](http://eacharya.inflibnet.ac.in/data-server/eacharya-documents/55d31af3e413010f24d8f40c_INFIEP_201/1901/ET/201-1901-ET-V1-S1__lecture_37.pdf) (datum posete 23.06.2016.)
- [75] Milić Stojić, Kontinualni sistemi automatskog upravljanja, Nauka, Beograd, 1996
- [76] Ignjatović I., Komenda T., Šešlija D., Mališa V., Optimisation of compressed air and electricity consumption in a complex robotic cell, Robotics and Computer Integrated Manufacturing, 29 (2013), 4, pp. 70–76
- [77] Šešlija D., From Remote Laboratories to Cloud Manufacturing, 7th DQM International conference, Life Cycle Engineering and Management, Prijedor, Srbija, 29 – 30 Jun 2016.

Prilozi

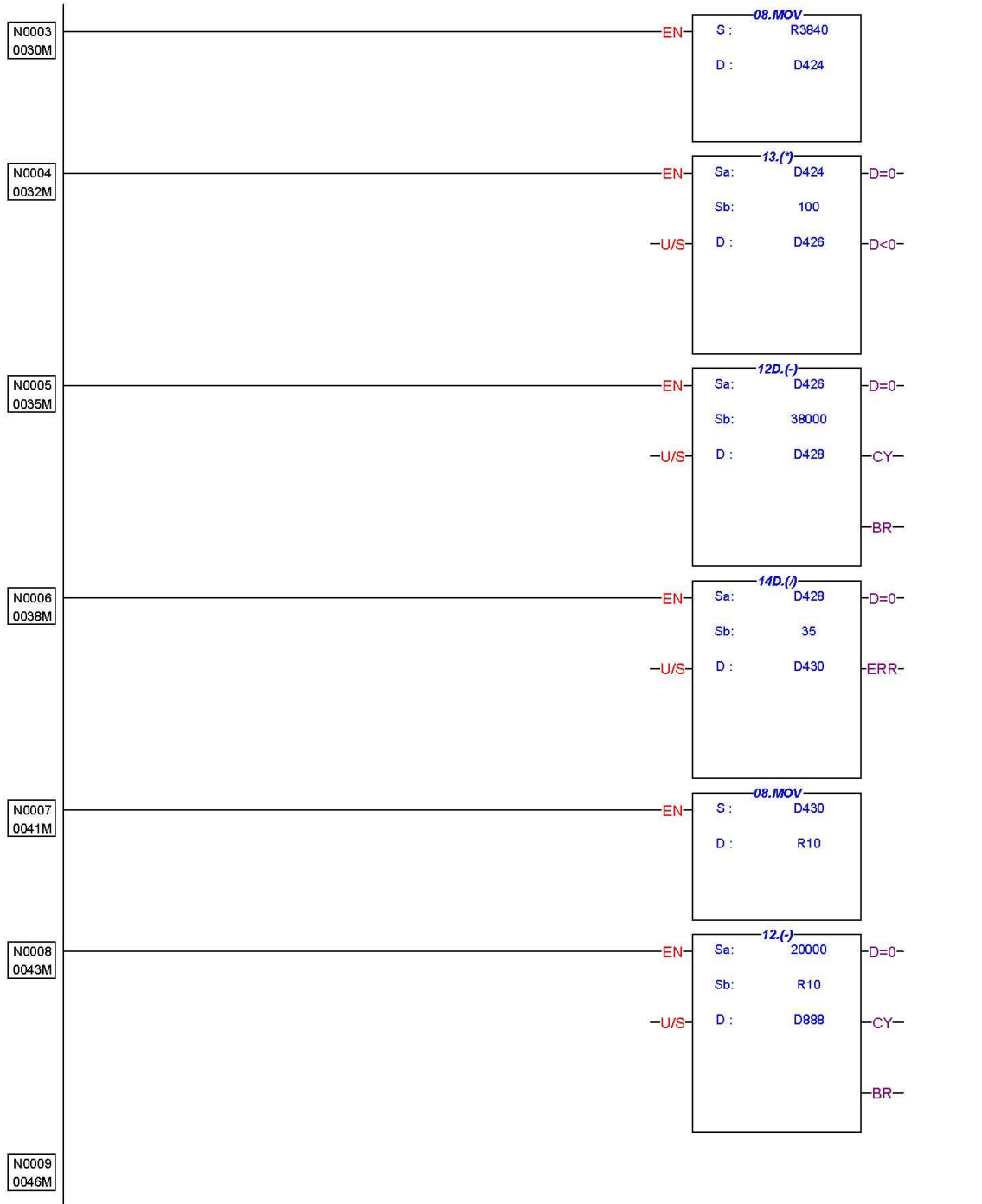
Prilog A - Kod – PLK, PWM upravljanje

Kod za – plc pwm upravljanje pneumatskim osama

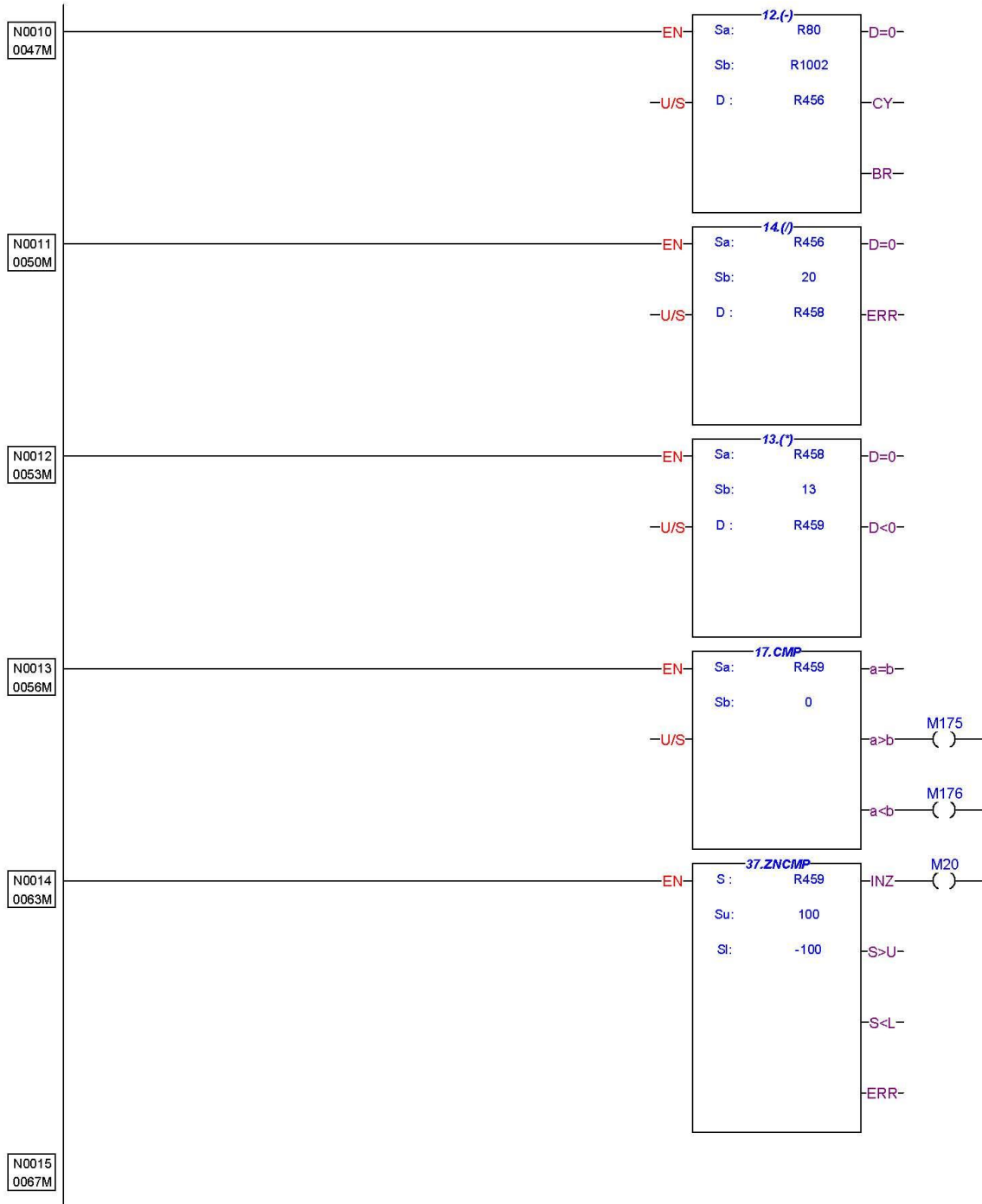
Printed Item: Ladder Diagram - Main_unit1



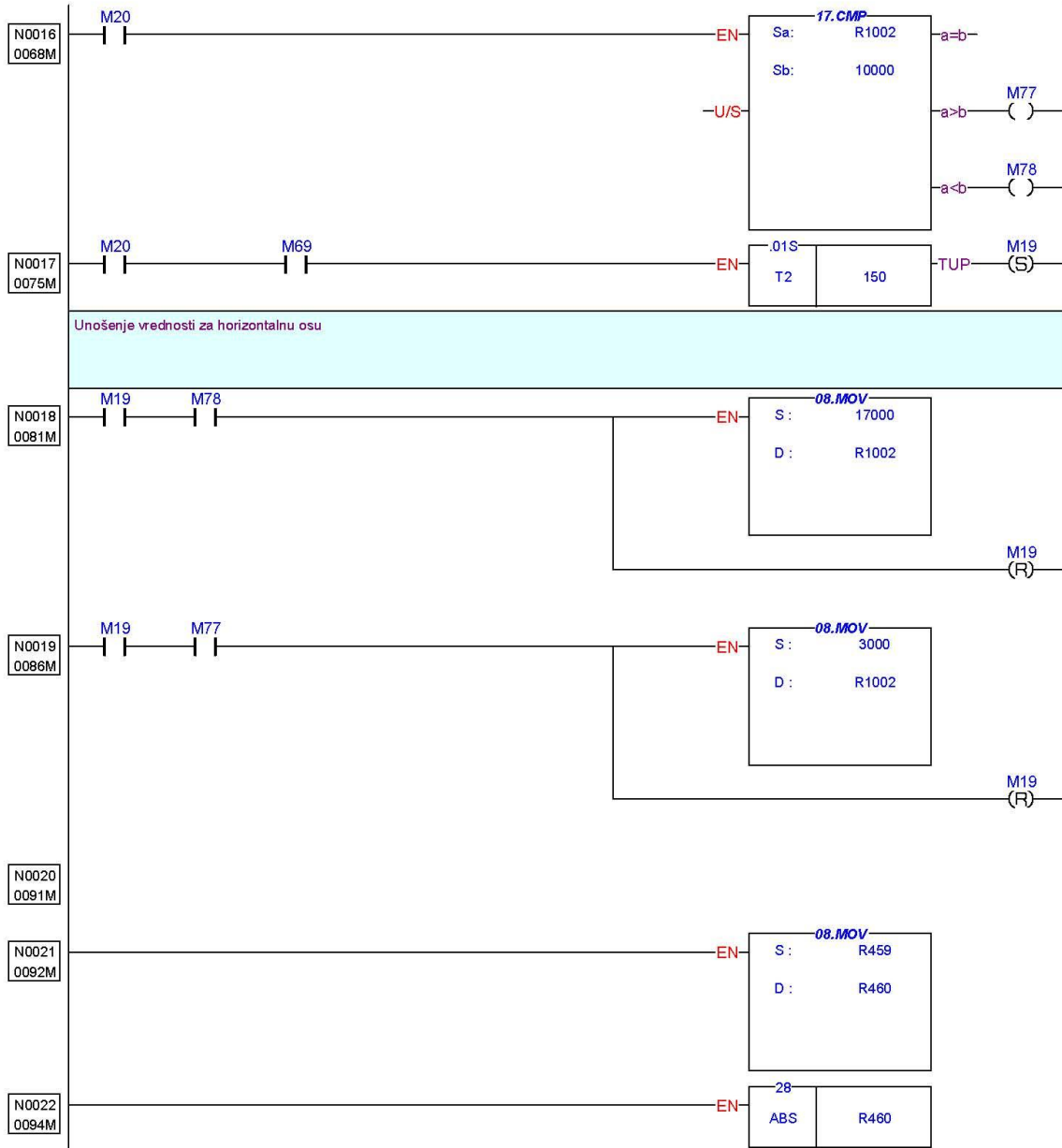
Printed Item: Ladder Diagram - Main_unit1



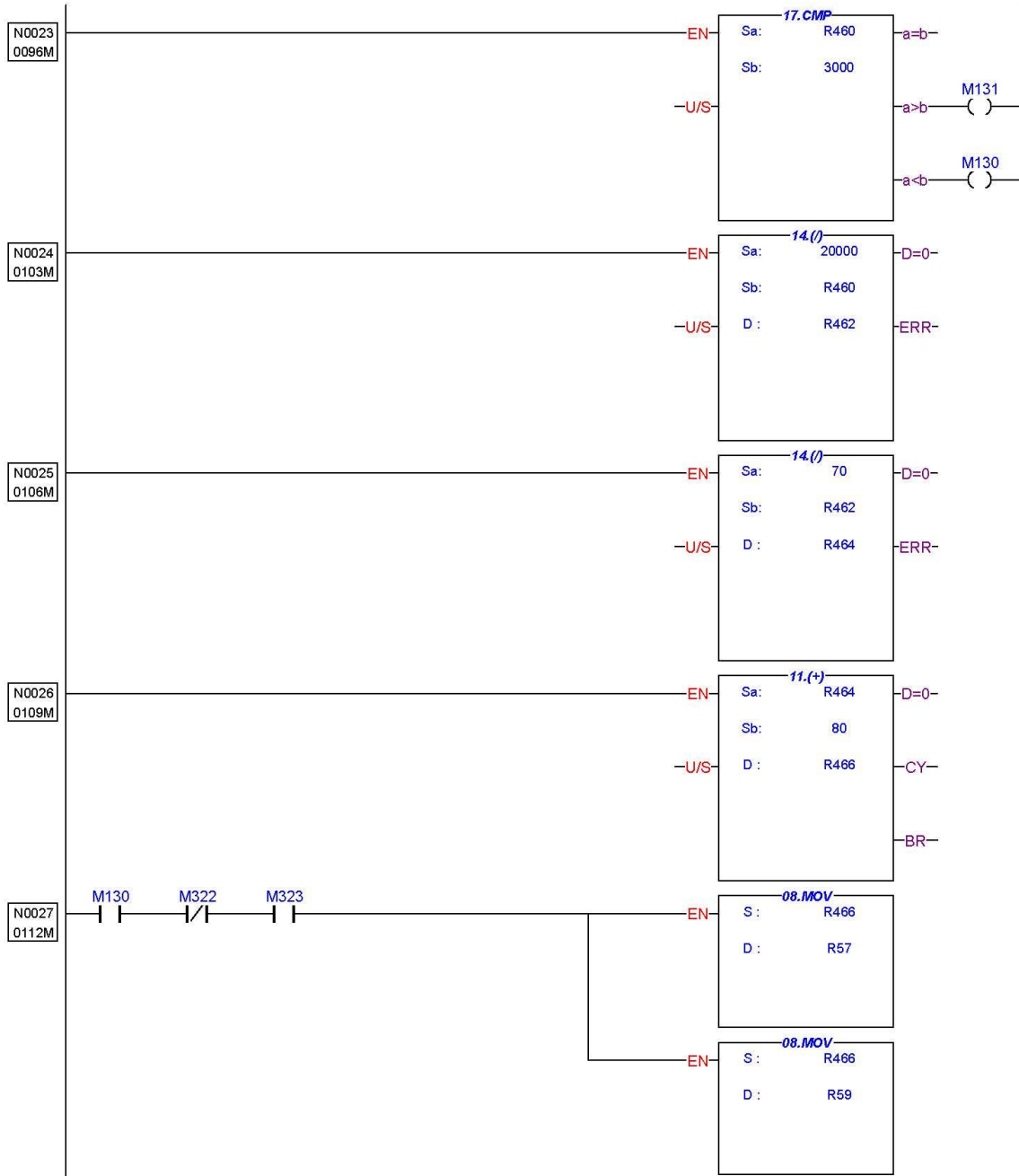
Printed Item: Ladder Diagram - Main_unit1



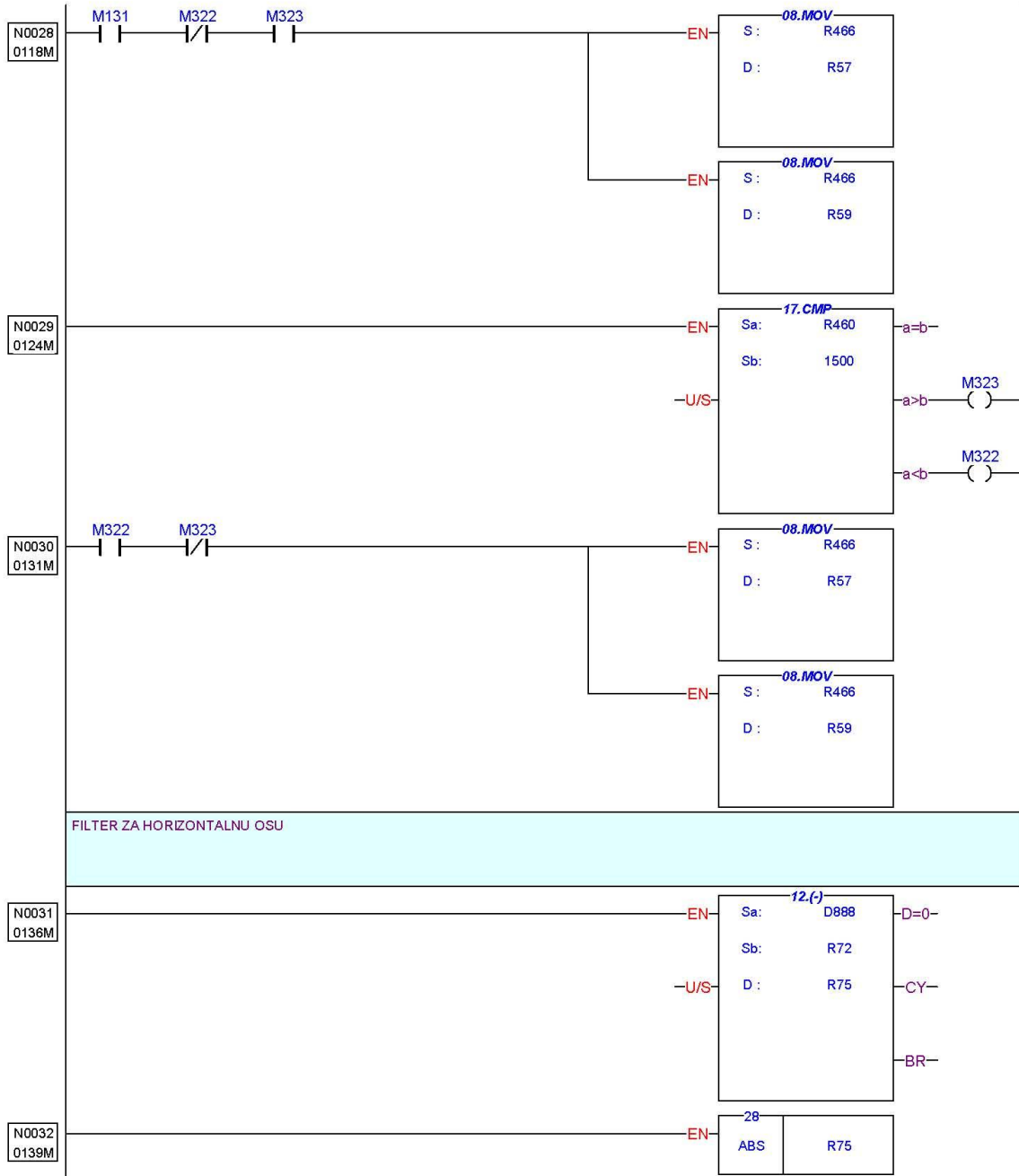
Printed Item: Ladder Diagram - Main_unit1



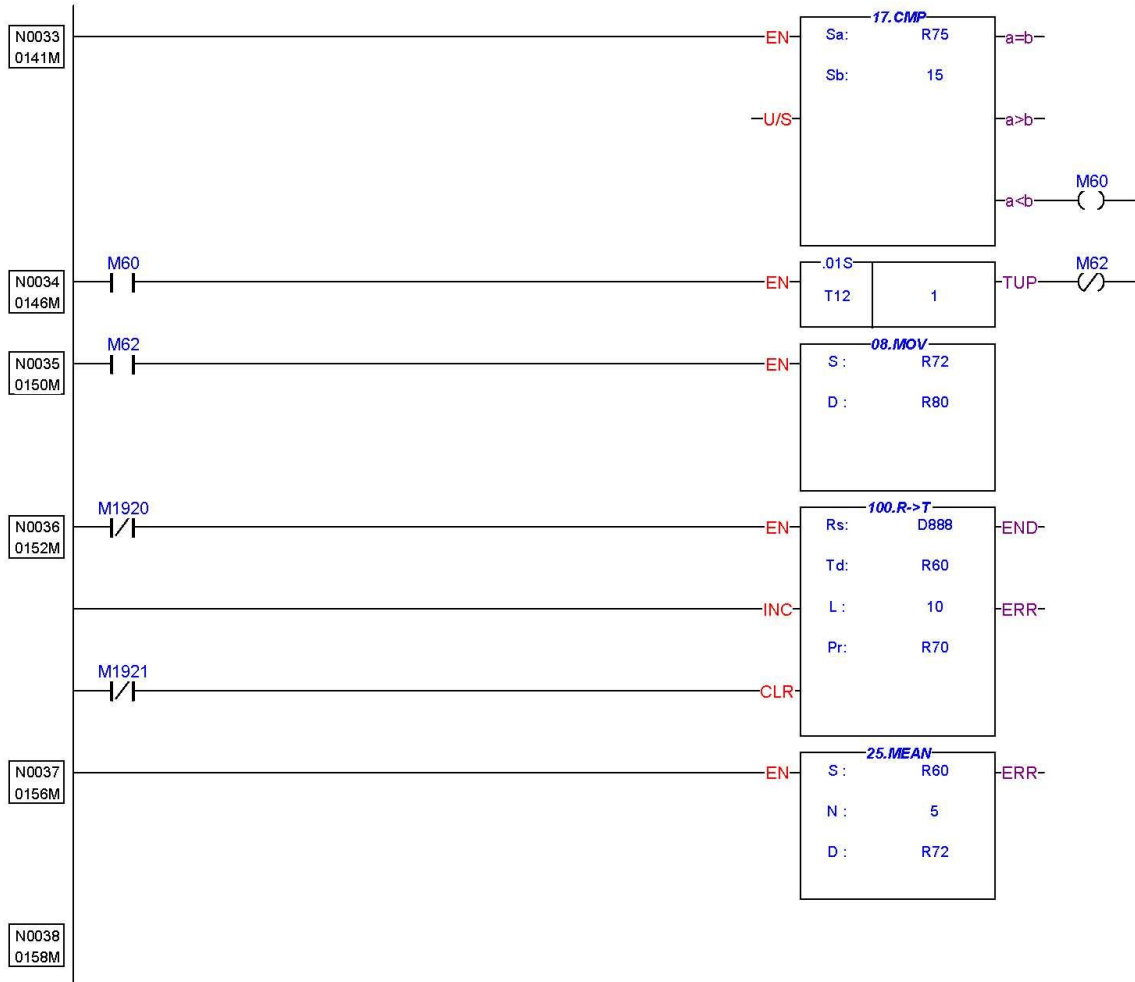
Printed Item: Ladder Diagram - Main_unit1



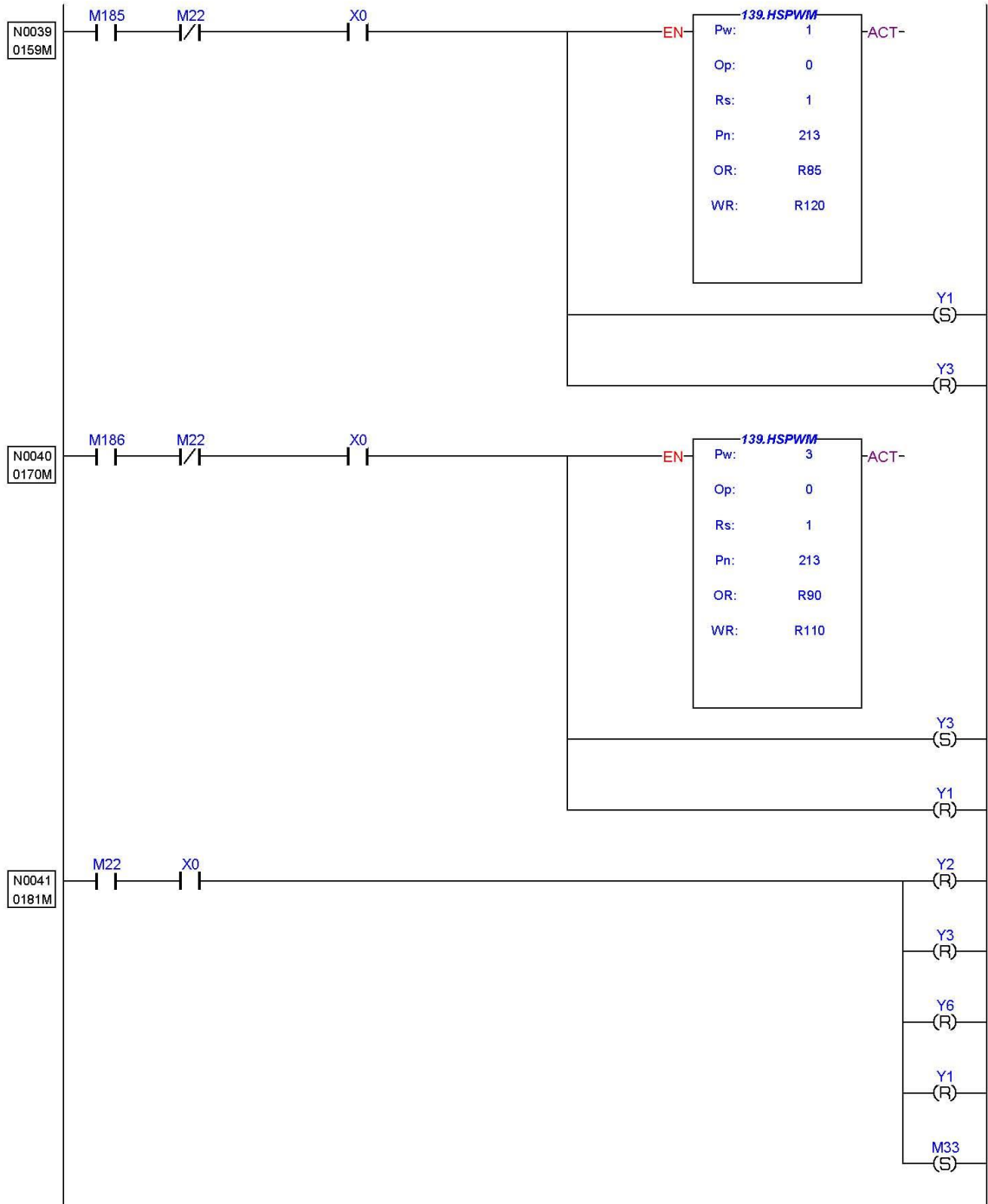
Printed Item: Ladder Diagram - Main_unit1



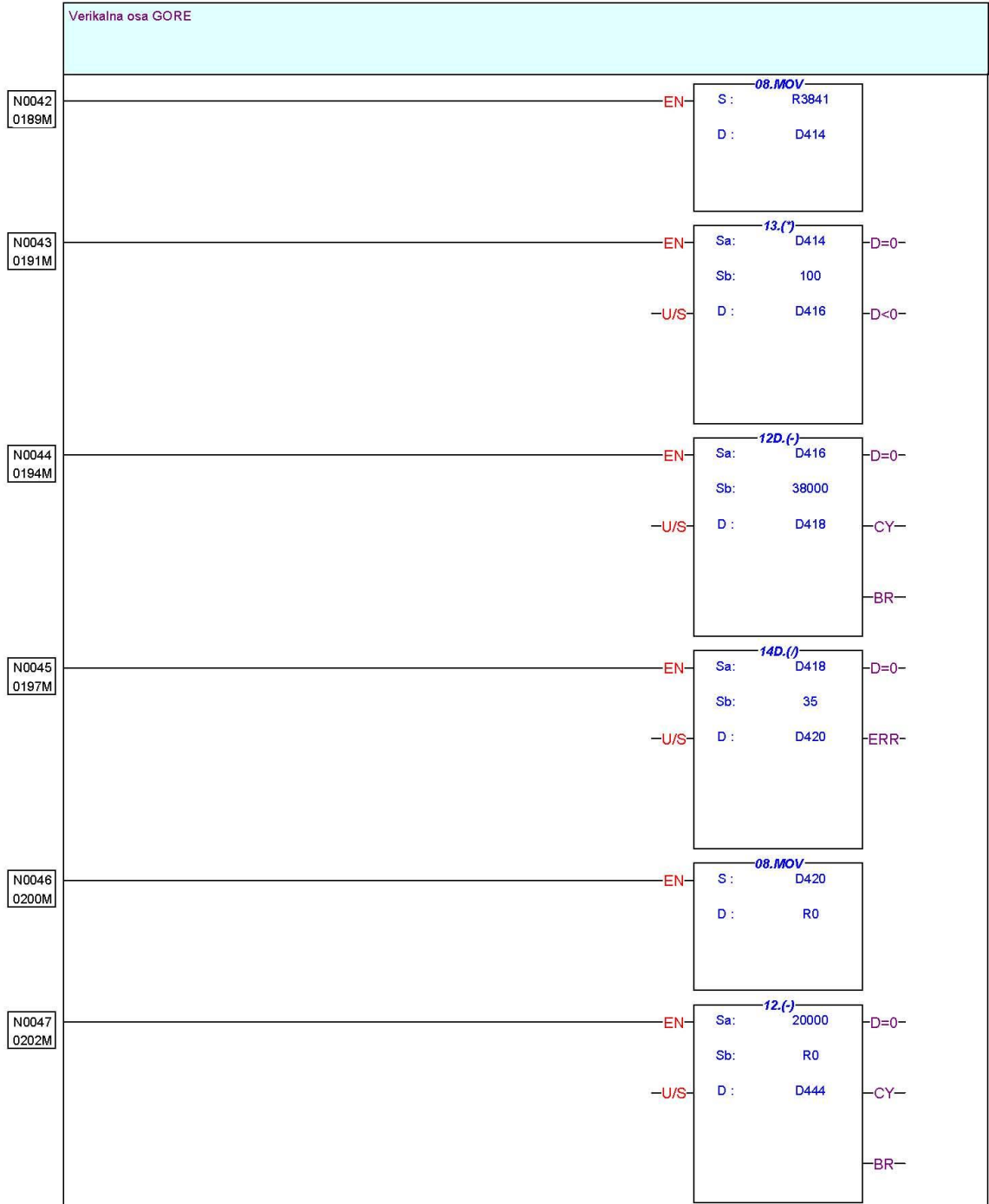
Printed Item: Ladder Diagram - Main_unit1



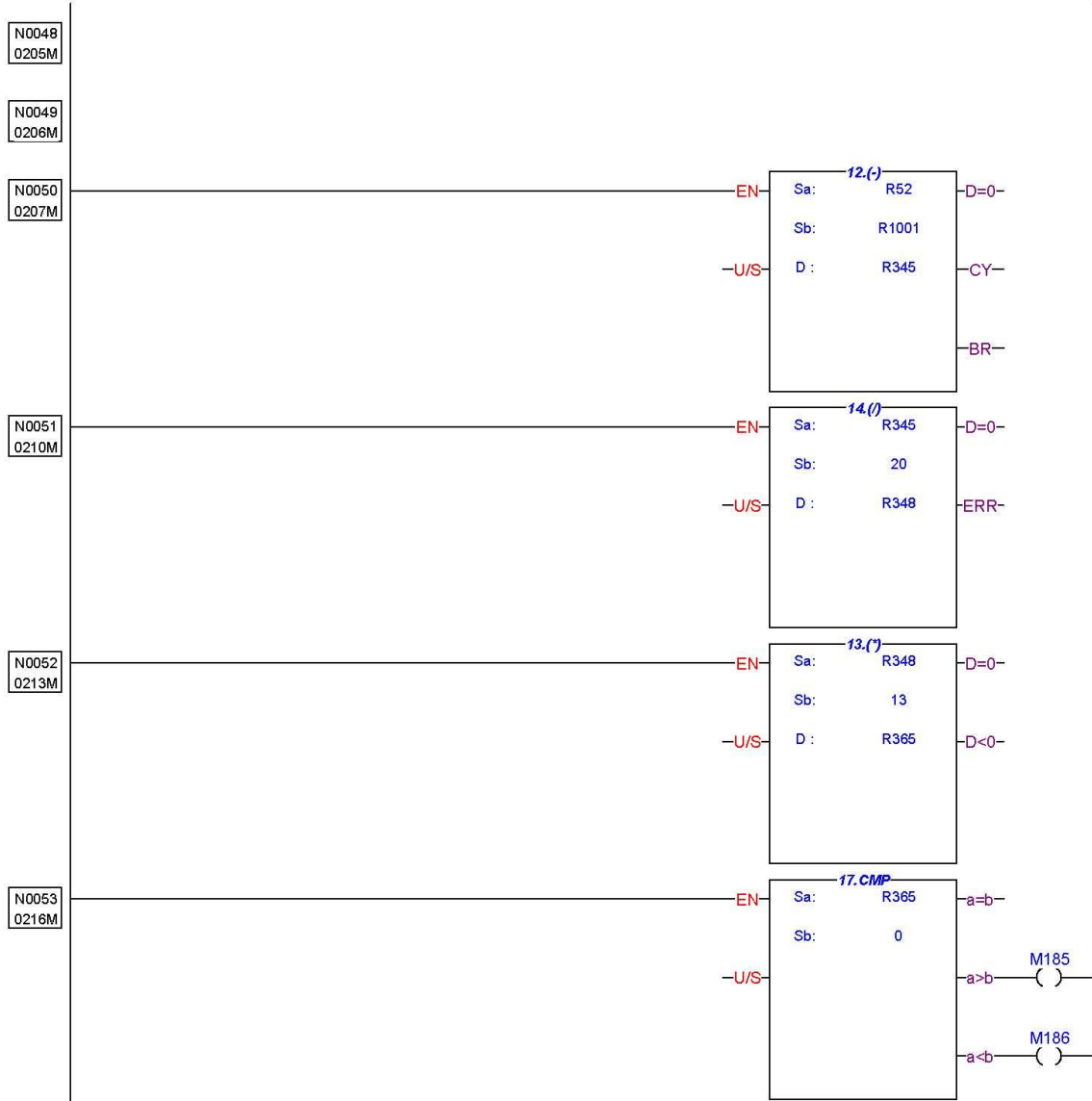
Printed Item: Ladder Diagram - Main_unit1



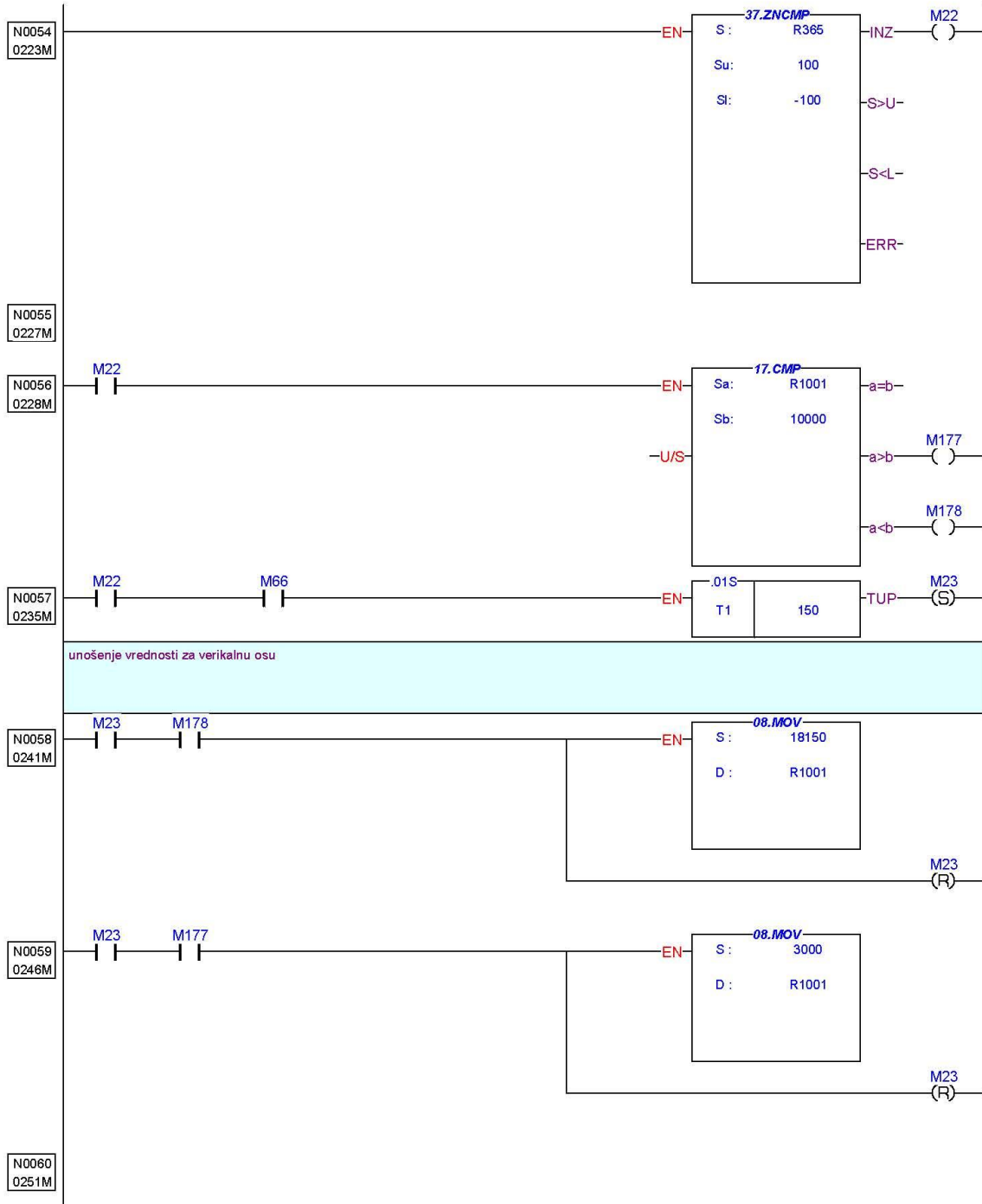
Printed Item: Ladder Diagram - Main_unit1



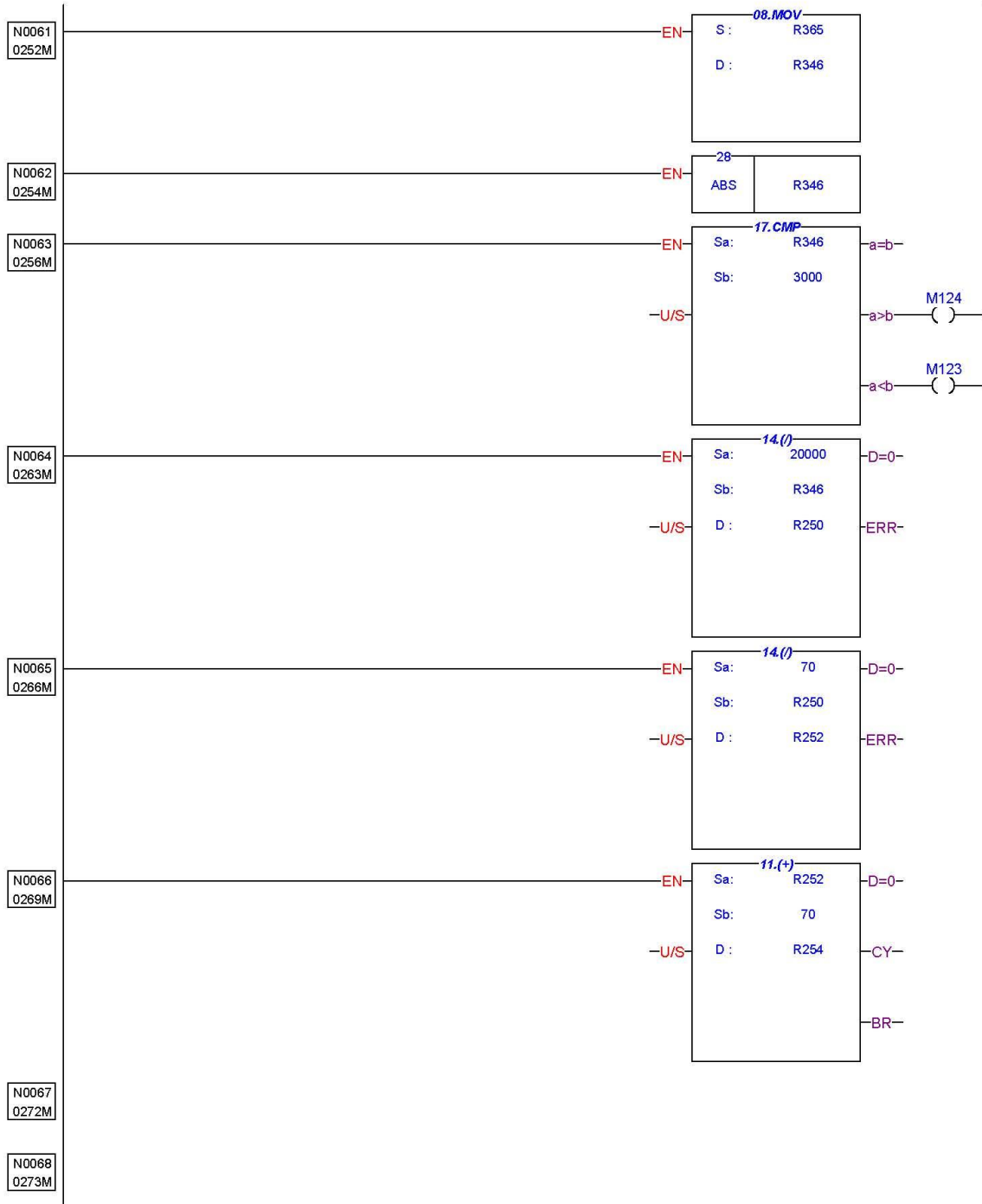
Printed Item: Ladder Diagram - Main_unit1



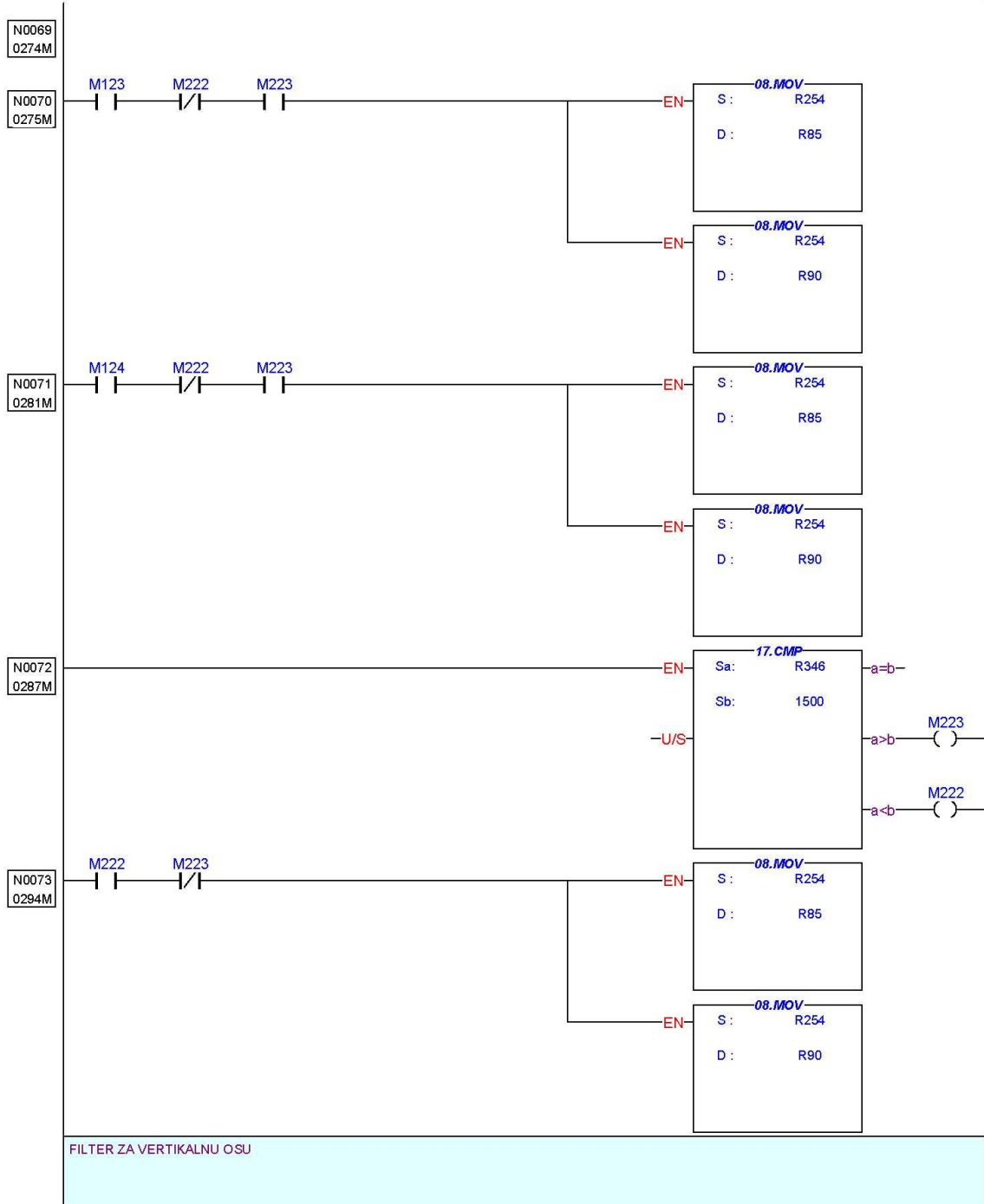
Printed Item: Ladder Diagram - Main_unit1



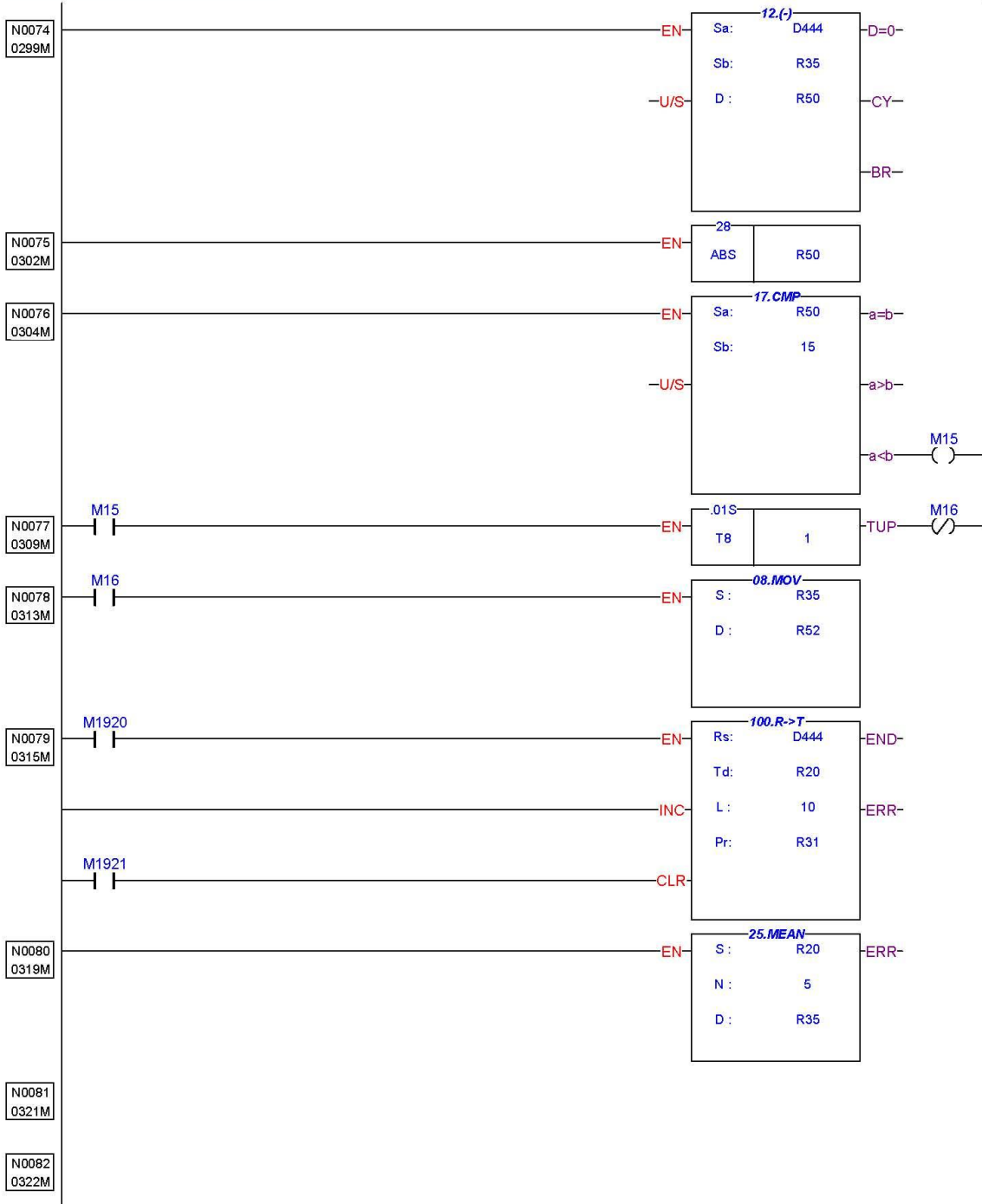
Printed Item: Ladder Diagram - Main_unit1



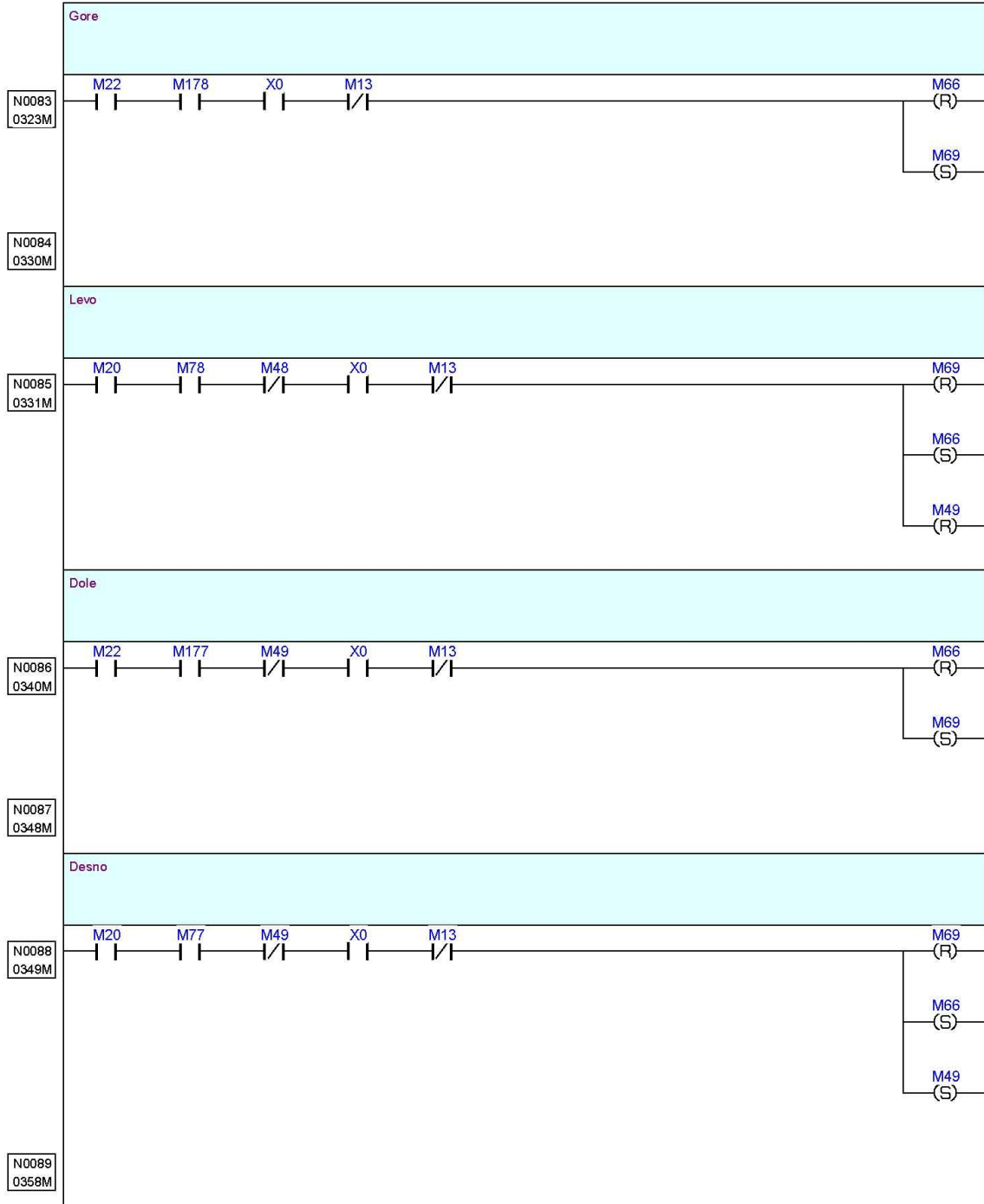
Printed Item: Ladder Diagram - Main_unit1



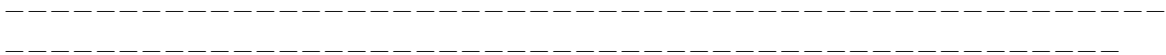
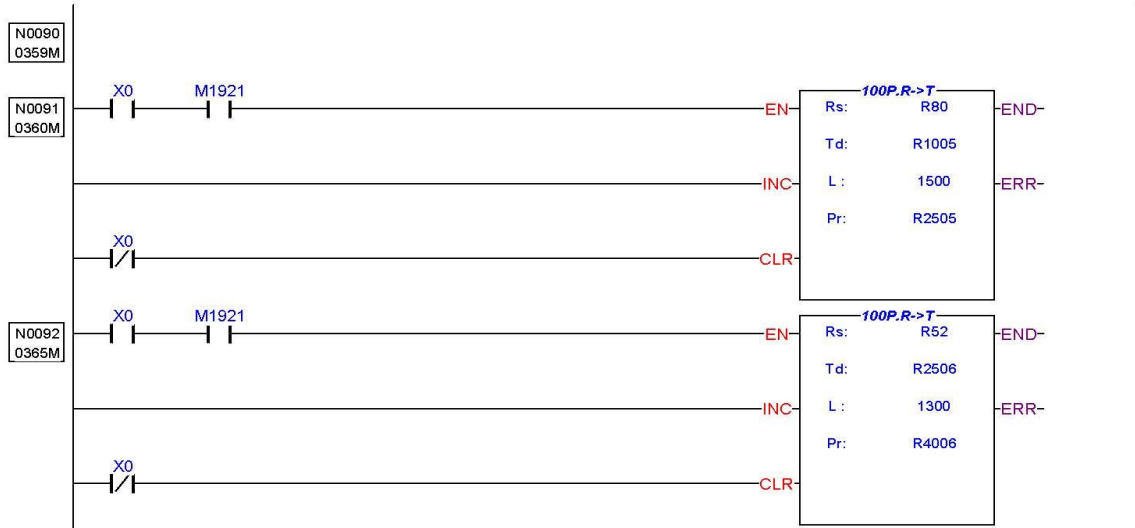
Printed Item: Ladder Diagram - Main_unit1



Printed Item: Ladder Diagram - Main_unit1



Printed Item: Ladder Diagram - Main_unit1



Prilog B – Kod – PLK, proporcionalno upravljanje – cpx - cmax

```

-----
PROGRAM PLC_PRG
VAR
    InData1 AT %IB4:FHPP_IN;
    OutData1 AT %QB0:FHPP_OUT;
    cpx_cmax_1:CPX_CMAX_CTRL_PRM;
    InData2 AT %IB12:FHPP_IN;
    OutData2 AT %QB8:FHPP_OUT;
    cpx_cmax_2:CPX_CMAX_CTRL_PRM;
    (*Vrednost: INT;*)
    korak: UINT;
    tajmer:TON;
    pali: BOOL;
    brojac: CTU ;
    broji: BOOL;
    ponisti: BOOL;
    PV:INT;
    prekidac AT%IX10.0:BOOL;
    Erg: INT;
    Counter: INT;
END_VAR

-----

cpx_cmax_1(I_DATA:=InData1, O_DATA := OutData1);
cpx_cmax_2(I_DATA:=InData2, O_DATA := OutData2);
tajmer(in:=pali, pt:=t#2s);
brojac( cu := broji, reset:=ponisti, pv:=0);
CASE korak OF
0: IF cpx_cmax_2.LoadVoltageApplied THEN
    cpx_cmax_2.OperationModeB1 := TRUE;

```

```
cpx_cmax_2.OperationModeB2 := FALSE;
cpx_cmax_2.ControlModeB1 := FALSE;
cpx_cmax_2.ControlModeB2 := FALSE;
cpx_cmax_2.EnableDrive := TRUE;
IF cpx_cmax_2.DriveEnabled THEN
    cpx_cmax_2.Stop := TRUE;
    IF cpx_cmax_2.OperationEnabled THEN
        korak := 1;
    END_IF
END_IF
END_IF
ponisti:=TRUE;
ERG:=17530;
1: IF cpx_cmax_1.LoadVoltageApplied THEN
    cpx_cmax_1.OperationModeB1 := TRUE;
    cpx_cmax_1.OperationModeB2 := FALSE;
    cpx_cmax_1.ControlModeB1 := FALSE;
    cpx_cmax_1.ControlModeB2 := FALSE;
    cpx_cmax_1.EnableDrive := TRUE;
    IF cpx_cmax_1.DriveEnabled THEN
        cpx_cmax_1.Stop := TRUE;
        IF cpx_cmax_1.OperationEnabled THEN
            korak :=52;
        END_IF
    END_IF
END_IF
52: IF NOT prekidac THEN korak:=53;
ELSE korak:=2;
END_IF
53: cpx_cmax_2.SETVALUE1:=50;
cpx_cmax_2.SETVALUE2:=17000;
cpx_cmax_1.SETVALUE1:=50;
cpx_cmax_1.SETVALUE2:=17000;
```



```
korak:=54;
54: IF NOT cpx_cmax_2.AckStart THEN
    cpx_cmax_2.StartTask := TRUE;
    korak := 55;
END_IF
55: IF NOT cpx_cmax_1.AckStart THEN
    cpx_cmax_1.StartTask := TRUE;
    korak := 2;
END_IF
2: ponisti:=FALSE;
    broji:=0;
IF cpx_cmax_2.StateOperationModeB1 AND
    NOT cpx_cmax_2.StateOperationModeB2 AND
    NOT cpx_cmax_2.StateControlModeB1 AND
    NOT cpx_cmax_2.StateControlModeB2 THEN
    korak := 3;
END_IF
3: IF cpx_cmax_1.StateOperationModeB1 AND
    NOT cpx_cmax_1.StateOperationModeB2 AND
    NOT cpx_cmax_1.StateControlModeB1 AND
    NOT cpx_cmax_1.StateControlModeB2 THEN
    korak:=4;
END_IF
4: IF cpx_cmax_2.DriveIsReferenced THEN
    korak := 5;
ELSE cpx_cmax_2.StartHoming := TRUE;
IF cpx_cmax_2.DriveIsReferenced THEN
    cpx_cmax_2.StartHoming := FALSE;
    korak := 5;
END_IF
END_IF
5: IF cpx_cmax_1.DriveIsReferenced THEN
    korak:=6;
```

```

ELSE cpx_cmax_1.StartHoming := TRUE;
IF cpx_cmax_1.DriveIsReferenced THEN
  cpx_cmax_1.StartHoming := FALSE;
  korak:=6;
END_IF
END_IF
6: cpx_cmax_2.SETVALUE1:=8;
cpx_cmax_2.SETVALUE2:=3000;
korak:=7;
7: cpx_cmax_1.SETVALUE1:=8;
cpx_cmax_1.SETVALUE2:=3000;
korak:=8;
8: IF NOT cpx_cmax_2.AckStart THEN
  cpx_cmax_2.StartTask := TRUE;
  korak := 9;
END_IF
9: IF cpx_cmax_2.AxisIsMoving AND
  NOT cpx_cmax_2.MC THEN
  cpx_cmax_2.StartTask := FALSE;
  korak := 10;
END_IF
pali:=1;
IF NOT cpx_cmax_2.AxisIsMoving AND tajmer.Q THEN
korak:=10;
END_IF
10: pali:=0;
IF cpx_cmax_2.MC THEN (*// prvi krug //*)
  cpx_cmax_2.SETVALUE1:=8;
  cpx_cmax_2.SETVALUE2:=Erg;
FOR brojac.PV:= 1 TO 2 BY 1 DO
Erg:=Erg+0;
END_FOR;
cpx_cmax_2.SETVALUE2:=Erg;

```

```
korak := 11;
END_IF
(*FOR brojac.Q :=1 TO 4 BY 1 DO
    cpx_cmax_2.SETVALUE2:=cpx_cmax_2.SETVALUE2+2000;
END_FOR*)
11: IF NOT cpx_cmax_1.AckStart THEN
    cpx_cmax_1.StartTask := TRUE;
    korak := 12;
END_IF
12: IF cpx_cmax_1.AxisIsMoving AND
    NOT cpx_cmax_1.MC THEN
    cpx_cmax_1.StartTask := FALSE;
    korak := 13;
END_IF
13: IF cpx_cmax_1.MC THEN
    cpx_cmax_1.SETVALUE1:=8;
    cpx_cmax_1.SETVALUE2:=17000;
    korak := 14;
END_IF
14: IF NOT cpx_cmax_2.AckStart THEN
    cpx_cmax_2.StartTask := TRUE;
    korak := 15;
END_IF
15: IF cpx_cmax_2.AxisIsMoving AND
    NOT cpx_cmax_2.MC THEN
    cpx_cmax_2.StartTask := FALSE;
    korak := 16;
END_IF
16: IF cpx_cmax_2.MC THEN
    korak := 17;
END_IF
17: IF NOT cpx_cmax_1.AckStart THEN
    cpx_cmax_1.StartTask := TRUE;
```

```
korak := 18;
  END_IF
18: IF cpx_cmax_1.AxisIsMoving AND
NOT cpx_cmax_1.MC THEN
cpx_cmax_1.StartTask := FALSE;
korak := 19;
  END_IF
19: IF cpx_cmax_1.MC THEN
korak := 20;
  END_IF
20:broji:=1;
IF NOT brojac.Q THEN
korak:=2;
END_IF
END_CASE
```

Prilog C – Parametrizacija u FCT

Detaljan prikaz podešavanja programskog okruženja codesys sa parametrizacijom u fct – programskom okruženju

Povezivanje FESTO CPX - CEC kontrolera i CPX - CMAX – C1 – 1 osnovnog kontrolera u Festo programskom paketu FCT.

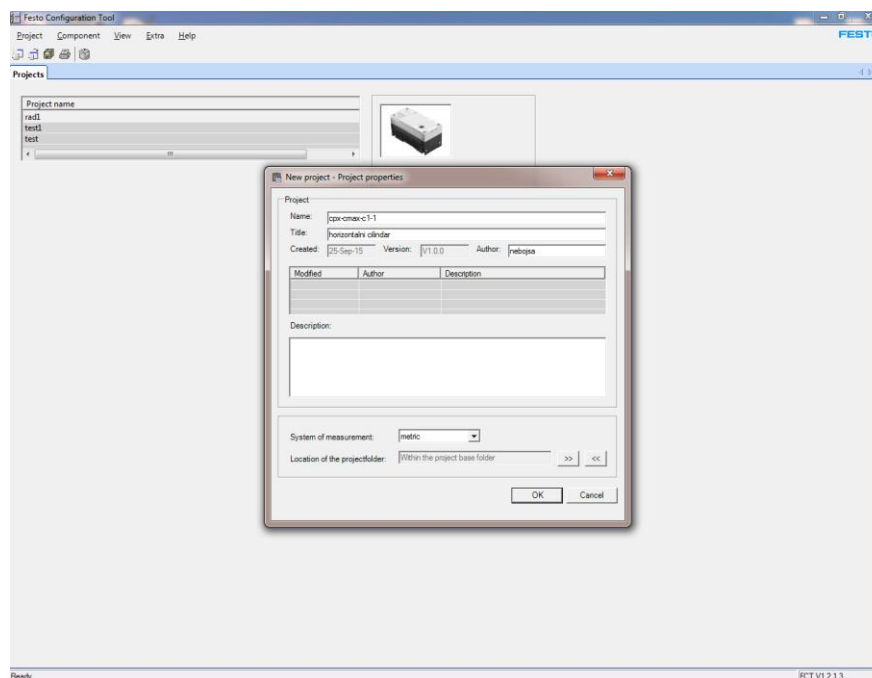
NAPOMENA:

Važno je imati instaliran kako ovaj softverski paket tako i odgovarajući dodatak. Pošto se koristi CPX-CMAX-C1-1 osni kontroler potrebno je instalirati i njegov dodatak (CPX-CMAX-C1-1, PlugIn-Release 2.2, koji je postavljen datuma 12.6.2015. godine).

Vrednosti koje nisu pomenute su ostavljene po default-u.

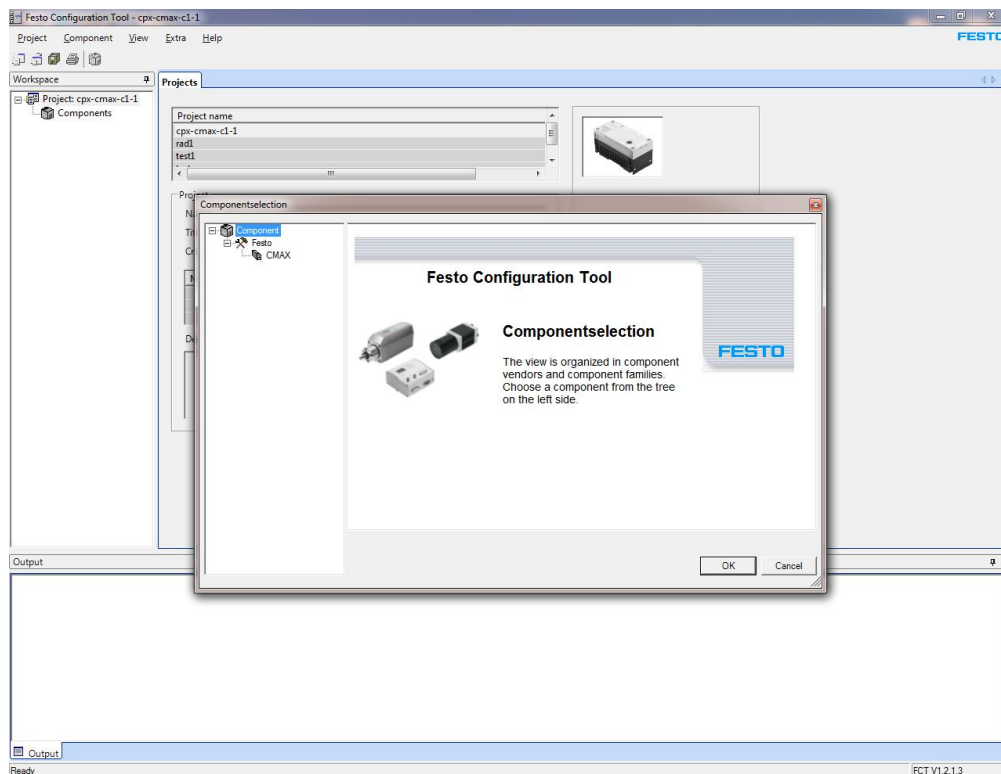
PODEŠAVANJE PARAMETARA I USPOSTAVLJANJE KONEKCIJE:

Po otvaranju programa Festo Configuration Tool (FCT), prikazuje se opcija gde se unose neke od osnovnih stvari kod projekta: naziv, naslov, ime autora, opis i u ovom slučaju izbor mernog sistema: metričkog ili imperijalnog.



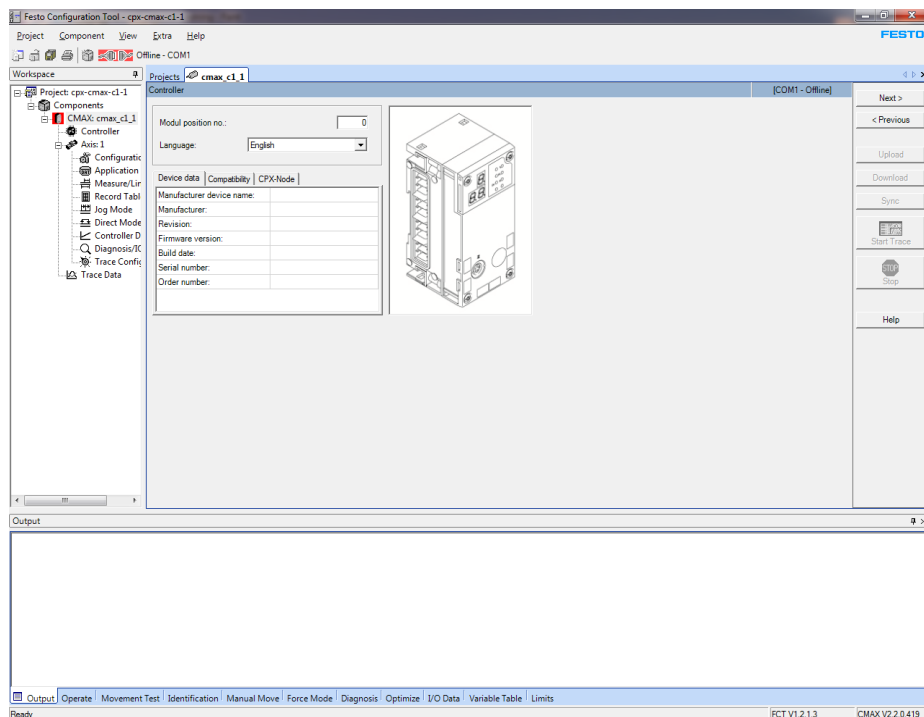
Pošto se upišu odgovarajući podaci klikne se na opciju OK.

Sledeći korak je da se klikne na opciju *Component selection* koja se nalazi ispod padajućeg menija.



Potrebno je kliknuti na opciju OK, potom se otvori sledeći prozor na kome je potrebno označiti, sa leve strane, CMAX u padajućem meniju, kao i imenovati komponentu koja se upotrebljava.

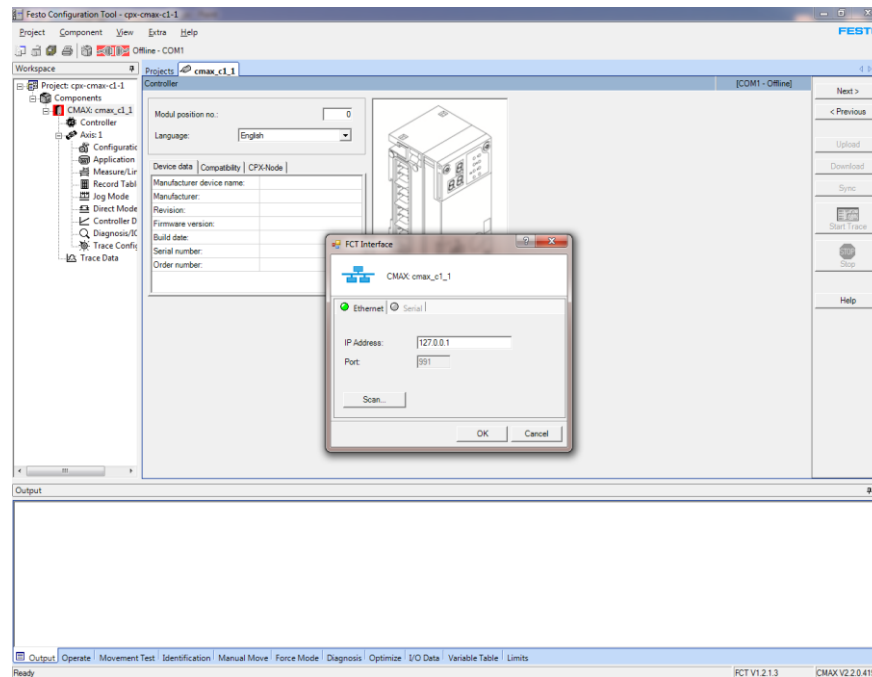
Pošto se to uradi otvara se novi, napravljen od strane korisnika, prozor na kome je prikazan osni kontroler.



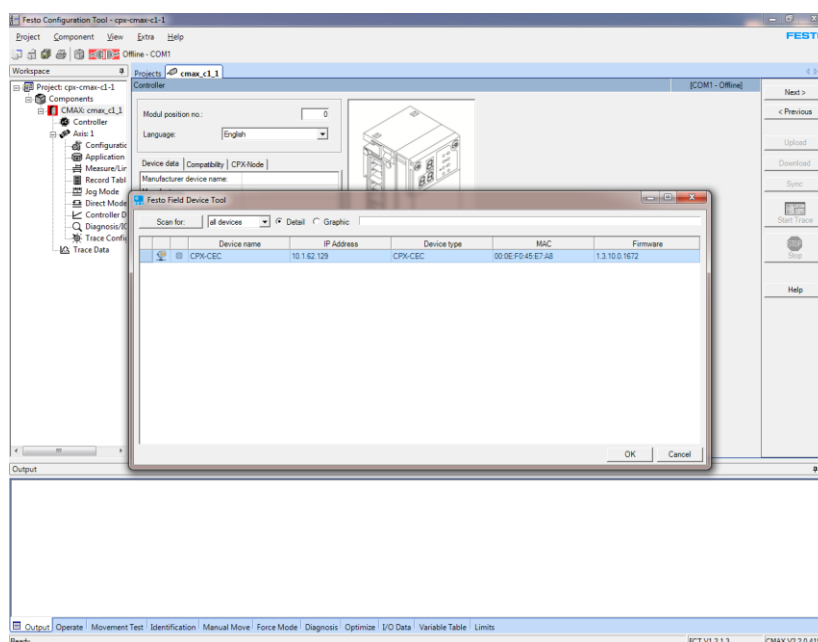
Nakon kreiranja projekta za osni kontroler prvo što je neophodno da se uradi je da se fizički povežu kontroler i računar. To je moguće uraditi na dva načina
 a) korišćenjem ukrštenog (crossover) UTP kabla, kojim direktno spajamo računar i CPX-CEC kontroler, ili

b) korišćenjem direktnog (straight) UTP kabla i patch panela.

U opciji Component koja se nalazi kao druga mogućnost u glavnom padajućem meniju, potrebno je izabrati opciju FCT Interface.



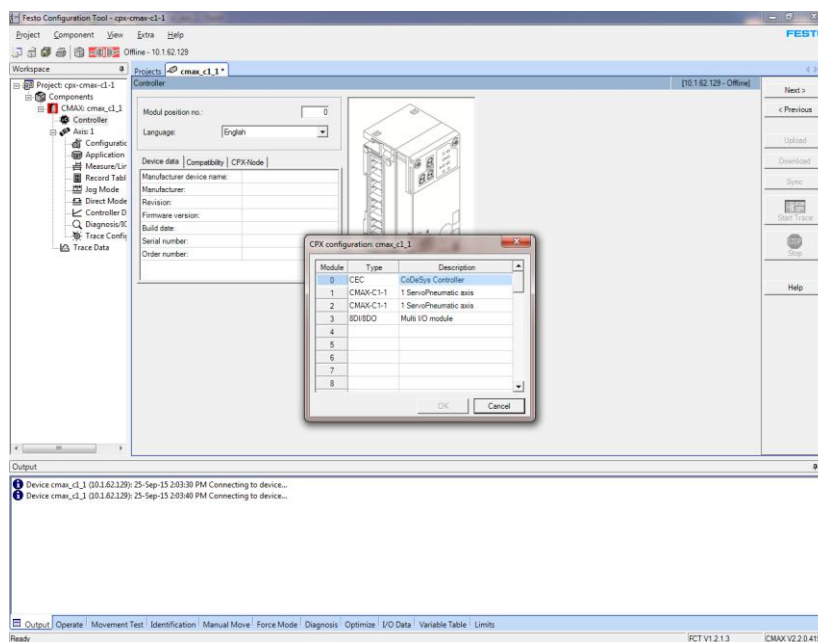
FCT interfejs prikazuje da je moguće povezivanje sa kontrolerom i preko serijske veze. U Ethernet podešavanju se može ručno uneti IP adresa CPX-CEC kontrolera ili skenirati celokupna mreža pa izabrati željeni kontroler.



U našem slučaju IP adresa CPX-CEC kontrolera je 10.1.62.119.

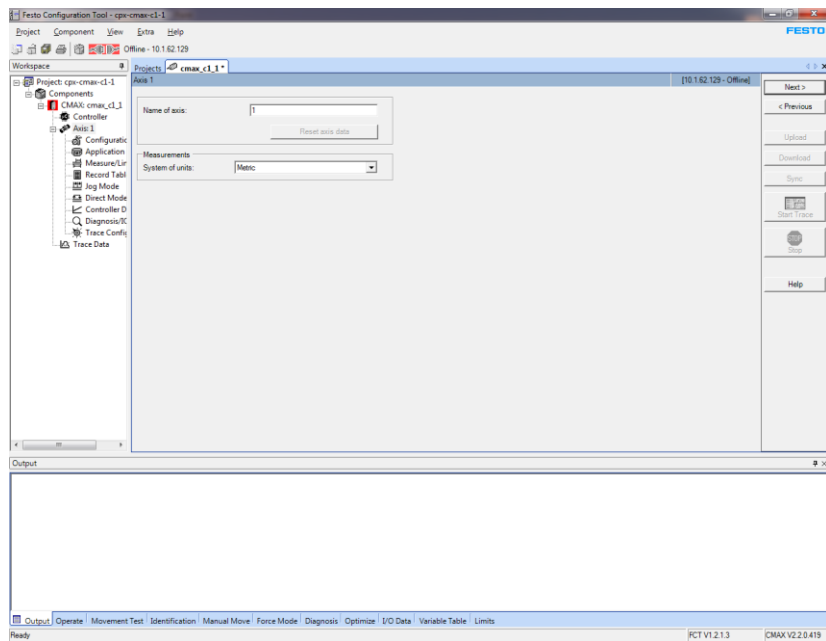
Nakon prepoznavanja i ostvarivanja veze sa kontrolerom, na glavnom prozoru će se pojaviti umesto crvenog polja sa natpisom Offline - COM, crveno polje sa natpisom Offline - IP adresa kontrolera. Pritiskom na ovu opciju ostvaruje se veza sa kontrolerom i moguće ga je koristiti. Posle ovih koraka mogu se konfigurisati i/ili označiti uređaji koji su spojeni sa CPX-CMAX kontrolerom, kao što su fabrička oznaka razvodnog ventila, dužina radnog hoda cilindra, radni pritisak itd.

Prvi korak konfiguracije je prikazan prozorom pod nazivom Controller. Ovde se u polju *Modul position number*. naznačava koji je po redu CMAX osni kontroler u odnosu na glavni kontroler CPX-CEC, zbog mogućnosti povezivanja više komada u sistem. Ako se preskoči numerisanje, FCT program će po pritiskanju na opciju Offline/Online izbaciti sledeći prozor, gde se mora označiti koji je osni kontroler u pitanju.



Prebacivanje na sledeći prozor podešavanja, kao i vraćanje unazad se vrši klikom na polja Next i Previous koja se nalaze sa desne strane radnog prozora.

Sledeći prozor se odnosi na upis broja osa koje kontroliše jedan, izabrani, CMAX kontroler, kao i još jedno upisivanje mernog sistema.

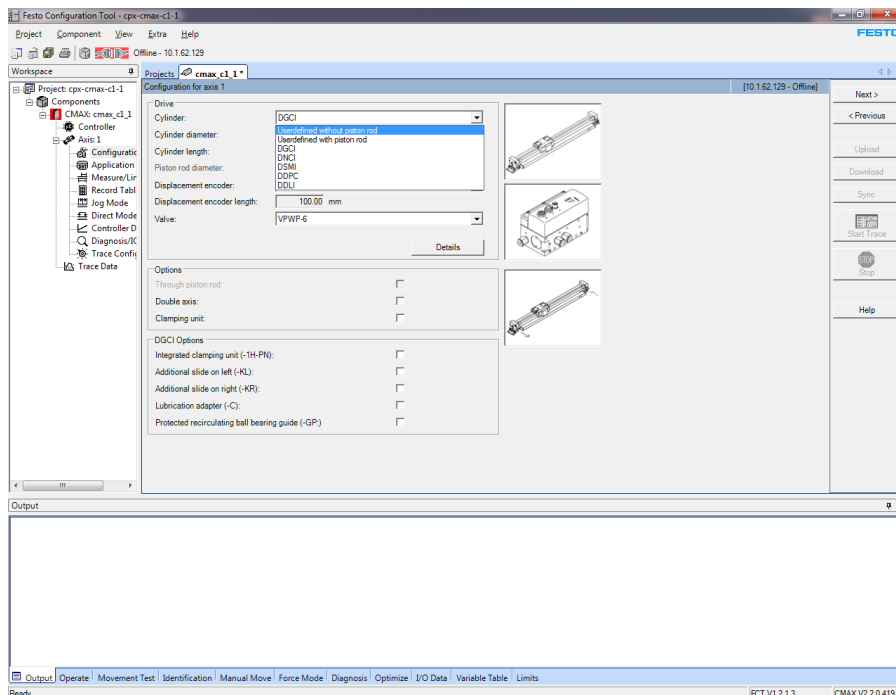


Na prethodnom bloku može da se uoči da je izabrana jedna osa i metrički merni sistem.

Sledeći prozor je povezan sa označavanjem modela cilindra, dužine njegovog radnog hoda, prečnika klipa, modela elektropneumatskog razvodnika, modela mernog uređaja kao i njegove dužine. Mogu se podesiti i neke dodatne opcije kao što je korišćenje duplih, dvostrukih mernih sistema i cilindara.

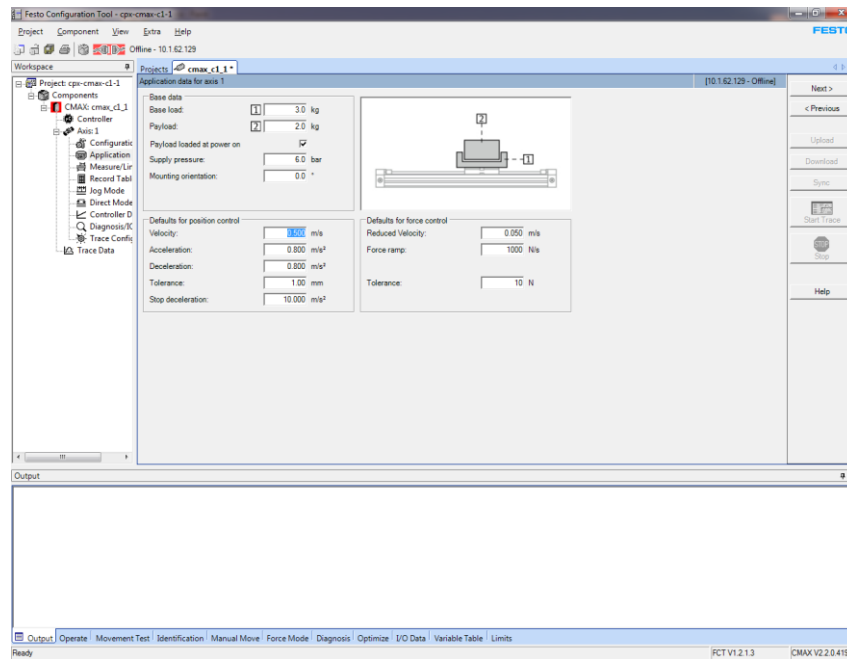
Nasledećem bloku može da se vidi da je izabran cilindar bez klipnjače, dužine 200 mm i prečnika klipa 25 mm, pa je zatim izabran potenciometar kao merni uređaj sa dužinom od 225 mm, i elektropneumatski proporcionalni ventil oznake VPWP-6.

Pri promeni tipa cilindra, oglašice se zaštita u vidu upozorenja i postaviće pitanje da li se sigurno želi promeniti tip cilindra. Potvrđuje se odgovor i nastavlja se dalje.



Klikom na polje *Next* otvoriće se prozor na kojem je moguće upisati radni pritisak sistema, ograničiti brzinu kretanja cilindra, silu koju može dostići kao i naznačiti koju težinu nosi.

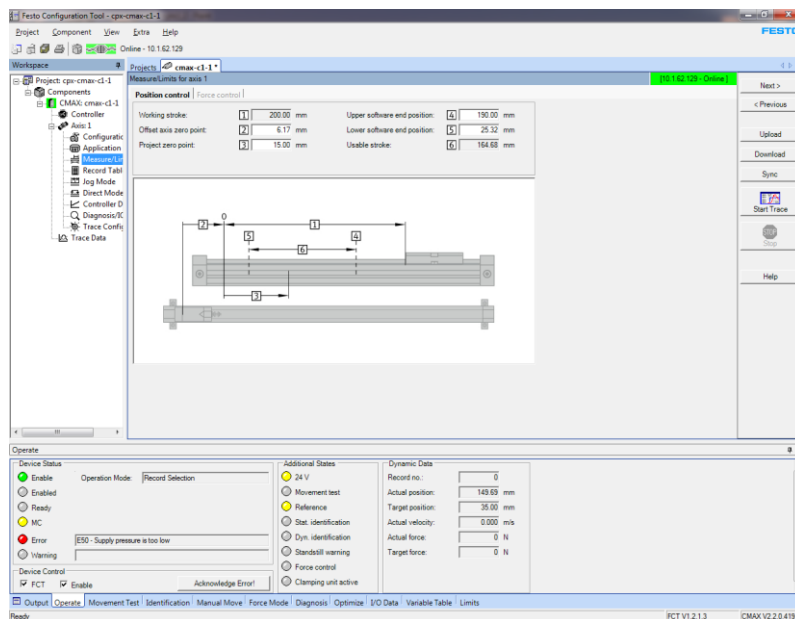
Upisano je da nosi osnovu od 3 kg na koju je zakačen teret (ovde je u pitanju drugi cilindar) od 2 kg, dok je radni pritisak 6 bar, brzina kretanja cilindra je ograničena na 0,5 m/s, ubrzanje i usporenje na 0,8 m/s².



Sledeći radni prozor predstavlja podešavanje radnog hoda cilindra kao i podešavanje početne, referentne tačke merenja.

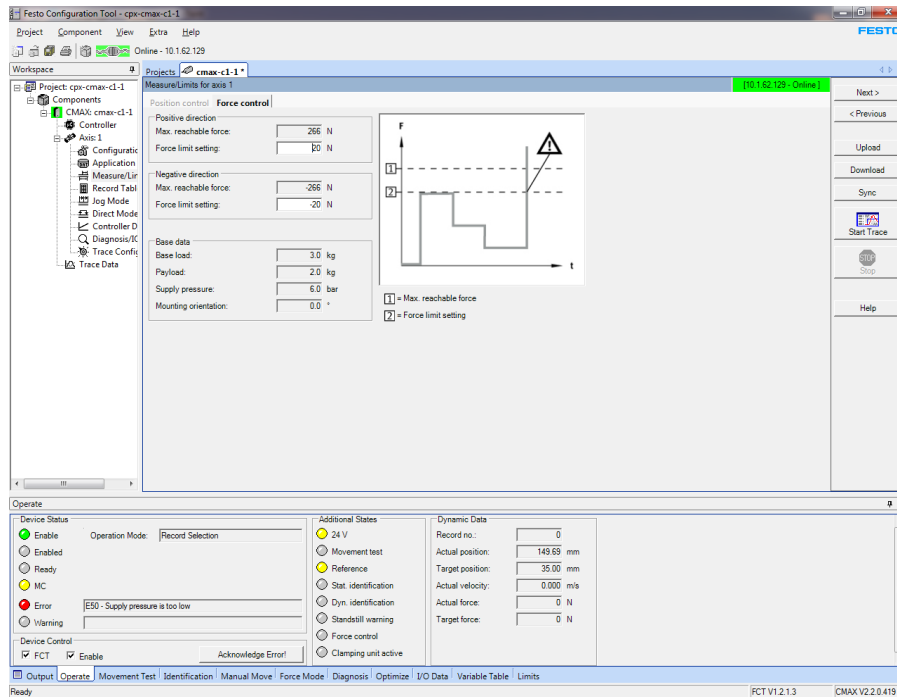
Upisane vrednosti su 6,17 mm offset axis zero point, 15 mm za project zero point, gornja i donja granica su 190 mm odnosno 25,32 mm.

Do ovih vrednosti se došlo tako što je "ručno" vožena klipnjala cilindra (Jog mode).

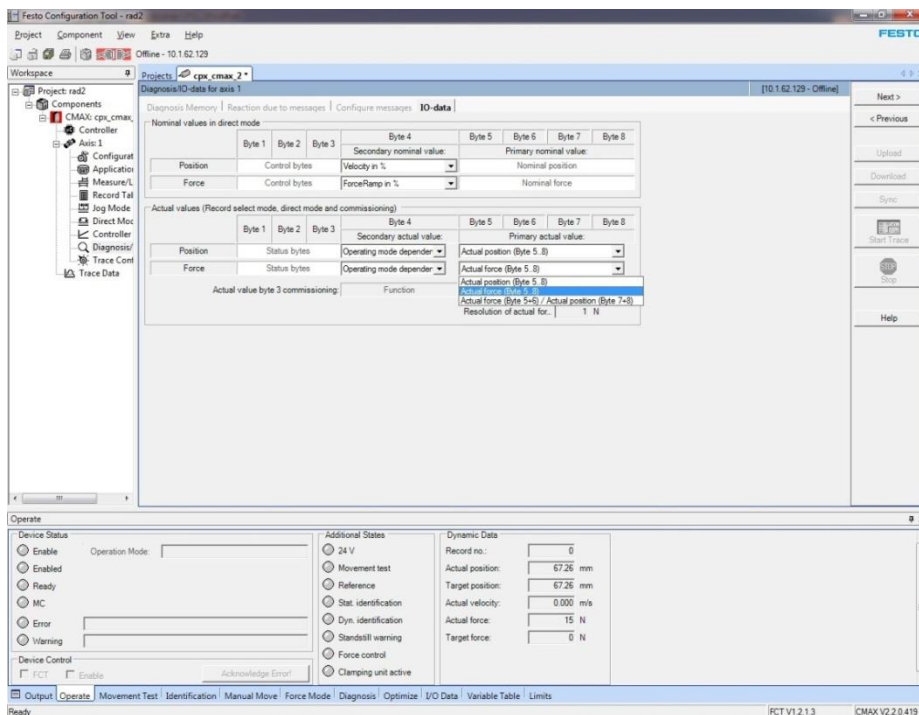


Sledeći prozor je onaj u kome se podešava vrednost sile, tj. ograničenje iste.

Upisana vrednost za gornju granicu sile u pozitivnom i negativnom smeru je 20 N.



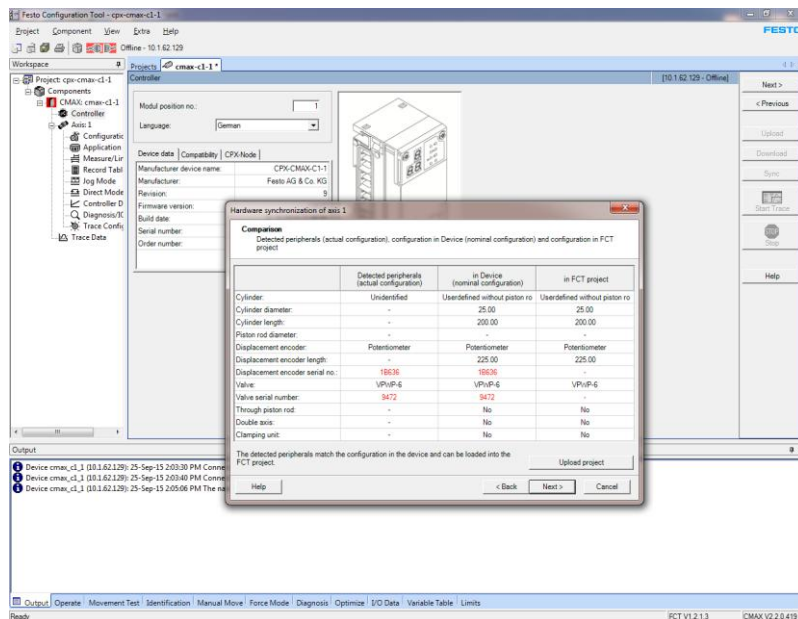
Ono što je takođe važno i biće korisno pri radu u Codesys programskom paketu se nalazi u opciji Diagnosis/IO Data u prozoru koji je nazvan IO - Data. Kod opcije Actual values - Force je bitno prebaciti na Actual force. Ovim prebacivanjem će se prikazivati dejstvo u Njutnima pri kretanju u funkciji sile, u Codesys paketu.



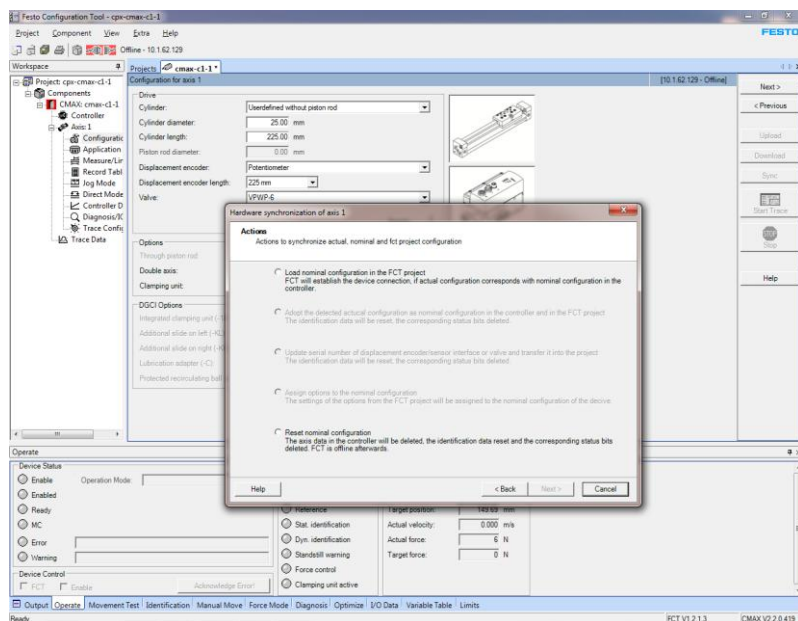
Klikom na Enable Editing se omogućava promena veličina. U okvirenom prozoru Monitoring se može podešiti vrednost kritične granice hoda kretanja cilindra u funkciji sile. Ovo je jedan od načina za otklanjanje greške E.38.

Posle upisivanja ovih podataka klikne se na opciju **Offline** i uloguje se, sa prebacivanjem podataka, na kontroler.

Postoji mogućnost da je već ubačen neki projekat pod nekim drugim imenom. Ako je to slučaj FCT softver će otvoriti novi prozor u kojem pita pod kojim imenom da sačuva projekat. Izabere li se opcija **From project** ubacije se novi projekat, samim tim i novo ime. Nakon toga se otvara novi prozor koji daje informaciju da se nalaze razlike u novom projektu i projektu koji se trenutno nalazi u CPX-CEC kontroleru.



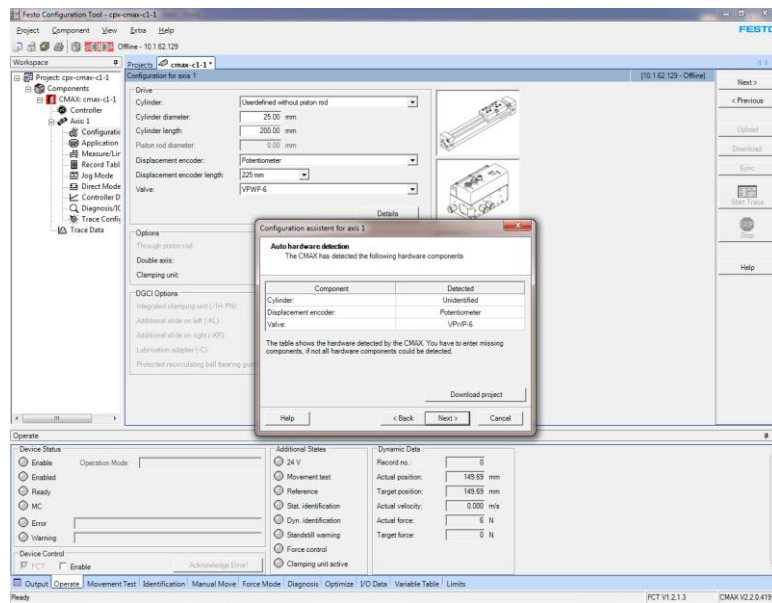
Po pritisku opcije **Upload project**, novi projekat prima sva podešavanja koja su ranije ubačena u CPX-CEC kontroler. Po pritiskanju opcije **next** otvara se sledeći prozor.



Ovde su ponuđene dve moguće varijante. Prva varijanta je resetovanje kompletne konfiguracije koja je prebačena u kontroler dok druga predstavlja delimične izmene kako novog tako i već ubačenog programa.

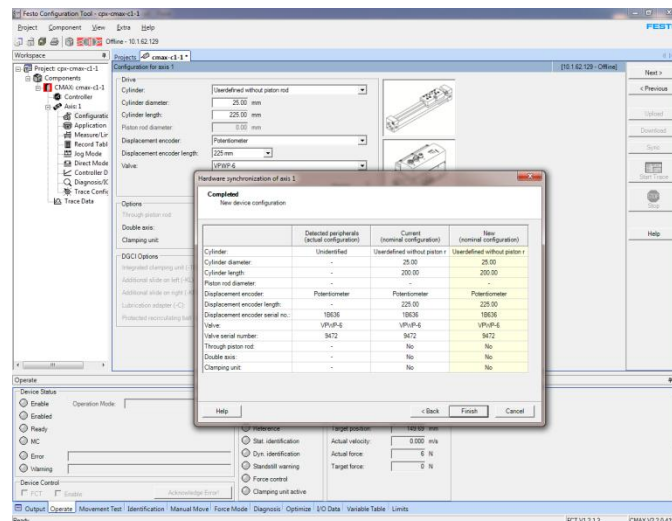
Opcija 1: Ako se izabere Reset nominal configuration, resetuje se postojeća konfiguracija, briše se projekat u CPX-CEC kontroleru i moguće je ponovo uspostaviti vezu klikom na Offline polje. Automatski se otvara prozor upozorenja koji čeka potvrdu za resetovanje podešavanja. Posle potvrdnog odgovora otvara se novi prozor Configuration assistant for axis 1 koji prikazuje detektovanu konfiguraciju od strane CPX-CEC kontrolera.

Može se kliknuti na Download project ako je novopodešena konfiguracija ispravna. Klikom na next polje otvara se novi prozor gde se podešava tip cilindra, potom i njegova dužina kao i prečnik klipa cilindra.

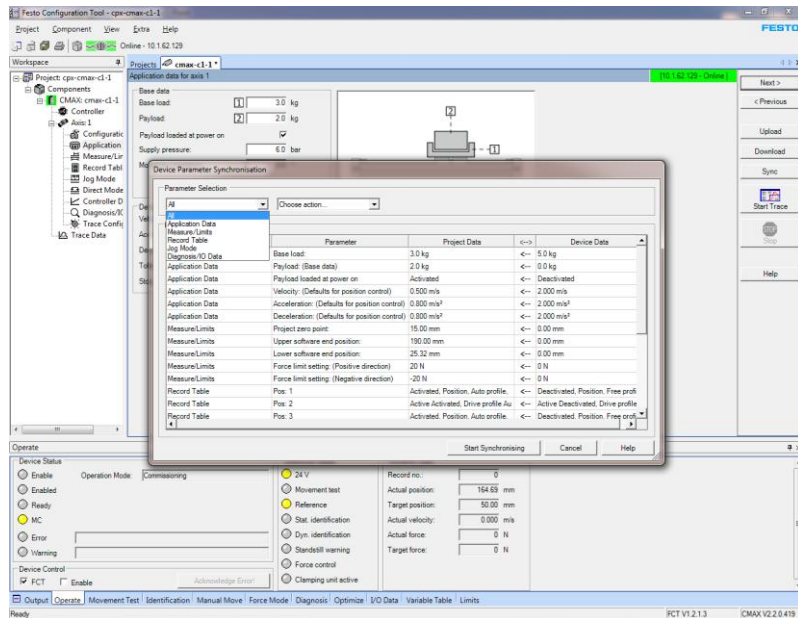


Opcija 2: Ako se izabere Load nominal configuration opcija, otvara se prozor u kojem su ponudene dve mogućnosti izbora:

- a) Complete upload, gde se sva podešavanja iz projekta koja se nalaze u kontroleru nalepe preko podešavanja koja su postavljena u novom projektu,
- b) Only configuration, gde se nalepljuju isključivo vrednosti iz prozora Configuration for Axis 1, kao što je i prikazano.

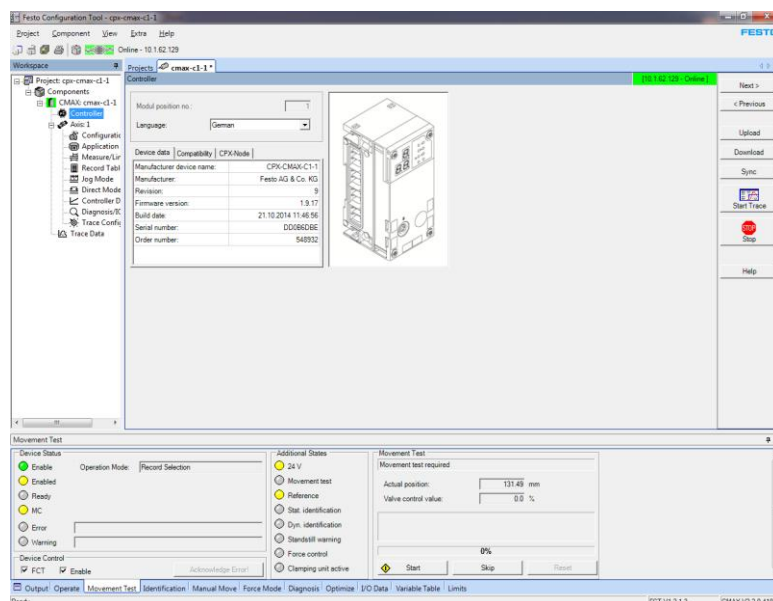


Sa desne strane prozora se nalaze opcije koje služe za sinhronizaciju podataka, praćenje kretanja i zaustavljanje praćenja kretanja. U prozoru je prikazana opcija sinhronizacije sa mogućnošću biranja broja podataka koji se mogu sinhronizovati kao i smer sinhronizacije.



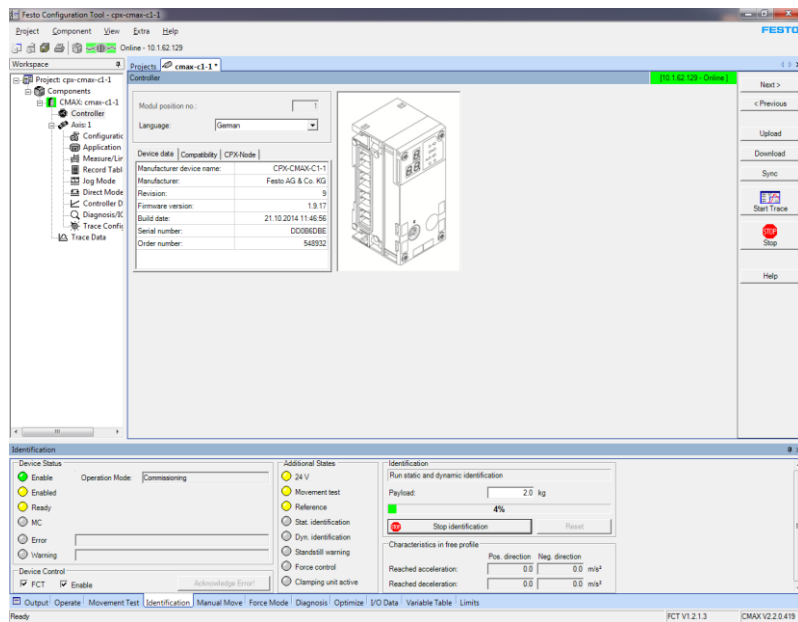
POKRETANJE MANIPULATORA

Po uspostavljanju konekcije i uspešnog prebacivanja programa, pojaviće se sledeći prozor, na kome se vidi zeleno polje u kojem piše Online - IP adresa kontrolera. U donjem prozoru se nalazi malo drugačiji "padajući" meni sa raznim testovima i opcijama (po) kretanja. Da bi se ove opcije mogle koristiti potrebno je odkačiti prozorčice FCT i Enable, u okvirenom polju Device control.

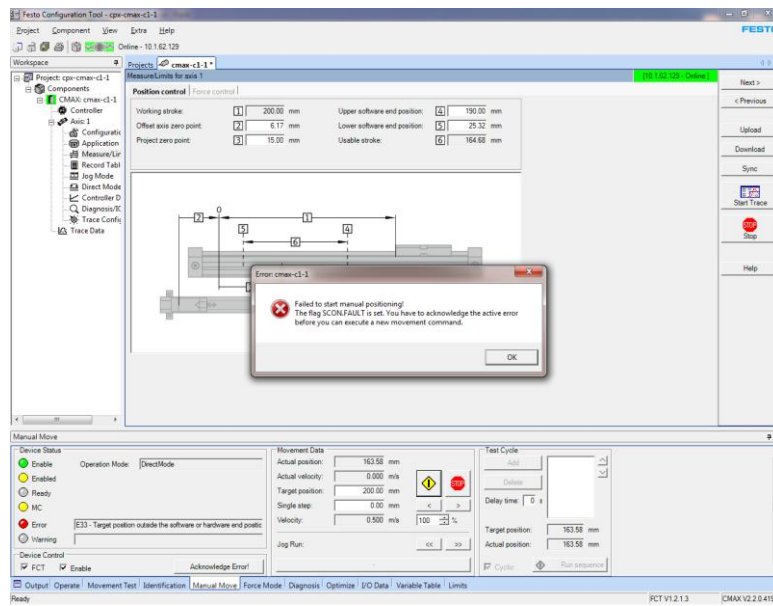


Prvo je potrebno da se izvrši Movement test koji stoji kao treća opcija u donjem meniju. Ako se test završi uspešno, prikazaće se poruka u trećem delu donjeg prozora sa porukama: Movement test executed i Movement test was successful. Ako se test ne završi uspešno, prikazaće broj greške u prvom delu donjeg prozora.

Uzrok greške se može naći u uputstvu - dokumentu koji se može naći na Festo - vom sajtu. Greška se "poništava" klikom na polja Enable, potom na Acknowledge Error, pa opet na Enable (ukoliko se želi nastavak rada). Ukoliko se uzrok greške ne pronade može se pritisnuti opcija Skip, koja se nalazi pored opcije Start movement test. Pošto se završi ovaj test prelazi se na Identification test koji se nalazi kao opcija broj četiri u donjem meniju.

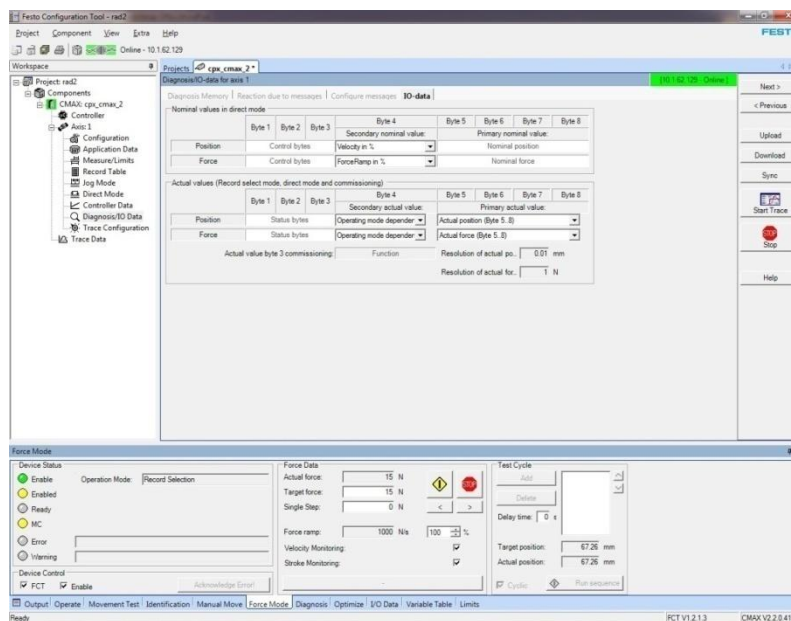


Peta opcija u donjem padajućem meniju je Manual move. U ovom prozoru je moguće "ručno" šetati klipnjaču cilindra po radnoj dužini. U svakom trenutku se može videti "tačna pozicija" cilindra (zavisi od ofseta i nulte tačke merenja). Moguće je podešavati brzinu kretanja u ovom "ručnom" režimu kretanju. Takođe je moguće postaviti neku proizvoljno izabranu tačku i kliknuti na polje žutog romba i gledati kako će se pozicionirati u željenu poziciju (zavisi od vrednosti tolerancije). Ako se napise vrednost koja nije u opsegu softverskih granica radne dužine klipnjače cilindra i pritisne opcija start - žuti romb, javiće grešku, koja je prikazana na sledećem bloku. Ukoliko je položaj klipnjače cilindra izvan zadatih granica, potrebno je upisati vrednost koja se nalazi unutar istih i pokrenuti pozicioniranje.

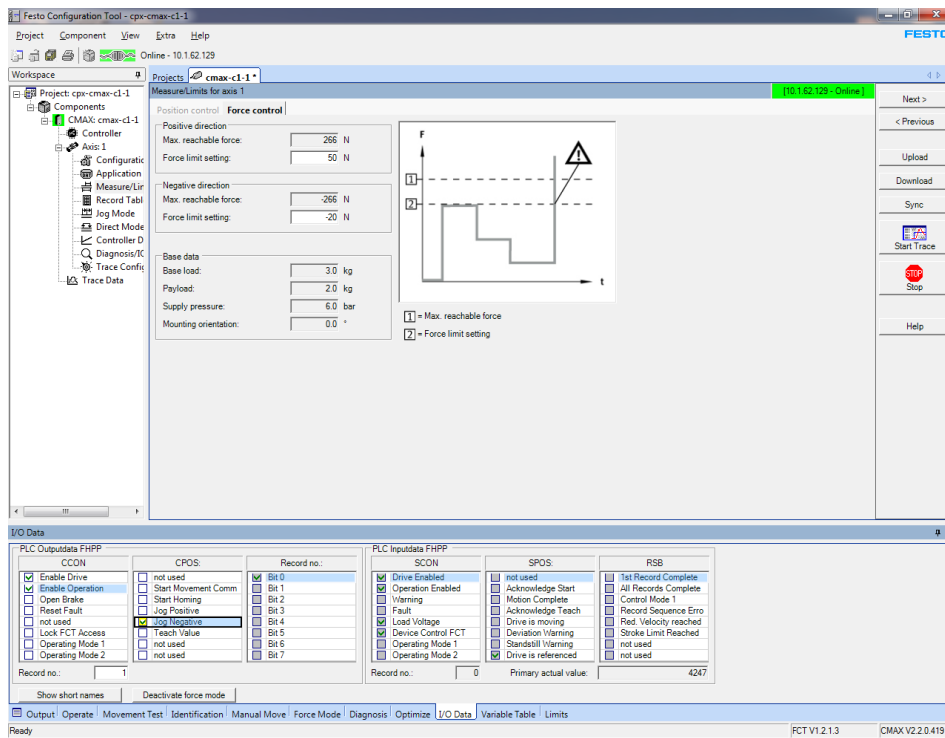


U šestoj opciji Force mode je moguće izvršiti pokretanje manipulatora zadavajući određenu silu koju je potrebno ostvariti, kao i kod kretanja gde se zadaju određene vrednosti za poicioniranje i ovde je potrebno zadati neku vrednost sile. Naravno, one moraju biti unutar zadatih granica, podešenih od strane korisnika, koje se mogu dodatno prepraviti. Kada se napiše određena veličina sile i pritisne žuti romb tada će klipnjača cilindra početi da se kreće sve dok ne dostigne tu veličinu. Zadavanje veličine može biti sa pozitivnim predznakom i tada će se klipnjača cilindra kretati u porastu koordinate ili sa negativnim predznakom, kada će se kretati suprotno - ka nižim vrednostima koje daje merna letva.

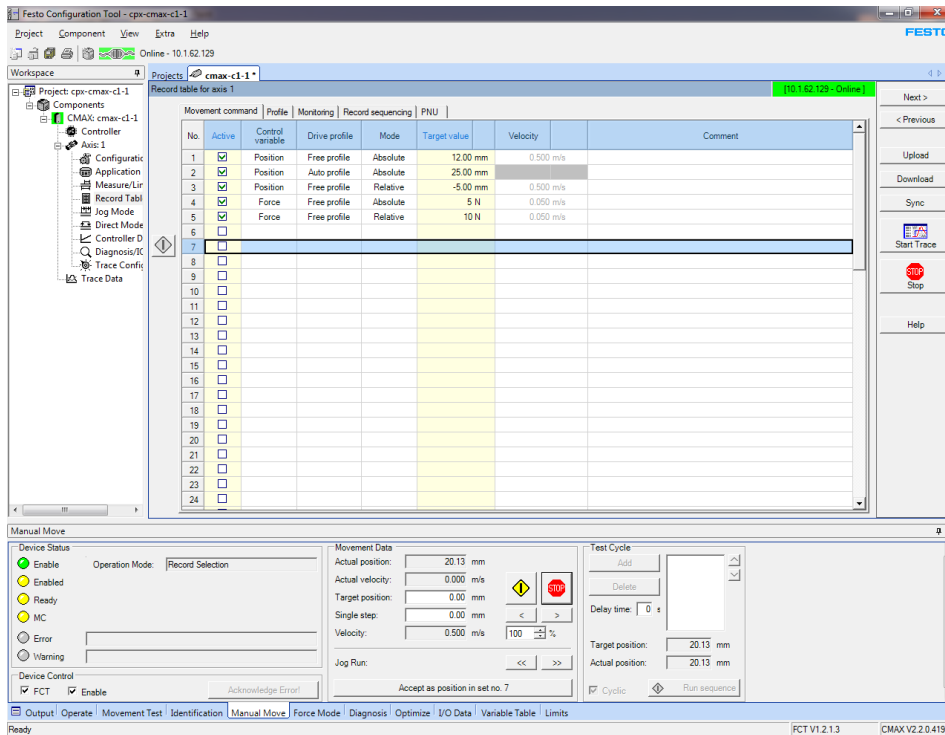
Na sledećem blok dijagramu je prikazana dostignuta vrednost od 15 N.



U opciji I/O Data u donjem padajućem meniju je moguće koristiti manipulator na mnogo opštiji način. Klikom na Activate force mode, otvaraju se razne mogućnosti za upravljanje manipulatorom. Na blog dijagramu je prikazano Jog kretanje u levu stranu.



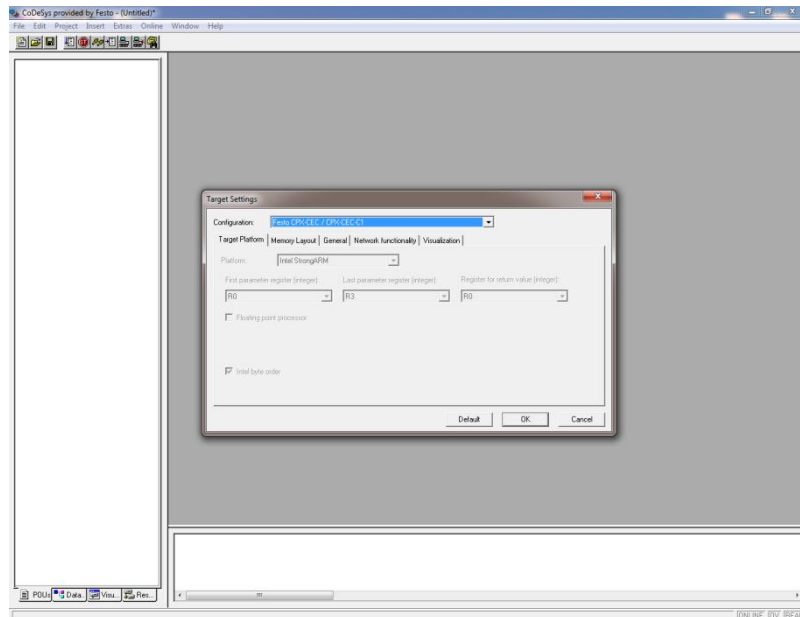
Na sledećem bloku su prikazani mogući načini zadavanja pozicije i sile. Mogućnost kretanja po poziciji, slobodnim profilom kretanja (proizvolja brzina kretanja, vrednost podešena po softverskom default - u, kasnije u Codesys programu je moguće eksplicitno postavljanje ove veličine) ili auto profilom (vrednost brzine i ubrzanja je podešena od strane korisnika), sa apsolutnim ili relativnim koordinatnim sistemom. Mogućnost kretanja po sili se može zadati samo sa apsolutnim ili relativnim mernim sistemom.



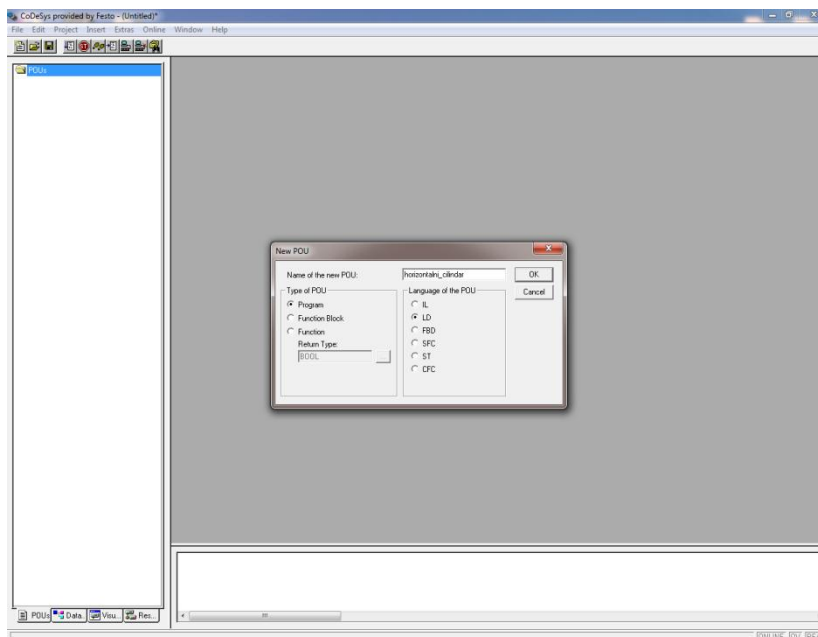
Uputstvo za korišćenje CPX - CEC kontrolera i CPX – CMAX - C1 osnog kontrolera u Festo programskom paketu Codesys v2.3

- DEFINISANJE PROGRAMA:

Prilikom prvog pokretanja softvera Codesys v2.3 automatski se otvara novi prozor sa gde je neophodno uneti određeni target, u našem slučaju je potrebno izabrati CMAX - C1 target. Ukoliko nije instaliran određeni target se neće se pojaviti kao opcija koju je moguće izabrati.

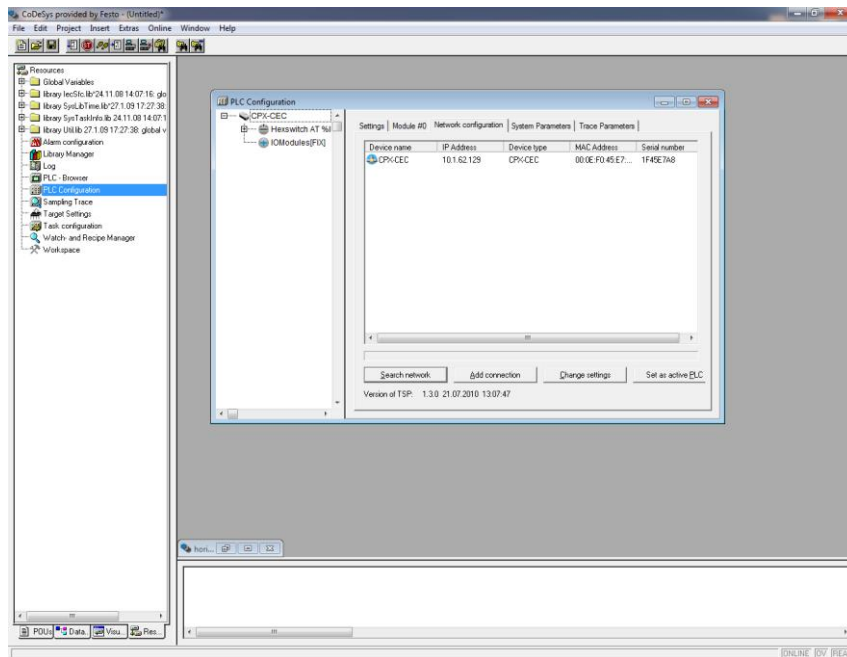


Klikom na OK, otvara se novi prozor sa mogućnošću izbora oblika POU - a (Programska organizaciona jedinica) i njegovog programskog jezika.

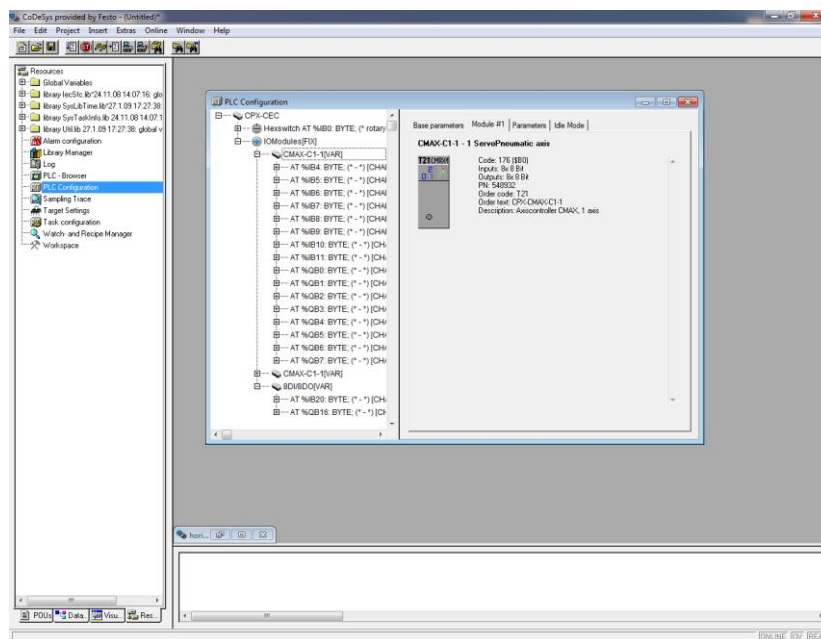


Sa leve strane se nalazi organizacioni prozor koji se sastoji od četiri polja: POU, Data, Visualisation, Resources.

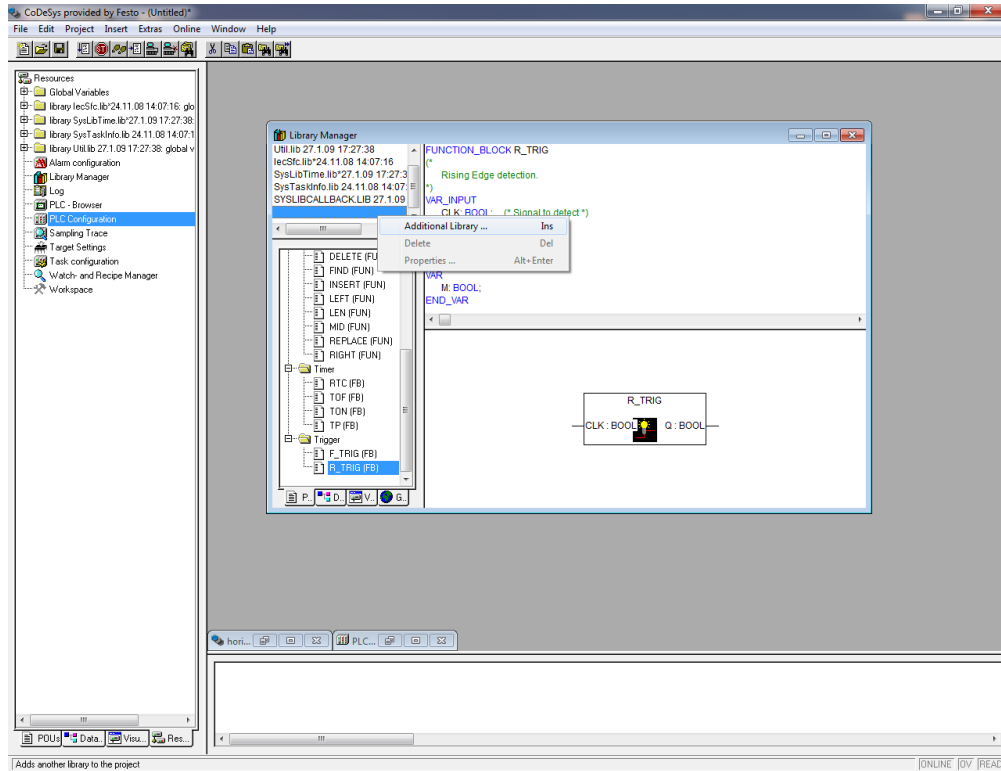
Prvi sledeći korak je aktiviranje CPX kontrolera. Klikom na polje Resources pronade se opcija PLC Configuration. Dvoklikom na tu opciju, otvara se prozor pod istim imenom, gde je potrebno kliknuti na polje Network configuration, u njegovom padajućem meniju. Pronalaženje kontrolera je moguće uraditi na dva načina: prvi način - klikom na Scan network gde se proverava i prikazuje svaki uređaj koji je na mreži, i drugi način - klikom na Add connection, gde se ukucava odgovarajuća IP adresa traženog kontrolera. Potom se klikne na polje Set as active PLC.



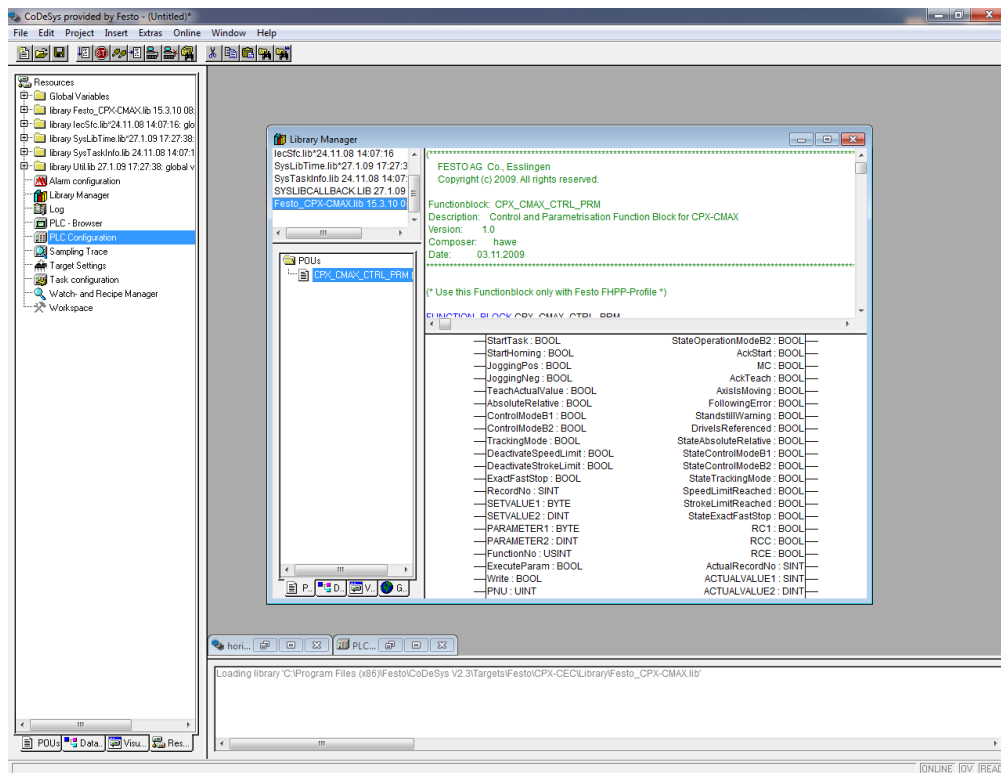
Pošto se aktivira kontroler, neophodno je uraditi pretraživanje uređaja koji su spojeni sa glavnim kontrolerom. To se radi na sledeći način: desnim klikom se klikne na polje IO Modules koji se nalazi sa leve strane PLC Configuration prozora. Nakon toga se klikne na opciju Scan module configuration. Svi uređaji koji su spojeni sa CPX - CEC kontrolerom se pojavljuju, kao što je prikazano na sledećem blog dijagramu.



Sledeći korak je ubacivanje CMAX biblioteka. To se radi otvaranjem Library Manager - a. U gornjem levom uglu se klikne desnim klikom na prazno polje i izabere se Additional library opcija. Tražena biblioteka je Festo_CPX-CMAX.



Izgled biblioteke CPX – CMAX:

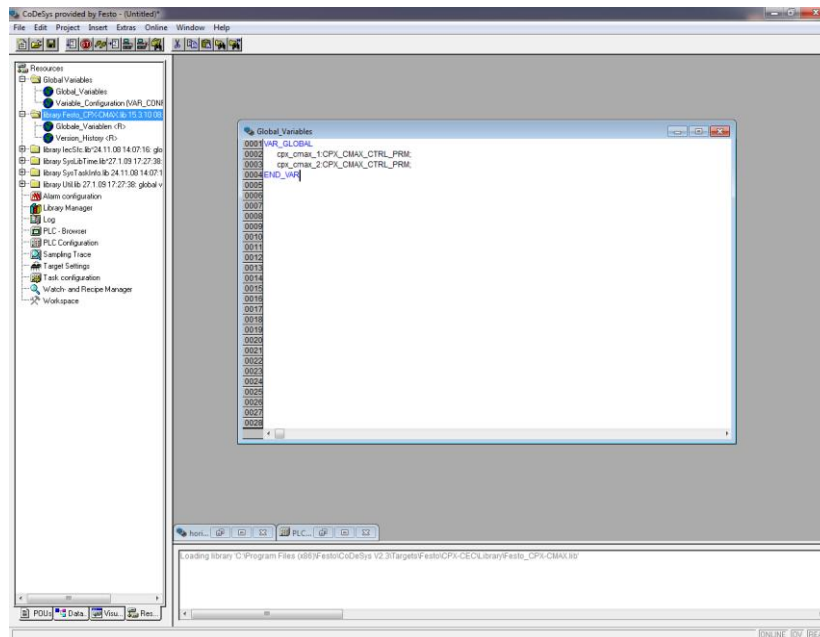


DEFINISANJE PROGRAMA:

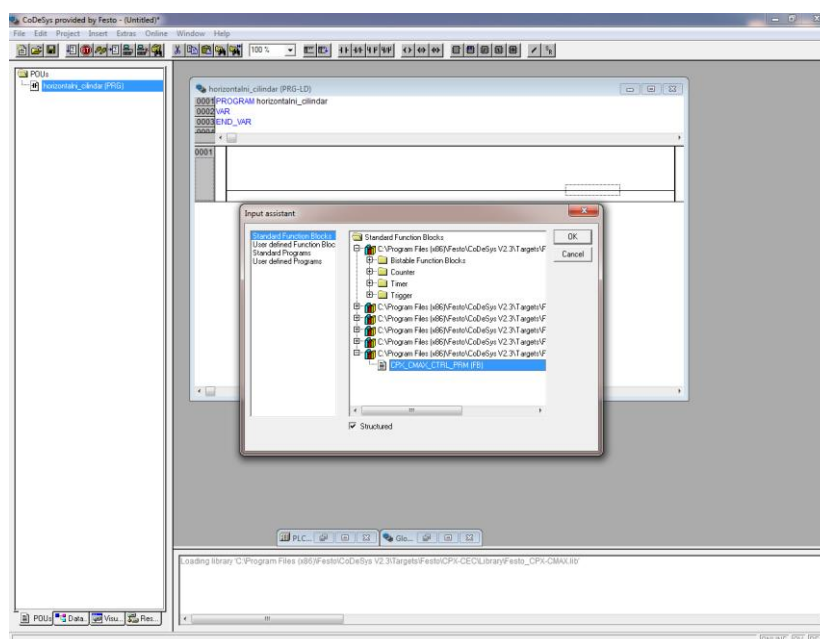
Postoje dva načina definisanja programa. Prvi, definisanje potprograma i njegovo pozivanje, i drugi - bez potprograma. Oba načina su prikazana.

Prvi način:

Pošto se uspešno ubaci biblioteka, potrebno je deklarirati globalne promenljive. Otvaranjem opcije Global variables u istoimenom folderu je potrebno sledeće napisati: (ime_neke_varijable):CPX_CMAX_CTRL_PRM;



Potom je potrebno vratiti se u POU prozor, i otvoriti program. Desnim klikom na lestvičast dijagram, izabere se opcija Function block. Otvara se prozor na kojem je potrebno izabrati Standard function blocks u levom delu prozora, i u folderu Library\Festo_CPX-CMAX.lib - CPX_CMAX_CTRL_PRM u desnom delu prozora.

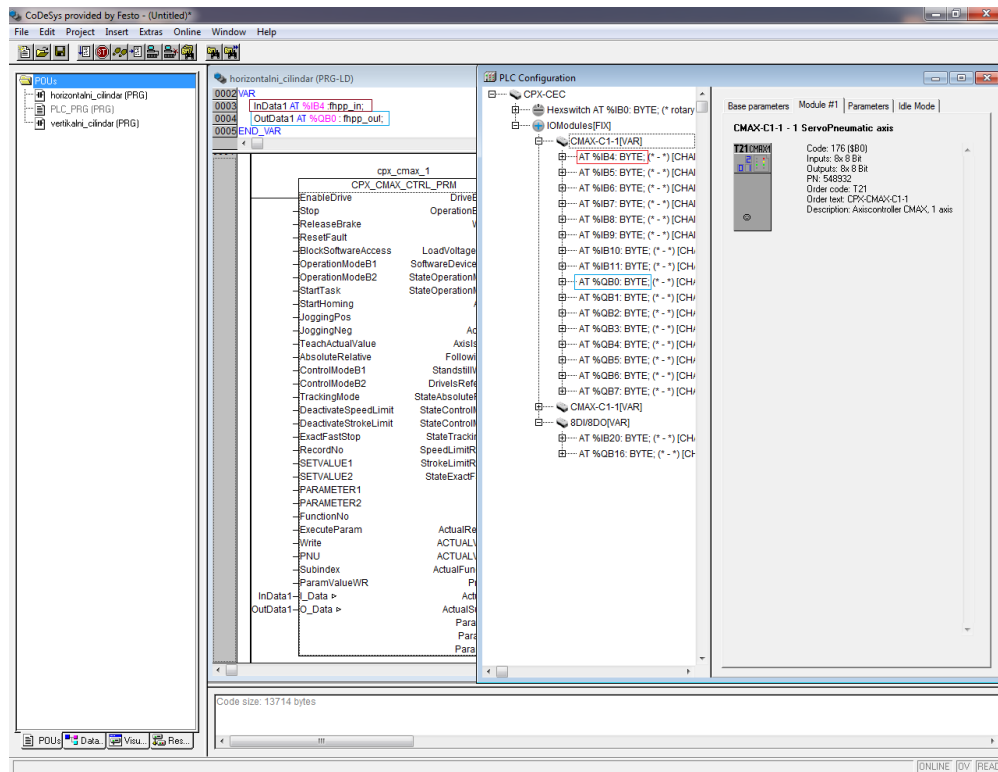


Nakon toga je potrebno otvoriti PLC configuration i videti adrese ulaznih i izlaznih promenljivih. Moraju se upisati dve varijable - ulazna i izlazna, koje su na "prvim" adresama, i to na sledeći način:

(ime_promenljive) at (adresa_ulazne_promenljive) : fhpp_in;

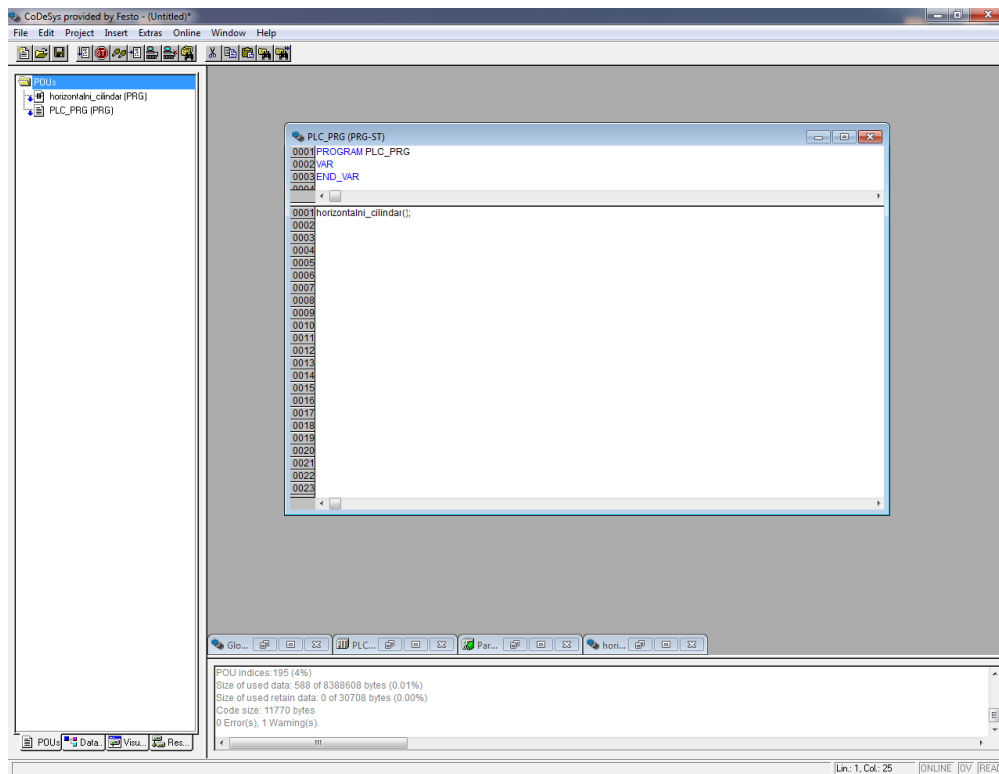
(ime_promenljive) at (adresa_izlazne_promenljive) : fhpp_out;

Nakon toga je potrebno povezati te promenljive sa ulazima odnosno izlazima na bloku u lederu.



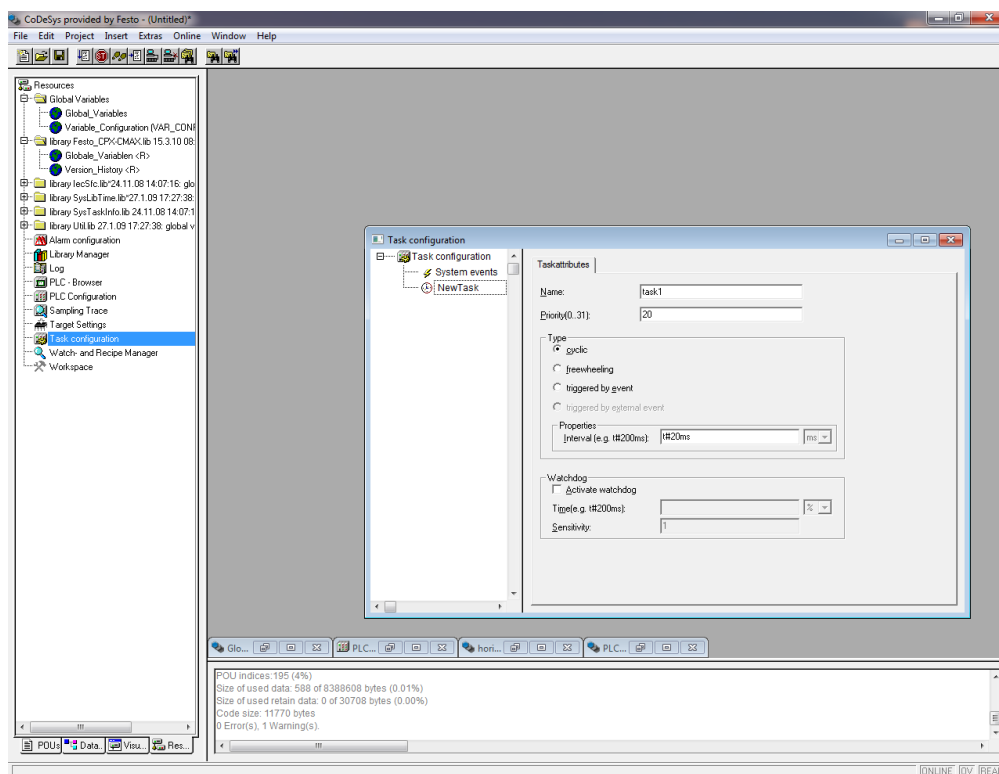
Sada je potrebno napraviti novi, glavni program koji će nositi ime PLC_PRG, i pozivati ovaj sa CMAX funkcijom.

Isti je princip dodavanja programa. U delu gde se kuca program je potrebno pozvati ranije napravljeni potprogram npr. Horizontalni_cilindar. Pozivanje je prikazano na blok dijagramu koji seldi.



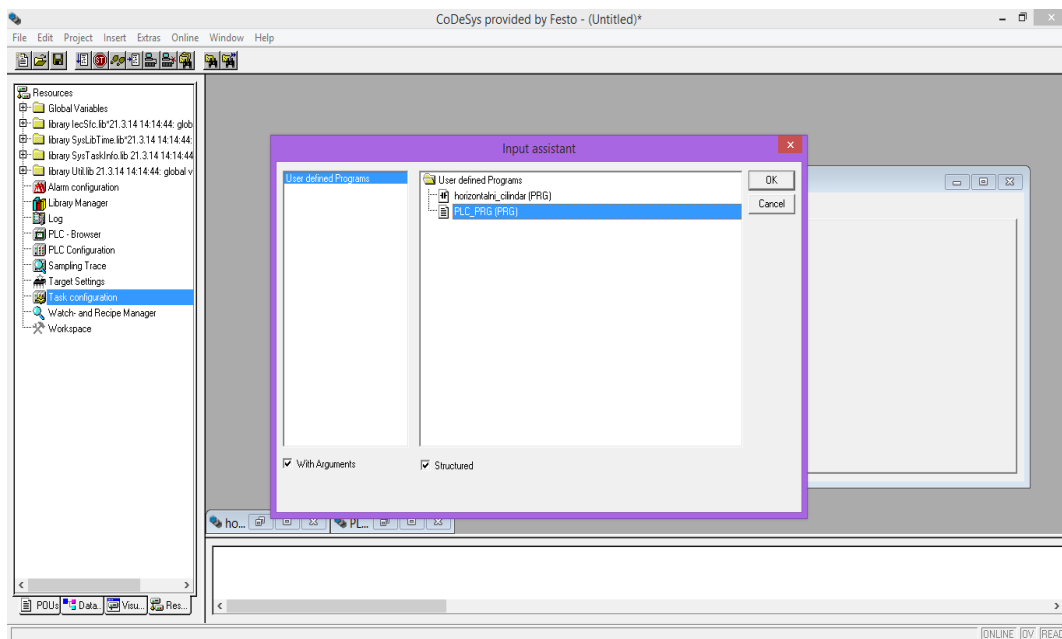
Ako se na ovaj način poziva ime potprograma će biti prozirno, i neće biti pozivano u glavnom programu.

Da bi se to omogućilo potrebno je uraditi sledeće: otvortiti Task configurator u Resources meniju. Desnim klikom na Task configuraton u otvorenom prozoru izabrati Append task.



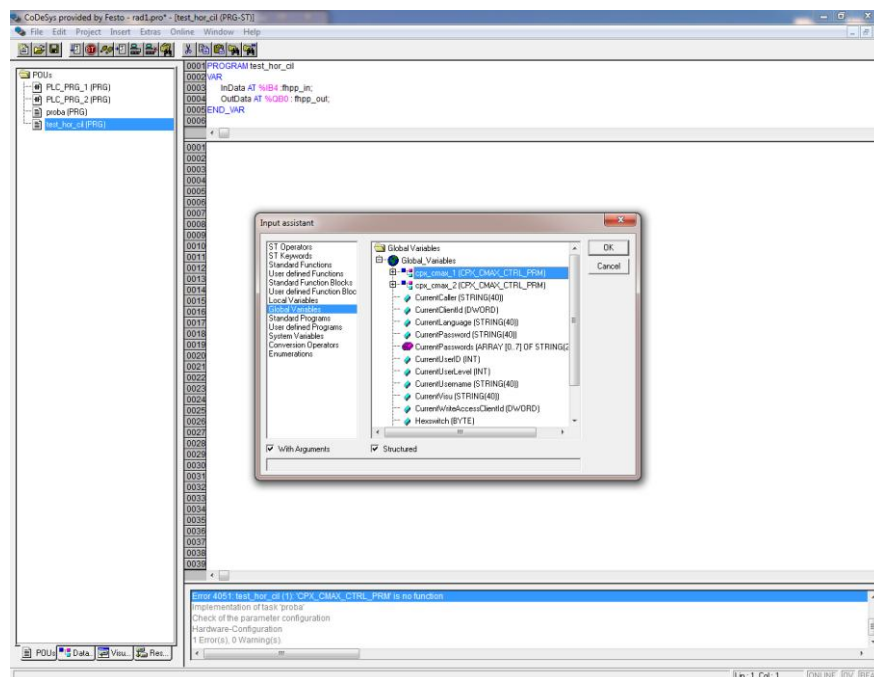
U ovom prozoru je najvažnije postaviti vreme, vreme po kojem će se task izvršavati ciklično, ime i prioritet u ovom slučaju nisu značajni. Potom desnim klikom na napravljeni

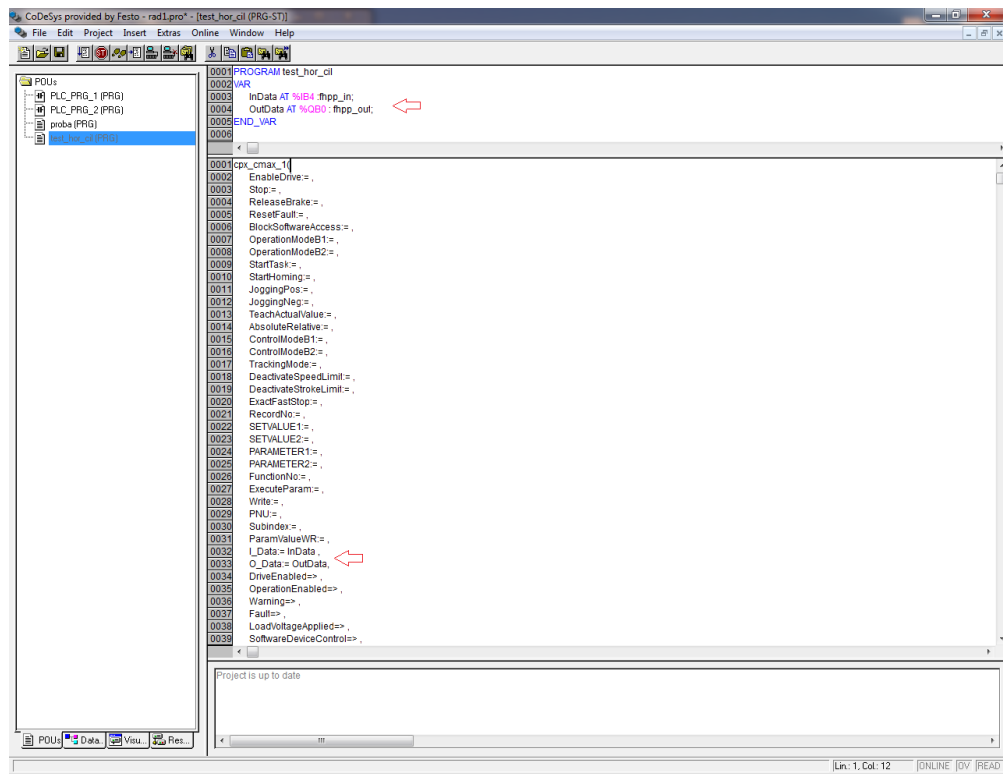
task birati Append program call. U tom prozoru je potrebno napisati ime glavnog programa tj. programa koji poziva druge programe, u ovom slučaju to je PLC_PRG.



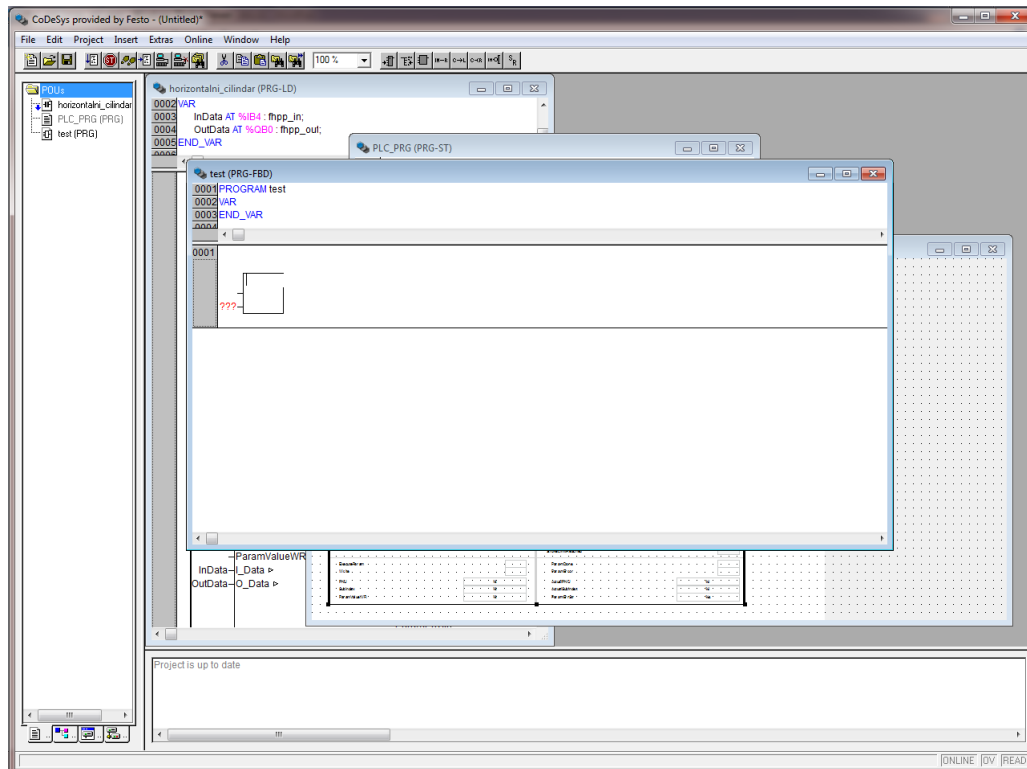
Program koji sadrži funkcionalni blok uopšte ne mora biti napisan u leder dijagramu. Slede primeri za pozivanje CPX-CMAX funkcijskog bloka u jeziku liste izjava (Statement list - ST) i u funkcijskom blok dijagramu (FBD).

Po kreiranju novog programa u jeziku liste izjava, u delu prozora predviđenom za pisanje programa, klikne se desnim klikom i izabere opcija Input assistant. Potom se izabere određena promenljiva, u ovom slučaju to je CPX_CMAX_1. Kada se izabere, klikne se na OK. Na kraju je potrebno povezati ulaznu i izlaznu promenljivu za funkcijski blok, kao što je prikazano na blog dijagramu ispod.



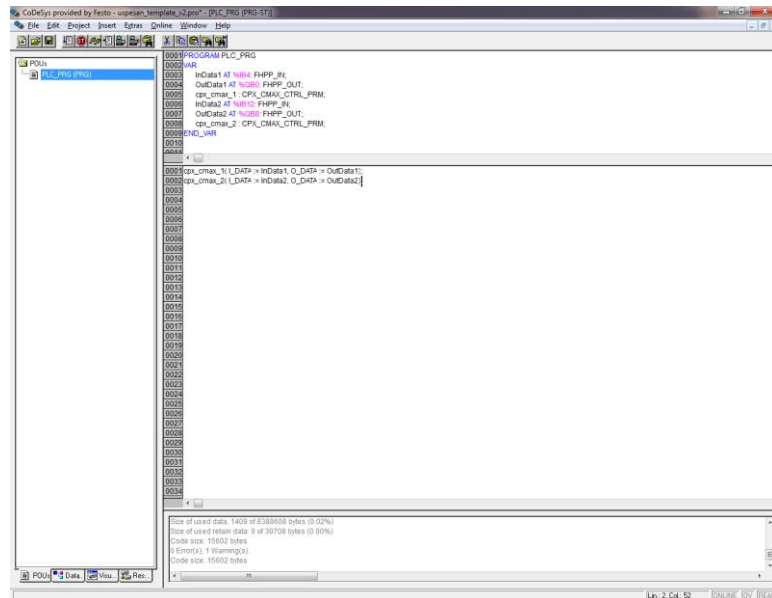


U FBD jeziku se izabere opcija Box, desnim klikom na polje 0001. U nazivu praznog bloka treba upisati cpx_cmax_ctrl_prm i pritisnuti enter. Potom, nazvati taj blok onim imenom iz globalnih promjenljivih, pa povezati ulazne i izlazne promjenljive i obrisati znake upitnika koji su ostali nepovezani.



Drugi način:

U POU se napravi (novi) program. U gornjem delu programa, gde se definišu promenljive, definišu se prva ulazna i prva izlazna promenljiva, kao i funkcija iz istoimene biblioteke CPX_CMAX_CTRL_PRM. Nakon toga je potrebno deklarirati CPX_CMAX funkciju.

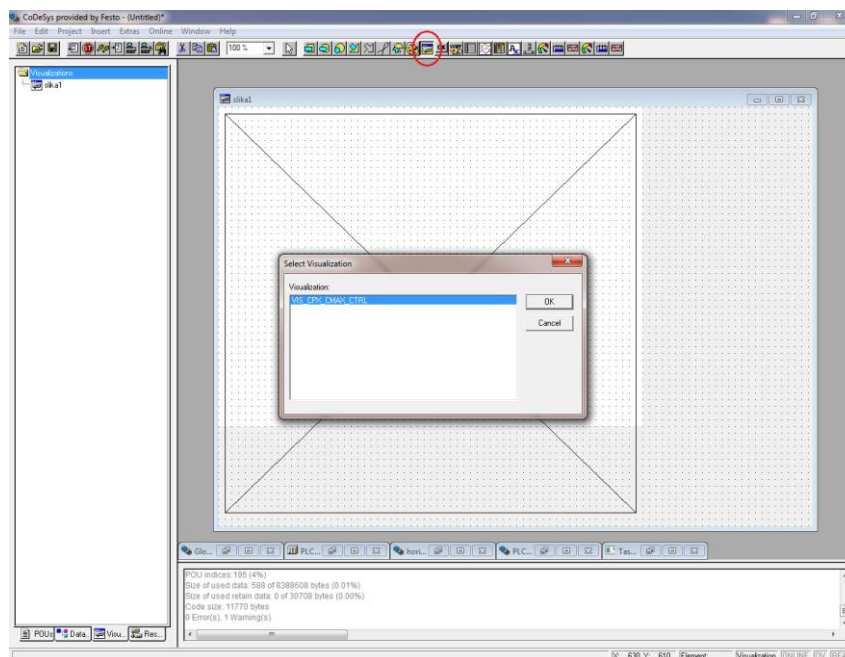


Nakon ovoga je moguće dodati druge promenljive i pisati program.

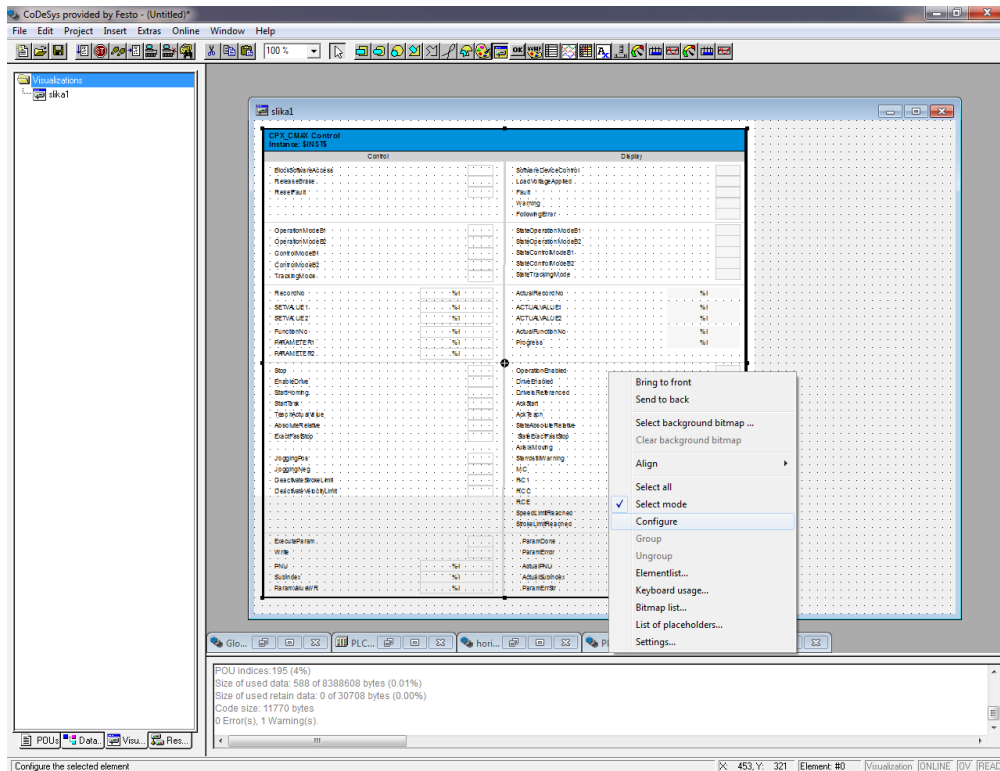
VIZUELIZACIJA:

Vizuelizacija programa se pravi na sledeći način: klikom na polje Visualisation u "padajućem" meniju, pa desnim klikom na istoimeni folder birati Add object. Nakon toga joj je neophodno dodeliti ime.

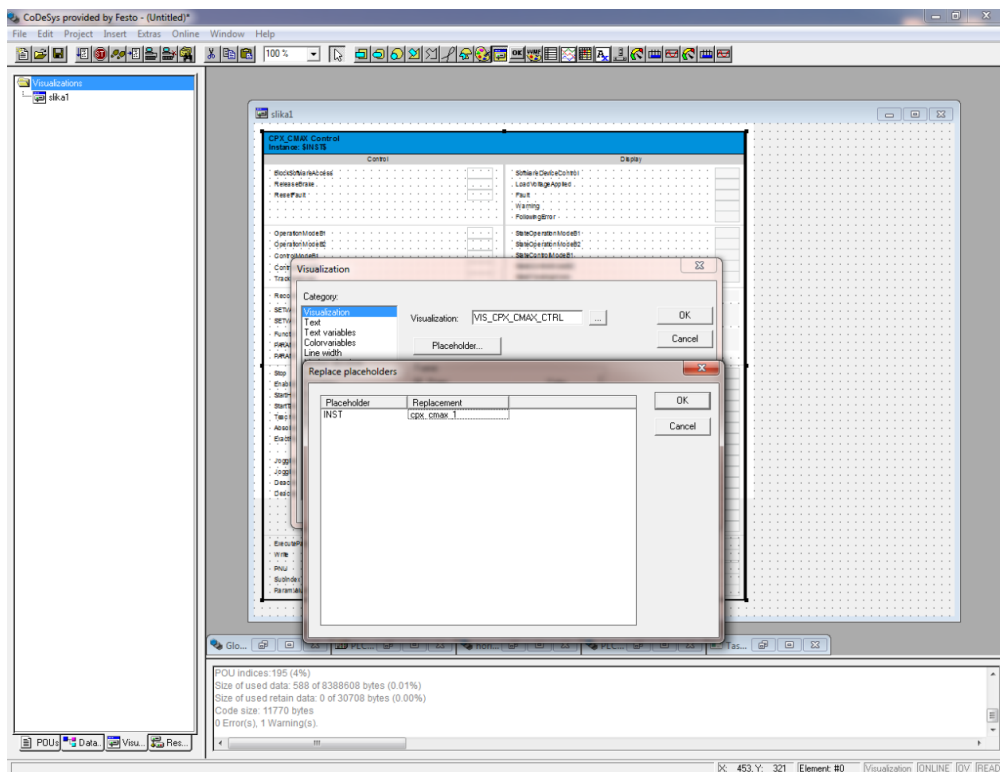
Na praznom prozoru je potrebno kliknuti na Visualisation opciju koja je prikazana na slici, i razvući je po prozoru na željenu površ.



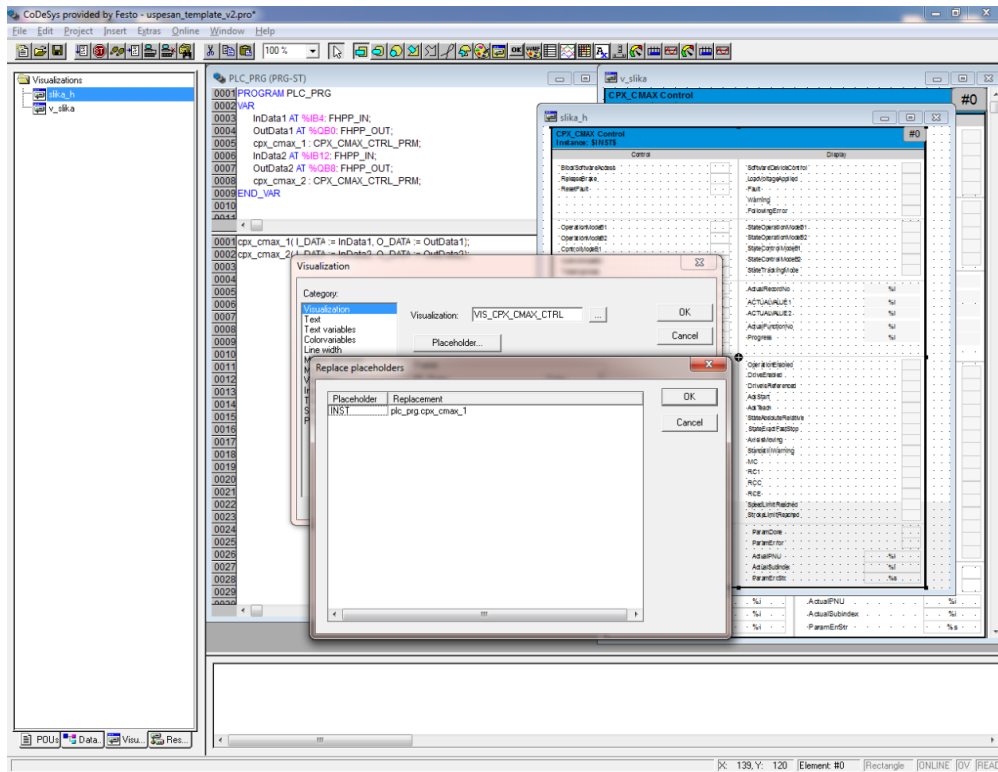
Na već napravljenoj slici kliknuti desnim klikom, i izabrati opciju Configure.



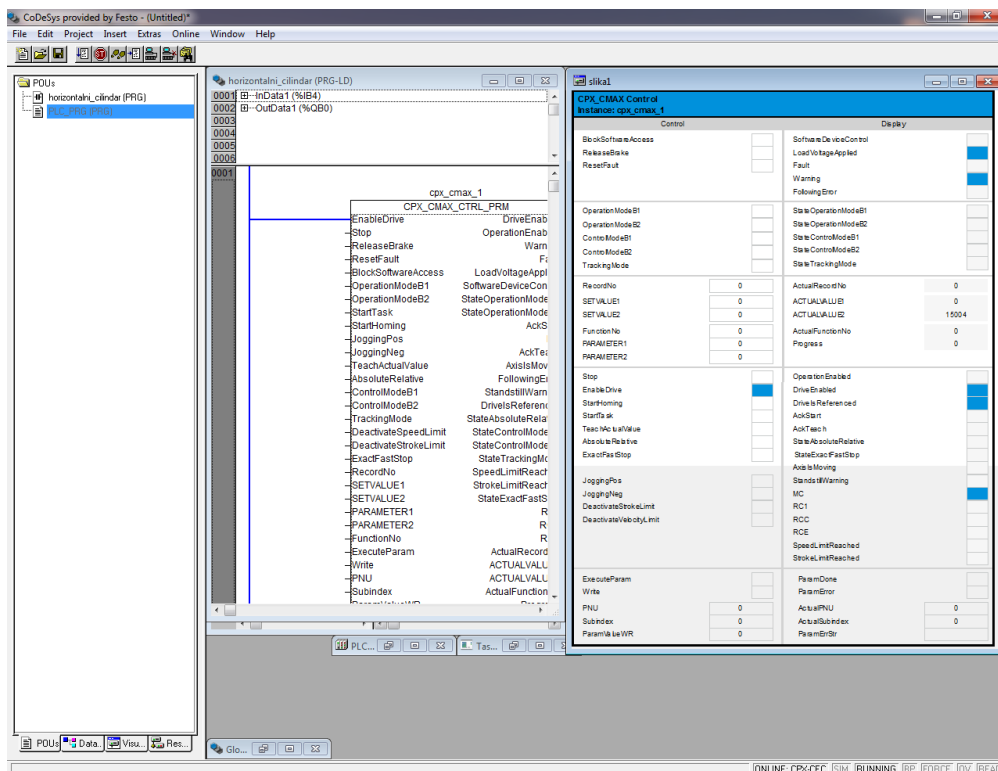
U prozoru podešavanja vizuelizacije kliknuti na polje Placeholder. U polju Replacement, u novootvorenom i istoimenom prozoru je potrebno navesti ime promenljive kojom je nazvana funkcija CPX_CMAX, kao i "lokaciju" definicije biblioteke CPX_CMAX.



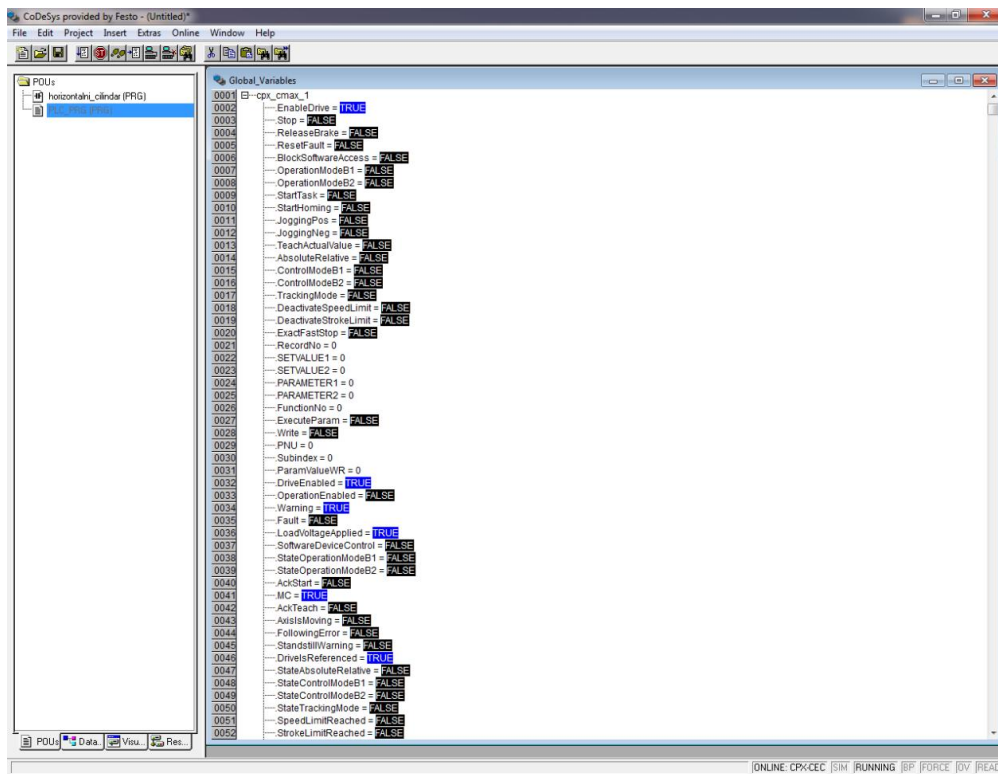
CPX_CMAX se nalazi u globalnim varijablama (cpx_cmax_1), način prvi



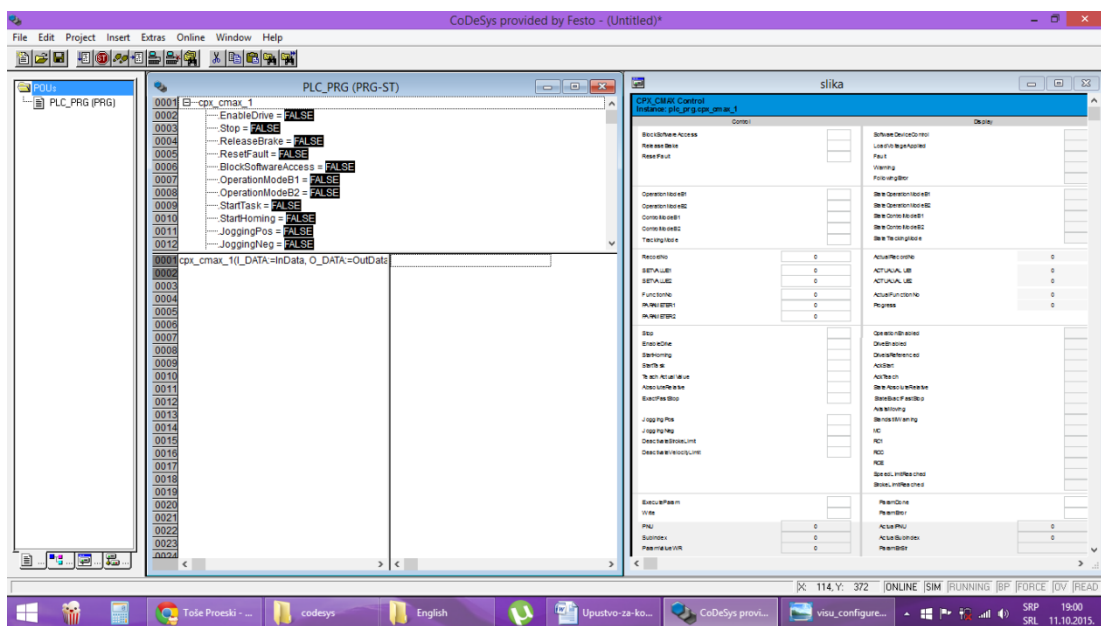
CPX_CMAX se nalazi u PLC_PRG programu (plc_prg.cpx_cmax_1), način drugi Sada je moguće pokrenuti program, prvo Build-om, potom sa Login-om.



PC je povezan sa kontrolerom, prikazan je prvi način definisanja programa



Prikaz globalne promenljive cpx_cmax_1 po ulogovanju, prvi način definisanja programa



PC je povezan sa kontrolerom, prikazan je drugi način definisanja programa

POKRETANJE MANIPULATORA:

CPX-CMAX-C1 osni kontroler ima 6 radnih mogućnosti/operacija:

- 1) Record mode - kontroler ima mogućnost da zapamti 64 tačke tj. pozicije i da ih koristi u programu. Kreće se u funkciji pozicije.
- 2) Direct mode, position control - free profile - kontroler ne može koristiti tačke koje je zapamtio, već korisnik mora da mu eksplicitno navede u kojoj tački želi da dovede klip. Nema mogućnosti podešavanja brzine kretanja klipa. Klip se kreće brzinom koja je podešena u parametrizaciji.
- 3) Direct mode, position control - auto profile - slično kretanje gorenavedenom, osim što je ovde omogućena regulacija brzine kretanja klipa.
- 4) Direct mode, pressure/force control - kretanje je u funkciji sile. Korisnik zadaje određenu silu, koju želi da ostvari na klipu. Moguća je regulacija brzine kretanja klipa.
- 5) Parametrisation - parametrizacija, podešavanje regulatora. Ova opcija se koristi kada se ne, najpre, iskoristi FCT softver. U suprotnom je nema potrebe koristiti.
- 6) Commissioning - sistemska provera. Ocenjuje se rad i stanja radnih elemenata, pripremne jedinice, proveravaju se priključci, slanje i primanje signala itd. Postoje dva testa Movement i Identification test. Oba se mogu odraditi i u FCT softveru.

1. Record mode

Uključuje se postavljanjem na jedinicu ili klikom na simulacioni blok na sledeće promenljive: Stop, EnableDrive. Mora se postaviti vrednost od 1 do 64 u polju RecordNo. Na displeju kontrolera će pisati 2.00. Broj 2 označava Record mode, dok brojevi 00 ozvačavaju trenutnu vrednost u polju RecordNo.

Pozicija se pamti na sledeće način: Klip se dovede u neki položaj, bilo rukom ili Jog kretanjem. Klikne se na TeachActualValue tj. postavi se na jedinicu, i potom se ponovo kline i postavi na nulu. Trenutak pamćenja pozicije je na silaznu ivicu. U tom trenutku će se na displeju osnovog kontrolera prikazati simbol malog slova t i ispod njega vrednost od 1 do 64, tj. onu koja je napisana u RecordNo. Nije moguće uticati na brzinu kretanja klipa, odnosno klip će se kretati brzinom koja je napisana u parametrizaciji u FCT programu. Po snimanju je potrebno promeniti broj (u RecordNo) koji je zapisan, u suprotnom će kontroler presnimiti tu poziciju.

Kada se obave neophodna snimanja, piše se program i koriste se numerisane pozicije. Kretanje klipa se postiže postavljanjem na jedinicu StartTask. Kretanje se vrši na uzlaznu ivicu, te je potrebno za svaki sledeći korak spustiti istu. Naravno, kretanje se može obaviti i preko vituzelnog bloka, klikom na StartTask i, predhodno, postavljanjem određene vrednosti u polju RecordNo. Tačan položaj klipa se može videti na polju Actualvalue2.

Napomena: Pri korišćenju oba cilindra važno je da nema preklapanja u pozicijama, npr. cilindar 1 i cilindar 2 ne smeju imati istu poziciju!

primer:

CASE korak OF

0: IF cpx_cmax_2.LoadVoltageApplied THEN

cpx_cmax_2.OperationModeB1 := FALSE;

cpx_cmax_2.OperationModeB2 := FALSE;

cpx_cmax_2.ControlModeB1 := FALSE;

cpx_cmax_2.ControlModeB2 := FALSE;

cpx_cmax_2.EnableDrive := TRUE;

IF cpx_cmax_2.DriveEnabled THEN

cpx_cmax_2.Stop := TRUE;

IF cpx_cmax_2.OperationEnabled THEN

korak := 1;

END_IF

END_IF

END_IF

1: IF NOT cpx_cmax_2.StateOperationModeB1 AND

NOT cpx_cmax_2.StateOperationModeB2 AND

NOT cpx_cmax_2.StateControlModeB1 AND

NOT cpx_cmax_2.StateControlModeB2 THEN

korak := 2;

END_IF

2: IF cpx_cmax_2.DriveIsReferenced THEN

korak := 3;

ELSE cpx_cmax_2.StartHoming := TRUE;

IF cpx_cmax_2.DriveIsReferenced THEN

cpx_cmax_2.StartHoming := FALSE;

korak := 3;

END_IF

END_IF

3: cpx_cmax_2.RecordNo:=1;

IF NOT cpx_cmax_2.AckStart THEN

cpx_cmax_2.StartTask := TRUE;

korak := 4;

```

END_IF
4: IF cpx_cmax_2.AxisIsMoving AND
NOT cpx_cmax_2.MC THEN
cpx_cmax_2.StartTask := FALSE;
korak := 5;
END_IF
5: IF cpx_cmax_2.MC THEN
cpx_cmax_2.RecordNo := 2;
korak := 6;
END_IF
6: IF NOT cpx_cmax_2.AckStart THEN
cpx_cmax_2.StartTask := TRUE;
korak := 7;
END_IF
7: IF cpx_cmax_2.AxisIsMoving AND
NOT cpx_cmax_2.MC THEN
cpx_cmax_2.StartTask := FALSE;
korak := 8;
END_IF
8: IF cpx_cmax_2.MC THEN
korak := 2;
END_IF
END_CASE

```

2) Direct mode, position control - free profile

Uključuje se postavljanjem na jedinicu ili klikom na simulacioni blok na sledeće promenljive: Stop, EnableDrive, OperationModeB1.

U programu ili u vizuelnom bloku se eksplicitno zadaju vrednosti položaja klipa. Vrednosti se pisu u polju Setvalue2. Kretanje se vrši uzlaznom ivicom StartTask-a. Ovde nije tačno određen broj pozicija kao u Record modu. Ovde se očekuje zadavanje brzine kretanja klipa.

Na displeju kontrolera će ispisivati simbole sa sledećim redosledom: broj 3 i brojeve koje predstavljaju položaj klipa u centimetrima. Tačan položaj klipa se takođe može videti na polju Actualvalue2.

primer:


```
CASE korak OF
0: IF cpx_cmax_1.LoadVoltageApplied THEN
cpx_cmax_2.OperationModeB1 := TRUE;
cpx_cmax_2.OperationModeB2 := FALSE;
cpx_cmax_2.ControlModeB1 := FALSE;
cpx_cmax_2.ControlModeB2 := FALSE;
cpx_cmax_2.EnableDrive := TRUE;
IF cpx_cmax_2.DriveEnabled THEN
    cpx_cmax_2.Stop := TRUE;
    IF cpx_cmax_2.OperationEnabled THEN
korak := 1;
END_IF
END_IF
END_IF
1: IF cpx_cmax_2.StateOperationModeB1 AND
NOT cpx_cmax_2.StateOperationModeB2 AND
NOT cpx_cmax_2.StateControlModeB1 AND
NOT cpx_cmax_2.StateControlModeB2 THEN
korak := 2;
END_IF
2: IF cpx_cmax_2.DriveIsReferenced THEN
korak := 3;
ELSE cpx_cmax_2.StartHoming := TRUE;
IF cpx_cmax_2.DriveIsReferenced THEN
cpx_cmax_2.StartHoming := FALSE;
korak := 3;
END_IF
END_IF
3: cpx_cmax_2.SETVALUE1:=10;
cpx_cmax_2.SETVALUE2:=6000;
korak:=4;
4: IF NOT cpx_cmax_2.AckStart THEN
cpx_cmax_2.StartTask := TRUE;
```

```
korak := 5;
END_IF
5: IF cpx_cmax_2.AxisIsMoving AND
NOT cpx_cmax_2.MC THEN
cpx_cmax_2.StartTask := FALSE;
korak := 6;
END_IF
6: IF cpx_cmax_2.MC THEN
cpx_cmax_2.SETVALUE1:=20;
cpx_cmax_2.SETVALUE2:=13000;
korak := 7;
END_IF
7: IF NOT cpx_cmax_2.AckStart THEN
cpx_cmax_2.StartTask := TRUE;
korak := 8;
END_IF
8: IF cpx_cmax_2.AxisIsMoving AND
NOT cpx_cmax_2.MC THEN
cpx_cmax_2.StartTask := FALSE;
korak := 9;
END_IF
9: IF cpx_cmax_2.MC THEN
korak := 2;
END_IF
END_CASE
```

3) Direct mode, position control - auto profile

Uključuje se postavljanjem na jedinicu ili klikom na simulacioni blok na sledeće promenljive: Stop, EnableDrive, OperationModeB1, ControlModeB2.

Naravno, moraju se navesti vrednosti, u polju SetValue2, u koje korisnik želi da dovede klip. Ovde nije određen tačan broj pozicija kao u Record modu. Takođe, ovde se ne piše brzina kretanja klipa, već se on kreće onom brzinom koja je napisana u parametrizaciji.

Kretanje se vrši uzlaznom ivicom StartTask-a.

Na displeju kontrolera će ispisivati simbole sa sledećim redosledom: broj 3 i brojeve koje predstavljaju položaj klipa u centimetrima. Tačan položaj klipa se takođe može videti na polju Actualvalue2.

Preporuka je da se pri korišćenju ovog moda koriste i prigušnice, ili da se pazi pri podešavanju najveće brzine u FCT softveru ili u parametrizacionom modu.

primer:

CASE korak OF

0: IF cpx_cmax_1.LoadVoltageApplied THEN

cpx_cmax_2.OperationModeB1 := TRUE;

cpx_cmax_2.OperationModeB2 := FALSE;

cpx_cmax_2.ControlModeB1 := FALSE;

cpx_cmax_2.ControlModeB2 := TRUE;

cpx_cmax_2.EnableDrive := TRUE;

IF cpx_cmax_2.DriveEnabled THEN

cpx_cmax_2.Stop := TRUE;

IF cpx_cmax_2.OperationEnabled THEN

korak := 1;

END_IF

END_IF

END_IF

1: IF cpx_cmax_2.StateOperationModeB1 AND

NOT cpx_cmax_2.StateOperationModeB2 AND

NOT cpx_cmax_2.StateControlModeB1 AND

NOT cpx_cmax_2.StateControlModeB2 THEN

korak := 2;

END_IF

2: IF cpx_cmax_2.DriveIsReferenced THEN

korak := 3;

ELSE cpx_cmax_2.StartHoming := TRUE;

IF cpx_cmax_2.DriveIsReferenced THEN

cpx_cmax_2.StartHoming := FALSE;

korak := 3;

END_IF

END_IF

```

3:cpx_cmax_2.SETVALUE2:=6000;
korak:=4;
4: IF NOT cpx_cmax_2.AckStart THEN
cpx_cmax_2.StartTask := TRUE;
korak := 5;
END_IF
5: IF cpx_cmax_2.AxisIsMoving AND
NOT cpx_cmax_2.MC THEN
cpx_cmax_2.StartTask := FALSE;
korak := 6;
END_IF
6: IF cpx_cmax_2.MC THEN
cpx_cmax_2.SETVALUE2:=13000;
korak := 7;
END_IF
7: IF NOT cpx_cmax_2.AckStart THEN
cpx_cmax_2.StartTask := TRUE;
korak := 8;
END_IF
8: IF cpx_cmax_2.AxisIsMoving AND
NOT cpx_cmax_2.MC THEN
cpx_cmax_2.StartTask := FALSE;
korak := 9;
END_IF
9: IF cpx_cmax_2.MC THEN
korak := 2;
END_IF
END_CASE

```

4) Direct mode, pressure/force control

Uključuje se postavljanjem na jedinicu ili klikom na simulacioni blok sledeće promenljive: Stop, EnableDrive, OperationModeB1, ControlModeB1.

Korisnik zadaje određenu silu u Njutnima u polju Setvalue2.

Pri kretanju klipa postavljanjem uzlazne ivice StartTask-a, u polju ActualValue2 se prikazuje koliku veličinu sile dostiže klip. Ovo prikazivanje će trajati sve dokle se klip kreće. Čim se zaustavi u tom polju će se prikazati vrednost pozicije klipa.

primer:

CASE korak OF

0: IF cpx_cmax_1.LoadVoltageApplied THEN

cpx_cmax_1.OperationModeB1:=TRUE;

cpx_cmax_1.OperationModeB2:=FALSE;

cpx_cmax_1.ControlModeB1:=TRUE;

cpx_cmax_1.ControlModeB2:=FALSE;

IF cpx_cmax_1.EnableDrive THEN

cpx_cmax_1.Stop:=TRUE;

IF cpx_cmax_1.OperationEnabled THEN

korak:=1;

END_IF

END_IF

END_IF

1: IF cpx_cmax_1.DriveIsReferenced THEN

korak:=2;

ELSE cpx_cmax_1.StartHoming:=TRUE;

IF cpx_cmax_1.DriveIsReferenced THEN

cpx_cmax_1.StartHoming:=FALSE;

cpx_cmax_1.DeactivateStrokeLimit:=FALSE;

cpx_cmax_1.DeactivateSpeedLimit:=FALSE;

korak:=2;

END_IF

END_IF

2: cpx_cmax_1.SETVALUE1:=10;

cpx_cmax_1.SETVALUE2:=100;

korak:=3;

3: IF NOT cpx_cmax_1.AckStart THEN

cpx_cmax_1.StartTask:=TRUE;

korak:=4;

END_IF

```

4: IF cpx_cmax_1.AxisIsMoving AND NOT cpx_cmax_1.MC THEN
cpx_cmax_1.StartTask:=FALSE;
korak:=5;
END_IF
5: IF cpx_cmax_1.ACTUALVALUE2 >= 40 THEN
cpx_cmax_1.Stop:=FALSE;
korak:=6;
END_IF;
6:;
END_CASE

```

5) Parametrisation mode

Uključuje se postavljanjem na jedinicu ili klikom na simulacioni blok sledeće promenljive: EnableDrive, OperationModeB1, OperationModeB2. Na displeju će biti ispisano 1.0P.

U poljima PNU i Subindex se zapisuju određeni brojevi koji su povezani sa određenom funkcijom ili određenim podešavanjem.

Promenljiva write se postavlja na jedinicu ukoliko korisnik želi da upiše ili promeni neko podešavanje, ili na nulu ukoliko želi da ga iščita.

Vrednost koja se upisuje, upisuje se u polju ParamvalueWR.

Potom se ExecuteParam postavlja na jedinicu i trenutna vrednost koja se iščitava ili nova koja se upisuje, prikazuje u polju Actualvalue2. Nakon toga je potrebno vratiti ExecuteParam na nulu.

primer čitanja:

CASE korak OF

```

0: IF cpx_cmax_1.LoadVoltageApplied THEN
cpx_cmax_2.Stop := FALSE;
IF NOT cpx_cmax_1.OperationEnabled THEN
cpx_cmax_2.OperationModeB1 := TRUE;
cpx_cmax_2.OperationModeB2 := TRUE;
cpx_cmax_2.ControlModeB1 := FALSE;
cpx_cmax_2.ControlModeB2 := FALSE;
cpx_cmax_2.EnableDrive := TRUE;
korak:=1;
END_IF

```

```

END_IF
1: IF cpx_cmax_2.StateOperationModeB1 AND
cpx_cmax_2.StateOperationModeB2 AND
NOT cpx_cmax_2.StateControlModeB1 AND
NOT cpx_cmax_2.StateControlModeB2 THEN
korak := 2;
END_IF
2: cpx_cmax_2.Write:=FALSE;
cpx_cmax_2.PNU:=404;
cpx_cmax_2.Subindex:=2;
korak:=3;
3: cpx_cmax_2.ExecuteParam:=TRUE;
korak:=4;
4: ;
END_CASE

```

6) Commissioning

Uključuje se postavljanjem na jedinicu ili klikom na simulacioni blok sledeće promenljive: EnableDrive, OperationModeB2.

U polju FunctionNo se upisuje vrednost 2 za Movement test ili 1 za Identification test.

Nakon toga se postavlja na jedinicu Stop varijabla, i na kraju StartTask.

Na displeju kontrolera će ispisivati simbole sa sledećim redosledom: broj 7 i brojeve koje predstavljaju broj procenata uspešnosti odrađenog testa.

primer:

```

CASE korak OF
0: IF cpx_cmax_1.LoadVoltageApplied THEN
cpx_cmax_2.OperationModeB1 := FALSE;
cpx_cmax_2.OperationModeB2 := TRUE;
cpx_cmax_2.ControlModeB1 := FALSE;
cpx_cmax_2.ControlModeB2 := FALSE;
cpx_cmax_2.EnableDrive := TRUE;
cpx_cmax_2.Stop := FALSE;
korak:=1;
END_IF

```

```

1: IF NOT cpx_cmax_2.StateOperationModeB1 AND
cpx_cmax_2.StateOperationModeB2 AND
NOT cpx_cmax_2.StateControlModeB1 AND
NOT cpx_cmax_2.StateControlModeB2 THEN
korak := 2;
END_IF
2: cpx_cmax_2.FunctionNo:=1;
cpx_cmax_2.PARAMETER1:=0;
cpx_cmax_2.PARAMETER2:=1;
korak:=3;
3: cpx_cmax_2.Stop:=1;
korak:=4;
4: IF cpx_cmax_2.OperationEnabled THEN
cpx_cmax_2.StartTask:=1;
korak:=5;
END_IF
5: IF cpx_cmax_2.AxisIsMoving THEN
cpx_cmax_2.StartTask:=0;
END_IF
END_CASE

```

PROBLEMI I OTKLANJANJE PROBLEMA

Greške naznačene sa E.xx se otklanjaju deaktiviranjem signala za početak kretanja i aktiviranjem signala Fault Reset. Nakon toga je potrebno deaktivirati taj signal. Preporuka je da se uzrok greške pogleda i u zvaničnoj dokumentaciji.

Komponente treba povezati ispravno. Proveriti JOG kretanjem da li se kretanje klipa cilindra prikazuje na displeju kontrolera i u vizuelizaciji.

Pripremna grupa zatvara automatski odvod za nečistoće po dostizanju određenog pritiska. Preporuka je sačekati da se napuni rezervoar vazduhom pod pritiskom i potom mu dozvoliti da krene ka pripremljenoj grupi i ostalom delu sistema.

LED sijalica svetli crvenom bojom, pulsira dva puta u manjem vremenskom razmaku i onda pravi dužu pauzu, otprilike sekundu. Ne postoji (ispravan) kod u kontroleru - ubaciti odgovarajući kod.

Ukoliko ne svetli zelena LED lampica na CPX - CEC kontroleru sa oznakom TP znači da ne prepoznaje ili nema drugog uređaja za komunikaciju (najčešće PC).

Koristiti direktni kabl uz korišćenje patch panela.

E.11 - Homing not required. Nije potrebno izvođenje i dovođenja klipa cilindra u (softverski) početni položaj.

E.13 - Wrong direction of movement during movement test. Pogrešno su povezani izlazi na pneumatskom proporcionalnom razvodniku. Zameniti creva na izlaznim vodovima proporcionalnih razvodnika.

E.19 - Impermissible change of operating mode.

a) Pre nego što je završeno kretanje klipa cilindra u Record modu, prebačeno je na Direct mode. Sačekati da se prvo završi kretanje.

b) Setovano je polje OperationModeB2 bez predhodnog resetovanja signala Stop. Po uspešnom aktiviranju OperationModaB2 moguće je setovati Stop signal.

E.21 - Invalid record number. Brojevi za snimanje pozicije u Record modu su u opsegu od 1 do 64.

E.22 - Record is not configured. Izabrani broj pozicije ne sadrži vrednost. Izabrati poziciju koja to sadrži ili (ponovo) sačuvati željenu poziciju.

E.31 - No movement after start. Po aktiviranju signala za početak kretanja klipa, nema kretanja istog. Proveriti manometar na pripremnoj grupi. Proveriti da li je u prekidu dovod vazduha pod pritiskom negde u sistemu. Proveriti da li ima prepreka na trajektoriji ili je postavljen pretežak teret na klip.

E.32 - Target force outside the force limits. Zadana (željena) veličina sile je izvan softverskih granica. Smanjiti upisanu veličinu sile ili ponovo podesiti softverske granice.

E.33 - Target position outside the software or hardware end positions. Zadana (željena) veličina je izvan softverskih i/ili fizičkih granica kretanja klipa cilindra. Smanjiti upisanu veličinu pozicije.

E.36 - Software end position reached during force control. Kretanje u funkciji sile je dostiglo krajnju softversku i/ili fizičku granicu kretanja klipa cilindra. Podesiti softversku granicu ukoliko je moguće.

E.38 - Critical stroke XLIM reached with force control. Dostignuta je kritična softverska granica. Smanjiti veličinu sile ili podesiti kritičnu vrednost kretanja klipa cilindra u funkciji sile.

E.44 - Teaching not possible. Učenje pozicije je moguće isključivo u Record modu.

E.45 - Faulty commissioning operation or parameter. Pogrešno upisana vrednost u polju Parameter2.

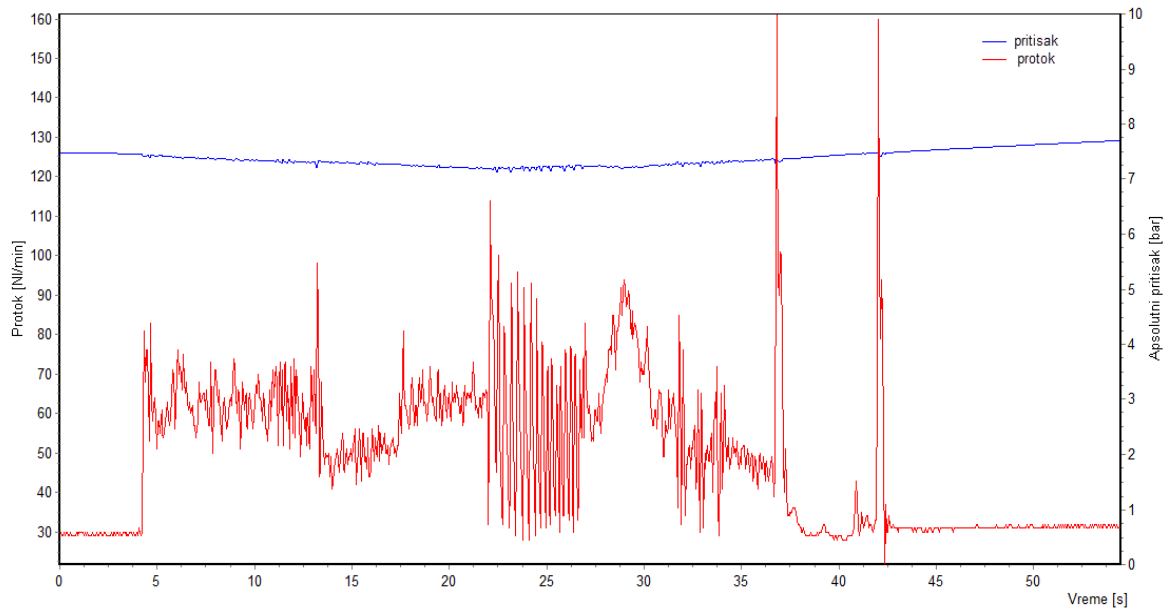
E.47 - Start during active positioning command not permitted. Aktiviranje signala za Homing kretanje u toku kretanja klipa cilindra.

E.58 - Handshake error. Po prebacivanju programa i logovanju na kontroler, iz nepoznatih razloga, najverovatnije zbog vazduha pod pritiskom koji je ostao u sistemu, hoće da pomeri klip pre nego se aktivira signal za startovanje programa.

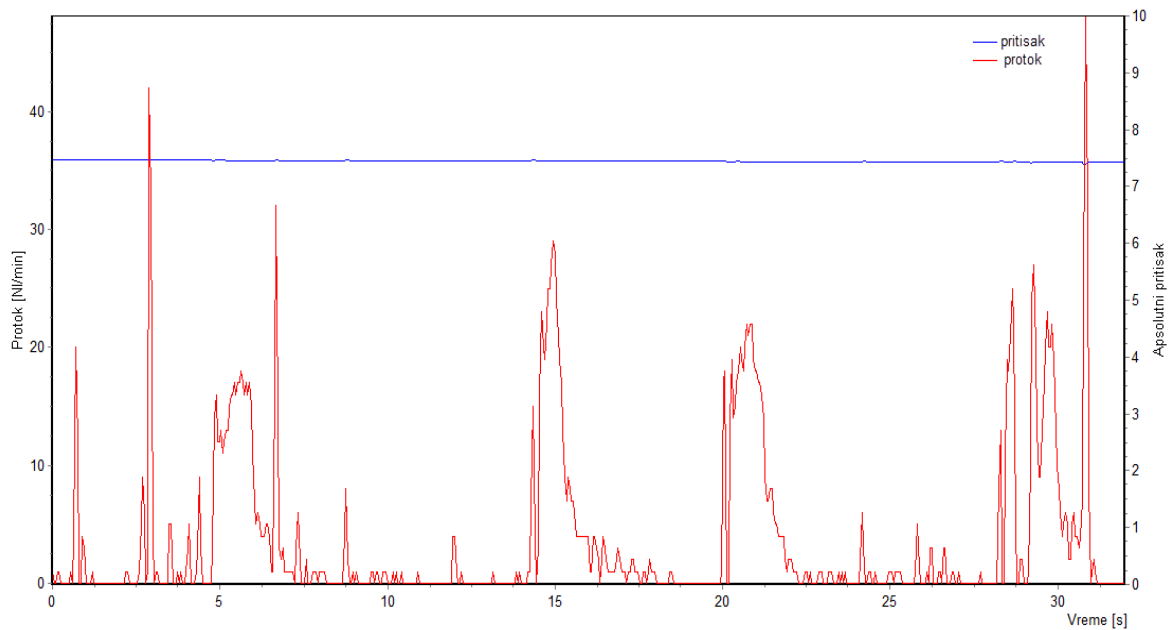
E.87 - Defective displacement encoder cable or potentiometer in electrical end position. Klizeći deo potencijometra se nalazi izvan njegovih (softverskih) granica. Pomeriti klizač ka sredini.

W.50 - Supply pressure is too low. Proveriti da li je otvorena slavina i omogućen dovod vazduha pod pritiskom. Proveriti manometar na pripremnoj grupi.

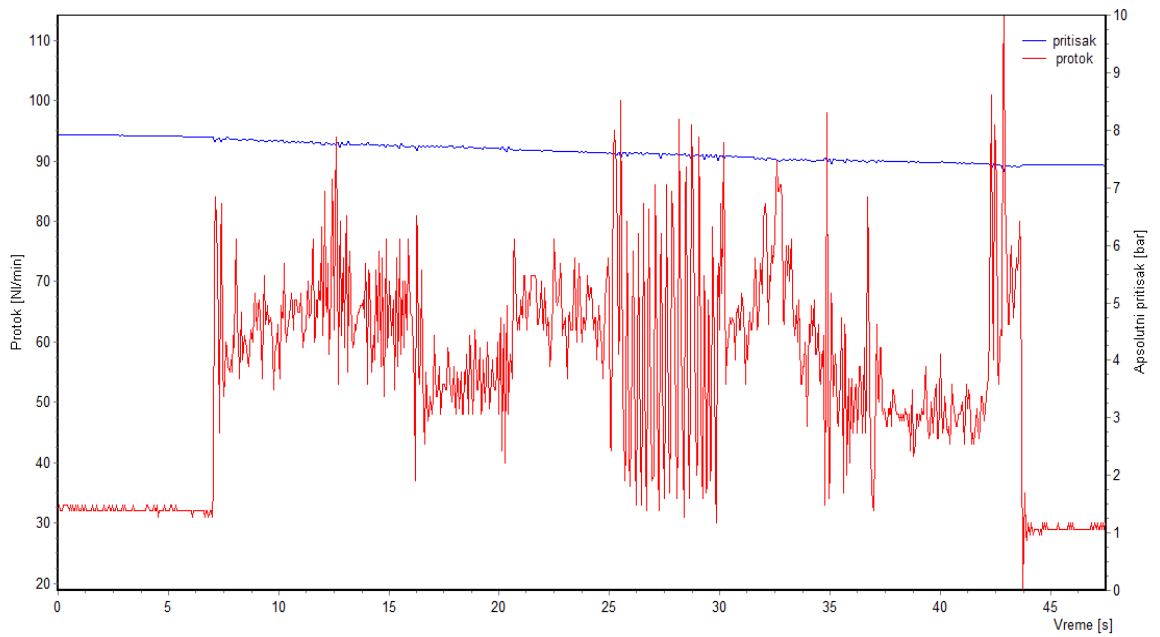
Prilog D – Rezultati merenja – potrošnja VPP



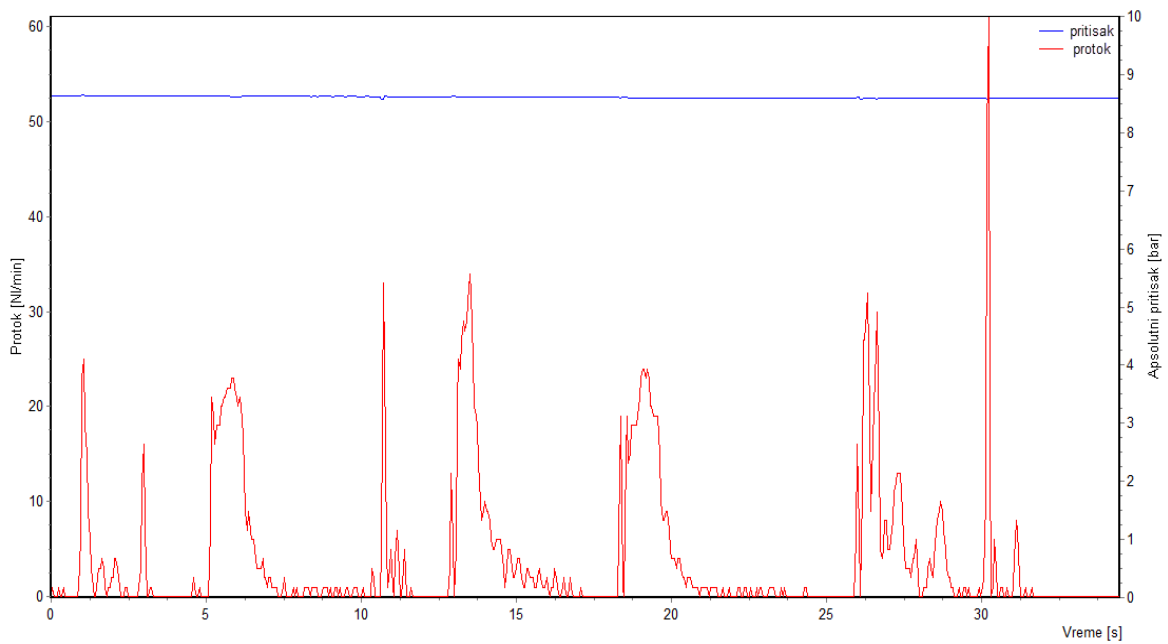
Slika 4. Potrošnja vazduha pod pritiskom za jedan ciklus \square 35 s, proporcionalno upravljanje, širina noža 3 mm, materijal PP



Slika 8. Potrošnja vazduha pod pritiskom za jedan ciklus \square 35 s, PWM upravljanje, širina noža 3 mm, materijal PP



Slika 3. Potrošnja vazduha pod pritiskom za jedan ciklus \square 35 s, proporcionalno upravljanje, širina noža 3 mm, materijal PA



Slika 8. Potrošnja vazduha pod pritiskom za jedan ciklus \square 35 s, PWM upravljanje, širina noža 3 mm, materijal PA