



УНИВЕРЗИТЕТ У НОВОМ САДУ
ФАКУЛТЕТ ТЕХНИЧКИХ НАУКА У
НОВОМ САДУ



Вуле Релјић

**ДАЉИНСКО УПРАВЉАЊЕ
ДИГИТАЛНОМ ПНЕУМАТИКОМ У
КОНЦЕПТУ ИНДУСТРИЈЕ 4.0**

ДОКТОРСКА ДИСЕРТАЦИЈА

Нови Сад, 2020.



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:	Вуле Рељић		
Ментор, МН:	др Драган Шешлија, ред. проф.		
Наслов рада, НР:	Даљинско управљање дигиталном пнеуматиком у концепту Индустије 4.0		
Језик публикације, ЈП:	Српски		
Језик извода, ЈИ:	Српски/Енглески		
Земља публикавања, ЗП:	Република Србија		
Уже географско подручје, УГП:	АП Војводина		
Година, ГО:	2020.		
Издавач, ИЗ:	Ауторски репринт		
Место и адреса, МА:	Факултет техничких наука, Трг Доситеја Обрадовића 6, 21000 Нови Сад		
Физички опис рада, ФО: (поглавља/страна/ цитата/табела/слика/графика/прилога)	5/127/167/22/78/4/5		
Научна област, НО:	Мехатроника		
Научна дисциплина, НД:	Мехатроника, роботика, аутоматизација и интегрисани системи		
Предметна одредница/Кључне речи, ПО:	Дигитална пнеуматика, PWM управљање, даљински управљан пригушно-неповратни вентил, даљински управљан регулатор притиска		
УДК			
Чува се, ЧУ:	Библиотека Факултета техничких наука		
Важна напомена, ВН:			
Извод, ИЗ:	<p>У овој докторској дисертацији, акценат је стављен на анализу даљински управљаних дигиталних пнеуматских система у концепту Индустије 4.0. Доприноси тезе су сљедећи: 1) Показано је на који начин је могуће, постојеће пнеуматске системе надградити тако да се омогући даљинско управљање кретањем пнеуматских радних елемената, даљинска регулација притиска и даљинска регулација протока. 2) Показано је на који начин је могуће развити даљински управљан дигитални пнеуматски систем, који има могућност даљинске промјене управљачких параметара (радног притиска и/или протока) у току процеса рада, и који је искључиво софтверски реконфигурабилан, те реализован на оптималан начин, чиме достиже ниво флексибилности потребан да се задовољи основни концепт Индустије 4.0. Примјена добијених резултата могућа је у свим индустријским, а потом и неиндустријским системима, у којима постоје пнеуматски радни елементи.</p>		
Датум прихватања теме, ДП:	30.05.2019. године		
Датум одбране, ДО:			
Чланови комисије, КО:	Председник:	др Слободан Дудић, ванр. проф.	Потпис ментора
	Члан:	др Ивана Миленковић, ванр. проф.	
	Члан:	др Милан Рапаић, ванр. проф.	
	Члан:	др Владислав Благојевић, ванр. проф.	
	Члан, ментор:	др Драган Шешлија, ред. проф.	



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 :	Vule Reljić		
Mentor, MN :	Dragan Šešlija, PhD, full professor		
Title, TI :	Remote control of the digital pneumatics in a scope of Industry 4.0		
Language of text, LT :	Serbian		
Language of abstract, LA :	Serbian/English		
Country of publication, CP :	Republic of Serbia		
Locality of publication, LP :	AP of Vojvodina		
Publication year, PY :	2020.		
Publisher, PB :	Author's reprint		
Publication place, PP :	Faculty of Technical Sciences, 21000 Novi Sad, Trg Dositeja Obradovića 6		
Physical description, PD : (chapters/pages/ref./tables/pictures/graphs/appendixes)	5/127/167/22/78/4/5		
Scientific field, SF :	Mechatronics		
Scientific discipline, SD :	Mechatronics, robotics, automation and integrated systems		
Subject/Key words, S/KW :	Digital pneumatics, PWM control, remotely controlled one-way flow control valve, remotely controlled pressure regulator		
UC			
Holding data, HD :	Library of Faculty of Technical Sciences		
Note, N :			
Abstract, AB :	<p>In this PhD thesis, the emphasis is placed on the analysis of remotely controlled digital pneumatic systems in the scope of Industry 4.0. The contributions of the thesis are the following: 1) The possibility of upgrading an existing pneumatic systems to allow remote motion control of pneumatic actuators, remote pressure control and remote flow control, is shown. 2) The possibility of developing a remotely controlled digital pneumatic system, which has the ability of remote change of the control parameters (the operating pressure and/or the flow) during the operating process, and which is exclusively software reconfigurable and optimally implemented, is shown. At that way, it is achieving a level of flexibility needed to meet the basic concept of Industry 4.0. The application of the obtained results is possible in all industrial and then non-industrial systems, where pneumatic actuators exist.</p>		
Accepted by the Scientific Board on, ASB :	2019/05/30		
Defended on, DE :			
Defended Board, DB :	President:	Slobodan Dudić, PhD, associate professor	
	Member:	Ivana Milenković, PhD, associate professor	
	Member:	Milan Rapačić, PhD, associate professor	Mentor's sign
	Member:	Vladislav Blagojević, PhD, associate professor	
	Member, Mentor:	Dragan Šešlija, PhD, full professor	

Анђелији с љубављу...

ЗАХВАЛНИЦА

Највећу захвалност дугујем свом ментору, проф. др Драгану Шешлији који ми је несебично помагао и водио ме све ове године, почевши од дипломског па преко мастер рада а закључно са израдом ове докторске дисертације.

Иакође, захвалност дугујем и својим незваничним менторима, проф. др Слободану Дудићу и проф. др Јвани Миленковић са којима сам током претходних година веома блиско сарађивао. Поред тога, и осталим члановима комисије дугујем захвалност на изузетно корисним савјетима и сугестијама.

Овим путем се захваљујем и мојим колегама др Јовану Шуцу, доценту и асистенту Брајану Бајчију са којима сам прошао највећи дио свог истраживања. Додатно, захваљујем се и својим студентима у оквиру чијих дипломских радова су, под менторством проф. др Драгана Шешлије, реализовани и дијелови појединих експеримената из саме дисертације, при чему сам био члан комисије за одбрану истих.

Посебну захвалност дугујем својим родитељима и свом брату који су ми пуне три деценије давали подршку и имали разумијевање како за све моје несташлуке, тако и за мој истраживачки рад.

Захвалност дугујем и својим пријатељима из студентских дана са којима сам прошао доста мога. Препознаће се они сами.

На самом крају, оно најважније. Посебно се захваљујем својој супрузи Јовани што ми је подарила најљепше тренутке живота и родила Анђелију а притом, била уз мене и у најтежим тренуцима приликом израде ове дисертације.

У Новом Саду, 07.09.2019. године

Вуле Рељић

САДРЖАЈ

Резиме	iii
Abstract	iv
Списак слика	v
Списак табела	vii
Списак графика	viii
ПОГЛАВЉЕ 1 – УВОД	1
1.1 Индустрија 4.0.....	4
1.1.1 <i>Флексибилност производних система</i>	7
1.1.2 <i>Поузданост производних система</i>	8
1.2 Даљинско управљање	10
1.3 Пнеуматски управљачки системи.....	13
1.4 Предмет истраживања	16
1.5 Циљ истраживања и очекивани резултати	17
1.6 Преглед дисертације по поглављима	18
ПОГЛАВЉЕ 2 – ТЕОРИЈСКЕ ОСНОВЕ И ПРЕГЛЕД ЛИТЕРАТУРЕ.....	20
2.1 Пнеуматско управљање	21
2.1.1 <i>ON-OFF управљање</i>	21
2.1.2 <i>Регулација брзине кретања пнеуматских радних елемената</i>	27
2.1.3 <i>Регулација притиска у управљачком систему</i>	30
2.1.4 <i>Дигитална пнеуматика</i>	33
ПОГЛАВЉЕ 3 – ИСТРАЖИВАЊЕ.....	41
3.1 Методологија истраживања.....	41
3.1.1 <i>Фазе истраживања</i>	41
3.1.2 <i>Истраживачке методе</i>	42
3.1.3 <i>Лабораторије и опрема за експериментални рад</i>	43
3.2 Експеримент 1: Даљински управљан пнеуматски кружни манипулатор.....	48
3.2.1 <i>Хардверска реализација пнеуматског кружног манипулатора</i>	49
3.2.2 <i>Софтверска реализација пнеуматског кружног манипулатора</i>	52
3.2.3 <i>Управљачки алгоритам</i>	55
3.3 Експеримент 2: Даљински управљана пнеуматска опруга.....	56
3.3.1 <i>Опруге као машински елементи</i>	57
3.3.2 <i>Хардверска реализација пнеуматске опруге</i>	59
3.3.3 <i>Софтверска реализација пнеуматске опруге</i>	61
3.3.4 <i>Управљачки алгоритам</i>	63
3.4 Експеримент 3: Уређај за даљинску регулацију протока ваздуха под притиском.....	64
3.4.1 <i>Хардверска реализација уређаја за даљинску регулацију протока ваздуха под притиском</i>	65
3.4.2 <i>Софтверска реализација уређаја за даљинску регулацију протока ваздуха под притиском</i> ...	67
3.4.3 <i>Управљачки алгоритам</i>	68
3.4.4 <i>Даљински управљан пригушно-неповратни вентил</i>	70
3.5 Експеримент 4: Даљински управљан дигитални флуидни погон.....	74
3.5.1 <i>Хардверска реализација система</i>	75
3.5.2 <i>Софтверска реализација система</i>	79
3.5.3 <i>Управљачки алгоритам</i>	80
3.5.4 <i>Даљински управљан регулатор притиска</i>	81
3.5.5 <i>Подсистем за детекцију предмета рада</i>	87
3.5.6 <i>Идејно софтверско рјешење</i>	90
ПОГЛАВЉЕ 4 – АНАЛИЗА РЕЗУЛТАТА И ДИСКУСИЈА.....	94
4.1 Надградња постојећих пнеуматских управљачких система	94
4.1.1 <i>Даљинско управљање кретањем пнеуматских радних елемената</i>	94
4.1.2 <i>Даљинска регулација притиска у пнеуматским управљачким системима</i>	96

4.1.3 Даљинска регулација протока у пнеуматским управљачким системима	99
4.2 Развој флексибилног, дигиталног пнеуматског управљачког система	101
ПОГЛАВЉЕ 5 – ЗАКЉУЧЦИ И ПРАВЦИ ДАЉИХ ИСТРАЖИВАЊА	109
ЛИТЕРАТУРА.....	112
ПРИЛОГ	120
Прилог 1. Резултати мјерења постигнуте вриједности протока на новоразвијеном даљински управљаном пригушно-неповратном вентилу	121
Прилог 2. Резултати позиционирања клипа цилиндра	121
Прилог 3. Резултати мјерења времена трајања позиционирања клипа цилиндра у крајњи горњи положај за различите случајеве.....	122
Прилог 4. Примјер програмског кода за израду корисничке апликације	123
Прилог 5. Примјер програмског кода за ПЛК	125

Резиме

У овој докторској дисертацији, акценат је стављен на анализу даљински управљаних дигиталних пнеуматских система у концепту Индустрије 4.0. Доприноси тезе су сљедећи:

1. Показано је на који начин је могуће, постојеће пнеуматске системе надградити тако да се омогући даљинско управљање кретањем пнеуматских радних елемената, даљинска регулација притиска и даљинска регулација протока. То је урађено развојем неколико експерименталних постројења под називом „даљински управљан пнеуматски кружни манипулатор“, „даљински управљана пнеуматска опруга“ и „уређај за даљинску регулацију протока ваздуха под притиском“, интеграцијом софтверског пакета за даљинско управљање индустријским системима (у конкретном случају, примијењен је SEyeClon Viewer), те развојем нових компоненти – даљински управљаног пригушно-неповратног вентила и даљински управљаног регулатора притиска. За новоразвијене пнеуматске компоненте су предложени и нови симболи.
2. Показано је на који начин је могуће развити дигитални пнеуматски систем, који има могућност даљинске промјене управљачких параметара (радног притиска и/или протока), и који је искључиво софтверски реконфигурабилан, те реализован на оптималан начин, чиме достиже ниво флексибилности потребан да се задовољи основни концепт Индустрије 4.0. То је урађено развојем експерименталног постројења под називом „даљински управљан дигитални флуидни погон“, интеграцијом новоразвијених компоненти и развојем идејног софтверског рјешења. На поменутом постројењу, испитан је и развијени модел за даљинско управљање дигиталним пнеуматским системима, који представља и посебан допринос ове докторске дисертације.

Примјена резултата добијених овим истраживањем могућа је у свим индустријским, а потом и неиндустријским системима, у којима постоје пнеуматски радни елементи, а посебно у производним системима и погонима у којима је од највећег значаја минимално вријеме завршетка операције рада (функција критеријума је продуктивност) или минимална потрошња ваздуха под притиском (функција критеријума је енергетска ефикасност).

Abstract

In this PhD thesis, the emphasis is placed on the analysis of the remotely controlled digital pneumatic systems in the scope of Industry 4.0. The contributions of the thesis are the following:

1. The possibility of upgrading an existing pneumatic systems to allow remote motion control of pneumatic actuators, remote pressure control and remote flow control, is shown. This was done through the development of several experimental setups called “remotely controlled pneumatic circular manipulator”, “remotely controlled compressed air spring” and “device for remote compressed air flow control”, and the integration of a software package for remote control of industrial systems (in this case, CEyeClon Viewer was applied), and the development of new components - a remotely controlled one-way flow control valve and a remotely controlled pressure regulator. Also, new symbols are proposed for newly developed pneumatic components.
2. The possibility of developing a remotely controlled digital pneumatic systems, which have the ability of remote change of the control parameters (the operating pressure and/or the flow) during the operating process, and which are exclusively software reconfigurable and optimally implemented, is shown. At that way, they are achieving a level of flexibility needed to meet the basic concept of Industry 4.0. This was done through the development of experimental setup called “remotely controlled digital fluid power”, and the integration of newly developed components, and the development of conceptual software solution. At the mentioned setup, a developed model for remote control of digital pneumatic systems, which is a special contribution of this PhD thesis, is tested.

The application of the obtained results is possible in all industrial and then non-industrial systems, where pneumatic actuators exist, especially in production systems and plants where the most important parameter is the minimum operation time (the criterion function is productivity) or the minimum compressed air consumption (the criterion function is energy efficiency).

Списак слика

Слика 1. Основни модел трансформисања расположивих ресурса у производе [1], [2]	1
Слика 2. Општа структура индустријског производног система [1], [2]	2
Слика 3. Хронолошки преглед индустријских револуција [8]	3
Слика 4. Примјер функционисања „паметне“, умрежене фабрике [14].....	4
Слика 5. Укупна флексибилност производног система [2]	7
Слика 6. Крива расподеле учестаности отказа у току вијека трајања система	9
Слика 7. Систем за надгледање и даљинско управљање јавном расвјетом компаније ZGSM [59].....	11
Слика 8. Пuteви комуникације приликом управљања на даљину коришћењем SEyeClon платформе [61] ...	13
Слика 9. Ток сигнала у управљачком ланцу и елементи управљачког ланца [86]–[88]	14
Слика 10. Примјер пнеуматске управљачке шеме са јасно назначеним нивоима	15
Слика 11. Подјела управљања [86], [87]	20
Слика 12. Директно управљање цилиндром једносмјерног дејства, моностабилно	22
Слика 13. Директно управљање цилиндром једносмјерног дејства, бистабилно.....	23
Слика 14. Директно управљање цилиндром двосмјерног дејства, моностабилно.....	23
Слика 15. Директно управљање цилиндром двосмјерног дејства, бистабилно.....	24
Слика 16. Индиректно управљање цилиндром једносмјерног дејства, моностабилно	25
Слика 17. Индиректно управљање цилиндром једносмјерног дејства, бистабилно.....	26
Слика 18. Индиректно управљање цилиндром двосмјерног дејства, моностабилно	26
Слика 19. Индиректно управљање цилиндром двосмјерног дејства, бистабилно.....	27
Слика 20. Начин рада пригушно-неповратног вентила	28
Слика 21. Пригушно-неповратни вентил.....	28
Слика 22. Пригушење извлачења клипњаче цилиндра једносмјерног дејства	29
Слика 23. Пригушење увлачења клипњаче цилиндра једносмјерног дејства.....	29
Слика 24. Пригушење извлачења и увлачења клипњаче цилиндра двосмјерног дејства.....	30
Слика 25. Регулатор притиска са растерећењем [111].....	31
Слика 26. Регулатор притиска	31
Слика 27. Регулација притиска приликом увлачења клипњаче цилиндра.....	32
Слика 28. Регулација притиска приликом извлачења клипњаче цилиндра	32
Слика 29. Електрично управљан регулатор притиска	33
Слика 30. Изглед PWM сигнала са различитим вриједностима фактора испуне	35
Слика 31. Разводни вентил произвођача Festo ознаке MHE3-MS1H-3/2G-1/8.....	36
Слика 32. Управљачка шема PWM управљања са два 3/2 нормално затворена разводна вентила.....	36
Слика 33. Управљачка шема PWM управљања са четири 2/2 нормално затворена, реверзибилна разводна вентила	37
Слика 34. Дигитално вентилско острво произвођача Festo ознаке VTEM [102]	38
Слика 35. Структура даљински управљаног пнеуматског кружног манипулатора [135]	49
Слика 36. Даљински управљан пнеуматски кружни манипулатор – физичка реализација, лијево и дијаграм пут-корак, десно [63], [135].....	50
Слика 37. Приказ врсте оптерећења клипњаче цилиндра (лијево) и скица ситуације у систему (десно) [135], [136].....	51
Слика 38. Различите врсте оптерећења (лијево) и скица ситуације у систему (десно) за два случаја: 1 – савијање, 2 - затезање [135], [136].....	51
Слика 39. Пнеуматска управљачка шема и шема повезивања ПЛК	52
Слика 40. Главни прозор програма SEyeClon Viewer	53
Слика 41. Корисничка апликација [63], [135].....	54
Слика 42. Управљачки алгоритам.....	56
Слика 43. Структура даљински управљане пнеуматске опруге [61].....	57
Слика 44. Облици опруга и параметри којима се описују њихове деформације.....	58
Слика 45. Карактеристика и коефицијент крутости линеарне опруге	59
Слика 46. Даљински управљана пнеуматска опруга – физичка реализација.....	59
Слика 47. Пнеуматска управљачка шема и шема повезивања ПЛК	60
Слика 48. Корисничка апликација [61], [137].....	62
Слика 49. Управљачки алгоритам [61].....	63
Слика 50. Структура уређаја за даљинску регулацију протока ваздуха под притиском [144], [145]	64
Слика 51. Уређај за даљинску регулацију ваздуха под притиском – физичка реализација	65

Слика 52. Спојница корачног електромотора и пригушно-неповратног вентила	65
Слика 53. Шема повезивања корачног електромотора, драјвера за електромотор и микроконтролера....	66
Слика 54. Пнеуматска управљачка шема.....	66
Слика 55. Корисничка апликација [144], [145].....	67
Слика 56. Управљачки алгоритам [144], [145].....	69
Слика 57. Експериментално одређивање вриједности протока	70
Слика 58. Поступак трансформације полиномских функција добијених на основу мјерења вриједности протока ваздуха под притиском у инверзне функције [148]	71
Слика 59. Прототип даљински управљаног пригушно-неповратног вентила, без поклопца [148].....	72
Слика 60. Корисничка апликација.....	73
Слика 61. Структура даљински управљаног дигиталног флуидног погона.....	75
Слика 62. Даљински управљан дигитални флуидни погон – физичка реализација	76
Слика 63. Израђени предмети рада [150].....	77
Слика 64. Пнеуматска управљачка шема.....	78
Слика 65. Корисничка апликација.....	79
Слика 66. Формирање PWM сигнала [151].....	80
Слика 67. Управљачки алгоритам.....	81
Слика 68. Експериментално одређивање вриједности притиска [154]	82
Слика 69. Поступак трансформације полиномске функције добијене на основу мјерења вриједности притиска у инверзну функцију [154].....	83
Слика 70. Прототип даљински управљаног регулатора притиска [154].....	84
Слика 71. Предложени симбол за новоразвијени даљински управљан регулатор притиска	84
Слика 72. Корисничка апликација.....	85
Слика 73. Интеграција даљински управљаног регулатора притиска и даљински управљаног пригушно-неповратног вентила у дигитални флуидни погон	86
Слика 74. Прототип сензора за детекцију предмета рада [150]	88
Слика 75. Корисничка апликација [150]	89
Слика 76. Избор уређаја за повезивање [150]	90
Слика 77. Идејно софтверско рјешење.....	92
Слика 78. Програмски код за корисничку апликацију „Circular_Manipulator.exe“	124

Списак табела

Табела 1. Коришћени радни елементи и њихове карактеристике	44
Табела 2. Коришћени сензори и њихове карактеристике	46
Табела 3. Коришћени контролери и њихове карактеристике	47
Табела 4. Списак команди и одговора у систему сензора за детекцију предмета рада [150].....	90
Табела 5. Резултати мјерења постигнутне вриједности секундарног притиска на новоразвијеном даљински управљаном регулатору притиска [154].....	97
Табела 6. Прорачуната релативна грешка.....	97
Табела 7. Резултати мјерења постигнутне вриједности протока на новоразвијеном даљински управљаном пригушно-неповратном вентилу при улазном притиску од 6 bar [148]	100
Табела 8. Прорачуната релативна грешка.....	100
Табела 9. Резултати позиционирања клипа цилиндра при подизању предмета рада уз степен отворености пригушно-неповратног вентила од 80% са заустављањем у двије међупозиције [152]	103
Табела 10. Резултати позиционирања клипа цилиндра при подизању предмета рада уз степен отворености пригушно -неповратног вентила од 80% са заустављањем само у једној међупозицији [152].....	103
Табела 11. Прорачуната релативна грешка.....	103
Табела 12. Потрошња ваздуха под притиском за различите случајеве подизања предмета рада	105
Табела 13. Вријеме потребно за подизање предмета рада до крајњег положаја при максималном могућем протоку за различите случајеве оптерећења и радног притиска	106
Табела 14. Новоразвијене компоненте и предложени симболи	108
Табела 15. Резултати мјерења постигнутне вриједности протока на новоразвијеном даљински управљаном пригушно-неповратном вентилу при улазном притиску од 2 bar [148]	121
Табела 16. Резултати мјерења постигнутне вриједности протока на новоразвијеном даљински управљаном пригушно-неповратном вентилу при улазном притиску од 5 bar [148]	121
Табела 17. Резултати позиционирања клипа цилиндра при подизању предмета рада уз степен отворености пригушно-неповратног вентила од 50% са заустављањем у двије међупозиције [152].....	121
Табела 18. Резултати позиционирања клипа цилиндра при подизању предмета рада уз степен отворености пригушно-неповратног вентила од 50% са заустављањем само у једној међупозицији [152]	122
Табела 19. Вријеме потребно за подизање предмета рада до крајњег положаја при степену отворености пригушно-неповратног вентила од 90%, за различите случајеве оптерећења и радног притиска.....	122
Табела 20. Вријеме потребно за подизање предмета рада до крајњег положаја при степену отворености пригушно-неповратног вентила од 70%, за различите случајеве оптерећења и радног притиска.....	122
Табела 21. Вријеме потребно за подизање предмета рада до крајњег положаја при степену отворености пригушно-неповратног вентила од 50%,за различите случајеве оптерећења и радног притиска.....	123
Табела 22. Вријеме потребно за подизање предмета рада до крајњег положаја при степену отворености пригушно-неповратног вентила од 30%, за различите случајеве оптерећења и радног притиска.....	123

Списак графика

График 1. Релативна грешка постизања жељене вриједности секундарног притиска на новоразвијеном даљински управљаном регулатору притиска.....	98
График 2. Релативна грешка постизања жељене вриједности протока на даљински управљаном пригушно-неповратном вентилу.....	101
График 3. Релативна грешка позиционирања.....	104
График 4. Профил брзине клипа цилиндра при подизању најтежег предмета рада, при радном притиску од 6 bar и проценту отворености пригушно-неповратног вентила од 70% [156].....	104

ПОГЛАВЉЕ 1 – УВОД

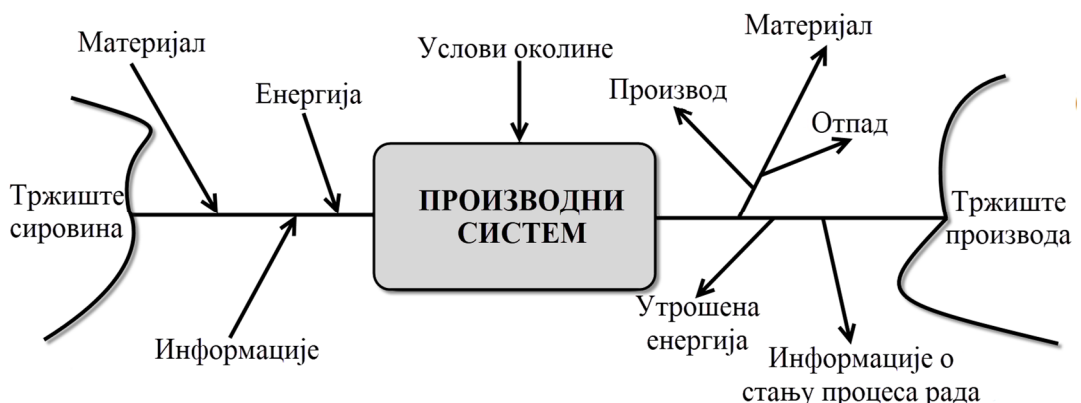
Мисли без садржаја јесу празне, опажаји без појмова јесу слијепи.

(Имануел Кант, Критика чистог ума)

Од најранијих периода цивилизације па све до данас, људи су тежили подмиривању сопствених потреба и побољшању услова живота. Временом су уочили могућност трансформације природних добара, која их окружују, у друштвено корисне производе одговарајуће структуре и квалитета. Сам поступак трансформације назван је производња. Људско друштво не би могло опстати без производње, без обзира на природна богатства земље и облике у којима се она налазе [1], [2].

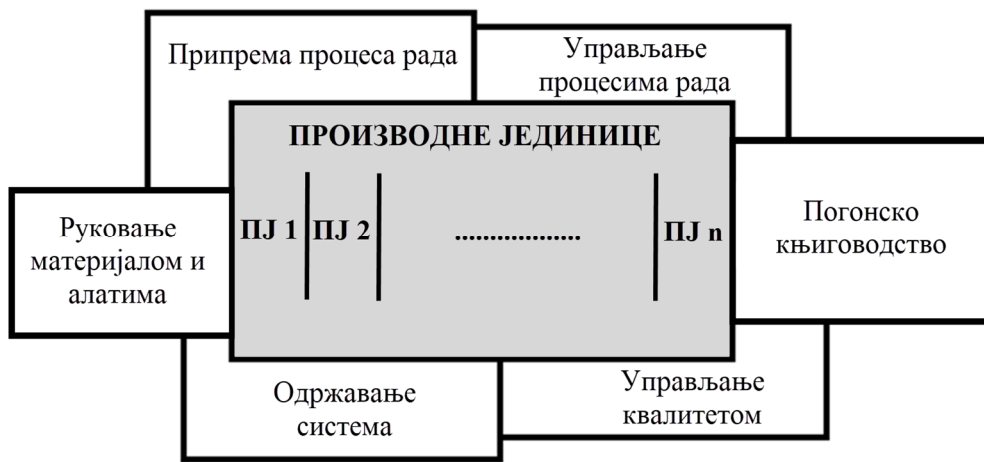
У суштини, производња представља усмјерену активност која има за циљ добијање производа, корисних за друштво, чија структура варира у широким границама како по врсти (од постројења, обрадних система, возила, алата, рачунара, робота, па све до научних сазнања, поступака и метода, рачунарских програма и информација различите врсте) и по квалитету (од производа високе тачности у погледу мјера, облика, квалитета обрађене површине, структуре материјала и других параметара квалитета, до мање квалитетних или чак неодређених у погледу квалитета производа), тако и по количини [1], [2].

Производња је условљена постојањем скупа елемената (предмета рада, средстава рада и учесника у процесима рада) међусобно повезаних у складу са пројектованим поступцима промјене стања са једне, и улагањем људског рада са друге стране, односно условљава постојање система за производњу обликованих на начин да обезбиједи трансформацију расположивих ресурса у производе у складу са датим потребама (слика 1). Производни системи, представљају, на дати начин, системе за остварење циљева производње односно добијање производа неопходних за задовољење потреба у друштву [1], [2].



Слика 1. Основни модел трансформисања расположивих ресурса у производе [1], [2]

Индустријски производни систем представља скуп основних технолошких система (као што су, на примјер, обрадни системи, монтажни системи, мјерни системи, управљачки системи, системи за руковање материјалом, у оквиру којих се могу разликовати транспортни системи и складишни системи, и слично) и осталих технички одређених информационах и енергетских структура – елемената радних система, уређених на начин да обезбјеђују вршење постављене функције циља¹ и остварење пројектованих ефеката. Поменути систем везује технолошке системе, енергетске и информационе структуре и учеснике у процесима рада везама одређеног степена јачине, правца и смјера. Процес рада индустријског производног система назива се производним процесом и он представља скуп активности неопходних за извршење поступка промјене улазних у излазне величине система [1], [2]. Општа структура индустријског производног система приказана је на слици 2.



Слика 2. Општа структура индустријског производног система [1], [2]

На развој индустријских производних система било које државе утиче неколико фактора, међу којима је један од значајнијих степен технолошке развијености државе, који одређује могућности нивоа технолошког развоја, а који мора бити заснован на систему научних сазнања – информација добијених у резултату истраживачког рада. Историјски гледано, степени технолошке развијености индустријски развијених држава значајно су се мијењали. Посебно су били високи када је долазило до великих технолошких скокова који су довели до круцијалних помака у индустријализацији [3], [4]. Ти технолошки скокови названи су индустријске револуције [5].

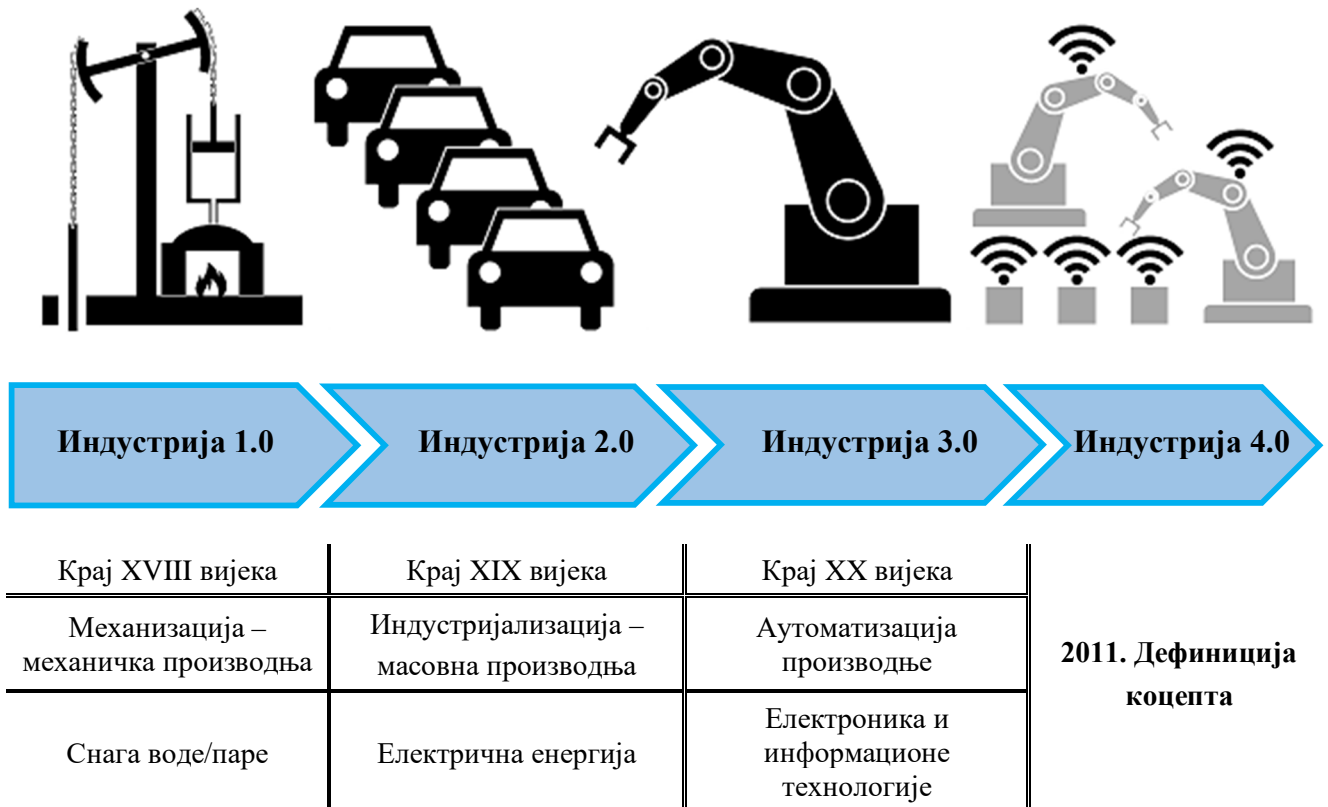
Прва индустријска револуција започела је у Уједињеном Краљевству Велике Британије и Сјеверне Ирске крајем XVIII вијека у области механизације. Ручну производњу замијенила је машинска. Један од најпознатијих изума из овог периода је Ватова² парна машина. Након проласка кроз неколико фаза израде и реконструкције, прве парне машине стављене су у погон у комерцијалне производне системе 1776. године. Захваљујући појави парних машина, 1807. саграђен је први комерцијални пароброд³, а 1814. и

¹ Функција циља или функција критеријума производних система дефинисана је као мјера усаглашености између захтјева доносиоца одлука, услова околине и параметара процеса рада. Из дате дефиниције проистиче закључак да се њоме дефинише жељено понашање система у будућем временском периоду [2].

² Џејмс Ват (Гриноук, 19.01.1736. године – Хетфилд, 25.08.1819. године), шкотски проналазач и инжењер

³ Конструктор првог пароброда био је Роберт Фултон (Литл Бритн Тауншип, 14.11.1765. године – Њујорк, 24.02.1815. године), амерички проналазач и инжењер.

прва парна локомотива⁴. Друга индустријска револуција започела је у Њемачкој и Сједињеним Америчким Државама крајем XIX вијека захваљујући интензивној употреби електричне енергије. Неки од најпознатијих изума из овог периода су Едисонова⁵ електрична сијалица и Теслин⁶ електромотор наизмјеничне електричне струје. Изузетно вриједна помена је и Фордова⁷ покретна трака, први пут примијењена 1913. године за склапање, у то вријеме, врло популарног аутомобила, модел Т. Трећа индустријска револуција започела је крајем XX вијека у више индустријски високо развијених држава (прије свега, у Сједињеним Америчким Државама, Западној Европи и у државама Источне Азије) захваљујући широкој примјени информационих технологија. Ову индустријску револуцију најближе описује прелазак са аналогне на дигиталну технологију, те масовна производња и примјена рачунара, мобилних телефона, и слично. У последње вријеме, производњу карактеришу напредна дигитализација и умрежавање унутар, али и ван производних система. На тај начин се омогућава да сами производи, у некој мјери, управљају сопственим производним процесом⁸ преносећи информације од једног до другог технолошког система што доводи до стварања „паметних“ фабрика, а самим тим и новог значајног помака у индустријској производњи. Тај нови помак назван је четврта индустријска револуција или просто Индустрија 4.0 [6], [7]. Хронолошки преглед индустријских револуција приказан је на слици 3.



Слика 3. Хронолошки преглед индустријских револуција [8]

⁴ Конструктор прве локомотиве био је Џорџ Стивенсон (Вајлам, 09.06.1781. године – Честерфилд, 12.08.1848. године), енглески проналазач и инжењер.

⁵ Томас Алва Едисон (Мајлан, 11.02.1847. године – Вест Оринџ, 18.10.1931. године), амерички физичар и проналазач

⁶ Никола Тесла (Смиљан, 10.07.1856. године - Њујорк, 07.01.1943. године), српски научник и проналазач

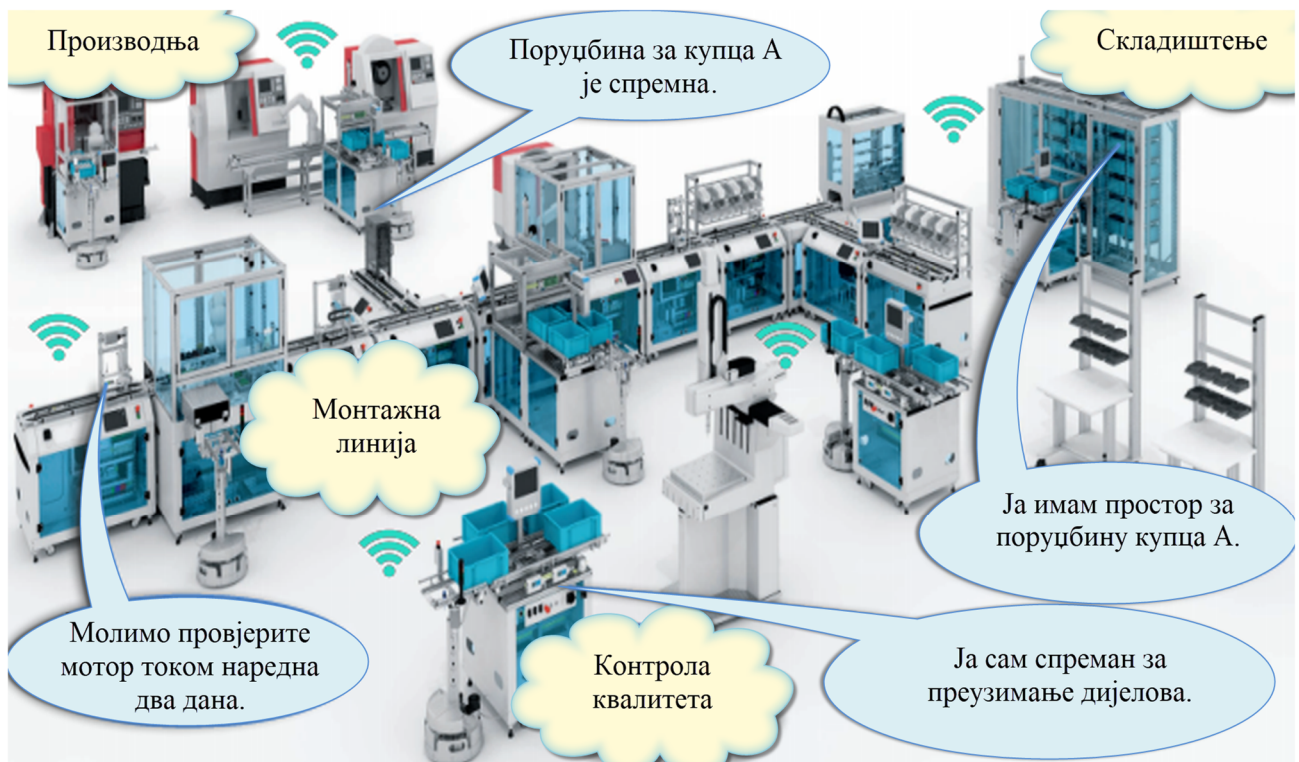
⁷ Хенри Форд (Гринфилд Тауншип, 30.07.1863. године – Дирборн, 07.04.1947. године), амерички предузетник, творац компаније Ford Motor Company.

⁸ „Паметни производи“ су производи који, захваљујући својим сензорским системима и електронским управљачким склоповима, могу да размјењују информације са другим производима, управљачким системима, околином, оператерима, корисницима, и слично. Подаци који се добијају од оваквих производа могу се користити за доношење одлука везаних за прилагођавање производног процеса тренутном захтјеву а све у циљу побољшања перформанси производа и скраћењу времена одговора на захтјеве купаца.

1.1 Индустрија 4.0

Основни концепт Индустрије 4.0 [6], [7], [9]–[13] први пут је представљен на хановерском сајму 2011. године. Веома брзо од свог увођења, појам „Индустрија 4.0“ постао је најинтересантнија заједничка тема њемачке академске и индустријске заједнице у многим приликама, а у међувремену се проширио и на друге индустријски развијене државе. Индустрија 4.0 је дефинисана као кључна трансформација у историји фабричке аутоматизације са циљем да:

- омогући производњу више различитих врста производа у оквиру исте производне линије,
- скрати вријеме одговора на специфичне, појединачне захтјеве купаца,
- оптимизује производњу уз уштеду енергије, материјала и новца, и
- прикупља, дијели и користи информације и на тај начин омогући непрекидну размјену информација између свих уређаја производне линије како би се остварио концепт „паметних“, умрежених фабрика [14]. Примјер функционисања једне такве фабрике приказан је на слици 4.



Слика 4. Примјер функционисања „паметне“, умрежене фабрике [14]

Увођење Индустрије 4.0 уско је повезано са чињеницом да су многе могућности за повећање профита у индустријској производњи исцрпљене и да је неопходно проналажење нових. Да би се повећао профит, свакако је неопходно и смањити трошкове индустријске производње, а примјена концепта Индустрије 4.0 могла би да резултира на сљедећи начин [9]:

- трошкови производње могу бити смањени за 10-30%,
- логистички трошкови могу бити смањени за 10-30%, и
- трошкови управљања квалитетом могу бити смањени за 10-20%.

Индустрија 4.0 у суштини доноси нови приступ производњи који у први план ставља прилагодљивост производње специфичним, индивидуалним захтјевима купаца, при чему се тежи скраћивању производног процеса и уштеди енергије [15]–[17]. Тај приступ се огледа у сљедећем: оператер, понекад и са удаљене

локације, дефинише само задатак који управљачки систем треба да обави, умјесто досадашњег дефинисања низа секвенци операције која треба да буде обављена, односно оператер само дефинише крајњи циљ, а управљачки систем сам бира одговарајући, унапријед припремљени план акције за дату операцију. Подразумијева се да управљачки систем у том случају мора да добије довољну количину информација кроз веома добро умрежен сензорски систем да би задатак извршио аутоматски, и то на оптималан начин.

Очекује се да коришћење овог приступа значајно повећа продуктивност производње чиме ће се додатно подстаћи индустријски раст [18], [19]. С тим у вези, очекује се и модификација потребног профила радне снаге јер је конструисање, а посебно програмирање рада и управљање радом система овог типа изузетно сложено. Да би управљачки систем могао да поприми улогу која се од њега очекује, потребно је ријешити сљедеће проблеме, односно одговорити на сљедећа питања:

- Паралелизам – Како операције могу бити обављене истовремено, синхронно или асинхронно?
- Очекивање/верификација – На који начин надгледати рад система у том случају и како константно верификовати завршене акције?
- Адаптација – Како омогућити тренутну промјену низа секвенци „на линији“?

Постављене захтјеве могуће је остварити само у савременим производним системима који представљају складну синтезу [1]:

- савремених технолошких поступака,
- рачунарски подржаних информационо-управљачких система, и
- аутоматизованог управљања процесом рада.

Такве производне системе карактерише максимални степен флексибилности, а токови материјала, енергије и информација су максимално међусобно повезани уз значајно присуство аутоматизованих и роботизованих система. Управљање процесима рада се изводи у дијалогу учесник-управљачки систем.

Висок степен флексибилности оваквих система омогућава производњу више различитих врста производа у склопу једне производне линије. У том случају, предмети рада морају да на извјестан начин сами управљају својим производним процесом, и на неки начин преносе значајне информације (на примјер, своје основне карактеристике, информације о тренутном нивоу обрађености и припремљености, и слично) од једног до другог технолошког система. У ту сврху често се користи RFID (енг. *Radio Frequency Identification*) технологија помоћу које је могуће читавати податке са ознака или уписивати податке на ознаке бесконтактно [20]. Исту операцију могуће је извршити и примјеном NFC-а (енг. *Near Field Communication*) у случају када се два елемента која међусобно комуницирају налазе на удаљености до 10 mm. Носиоци информације понекад, умјесто самих предмета рада, могу да буду, у зависности од начина руковања предметима рада, и стандардна транспортна помоћна средства као што су, на примјер, равне палете.

Поред тога што предмети рада и/или носачи предмета рада преносе информације између технолошких система, у оваквим производним системима од изузетног је значаја и да сами технолошки системи непрекидно међусобно размјењују информације (M2M, енг. *Machine-to-Machine*) али и да је сарадња између оператера и технолошких система (H2M, енг. *Human-to-Machine*) на изузетно високом нивоу. То свакако доприноси повећању ефикасности система са једне, али и безбједности оператера са друге стране. Безбједност оператера могуће је додатно подићи на виши ниво примјеном робота помоћника или

колаборативних робота, тзв. кобота (енг. *Cobot*) који помоћу својих сензора детектују ризичне ситуације и шаљу одговарајуће информације, а ефикасност и продуктивност система могуће је додатно подићи на виши ниво примјеном аутоматски вођених возила, AGV (енг. *Automated Guided Vehicles*) или аутономних робота.

Кључна ствар за несметано функционисање система овог типа је виртуелни простор за похрањивање података на интернету (енг. *Cloud*) [19] на коме се складиште подаци са сваког предмета рада, сваког технолошког система, сваког робота. На основу прикупљених података могуће је извршити анализу тренутног стања система, предвидјети потенцијалне отказе и прилагодити управљачке поступке тако да би се спријечило појављивање управо тих отказа [21]. Додатно, могуће је и константно пратити потрошњу енергије (на примјер, мјерити потрошњу ваздуха под притиском, мјерити радни притисак, испитивати топлотне параметре, провјеравати филтере, и слично) и у складу са тим, прилагођавати управљачке поступке како би се иста довела на најмању могућу мјеру.

На основу података добијених на претходно описани начин, могуће је извршити пресликавање реалног предмета рада (или једног његовог дијела) у његовог виртуелног близанца (енг. *Digital Twins*), који се може искористити за симулацију извршења неке операције рада, а све у циљу оцјене будућег понашања система при тачно дефинисаним условима [22]. Као резултат симулације може да се јави идентификација потенцијалних проблема још у вријеме развоја производа што ће условити правовремену реакцију за њихово рјешавање. Као што је могуће направити виртуелног близанца предмета рада, исто је могуће урадити и са цјелокупним производним системом креирањем дигиталне сијенке (енг. *Digital Shadow*), која омогућава довољно јасан приказ података из производње и симулацију производног ланца прије почетка његовог рада [23]. На тај начин могуће је урадити детаљну анализу потенцијалних грешака/проблема без скувих тестирања.

Додатне корисне информације о предметима рада, технолошким системима и/или производним процесима могуће је добити примјеном проширене, AR (енг. *Augmented Reality*) и/или виртуелне реалности, VR (енг. *Virtual Reality*) [24]–[28]. У AR апликацијама, видљиви свијет природе преклапа се слојем дигиталног садржаја који помаже приликом, на примјер, одржавања система или приликом монтаже. Са друге стране, VR поставља корисника на потпуно различиту локацију, маскира његово природно окружење и на тај начин му пружа неопходне информације.

Одржавање и реконфигурисање система могуће је понекад извести и даљинским путем, без директног физичког контакта са технолошким системом или једним његовим дијелом. Даљинско управљање повећава флексибилност, поједностављује примјену и додаје нови сет апликација које су претходно биле веома тешке за реализацију. Имплементација даљинског управљања омогућава многе предности без угрожавања основних функција система. Посебно је погодно при праћењу стања неког производног процеса, испитивању квалитета и мјерењу потрошње енергије, откривању отказа и детектовању нежељених стања у процесу, као и у отклањању истих [29]. На највишем нивоу, све елементе једног производног система могуће је хијерархијски интегрисати у различите нивое у Интернет ствари, IoT (енг. *Internet of Things*) да би се постигло комплетно рјешење, а то интегрисање омогућавају кибернетско⁹-физички системи, CPS (енг. *Cyber Physical Systems*) [30]–[32].

⁹ Кибернетски систем је еквивалентан самоуправљивом систему, а самоуправљивост подразумева да је такав систем истовремено отворен (између система и околине постоје релације одређене врсте и јачине), динамичан (стање елемената система, релације између њих и њихове карактеристике се мијењају у времену), управљив и да сам собом управља [2].

1.1.1 Флексибилност производних система

Једна од основних карактеристика савремених производних система који функционишу у складу са принципима Индустије 4.0 јесте флексибилност [33]. Под појмом флексибилности производних система подразумева се мјера њихове способности за прилагођавање условима и утицајима околине, као и захтјевима процеса рада у датом времену и датим условима околине [1], [2], [33]. Разликују се:

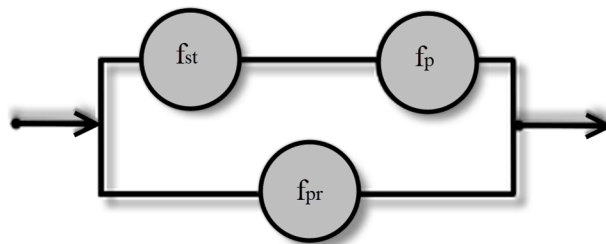
- флексибилност структуре, која представља вјероватноћу да ће се дата структура успјешно прилагодити условима околине, захтјевима поступака рада и поремећајима у процесу рада, и
- флексибилност процеса рада, која представља вјероватноћу да ће се дати процес рада успјешно, у што је могуће краћем временском року, прилагодити захтјевима услова околине.

Флексибилност структуре је израз конструкционо-технолошких параметара елемената структуре система, а флексибилност процеса рада је израз временских величина и организационих захвата у процесу рада производног система. Флексибилност структуре се изражава кроз флексибилност структуре тока, која се састоји из двије компоненте, технолошке и капацитивне, и кроз флексибилност структуре простора. Укупна флексибилност система условљена је међусобном везом појединих компоненти (слика 5) и одређује се коришћењем формуле 1:

$$f_{ps} = 1 - (1 - f_{st} \cdot f_p) \cdot (1 - f_{pr}) \quad (1)$$

гдје је:

- f_{ps} – укупна флексибилност производног система,
- f_{st} – флексибилност структуре тока,
- f_p – флексибилност простора, и
- f_{pr} – флексибилност процеса рада.



Слика 5. Укупна флексибилност производног система [2]

Флексибилни производни системи, FMS (енг. *Flexible Manufacturing Systems*) [34] представљају технолошки најнапредније производне јединице – ћелије са веома високим степеном аутоматизације, засноване на примјени групне технологије [35]–[39]. У високо аутоматизоване производне системе FMS интегрише многе од концепата и технологија:

- флексибилну аутоматизацију,
- CNC¹⁰ машине,

¹⁰ CNC (енг. *Computer Numerical Control*) машина је врста обрадне машине која све операције реализује према одговарајућем програму, преко рачунарске управљачке јединице која директно управља радом машине. Програм садржи све инструкције потребне за обликовање одређеног предмета рада. Коришћењем машина овог типа могуће је обављати операције рада као што су бушење, резање, стругање, глодање, савијање, и слично.

- дистрибуиране управљачке системе,
- аутоматизоване системе за руковање материјалом и складиштење,
- групну технологију, и слично.

Флексибилни аутоматизовани систем [35]–[39] је, у суштини, онај систем који има способност да производи скуп различитих предмета рада, са веома малим временом потребним за пребацивање са производње једног типа предмета рада на производњу другачијег типа предмета рада. У њему нема физичког прилагођавања опреме нити репрограмирања система. Систем производи разноврсне комбинације производа и у различитим редослиједима прилагођавајући се на тај начин индивидуалним захтјевима купаца, умјесто производње у великим серијама. Потребно је нагласити да разлике између предмета рада које процесира овакав систем нису велике, односно у једном оваквог систему није могуће производити, на примјер, дијелове за авионе и спортску опрему. У системима овог типа обрађују се предмети рада сличних карактеристика и потребне промјене за различите серије се, по могућности, свде на најмању мјеру.

Главне предности FMS су [34]:

- повећано искоришћење и смањен број технолошких система,
- смањен потребан простор, као и количине залиха,
- повећана и убрзана способност одговора на специфичне захтјеве купаца,
- скраћено вријеме технолошког циклуса производње,
- смањени директни трошкови а повећана продуктивност рада, и слично.

Основни недостаци FMS су [34]:

- велика инвестиција, и
- велика потреба за високо квалификованом радном снагом (инжењерским кадром).

Провјера да ли је неки систем флексибилан или не врши се кроз четири теста [34]:

- тест разноликости дијелова,
- тест промјене плана производње,
- тест способности опоравка од грешке, и
- тест способности примања нових дијелова.

Дакле, потребно је провјерити да ли је систем у стању да обрађује различите типове предмета рада у серијској производњи, да ли је спреман да прихвати промјене у плану производње, да ли може лако да се опорави од лошег функционисања, грешака у раду или потпуног застоја тако да производња не престаје у потпуности, и да ли се на постојећем производном систему могу обрађивати нови предмети рада без великих тешкоћа. Уколико су сви поменути критеријуми задовољени, тада се производни систем оправдано може сматрати флексибилним.

1.1.2 Поузданост производних система

Друга веома важна карактеристика савремених производних система је поузданост [40]. Под појмом поузданости производних система [2], [41]–[45] подразумијева се вјероватноћа да ће систем, по уласку у подручје дозвољених одступања, успјешно вршити функцију циља у датом подручју, пројектованом времену и датим условима околине. Развој концепта поузданости заснован је на упоређивању величина

постављене функције циља и остварене функције радне способности система, па је у општем случају поузданост могуће изразити као функцију двије поменуте величине (2):

$$P(t) = f(f_c(t), f_{rs}(t)) \quad (2)$$

гдје је:

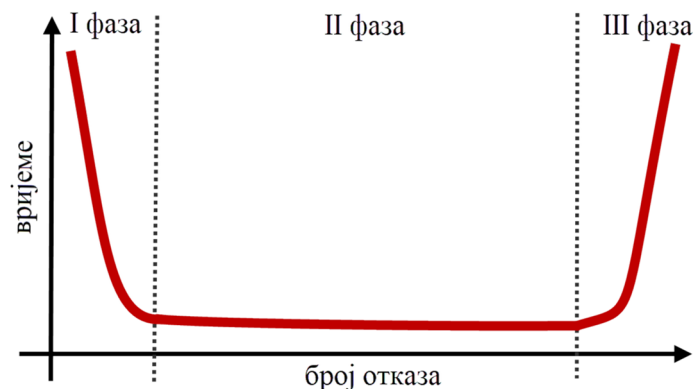
- $P(t)$ – поузданост производног система,
- $f_c(t)$ – функција циља производног система, и
- $f_{rs}(t)$ – функција радне способности производног система.

Једноставније речено, поуздан је онај систем који своју функцију извршава несметано, без отказа односно квара. Поузданост [40] је веома сложен појам и представља једну од најважнијих карактеристика система. Да би се добро одредили параметри поузданости, која у великој мјери зависи од стохастичких процеса, потребно је добро познавати систем. На примјер, отказ једног елемента система не мора истовремено да значи и отказ цијелог система, уколико је ријеч о елементу периферног значаја. Међутим, уколико је ријеч о елементу од виталног значаја за систем, његов отказ проузроковаће и отказ цијелог система.

Поузданост производних система условљена је великим бројем елемената [2], [40]:

- карактером функције циља и величином подручја дозвољених одступања,
- начином структурирања елемената у систему и степеном сложености структуре система,
- поступком извођења процеса трансформације улазних у излазне величине,
- квалитетом обраде и монтаже,
- временом рада елемената система у укупном времену рада система,
- учестаношћу отказа елемената и система у времену,
- погодношћу и поступцима (замјена или оправка) одржавања система, и слично.

Један од најзначајнијих показатеља поузданости свакако је учестаност отказа елемената и система у времену, која се најчешће дефинише као очекивани број отказа у одређеном временском интервалу и код великог броја техничких и производних система има криву расподеле у облику „каде“ [40], као што се може видјети на слици 6. Крива показује три периода у експлоатацији система: откази су чести у првој фази односно фази разраде система (тзв. „дјечије болести“), затим слиједи период нормалног рада система са ниском, константном вриједношћу броја отказа, и све се завршава трећом фазом и крајем животног вијека, када се поново повећава учестаност отказа система због дотрајалости истог.



Слика 6. Крива расподеле учестаности отказа у току вијека трајања система

Повећању поузданости производног система могуће је допринијети на више начина, као на примјер [42]:

- додавањем резервних елемената у систем,
- константним надзором и одржавањем како појединих елемената система тако и система као цјелине,
- коришћењем планираних застоја система за обављање послова усмјерених на повећање поузданости (периодичне поправке и замјена истрошених дијелова без чекања да се неки поквари), и слично.

1.2 Даљинско управљање

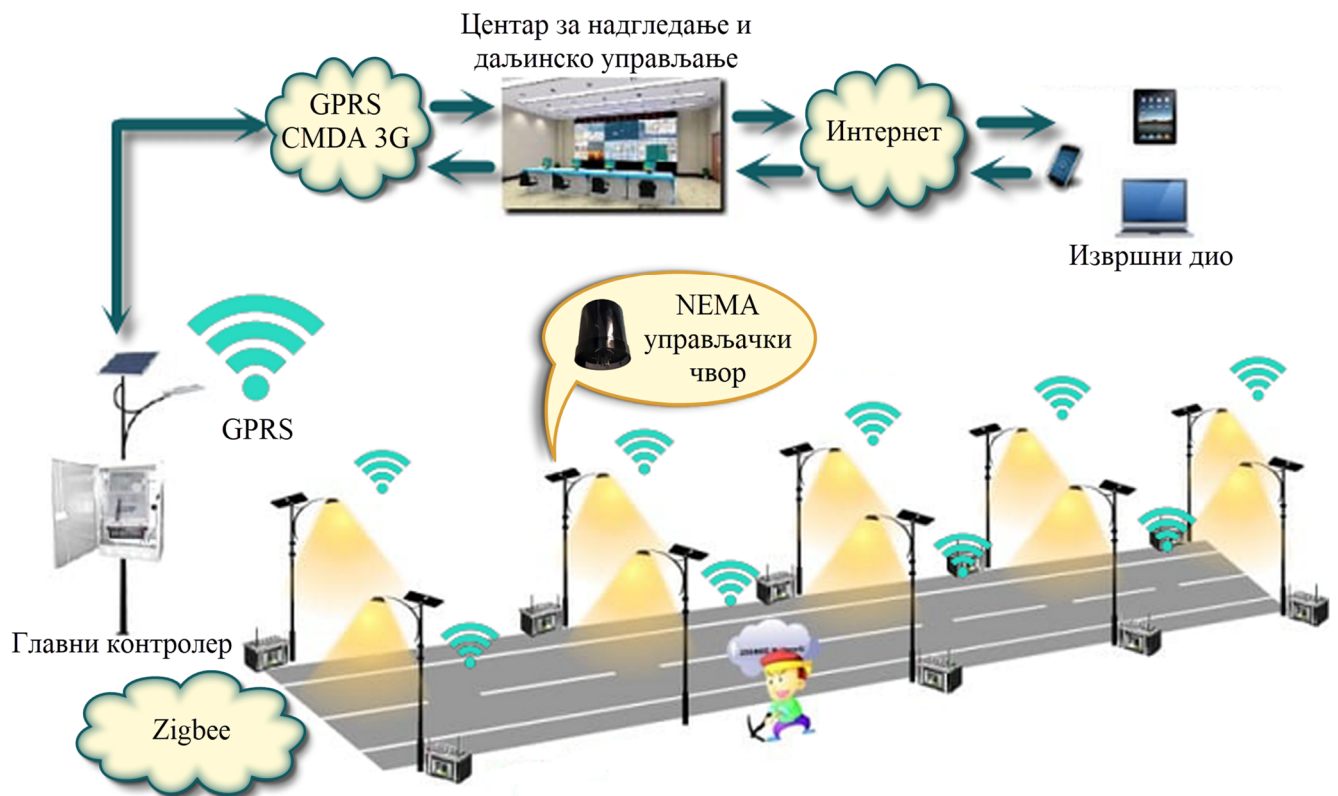
Управљање¹¹ неким системом пројектује се са циљем да систем оствари жељено понашање. Да би управљање било успјешно, неопходно је пратити понашање система, односно у одговарајућем тренутку добити потребну информацију о стању елемената система или цјелокупног система. Почетна истраживања, која су подразумијевала чулна опажања, временом су прерасла у добијање података помоћу одговарајуће мјерне опреме. Довођењем тих добијених сигнала на панеле са инструментима или системе одговарајућих свјетлосних индикатора, формиран су и први системи за праћење и надзор неког процеса, као и за управљање тим процесом [46]. На основу добијених информација, оператер би ручно, преко различитих потенциометара и других давача сигнала, подешавао параметре контролера који управљају процесом. Дакле, дужност систем оператера била је та да повремено надгледа измјерене вриједности, изврши одабир и постави задату вриједност.

Проблем је, међутим, и даље био отворен код читавог низа система код којих је, из различитих разлога, било тешко пратити мјерне сигнале. Тако су, на примјер, од самог настанка идеје о примјени технолошких достигнућа за временску прогнозу, истраживачи схватили да им је за иоле релевантне резултате неопходна веома велика количина података. Нажалост, само мали дио тих података могао се прикупити на мјестима која су приступачна, и на којима људи живе. Сличан проблем јавио се и у жељезничком саобраћају, гдје је било потребно пратити кретање возова и обавјештавати скретничаре дуж пруге када треба да поставе скретнице или да спусте рампе [46]. Рјешавајући поменуте проблеме, инжењери су препознали потребу и за двосмјерном комуникацијом. На тај начин, створена је могућност да се из даљине, на примјер, не само надзире кретање возова, већ и да се слањем одговарајућих сигнала управља електромагнетним скретницама. Ово рјешење управљања привукло је компаније које су се бавиле преносом електричне енергије и гаса на даљину и које су рјешавале сличан транспортни проблем, што је за резултат имало то да је ова област заживјела [46], а да данас, како је већ претходно речено, представља незаобилазан саставни елемент Индустије 4.0.

Посматрано из техничког аспекта, под појмом „даљинско управљање“ или „управљање на даљину“ описују се поступци, технике и системи који омогућавају управљање објектима, процесима или њиховим

¹¹ За дефинисање појмова и назива у регулационој и управљачкој техници користи се DIN 19226 [103] стандард („Регулациона и управљачка техника, појмови и називи“) који је издат 1968. године и још увијек је актуелан. Према поменутом стандарду, управљање се дефинише као процес у неком систему, у коме једна или више улазних величина утичу, преко законитости која је својствена само том систему, на друге величине, као излазне величине. Карактеристика овог процеса јесте његово одвијање у отвореном кругу. Према истом стандарду, регулација се дефинише као процес при коме се непрекидно прати одређена величина која се регулише (регулисана величина), пореди се са жељеном (водећом) величином и, у зависности од резултата поређења, врши се утицај на регулисану величину тако да се она приближи жељеној величини. Карактеристика овог процеса јесте његово одвијање у затвореном кругу.

саставним дијеловима на даљину [29]. Главна разлика у односу на класично управљање је то што се ова врста управљања одвија са локација које се налазе на већим или мањим растојањима од објеката управљања. Објекат управљања и управљачки објекат немају директни контакт и између њих се налази телекомуникациони или мрежни систем који омогућава пренос података и сигнала. Управљање на даљину данас се примјењује у многим областима, посебно при реализацији концепта тзв. „пааметних“ градова (енг. *Smart city*) [47]–[50]. У складу са тим, у области освјетљења [51]–[53], већ неколико година, велики свјетски произвођачи свјетилки и свјетлосних извора раде на развоју даљинског система који омогућава даљинску дијагностику уз могућност управљања (слика 7), тј. укључења и искључења свјетилки, као и регулације свјетлосног флукса (димовања). Овај систем омогућава двосмјерну комуникацију, тј. има могућност слања команде али и пријема информације о статусу свјетилки, као и потврде да је команда извршена [53]. У области пољопривредне производње [54]–[58], развијени су системи који имају могућност прикупљања велике количине података, попут тренутне вриједности температуре и влажности ваздуха и земљишта, притиска, концентрације одређених хемијских једињења, и слично. Истовремено, имају могућност и даљинског управљања на основу прикупљених података, на примјер, отварања и затварања прозора и врата на стакленику у циљу регулације температуре [58], и слично.



Слика 7. Систем за надгледање и даљинско управљање јавном расвјетом компаније ZGSM [59]

За имплементацију даљинског управљања, потребно је развити и/или примијенити одговарајуће софтверско рјешење које ће то и омогућити. Једно такво рјешење, које је у својој основи намијењено за индустријске примјене [60], а затим прилагођено и за учење на даљину [61]–[63] кроз приступ даљинским лабораторијама и извођење експеримената, је SEyeClon платформа. Развој даљински управљаних лабораторија [64], [65], у склопу концепта Индустрије 4.0, образовање ученика и/или студената, посебно техничких струка, али и запослених у производним системима у индустрији, подиже на виши ниво. На тај начин, коришћењем даљинских лабораторија у образовању, ученици и/или студенти су у стању да

дијелове свог образовног процеса реализују од куће или са неког другог погодног мјеста. То образовање чини доступнијим, нарочито онима из руралних подручја. Поред тога, то образовање чини и удобнијим, јер ученици и/или студенти имају могућност да сами креирају сопствени распоред активности. Што се тиче запослених у индустрији, њима коришћење даљинских лабораторија омогућава упознавање са опремом која им, можда, у датом тренутку није на располагању, или тестирање рада система сличног стварном, прије пуштања у производни процес стварног система, чиме се детектују поједине грешке и откази. Даљинске лабораторије и даљински експерименти се најчешће примјењују у области енергетске електронике [66], електронике [67], мехатронике и роботике [68]–[70]. Поред техничких области, даљинске лабораторије и даљински експерименти заступљени су и у области природно-математичких наука, на примјер, у физици [71] и хемији [72]–[74].

Управљање на даљину могуће је реализовати и имплементирати на већи број начина, а који од њих ће бити изабран зависи од врсте управљања и од самог система којим се управља. У случају савремених, аутоматизованих индустријских система, могуће је користити неколико различитих приступа од којих су неки намјенски развијени за индустријске, а неки за едукативне примјене, и накнадно прилагођавани индустријским захтјевима, а то су:

- управљање системима удаљеним приступом сервер рачунарима помоћу TeamViewer-a [75]–[77],
- управљање системима коришћењем намјенски развијених софтверских рјешења, као што су iLab Shared Architecture (ISA), Labshare (Sahara), WebLab-Deusto, CEyeClon [61]–[63], [78], [79],
- управљање системима помоћу веб страница [77], [80], и
- управљање системима помоћу LabVIEW апликација [66], [81].

Примјена апликације TeamViewer [75]–[77] представља једно од најједноставнијих рјешења за реализацију приступа удаљеним рачунарима и управљање неким аутоматизованим системом. TeamViewer је првенствено намијењен за „подршку на даљину“ у пословним примјенама, али је доступан и као бесплатна верзија за приватне кориснике. Могуће га је користити уколико је систем којим се управља, на неки начин (преко проводника или бежичним путем), повезан са сервер рачунаром на коме је инсталирана апликација за промјену параметара и управљање системом. Главни недостатак овог приступа је низак ниво безбједности система.

Слична рјешења представљају и намјенски развијане софтверске платформе, као што су, на примјер, WebLab-Deusto и CEyeClon [61]–[63], [82], али су код њих ограниченост приступа, те безбједност и заштита система на знатно вишем нивоу. Додатно, за разлику од неких других рјешења, као што су TeamViewer и LabVIEW, поменуте платформе не захтијевају додатну конфигурацију комуникационих портова, искључење антивирусног система приликом комуникације, и слично. Као такве, изузетно су погодне за управљање на даљину, за шта су суштински и намијењене.

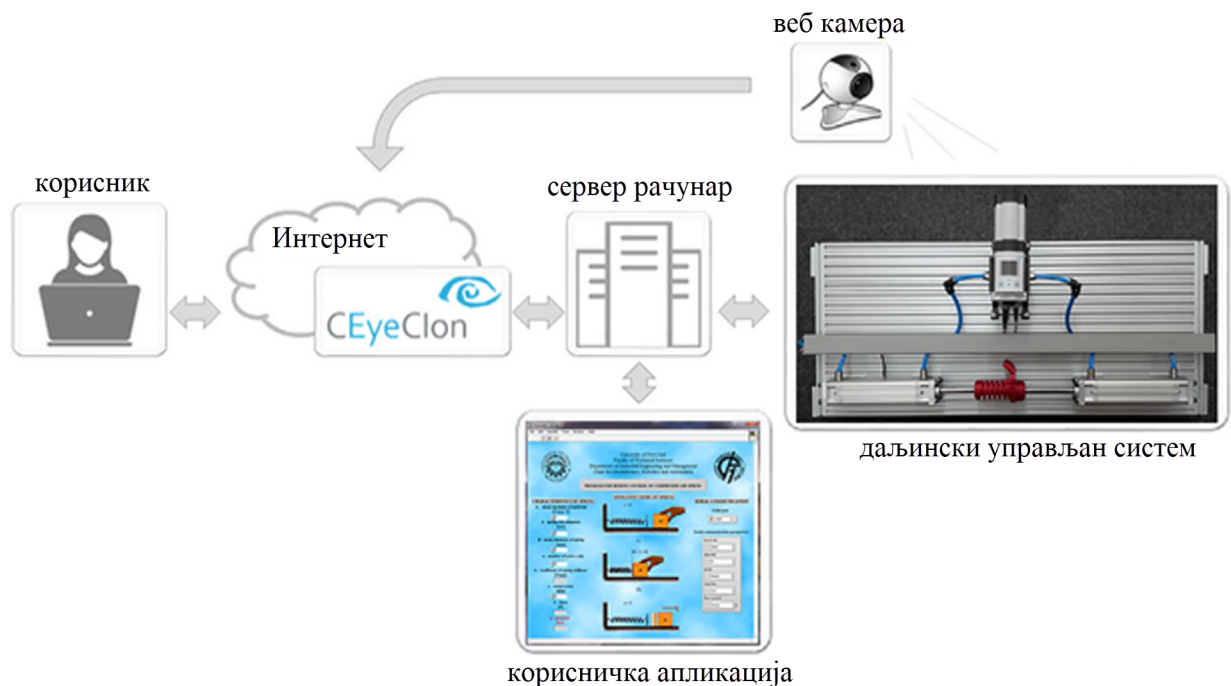
Уколико се за управљање системом користи контролер који посједује режим рада назван веб сервер, њему је могуће приступити директно помоћу одговарајуће, најчешће статичке, IP адресе¹² [77], [80].

¹² IP адреса (енг. *Internet Protocol Address*) је јединствени број, сличан телефонском, који се додјељује уређајима (најчешће рачунарима, контролерима, штампачима, и слично) на рачунарској мрежи која за комуникацију користи интернет протокол.

Промјена управљачких параметара и управљање системом омогућени су директним приступом контролеру помоћу веб странице на коју се инсталира корисничка апликација. Предност овог приступа је смањење броја компоненти, јер се не користи додатни сервер рачунар, већ се директно приступа контролеру који управља системом, а главни недостатак је низак ниво безбједности и заштите система.

Приступ који у себи интегрише дијелове претходно поменутих приступа је управљање аутоматизованим системима коришћењем LabVIEW апликација [29], [67], [68], [83]–[85]. Уколико се користи додатни сервер рачунар на који је повезан систем којим се управља са удаљене локације, потребно је креирати серверску и клијентску LabVIEW апликацију, и коришћењем стандардних интернет протокола остварити одговарајућу комуникацију. Додатни сервер рачунар могуће је избјећи коришћењем намјенски развијеног контролера компаније National Instruments [83] под називом CompactRIO [85].

Битно је напоменути и то да је, у свим претходно дефинисаним случајевима, у непосредној близини управљаног система неопходно инсталирати и веб камеру како би се уживо могле пратити све промјене стања система. Примјер даљинског управљања аутоматизованим системом приказан је на слици 8. За приступ систему, у овом случају, користи се SEyeClon платформа.



Слика 8. Пuteви комуникације приликом управљања на даљину коришћењем SEyeClon платформе [61]

1.3 Пнеуматски управљачки системи

Савремене индустријске процесе скоро је немогуће замислити без примјене пнеуматских¹³ система. То су системи које сачињавају уређаји и машине који раде на сабијени ваздух (ваздух под притиском) или разријеђени ваздух (вакуум) [86], [87]. Комплетан и јединствен пнеуматски систем сачињавају производни, припремни и дистрибутивни дио система ваздуха под притиском са једне стране и извршни,

¹³ Пнеуматика је међународни израз за примјену пнеуматских елемената у технолошким системима у производним процесима. Савремена пнеуматика, с вишеструким могућностима примјене, почела је у Њемачкој допуњавати до тада познате технике тек после 1950. године. У међувремену, пнеуматика се развила у значајну и веома успјешну грану технике [88].

односно потрошачки дио система ваздуха под притиском са друге стране. Једна од најважнијих предности пнеуматских система јесте та што се могу примјењивати и у најтежим климатским условима и у најопаснијим окружењима, у којима, на примјер, постоји могућност експлозије, појаве ватре, отровних испарења, и слично. Користе се на опреми која служи за производњу или руковање материјалом у фабрикама и/или складишним системима. Такође, пнеуматски системи присутни су и ван фабрика, при транспорту и/или испоруци производа, јер омогућавају покретање помоћних система на камионима, возовима, бродовима и авионима.

Већ деценијама, пнеуматски системи успјешно опстају у свијету стално промјенљиве технологије. Велика заслуга за то припада и пнеуматским радним елементима који пружају изузетно добар однос цијена и радних карактеристика. Посебно су пнеуматски цилиндри наишли на изванредан пријем у техници те су постали једна од најзаступљенијих врста радних елемената која је данас у примјени [86]–[88]. Поготово су значајне њихове сљедеће особине:

- повољна цијена,
- једноставна а робусна конструкција,
- једноставна инсталација,
- једноставно управљање,
- једноставно одржавање,
- доступност у великом броју димензија,
- експлозивна сигурност, и слично.

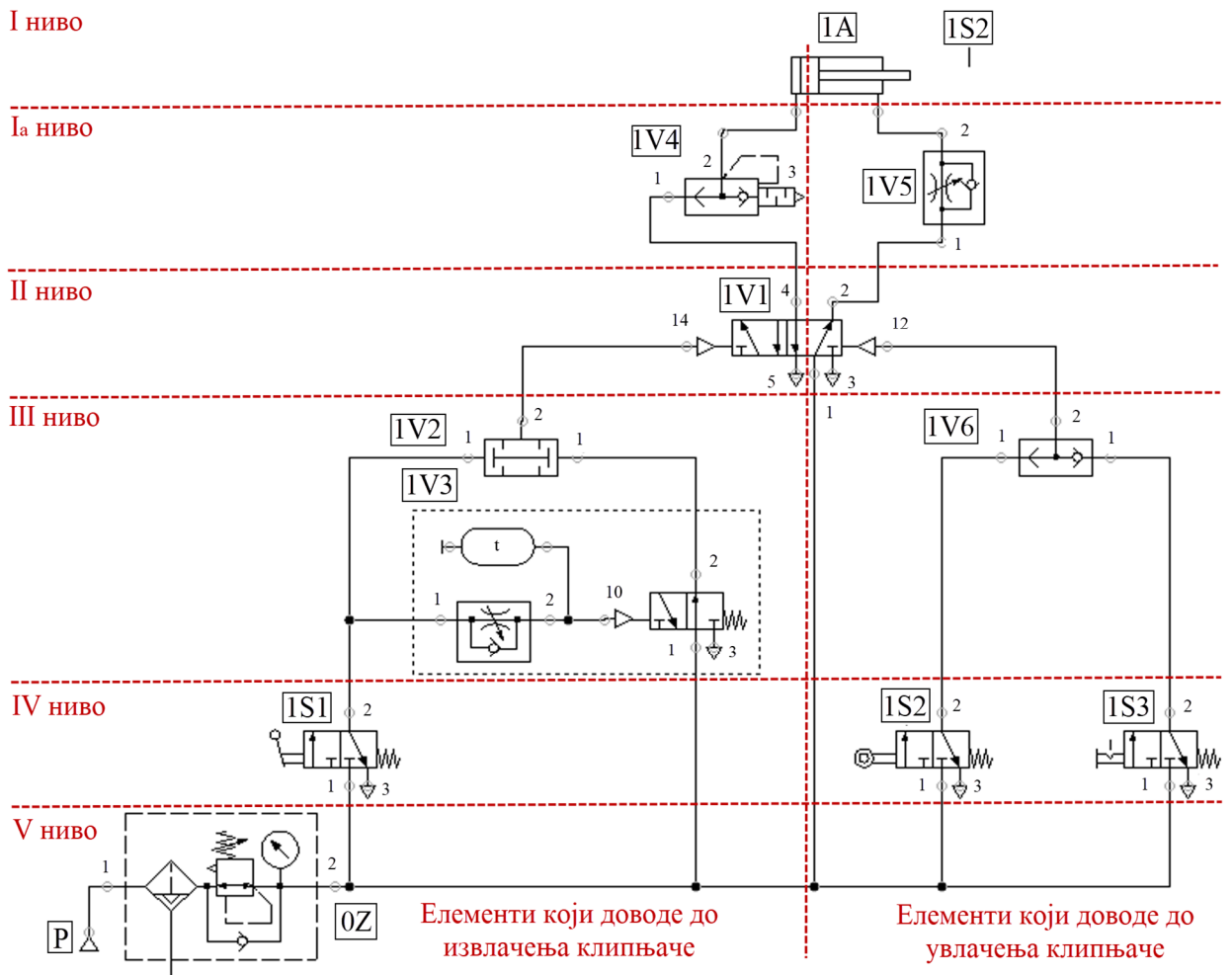
Пнеуматски систем се састоји од међусобно повезаних група елемената, као што је приказано на слици 9. Ове групе елемената формирају пут који омогућава ток сигнала са почетком на улазном дијелу и крајем на дијелу са радним елементима тј. извршним органима, односно излазу. Управљање радним елементима врши се преко управљачких или командних елемената на основу сигнала добијених од елемената за обраду сигнала [86]–[88].



Слика 9. Ток сигнала у управљачком ланцу и елементи управљачког ланца [86]–[88]

Начин функционисања пнеуматског управљачког система и веза између његових елемената (али не и њихова физичка позиција) приказују се коришћењем пнеуматских управљачких шема на којима се елементи приказују упрошћено, преко симбола, као што се може видјети на слици 10. Основни нивои у пнеуматским системима су:

- ниво I – ниво радних елемената (актуатора),
- ниво I_a – ниво за регулацију брзине извршних органа и сигурносне функције,
- ниво II – ниво управљачких разводника,
- ниво III – ниво логичких елемената, односно елемената за обраду сигнала,
- ниво IV – ниво сигналних елемената, и
- ниво V – ниво елемената за снабдијевање ваздухом под притиском.



Слика 10. Примјер пнеуматске управљачке шеме са јасно назначеним нивоима

Пнеуматске компоненте и системе одликује висока способност прилагођавања новим технологијама те тако могу да остваре адекватну везу и са рачунарским и електронским управљачким технологијама у времену које се одликује огромним развојем у тим областима. Због тога је, у посљедњих 30-ак година, био примјетан развој пнеуматских компоненти и система који су се одвајали од класичне пнеуматике и то на тај начин што су вршена „фина подешавања“ постојећих конструктивних рјешења и усклађивање са новим трендовима комуникације са управљачком електроником [88]. Тај развој кретао се у два правца: правцу развоја „интелигентних“ пнеуматских компоненти [89]–[92] и правцу развоја „интелигентних“ пнеуматских система [93]–[95]. Ово је довело до тога да је, на примјер, омогућено позиционирање пнеуматских радних

елемената у међуположајима, тј. за вријеме кретања између два крајња положаја коришћењем пнеуматских оса за регулацију положаја, или до тога да нека пнеуматска компонента реагује на догађај у току процеса не чекајући наредбу од неког управљачког елемента. Описана спрега између пнеуматике и рачунарских и електронских управљачких технологија названа је „интелигентна пнеуматика“.

Додатним трансформацијама, посљедњих неколико година, постигнут је виши ниво спрезања [96]–[101] и уведен је нови термин – „дигитална пнеуматика“ [86], [102]. Дигитална пнеуматика омогућава да један хардверски елемент, уз одговарајућу управљачку електронику и одговарајуће софтверско рјешење, замијени велики број индивидуалних компоненти. На тај начин, поред основних функција разводника, могуће је реализовати и задатке са сложенијим профилима кретања који су до сада могли да се изведу само помоћу сервопнеуматике. Поред тога, у поменути хардвер, могуће је лако имплементирати и дијагностичке функције за праћење и смањење потрошње ваздуха под притиском [102]. Умрежавањем већег броја система овог типа могуће је достићи ниво управљања технолошким системом, чији су саставни елементи поменути дигитални системи, а умрежавањем таквих технолошких система, и ниво управљања цјелокупним производним процесом у једној фабрици, односно направити „паметну“ фабрику.

1.4 Предмет истраживања

Предмет истраживања ове докторске дисертације су даљински управљани, дигитални пнеуматски системи. У самој дисертацији објашњено је на који начин је могуће традиционалне пнеуматске управљачке системе унаприједити тако да постану даљински управљани, или испројектовати и развити тако да омогуће реализацију већег броја различитих функција, уз реконфигурацију искључиво софтверским путем (без физичке замјене компоненти), са могућношћу директне промјене управљачких параметара у току самог процеса рада. На тај начин, пнеуматски управљачки системи ће достићи ниво флексибилности потребан за прилагођавање сталним промјенама захтјева купаца и поступака рада који доноси Индустрија 4.0. Ово је веома значајно, будући да се у наредном периоду очекује трансформација традиционалних индустријских постројења, како би се иста приближила трендовима које доноси Индустрија 4.0. То подразумијева надградњу постојећих система савременом опремом за даљинско управљање и комуникацију, без круцијалних промјена у самој опреми и производним процесима. Дакле, идеја је да се велики број постојећих фабрика прилагоди трендовима које доноси Индустрија 4.0, јер није реално очекивати масовну изградњу нових, „паметних“ фабрика. Поред претходно наведеног, у оквиру ове докторске дисертације дефинисане су главне предности даљински управљаних, дигиталних пнеуматских система у поређењу са традиционалним пнеуматским управљачким системима, а које се односе на поузданост и сигурност у раду, трошкове производње, и слично. Додатно, кроз један примјер софтверског рјешења, приказан је модел за управљање системима овог типа.

Наслов дисертације истиче мултидисциплинарни приступ проблему. У складу са тим, за потребе ове дисертације развијена су три експериментална постројења на којима је могуће, даљинским путем, мијењати управљачке параметре и тиме систем прилагодити тренутном захтјеву. Ти захтјеви се односе на даљинско управљање кретањем пнеуматских радних елемената простим активирањем, односно деактивирањем командних разводника, даљинску промјену вриједности притиска у управљачком систему чиме се остварује индиректно управљање по сили, и даљинску промјену вриједности протока чиме се остварује индиректно управљање по брзини. Хардверске реализације поменутих постројења су

пропраћене одговарајућим софтверским рјешењима. У складу са претходно наведеним, дефинисана је прва хипотеза овог истраживања:

- Хипотеза 1: Постојеће пнеуматске управљачке системе могуће је надградити тако да се даљинским путем омогући управљање кретањем пнеуматских радних елемената и промјена вриједности управљачких параметара чиме се остварује даљинско управљање по сили, односно по брзини.

Поред развоја претходно поменутих експерименталних постројења, дијелови истих интегрисани су у један свеобухватни, дигитални пнеуматски систем чију хардверску реализацију прати одговарајуће софтверско рјешење. На том систему испитан је концепт који омогућава избор адекватног типа управљања уколико се као критеријум постави:

- вријеме завршетка процеса рада (продуктивност), или
- потрошња енергије (енергетска ефикасност).

Поменути критеријуми дефинисани су у складу са захтјевима за повећањем флексибилности производних процеса. Наиме, управљачки системи се пројектују увијек тако да задовоље критичне услове. На примјер, уколико се један радни елемент користи за подизање три предмета рада различитих маса, он ће бити пројектован тако да сигурно може подићи најтежи предмет рада потребном брзином. У случајевима када се подижу лакши предмети рада, подизање је могуће извршити и са мањом потрошњом енергије, смањивањем радног притиска у систему јер је, у том случају, за подизање потребна мања сила. Даље, уколико је дату операцију рада потребно синхронизовати са другом, која из неког разлога дуже траје, нема потребе да се подизање различитих предмета рада обавља максимално могућом брзином. У том случају, могуће је смањити брзину, а самим тим повећати поузданост, односно продужити животни вијек компоненте, јер се смањује хабање, и слично. У складу са претходно наведеним, дефинисана је и друга хипотеза овог истраживања:

- Хипотеза 2: Пнеуматски управљачки системи могу се формирати тако да буду искључиво софтверски реконфигурабилни (без физичке замјене компоненти) уз могућност директне промјене управљачких параметара у току процеса рада (даљинске промјене протока и/или притиска), чиме достижу ниво флексибилности потребан да се задовоље основни концепти Индустије 4.0.

1.5 Циљ истраживања и очекивани резултати

Главни циљ истраживања у оквиру докторске дисертације је развој модела за даљинско управљање дигиталним пнеуматским системима у концепту Индустије 4.0. Циљ дисертације остварен је реализацијом неколико парцијалних задатака (експерименталних постројења). Ова постројења обухватају реализацију пнеуматских управљачких система у којима је могуће даљинским путем управљати кретањем радних елемената, мијењати радни притисак и проток ваздуха под притиском, и тиме утицати на позицију радних елемената, на силу коју могу да остваре и на брзину њиховог кретања.

Након тога, извршена је интеграција дијелова тих експерименталних постројења у један свеобухватни, дигитални пнеуматски управљачки систем, и на њему су извршени експерименти који су послужили као основа за развој претходно поменутог модела. Искључиво софтверским путем (без физичке замјене компоненти), тај систем омогућава реализацију већег броја функција, као што су:

- даљинско управљање доводом и одводом ваздуха под притиском,
- даљинско управљање кретањем и позиционирањем пнеуматских радних елемената,
- даљинска промјена притиска у систему, и
- даљинска промјена протока ваздуха под притиском.

Како би модел адекватно могао бити имплементиран на развијена експериментална постројења, за свако је развијено и одговарајуће софтверско рјешење. Софтверско рјешење које прати развој свеобухватног дигиталног пнеуматског система уједно представља и посебан циљ ове докторске дисертације. Софтверско рјешење је доступно у оквиру корисничке апликације. Преко ове апликације, корисници имају могућност да одаберу критеријум по којем ће се систем (експериментално постројење) понашати. Предвиђена је могућност избора два критеријума:

- продуктивности (минимално вријеме завршетка операције рада), или
- енергетске ефикасности (минимална потрошња ваздуха под притиском).

Примјена резултата добијених истраживањем у оквиру ове докторске дисертације могућа је, прије свега, у свим индустријским, а потом и неиндустријским системима у којима постоје радни елементи који се снабдијевају ваздухом под притиском. Највећи степен примјене добијених резултата може да се очекује у производним погонима у којима су од посебног значаја минимално вријеме завршетка операције рада (продуктивност) или минимална потрошња ваздуха под притиском (енергетска ефикасност).

1.6 Преглед дисертације по поглављима

Ова докторска дисертација се састоји од пет поглавља. Након уводног дијела, у поглављу 2 приказане су теоријске основе и дат је преглед актуелног стања у области. Посебна пажња посвећена је приказу традиционалног ON-OFF управљања, управљања по сили и управљања по брзини у пнеуматским управљачким системима. Наиме, тиме су обухваћени фундаментални принципи пнеуматског управљања, а то су управљање кретањем радног елемента у зависности од положаја управљачког разводног вентила, управљање брзином кретања радног елемента, промјеном протока ваздуха под притиском, и управљање по сили, промјеном радног притиска у управљачком систему. Даље, детаљно је приказано управљање дигиталним пнеуматским системима, односно системима који у себи интегришу све претходно наведено, а који за покретање управљачких разводних вентила најчешће користе ширинско-импулсну модулацију, PWM (енг. *Pulse Width Modulation*).

У оквиру поглавља 3 приказана је методологија истраживања и описане су коришћене истраживачке методе. Детаљно су представљена развијена експериментална постројења.

Експериментално постројење под називом „Даљински управљан кружни манипулатор“ служи за имплементацију стандардног, корачног управљања пнеуматским радним елементима. Састоји се од пет пнеуматских цилиндара двосмјерног дејства и једне пнеуматске хваталке. Предмети рада ваљкастог облика смјештени су у вертикални магацин за складиштење. Праћењем извршења основног радног циклуса по корацима могуће је уочити како предмети рада „круже“ од једног до другог радног елемента. Одатле и потиче сам назив манипулатора. Развојем манипулатора и имплементацијом система за даљинско управљање, приказан је начин на који је могуће коришћењем унапријеђеног традиционалног ON-OFF управљања управљати кретањем пнеуматских радних елемената на даљину.

Експериментално постројење под називом „Даљински управљана пнеуматска опруга“ служи за симулацију рада механичких опруга при сабијању под различитим условима. Користе се два пнеуматска цилиндра двосмјерног дејства од којих један симулира рад опруге, а други силу којом се дјелује на опругу. Промјеном параметара којима се описује рад механичких опруга директно се утиче на промјену радног притиска, а самим тим и промјену силе у датом систему. Развојем пнеуматске опруге и имплементацијом система за даљинско управљање, приказан је начин на који је могуће даљинским путем вршити управљање по сили у пнеуматским управљачким системима.

Експериментално постројење под називом „Уређај за даљинску регулацију протока ваздуха под притиском“ служи за приказ промјене брзине кретања пнеуматског радног елемента даљинским путем. Наиме, развијени систем је такав да се састоји од једног пнеуматског цилиндра двосмјерног дејства чија клипњача се извлачи до крајњег положаја више пута, уз различит степен отворености пригушно-неповратног вентила чиме се обезбјеђују различите вриједности протока. На овај начин, приказано је на како је могуће даљинским путем вршити управљање по брзини у пнеуматским управљачким системима.

Експериментално постројење под називом „Даљински управљан дигитални флуидни погон“ служи за приказ могућности развоја система који омогућава реализацију већег броја функција (уз искључиво софтверско реконфигурисање), те директну промјену управљачких параметара током самог процеса рада, у складу са концептом Индустрије 4.0. Састоји се од појединих дијелова претходно развијених постројења, те једног пнеуматског цилиндра без клипњаче и вакуум хваталке која носи предмет рада. Коришћењем овог постројења, развијен је модел за даљинско управљање дигиталним пнеуматским системима, који омогућава да се на основу тренутног захтјева, промијене управљачки параметри и генерише жељено управљање, према унапријед утврђеном критеријуму, који може бити, на примјер, минимално вријеме извршења операције рада или минимална потрошња ваздуха под притиском.

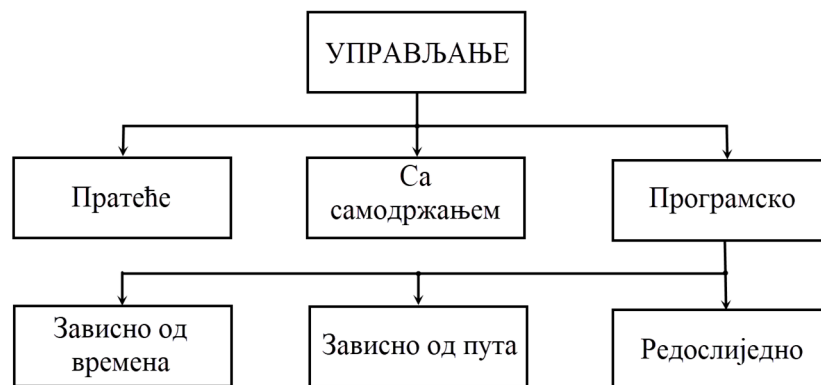
У оквиру поглавља 4 приказана је дискусија добијених резултата и доказане су постављене хипотезе. У оквиру поглавља 5, изведени су најважнији закључци и представљени су правци даљег истраживања. На самом крају, дат је списак коришћене литературе, као и одговарајући прилози.

ПОГЛАВЉЕ 2 – ТЕОРИЈСКЕ ОСНОВЕ И ПРЕГЛЕД ЛИТЕРАТУРЕ

Наше сазнање произлази из два основна извора духа од којих се први састоји у примању представа (рецептивитет утисака), а други у способности да се помоћу ових представа сазна неки предмет (спонтанитет појмова).

(Имануел Кант, Критика чистог ума)

Постоји више различитих критеријума на основу којих је могуће извршити подјелу управљања. Према [103], управљање се може подијелити на начин приказан на слици 11.



Слика 11. Подјела управљања [86], [87]

Под појмом пратеће управљање подразумева се управљање код кога између управљачке и излазне величине постоји једнозначна одређеност. До одступања може доћи само под дејством неке поремећајне величине. Меморијски елементи се не користе код овог типа управљања.

Управљање са самодржањем подразумева управљање код кога се постигнута вриједност излазне величине одржава и након престанка дејства управљачке величине, а посебно након престанка дејства иницирајућих сигнала. Постављање излазне величине на почетну вриједност врши се довођењем супротне, односно инверзне улазне величине или супротно оријентисаног иницирајућег сигнала. Код овог типа управљања увијек се користе бистабилни, односно меморијски елементи.

Програмско или програмабилно управљање подразумева управљање које се одвија према унапријед дефинисаном програму или алгоритму. Могуће га је реализовати на три различита начина: као управљање зависно од времена, као управљање зависно од пута, и као редослиједно управљање. За реализацију сва

три типа програмског управљања, данас се често, поред искључиво пнеуматских реализација, користе намјенски дигитални рачунари под називом програмабилни логички контролери¹⁴ (ПЛК) [46], [104]–[106].

Програмско управљање зависно од времена одликује равномјерно и неосјетљиво на сметње одвијање програма у току времена. Пошто нема контроле одвијања појединих операција, код овог типа управљања, смањена је сигурност у раду.

Програмско управљање зависно од пута одликује имплементација граничних прекидача и пријемних елемената којима се детектује позиција радног елемента. Због могућности детекције сметњи у току рада и самосталног прекида одвијања програма, овај тип управљања одликује висок ниво сигурности у раду. Недостатак је тај што је реализација компликована а програм непрегледан.

Редослиједно програмско управљање подразумијева управљање код кога сљедећа операција може почети само уколико је претходна успјешно завршена, или је неки други процес успјешно завршен, или је неки други услов испуњен. У свим осталим случајевима, систем застаје у позицији сметње. Сигурност у раду је због тога веома висока, али пошто овај тип управљања ради зависно о путу, времену или некој другој улазној помјенљивој величини, захтијева коришћење знатно већег броја сигналних елемената.

2.1 Пнеуматско управљање

Под појмом пнеуматско управљање најчешће се подразумијева програмско управљање технолошким процесом сагласно претходно формираном управљачком ланцу (слика 9), који се састоји од међусобно повезаних пнеуматских елемената. Једноставније речено, то је назив за начин рјешавања управљачког проблема примјеном пнеуматских елемената.

2.1.1 ON-OFF управљање

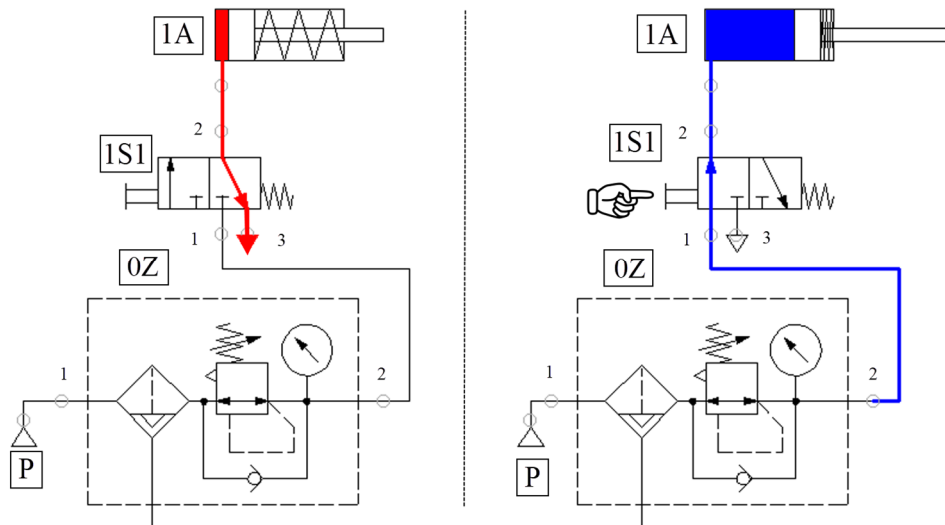
У зависности од тога каква је структура пнеуматског управљачког система, могуће је разликовати директно и индиректно управљање пнеуматским радним елементима [86]–[88]. У оба случаја, за управљање се користе разводни вентили чијим простим активирањем односно деактивирањем (ON-OFF) се може успоставити или прекинути проток, промијенити смјер кретања ваздуха под притиском и тиме промијенити смјер кретања радног елемента, и слично.

Директно управљање представља најједноставнији начин управљања пнеуматским радним елементима јер подразумијева напајање радног елемента ваздухом под притиском директно преко једног јединог разводног вентила који може бити активиран ручно, механички или електромагнетом. Потребно је нагласити да поменути разводник мора бити у стању да обезбиједи тачно дефинисан и одговарајући проток како би се управљање успјешно обавило. Директно управљање могуће је извести и у моностабилној и у бистабилној варијанти, а могуће га је примијенити код цилиндара, мотора, млазница, вакуум хватаљки итд. али само за погоне малих брзина и/или малих запремина. Примјери директног

¹⁴ Према стандардизацији удружења произвођача електричне опреме NEMA (енг. *The National Electrical Manufacturers Association*), ПЛК је дефинисан као: „Дигитални електронски уређај који користи програмабилну меморију за памћење наредби којима се захтијева извођење специфичних функција, као што су логичке функције, секвенцирање, пребројавање, мјерење времена, израчунавање, и слично, у циљу управљања различитим типовима машина и процеса преко дигиталних и аналогних улазно-излазних модула [157].“ Једноставније речено, ПЛК је намјенски развијен микроконтролерски систем чији су и хардвер и софтвер прилагођени индустријском окружењу, односно раду у непосредном окружењу процеса за чије управљање се и користе.

управљања цилиндрима једносмјерног и двосмјерног дејства у моностабилној и бистабилној варијанти приказани су на сликама 12-15, респективно.

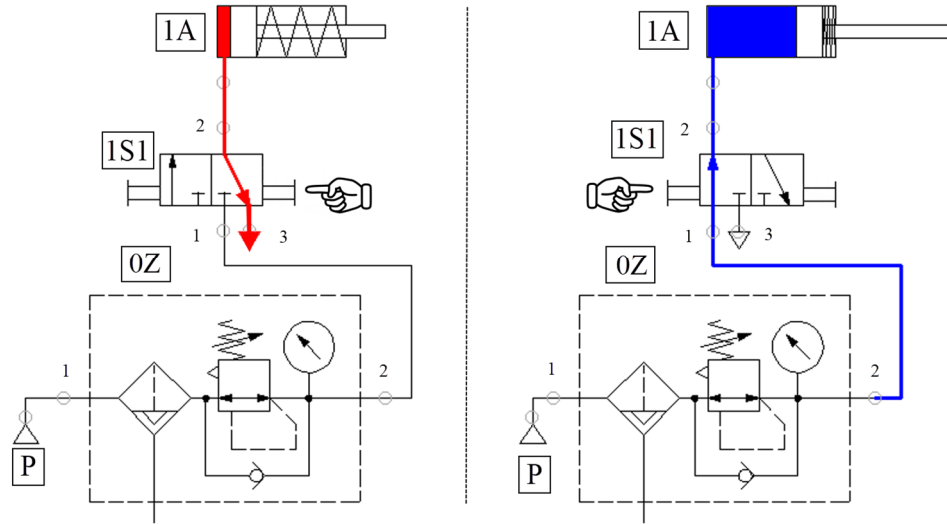
Приликом реализације моностабилног управљања цилиндром једносмјерног дејства (слика 12), коришћен је ручно активиран, моностабилни разводни вентил 3/2. У случају када исти није активиран (слика 12, положај лијево), клипњача цилиндра се налази у крајњем увученом положају јер се ваздух из цилиндра преко прикључака 2 и 3 испушта у атмосферу. Притиском на тастер, вентил се активира и омогућава се проток ваздуха под притиском ка клипној страни цилиндра (слика 12, положај десно), преко прикључака 1 и 2. Клипњача се извлачи ка крајњем извученом положају и у њему остаје све док је тастер притиснут. Након отпуштања тастера, клипњача се, према већ описаном поступку, враћа у крајњи увучени положај.



Слика 12. Директно управљање цилиндром једносмјерног дејства, моностабилно

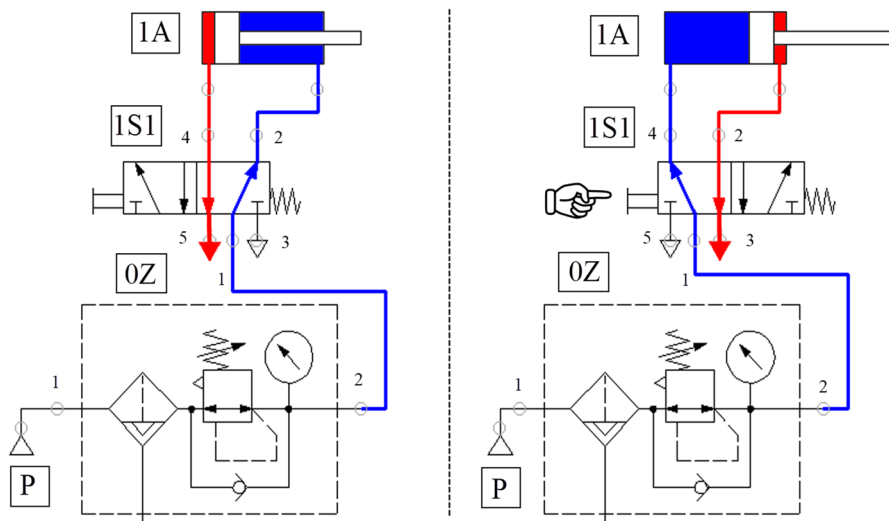
За случај бистабилног управљања цилиндром једносмјерног дејства (слика 13), коришћен је ручно активиран, бистабилни разводни вентил 3/2. У случају када је притиснут тастер са десне стране (слика 13, положај лијево), под условом да претходно није био активиран други тастер са лијеве стране, клипњача цилиндра се налази у крајњем увученом положају, јер се ваздух из цилиндра преко прикључака 2 и 3 испушта у атмосферу. Клипњача цилиндра остаје у овом положају и након отпуштања тастера. Притиском на други тастер са лијеве стране, вентил се активира и омогућава се проток ваздуха под притиском ка клипној страни цилиндра (слика 13, положај десно), преко прикључака 1 и 2. Клипњача се извлачи ка крајњем извученом положају и у њему остаје и након отпуштања тастера. Повратак клипњаче у почетни, крајњи увучени положај могућ је само у случају када се поново притисне тастер са десне стране.

За управљање цилиндром двосмјерног дејства могуће је користити разводне вентиле са четири (4/2) и са пет (5/2) прикључака. Уколико се користи разводник са пет прикључака, могуће је посебно утицати на ваздух који се из цилиндра испушта у атмосферу у ходу напријед и у ходу назад. Такође, исте функције које имају поменути разводници могуће је остварити и коришћењем два 3/2 разводна вентила или четири 2/2 разводна вентила.



Слика 13. Директно управљање цилиндром једносмјерног дејства, бистабилно

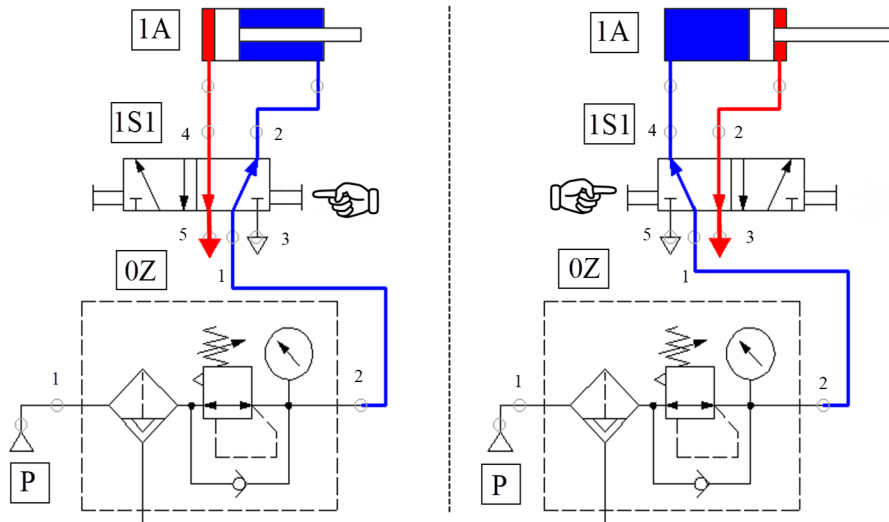
У примјеру приказаном на слици 14, код моностабилног управљања цилиндром двосмјерног дејства, коришћен је ручно активиран, моностабилни 5/2 разводни вентил. У случају када исти није активиран (слика 14, положај лијево), клипњача цилиндра се налази у крајњем увученом положају јер се ваздух из клипне стране цилиндра, преко прикључака 4 и 5, испушта у атмосферу, а клипњачина страна се напаја ваздухом под притиском директно са извора напајања, преко прикључака 1 и 2. Притиском на тастер, вентил се активира и омогућава се проток ваздуха под притиском ка клипној страни цилиндра преко прикључака 1 и 4, а ваздух из клипњачине стране цилиндра се, преко прикључака 2 и 3, испушта у атмосферу (слика 14, положај десно). Клипњача се извлачи ка крајњем извученом положају и у њему остаје све док је тастер притиснут. Након отпуштања тастера, клипњача се, према већ описаном поступку, враћа у крајњи увучени положај.



Слика 14. Директно управљање цилиндром двосмјерног дејства, моностабилно

Код бистабилног управљања цилиндром двосмјерног дејства, коришћен је ручно активиран, бистабилни 5/2 разводни вентил. У случају када је притиснут тастер са десне стране (слика 15, положај лијево), под условом да претходно није био активиран други тастер са лијеве стране, клипњача цилиндра се налази у крајњем увученом положају, јер се ваздух из клипне стране цилиндра, преко прикључака 4 и 5, испушта у атмосферу, а клипњачина страна се напаја ваздухом под притиском директно са извора

напајања, преко прикључака 1 и 2. Клипњача цилиндра остаје у овом положају и након отпуштања тастера. Притиском на други тастер са лијеве стране, вентил се активира и омогућава се проток ваздуха под притиском ка клипној страни цилиндра (слика 15, положај десно), преко прикључака 1 и 4, а ваздух из клипњачине стране цилиндра се, преко прикључака 2 и 3, испушта у атмосферу. Клипњача се извлачи ка крајњем извученом положају и у њему остаје и након отпуштања тастера. Повратак клипњаче у почетни, крајњи увучени положај могућ је само у случају када се поново притисне тастер са десне стране.

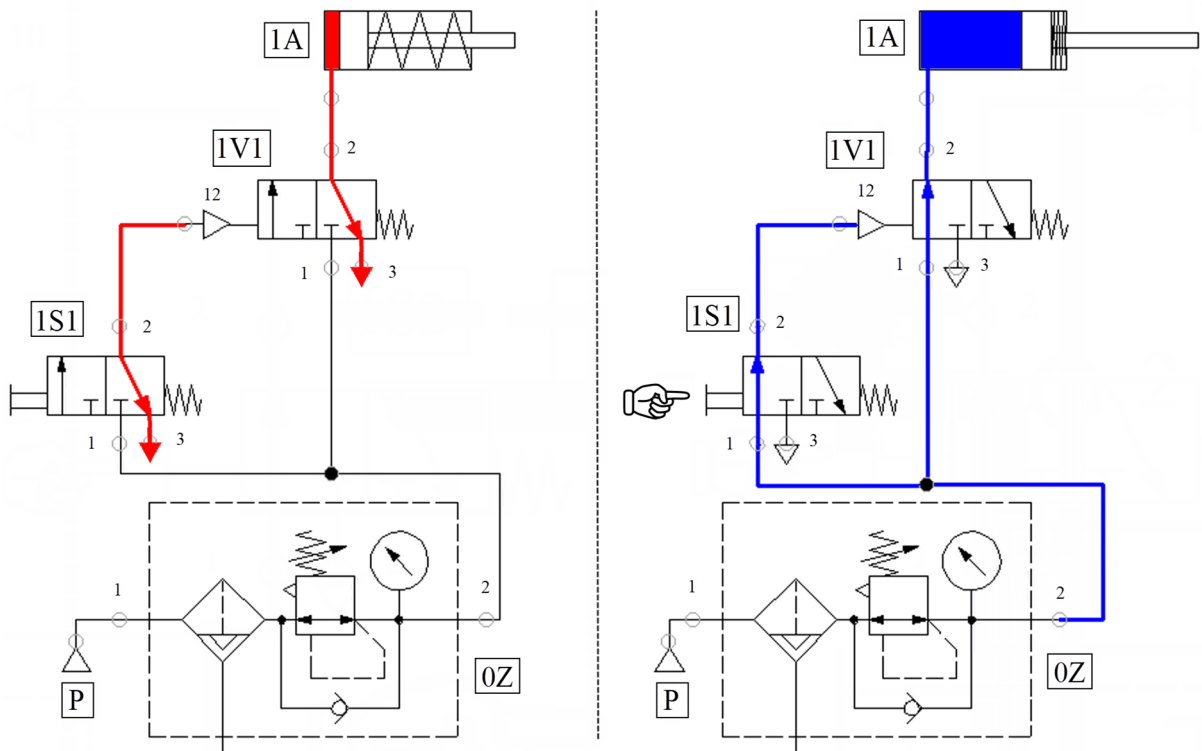


Слика 15. Директно управљање цилиндром двосмјерног дејства, бистабилно

Индијектно управљање подразумијева постојање припадајућег командног (главног) разводног вентила уз сваки радни елемент. Тај разводни вентил се активира индијектно, преко излазног сигнала са неког другог вентила. Поменути сигнал назива се управљачки. Потребно је нагласити да се, у случају индијектног управљања, до радног елемента увијек доводи константан ваздух под притиском и он обично, у индустријској примјени, има вриједност око 6 bar . Овај ваздух се назива радни јер, у суштини, он обавља користан рад, за разлику од управљачког ваздуха, који преноси информације и служи за активирање командних разводника. Вриједност управљачког ваздуха најчешће је нижа од вриједности радног, али не би требала да буде испод 3 bar . Индијектним начином управљања могуће је реализовати управљање кретањем радних елемента највећих димензија. Код индијектног начина управљања, главни разводни вентили и радни елементи могу бити постављени довољно близу једни других тако да водови између њих буду кратки. На тај начин се мали „мртви простор“ испуњава ваздухом под притиском, а то доводи до мање потрошње истог. Примјери индијектног управљања цилиндрима једносмјерног и двосмјерног дејства у моностабилној и бистабилној варијанти приказани су на сликама 16-19, респективно.

За случај моностабилног управљања цилиндром једносмјерног дејства (слика 16), коришћен је пнеуматски активан, моностабилни $3/2$ разводни вентил 1V1 који се активира, преко прикључка 12, излазним сигналом са ручно активаног, моностабилног $3/2$ разводног вентила 1S1. У случају када 1S1 није активан, није активан ни 1V1 па се клипњача цилиндра налази у крајњем увученом положају јер се ваздух из цилиндра испушта у атмосферу преко прикључака 2 и 3 командног разводника 1V1 (слика 16, положај лијево). Притиском на тастер, вентил 1S1 се активира и задаје се управљачки сигнал вентилу 1V1 чиме се кроз исти, преко прикључака 1 и 2, омогућава проток ваздуха под притиском ка цилиндру (слика 16, положај десно). Клипњача се извлачи ка крајњем извученом положају и у њему остаје све док

је тастер притиснут. Након отпуштања тастера, деактивира се командни вентил 1V1 и клипњача цилиндра се, према већ описаном поступку, враћа у крајњи увучени положај.

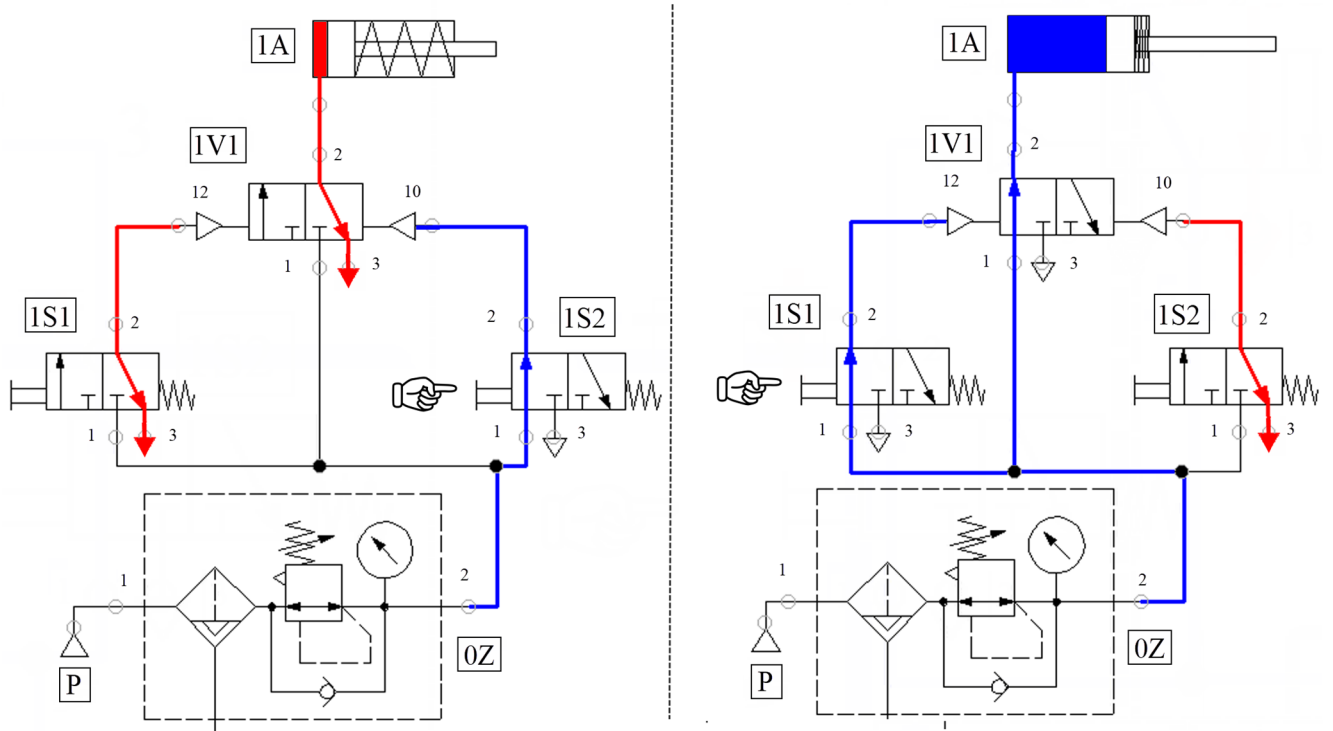


Слика 16. Индиректно управљање цилиндром једносмјерног дејства, моностабилно

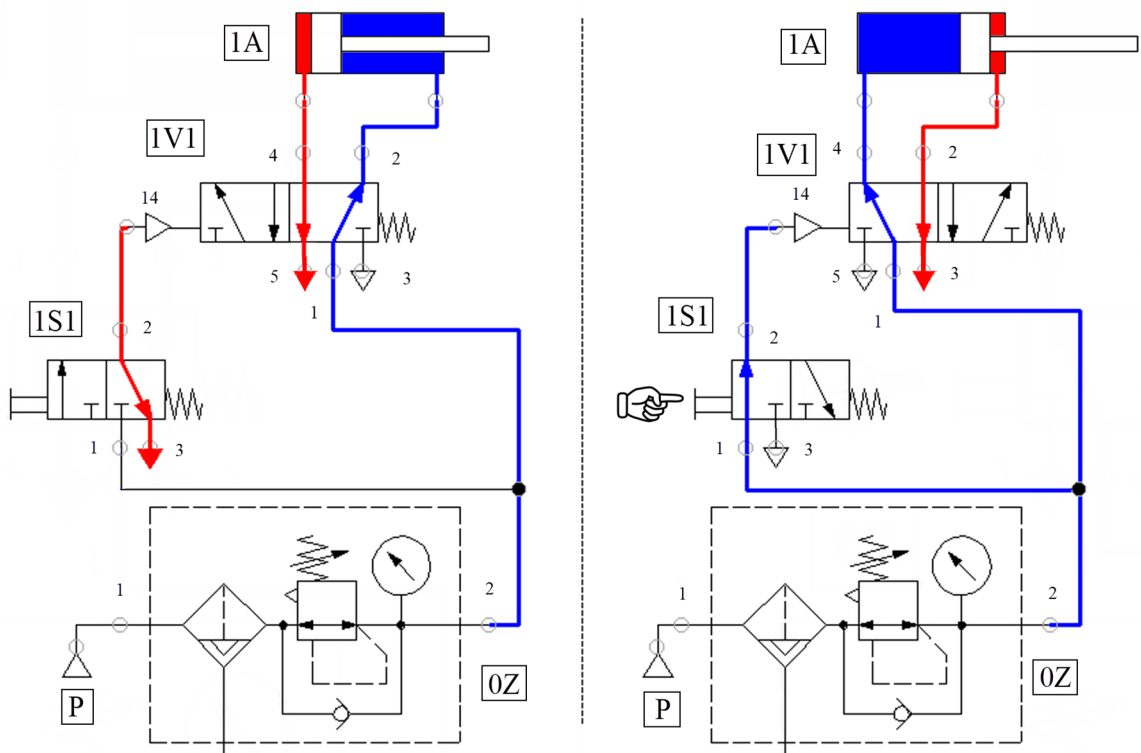
Приликом реализације бистабилног управљања цилиндром једносмјерног дејства (слика 17), коришћен је пнеуматски активирањем, бистабилни 3/2 разводни вентил 1V1. Поменути вентил се активира, преко прикључка 12, излазним сигналом са ручно активираним, моностабилним 3/2 разводним вентилем 1S1, а деактивира, преко прикључка 10, излазним сигналом са ручно активираним, моностабилним 3/2 разводним вентилем 1S2. Операције активирања/деактивирања командног вентила се међусобно искључују и могуће се само онда када супротна није у току. У случају када је активирањем вентил 1S2, клипна страна цилиндра је, преко прикључака 2 и 3 командног вентила 1V1, повезана са атмосфером и клипњача се налази у крајњем увученом положају (слика 17, положај лијево). У случају када је активирањем вентил 1S1, клипна страна цилиндра је, преко прикључака 1 и 2 командног вентила 1V1, повезана директно на извор напајања ваздухом под притиском и клипњача се налази у крајњем извученом положају (слика 17, положај десно). Клипњача у било ком од два могућа стања остаје и након отпуштања тастера односно деактивирања вентила 1S1 или 1S2. Промјена положаја клипњаче дешава се само након појаве супротно оријентисаног иницирајућег сигнала.

За случај моностабилног управљања цилиндром двосмјерног дејства (слика 18), коришћен је пнеуматски активирањем, моностабилни 5/2 разводни вентил 1V1 који се активира, преко прикључка 14, излазним сигналом са ручно активираним, моностабилним 3/2 разводним вентилем 1S1. У случају када 1S1 није активирањем, није активирањем ни командни вентил 1V1 (слика 18, положај лијево). Клипна страна цилиндра је, преко прикључака 4 и 5 командног вентила, повезана са атмосфером, а клипњачина страна је, преко прикључака 1 и 2 командног вентила, повезана директно на извор напајања ваздухом под притиском па се клипњача цилиндра налази у крајњем извученом положају. Притиском на тастер, вентил 1S1 се активира и

задаје се управљачки сигнал вентилу 1V1 чиме се кроз исти, преко прикључака 1 и 4, омогућава проток ваздуха под притиском ка клипној страни цилиндра, а ваздух из клипњачине стране се, преко прикључака 2 и 3, испушта у атмосферу (слика 18, положај десно). Клипњача се извлачи ка крајњем извученом положају и у њему остаје све док је тастер притиснут. Након отпуштања тастера, деактивира се командни вентил 1V1 и клипњача цилиндра се, према већ описаном поступку, враћа у крајњи увучени положај.

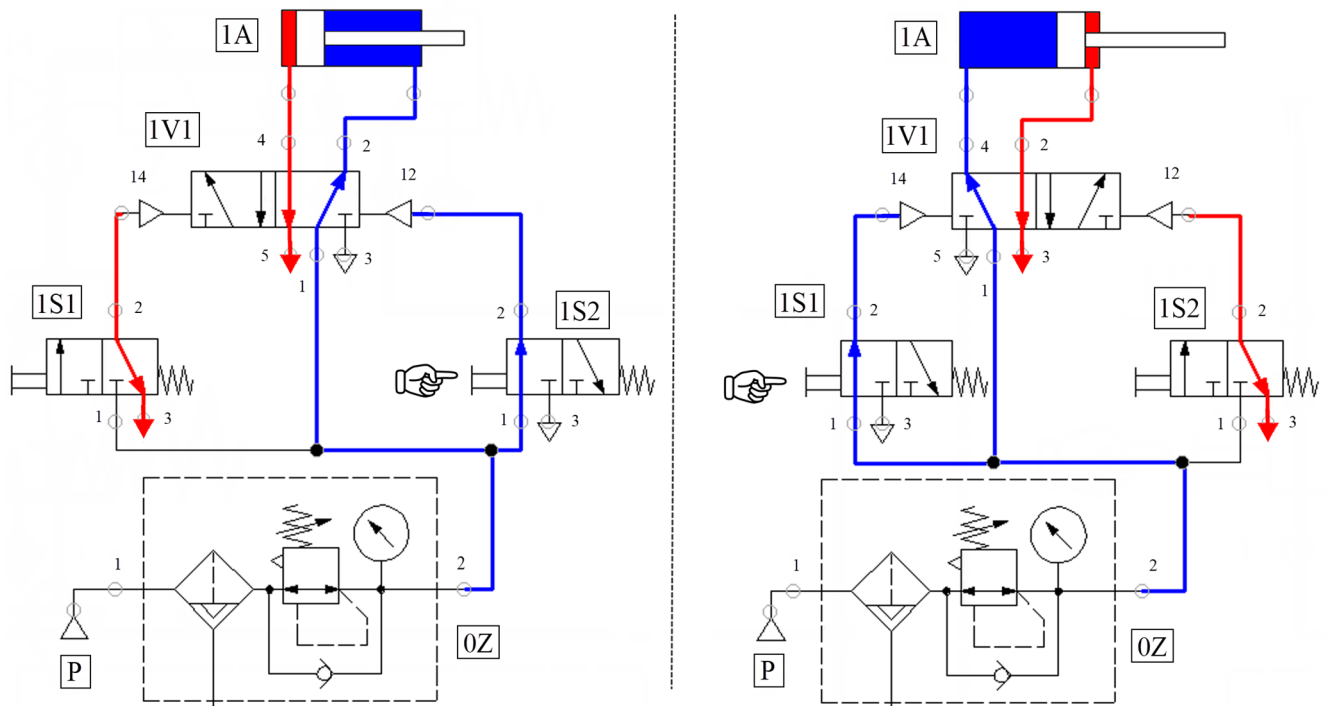


Слика 17. Индиректно управљање цилиндром једносмјерног дејства, бистабилно



Слика 18. Индиректно управљање цилиндром двосмјерног дејства, моностабилно

Приликом реализације бистабилног управљања цилиндром двосмјерног дејства (слика 19), коришћен је пнеуматски активиран, бистабилни 5/2 командни разводни вентил 1V1. Поменути командни вентил се активира, преко прикључка 14, излазним сигналом са ручно активираног, моностабилног 3/2 разводног вентила 1S1 а деактивира, преко прикључка 12, излазним сигналом са ручно активираног, моностабилног 3/2 разводног вентила 1S2. У случају када је активиран вентил 1S2, клипна страна цилиндра је, преко прикључака 4 и 5 командног вентила, повезана са атмосфером, а клипњачина страна је, преко прикључака 1 и 2 командног вентила, повезана директно на извор напајања ваздухом под притиском и клипњача се налази у крајњем увученом положају (слика 19, положај лијево). У случају када је активиран вентил 1S1, клипна страна цилиндра је, преко прикључака 1 и 4 командног вентила, повезана директно на извор напајања ваздухом под притиском, а клипњачина страна је, преко прикључака 2 и 3 командног вентила, повезана са атмосфером и клипњача се налази у крајњем извученом положају (слика 19, положај десно). Клипњача у било ком од два могућа стања остаје и након отпуштања тастера односно деактивирања вентила 1S1 или 1S2. Промјена положаја клипњаче дешава се само након појаве супротно оријентисаног иницирајућег сигнала.



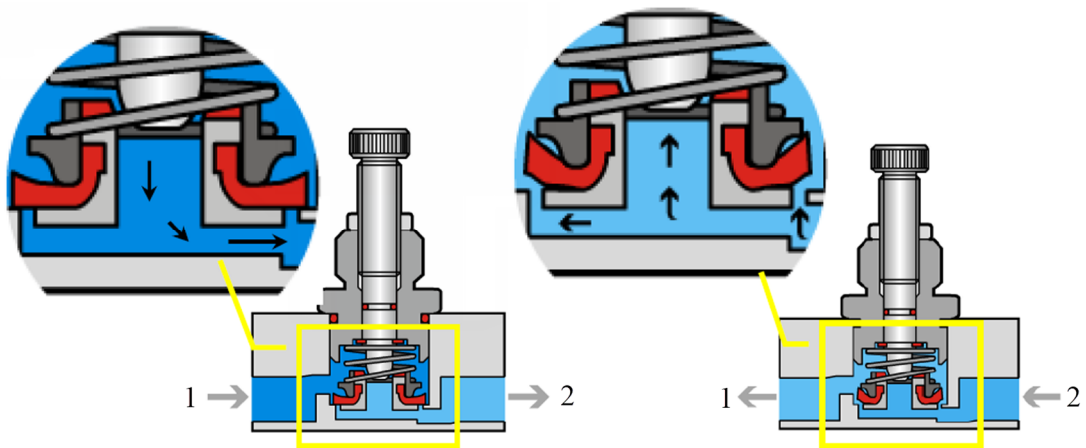
Слика 19. Индиректно управљање цилиндром двосмјерног дејства, бистабилно

2.1.2 Регулација брзине кретања пнеуматских радних елемената

У зависности од врсте управљачког проблема који се рјешава, понекад је потребно смањити или повећати тренутну брзину кретања радног елемента и на тај начин остварити и један вид управљања по брзини. За ову намјену најчешће се користе два типа вентила: пригушно-неповратни вентил и брзоиспусни вентил [86]–[88], [107]. Пошто се у овој докторској дисертацији разматра само смањење брзине кретања, у наставку рада ће детаљно бити приказани само пригушно-неповратни вентили.

Пригушно-неповратни вентил представља паралелни спој пригушнице и неповратног вентила. Он омогућава неометан пролаз у смјеру од 2 ка 1 (слика 20, положај десно), као и други неповратни вентили, јер је у том случају проток кроз пригушницу најмањи могући па се занемарује, и управљано пригушени пролаз у смјеру од 1 ка 2 (слика 20, положај лијево). Помоћу вијка се регулише количина ваздуха под притиском која се пропушта (мијења се карактеристика протока) и тиме се утиче на брзину кретања радног елемента. Пригушно-неповратне вентиле

треба по могућности уградити директно на прикључке радног елемента. Символ пригушно-неповратног вентила, као и стварни изглед компоненте код два произвођача приказани су на слици 21.



Слика 20. Начин рада пригушно-неповратног вентила



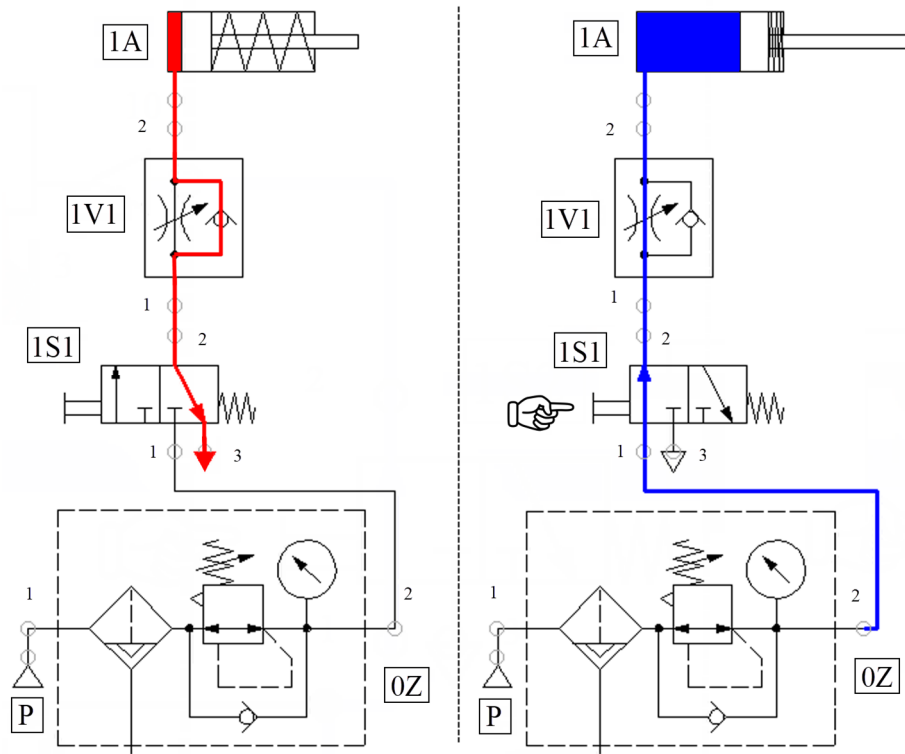
Слика 21. Пригушно-неповратни вентил

Пригушење је могуће извести на два начина: пригушењем улазног ваздуха (енг. *Meter-In*), односно пригушењем излазног ваздуха (енг. *Meter-Out*). Код пригушења улазног ваздуха, пригушно-неповратни вентил постављен је тако да се пригушује ваздух који се доводи до радног елемента. У супротном смјеру, ваздух се из радног елемента одводи нормално у атмосферу. У овом случају, јављају се велике неравномјерности брзине кретања радног елемента [108]. Због тога се, пригушење улазног ваздуха, иако енергетски ефикасније [109], примјењује само код цилиндара једносмјерног дејства и код цилиндара малих запремина.

Код пригушења излазног ваздуха, пригушно-неповратни вентил постављен је тако да се пригушује ваздух који се из радног елемента испушта у атмосферу. У супротном смјеру, ваздух који се доводи до радног елемента струји слободно. На овај начин добија се много боље и равномјерније кретање радног елемента. Због тога је важно напоменути да се код цилиндара двосмјерног дејства често пригушује ваздух који се из комора цилиндра испушта ка атмосфери.

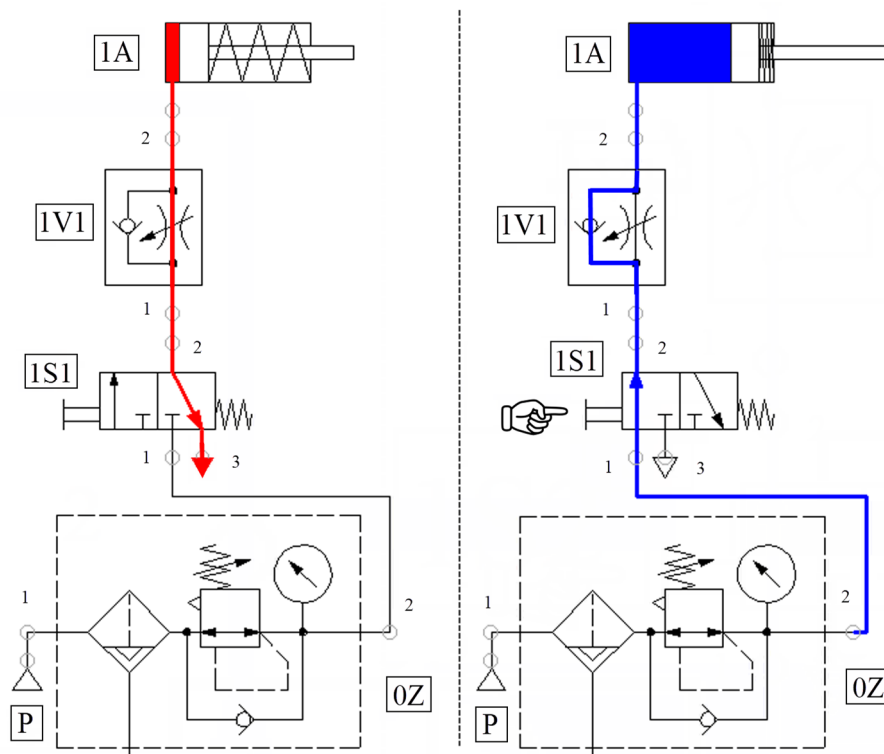
Пригушно-неповратни вентили су компоненте које су веома често у употреби. Наиме, радни елементи се увијек пројектују за неке максималне брзине, које се, на примјер, код цилиндара крећу у распону од $1 \frac{m}{s}$ па чак до $10 \frac{m}{s}$. Међутим, брзина која се користи при раду треба да буде оптимална а не максимална, односно радни елементи треба да се крећу брзинама које су најекономичније за управљачки систем и саму машину. Максималне брзине резултују већим хабањем, што доводи до скраћења радног вијека компоненти и система, те се због тога, као што је већ раније речено, пригушно-неповратни вентили веома често уграђују у управљачки систем [110]. Примјери пригушења улазног и/или излазног ваздуха из цилиндара једносмјерног и двосмјерног дејства приказани

су на сликама 22-24, респективно. У случају приказаном на слици 22, уградњом пригушно-неповратног вентила, добијено је подешавање брзине извлачења клипњаче цилиндра, пошто је пуњење клипне коморе ваздухом под притиском преко пригушнице, а пражњење исте испуством ваздуха у атмосферу слободно.



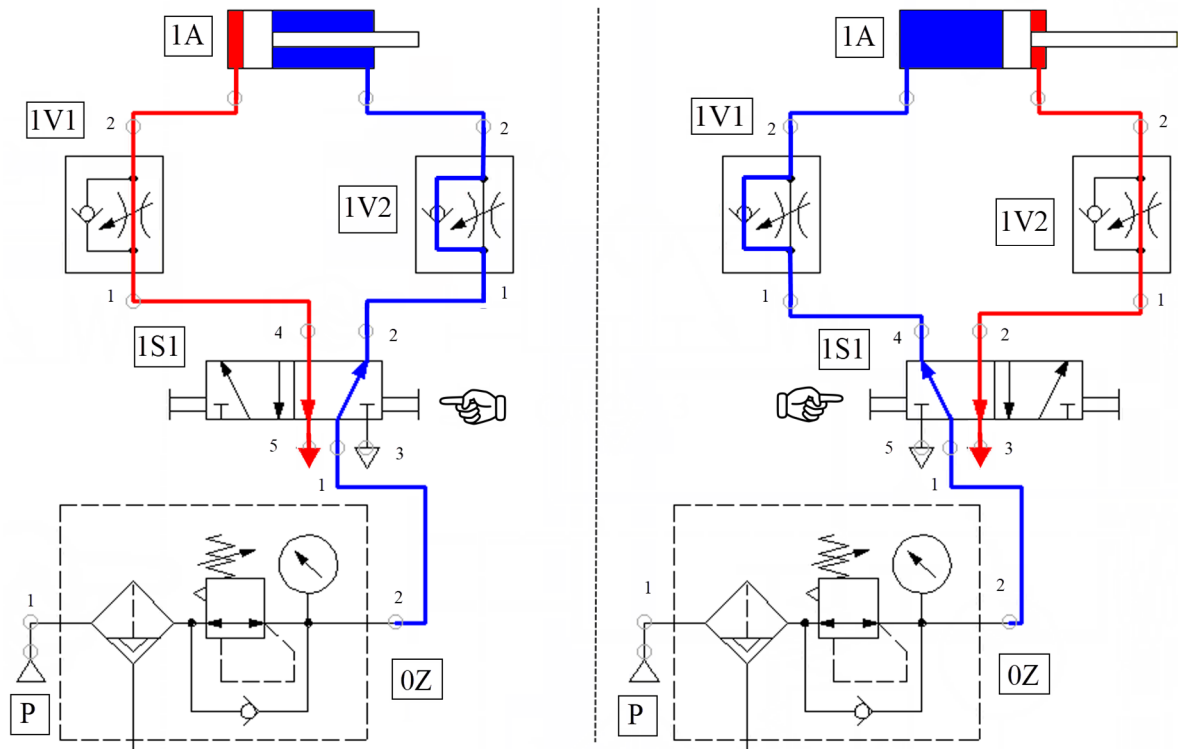
Слика 22. Пригушење извлачења клипњаче цилиндра једносмјерног дејства

У случају приказаном на слици 23, уградњом пригушно-неповратног вентила, добијено је подешавање брзине увлачења клипњаче цилиндра, пошто је пражњење клипне коморе испуством ваздуха у атмосферу преко пригушнице, а пуњење исте ваздухом под притиском слободно.



Слика 23. Пригушење увлачења клипњаче цилиндра једносмјерног дејства

У случају приказаном на слици 24, уградњом пригушно-неповратних вентила, добијена је могућност подешавања различитих брзина кретања клипњаче цилиндра двосмјерног дејства. Вентил 1V1 служи за подешавање брзине увлачења а вентил 1V2 за подешавање брзине извлачења клипњаче цилиндра.

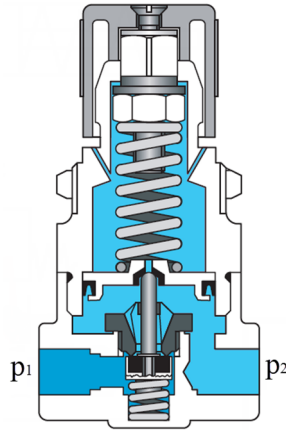


Слика 24. Пригушење извлачења и увлачења клипњаче цилиндра двосмјерног дејства

2.1.3 Регулација притиска у управљачком систему

За одржавање вриједности притиска у пнеуматском управљачком систему на приближно константном нивоу, чиме се индиректно остварује један вид управљања по сили, користи се компонента која се назива регулатор притиска. Регулатори притиска се изводе у двије варијанте, без растерећења и са растерећењем. Регулатори притиска без растерећења се користе у случајевима када се ваздух под притиском не смије испуштати у околину, као што је, на примјер, производња у чистим собама (енг. *clean room technology*), па у склопу ове докторске дисертације неће бити посебно разматрани.

Регулатор притиска са растерећењем приказан је на слици 25. Приликом коришћења овог типа регулатора притиска, улазни притисак у регулатор или тзв. примарни притисак (слика 25, p_1) увијек мора бити већи од излазног притиска из регулатора или тзв. секундарног притиска (слика 25, p_2). Сам поступак регулације притиска врши се помоћу мембране тако што са једне стране мембране дјелује секундарни притисак, а са друге сила опруге. Силу у опрузи могуће је подесити помоћу вијка. Уколико дође до повећања секундарног притиска, на примјер, због промјене оптерећења на цилиндру, мембрана се спушта ка опрузи и отвор довода ваздуха под притиском са улазне стране се смањује или затвара у потпуности. У истом тренутку, отвара се растеретни отвор мембране и ваздух под притиском се испушта у атмосферу и на тај начин се смањује секундарни притисак. Ако из неког разлога дође до смањења секундарног притиска, мембрана се подиже под дејством силе опруге и омогућава се довод ваздуха под притиском са улазне стране. Истовремено се затвара растеретни отвор мембране. На тај начин, регулатор притиска, притисак у систему одржава на приближно константој вриједности, без обзира на све осцилације. Симбол регулатора притиска, као и стварни изглед компоненте код два произвођача приказани су на слици 26.



Слика 25. Регулатор притиска са растерећењем [111]



а) Символ

б) Регулатор притиска произвођача Festo ознаке LR-D-MINI

в) Регулатор притиска произвођача SMC ознаке AR20-F02GH-Y

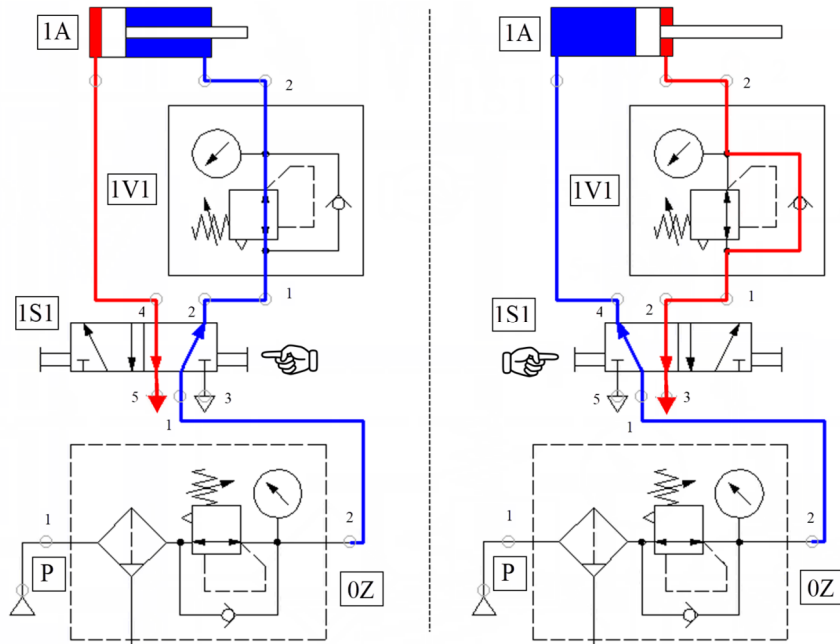
Слика 26. Регулатор притиска

Осим што се користи као обавезан саставни елемент припремне групе¹⁵, регулатор притиска могуће је искористити и унутар управљачког система на појединим мјестима. Тако је, на примјер, могуће искористити регулатор притиска за смањење притиска у слободном повратном ходу клипњаче, односно ходу без терета, чиме се доприноси смањењу потрошње ваздуха под притиском [112]. Примјер таквог система приказан је на слици 27. Потребно је нагласити да је, у овом случају, паралелно са регулатором притиска, уграђен и један неповратни вентил помоћу кога се, приликом извлачења клипњаче цилиндра двосмјерног дејства, регулатор притиска заобилази (слика 27, положај десно). Комбинација регулатора притиска и неповратног вентила, која у суштини представља нову модуларну јединицу, на шеми са слике 27 означена је са 1V1.

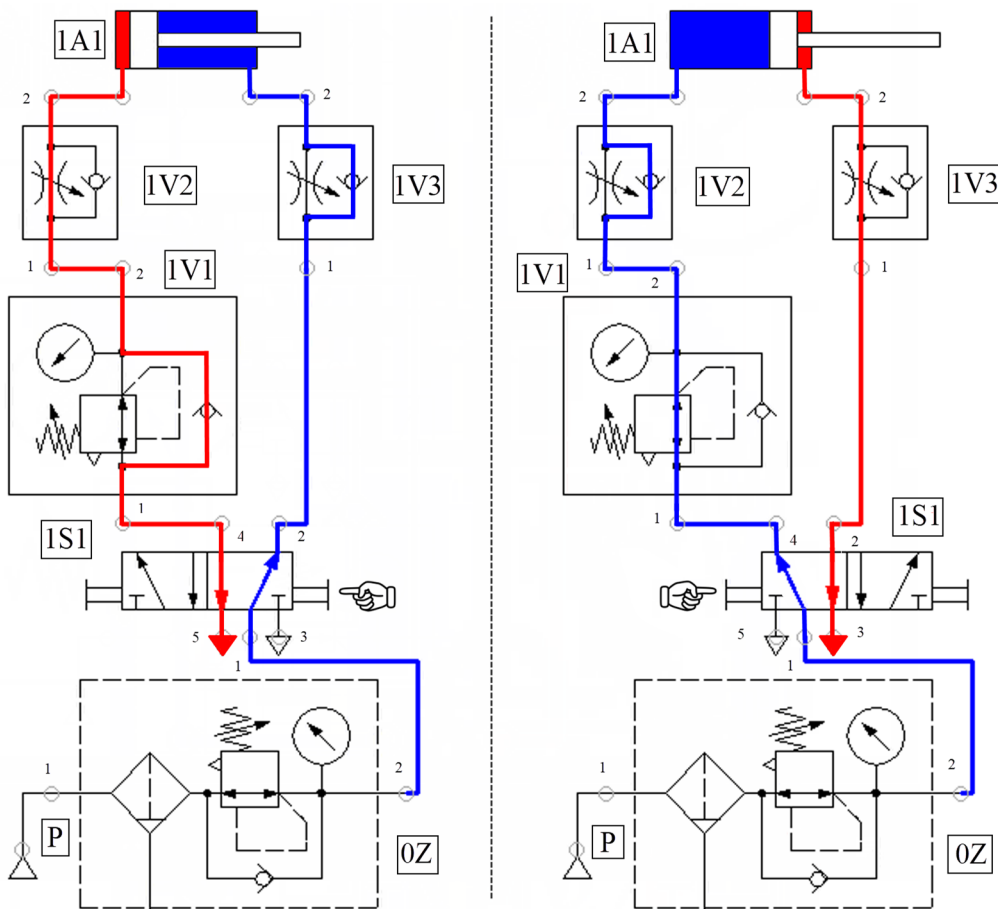
Регулатор притиска може да се користи и за ограничавање притиска, односно силе којом се дјелује на предмет рада, уколико је то у неком систему значајно. Погодно га је примијенити, на примјер, у ситуацијама када је потребно извршити етикетирање или када се врши паковање ломљивих предмета рада, како се етикета или предмет рада не би оштетили, и слично. Један такав примјер приказан је на слици 28. Паралелно са регулатором притиска постављен је неповратни вентил помоћу кога се, приликом увлачења

¹⁵ Припремне групе [86]–[88] су модуларни уређаји који се користе за припрему ваздуха под притиском. Састављене од пречистача (филтера) ваздуха под притиском, регулатора притиска и зауљивача, уколико је исти потребан у систему. Постављају се непосредно прије мјеста употребе ваздуха под притиском и обично представљају посљедњи елемент у ланцу припреме ваздуха под притиском. Након њих, ваздух под притиском се користи у управљачким и радним елементима, као управљачки и радни медијум.

клипњаче цилиндра двосмјерног дејства, регулатор заобилази. Комбинација регулатора притиска и неповратног вентила, на шеми са слике 28, означена је са 1V1. Додатно, уграђена су и два пригушно-неповратна вентила помоћу којих се ограничавају и брзина извлачења и брзина увлачења клипњаче цилиндра. Пригушно-неповратни вентили означени су са 1V2 и 1V3.



Слика 27. Регулација притиска приликом увлачења клипњаче цилиндра



Слика 28. Регулација притиска приликом извлачења клипњаче цилиндра

У посљедњих неколико година, велики свјетски произвођачи пнеуматске опреме, у складу са концептима Индустије 4.0, своје традиционалне производе унапређују интегрисањем савремених електронских и рачунарских технологија. Промјене су примјетне и код регулатора притиска, јер се сада често производе са могућношћу електричне и/или даљинске регулације притиска, умјесто регулације притиска ручним обртањем вијка. То се изводи помоћу електромотора који је помоћу одговарајуће спојнице повезан са самим регулатором. Паралелно са регулатором притиска, постављен је неповратни вентил, а на самом излазу постављен је и електрични сензор притиска. На овај начин је, у суштини, добијена нова модуларна јединица који има исту функцију као стандардни регулатор притиска (секундарни притисак одржава на приближно константном нивоу). Међутим, захваљујући томе што су додати сензор притиска и одговарајућа управљачка електроника, ова компонента постаје, на неки начин, управљива и интелигентна, јер може да обавијести контролер, који управља цијелим процесом, о тренутној вриједности притиска или о насталим промјенама. За поменути компоненту креиран је и нови симбол [113], који је приказан на слици 29. Поред тога, на истој слици, приказана су и два типа савремених, електрично управљаних регулатора притиска.



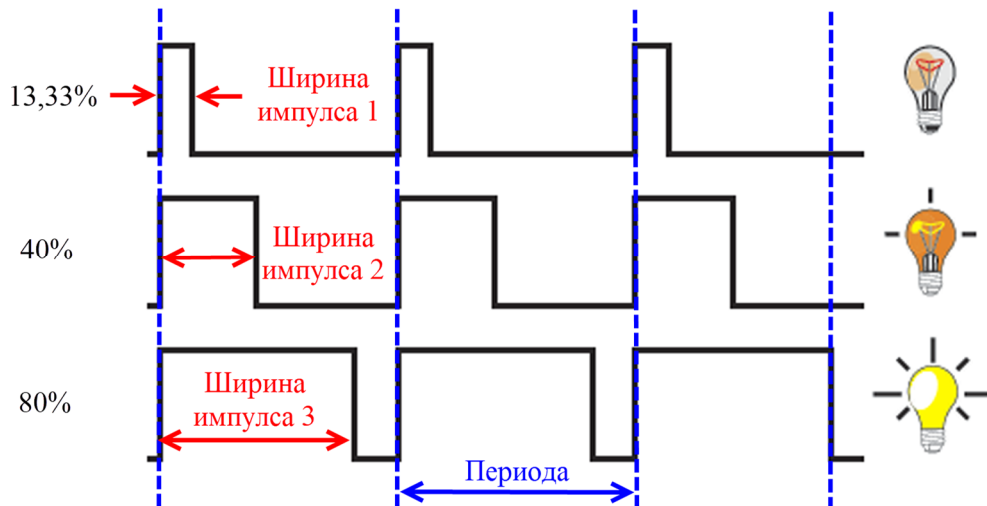
Слика 29. Електрично управљан регулатор притиска

2.1.4 Дигитална пнеуматика

Неке управљачке проблеме није могуће ријешити примјеном стандардних вентила који омогућавају позиционирање радног елемента само у два крајња положаја, већ је потребно извршити додатно позиционирање у неким међуположајима, и то са веома високом тачношћу и поновљивошћу, при чему тачност позиционирања некад чак мора бити у границама од десетог дијела милиметра. У том случају користе се компоненте које имају могућност регулисања протока у току кретања радног елемента, а типичан представник ове групе је пропорционални разводник. Током кретања, котва разводника, која се користи за позиционирање клипа за управљање протоком, заузима позицију између потпуно отвореног и потпуно затвореног положаја, у зависности од електричног сигнала који добија са управљачког уређаја [114]. На тај начин се континуално управља протоком и омогућава позиционирање радног елемента у неком од међуположаја. Тренутна позиција клипа радног елемента одређује се коришћењем одговарајуће мјерне летве, мјерењем напона или јачине електричне струје на истој и извршењем одговарајуће конверзије. Управљачки систем упоређује остварену тренутну позицију са жељеном, израчунава грешку

Друга група дигиталних флуидних погона подразумијева системе који примјењују тзв. прекидачке технологије, односно коришћењем одговарајућих техника управљања, брзо и континуално се активирају појединачне, или неколико компоненти одједном. Те компоненте су искључиво прекидачки (ON-OFF) вентили, а најчешће коришћени начин управљања је примјена ширинско-импулсне модулације - PWM, самостално, или у комбинацији са неком од преходно дефинисаних техника [119].

Под појмом PWM управљање [96], [98], [119], [120] подразумијева се управљање протоком коришћењем серије импулса једнаке дужине трајања. У оквиру сваког импулса, мијења се стање вентила (омогућен проток/блокиран проток), при чему дужина трајања сваког од стања зависи од управљачког сигнала и промјенљива је. Однос времена трајања стања које омогућава неометан проток (ширине импулса) и укупног времена трајања једног импулса (периоде) назива се фактор испуне. Најчешће се изражава бројем између 0 и 1 или процентуално – од 0% до 100%. PWM управљање се користи и у другим областима, на примјер, у освјетљењу. На слици 30 приказан је примјер PWM сигнала са различитим вриједностима фактора испуне, у зависности од кога се смањује интензитет освјетљаја који генерише сијалица (тзв. поступак димовања сијалице).



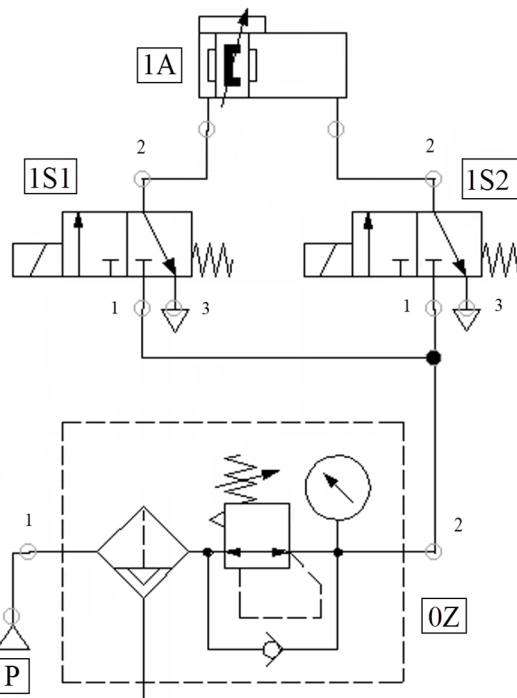
Слика 30. Изглед PWM сигнала са различитим вриједностима фактора испуне

Потребно је нагласити да се, у случају примјене PWM управљања у пнеуматским системима, морају користити прекидачки вентили код којих промјена стања (омогућен проток/блокиран проток) веома кратко траје јер у супротном, уколико је ширина импулса краћа од времена отварања вентила, он неће одреаговати. У складу са претходно наведеним, у последње вријеме, велики свјетски произвођачи развијају намјенске, специфичне вентиле који имају веома кратко вријеме отварања и затварања. Примјер једног вентила тога типа приказан је на слици 31. Поменути вентил, произвођача Festo, ознаке MHE3-MS1H-3/2G-1/8, има функцију моностабилног, нормално затвореног 3/2 разводног вентила, електрично управљаног са временом отварања од свега 2,8 ms и временом затварања од свега 2,3 ms.



Слика 31. Разводни вентил произвођача Festo ознаке MHE3-MS1H-3/2G-1/8

Два примјера реализације PWM управљања [114] пнеуматским цилиндром без клипњаче приказана су на сликама 32 и 33. На слици 32 приказана је реализација са два моностабилна, 3/2 нормално затворена разводна вентила. Уколико су оба вентила искључена, обје коморе цилиндра су, преко прикључака 2 и 3 поменутих вентила, повезане са атмосфером. Довођењем сигнала на соленоиде, обје коморе се, преко прикључака 1 и 2 поменутих вентила, прикључују на радни притисак и започиње процес позиционирања клипа. У случају постојања грешке у позиционирању, управљачки систем на соленоиде доводи серију импулса одговарајућег фактора испуне. Тај фактор испуне зависи од типа регулатора који је имплементиран приликом управљања, а веома често је то ПИД¹⁷.

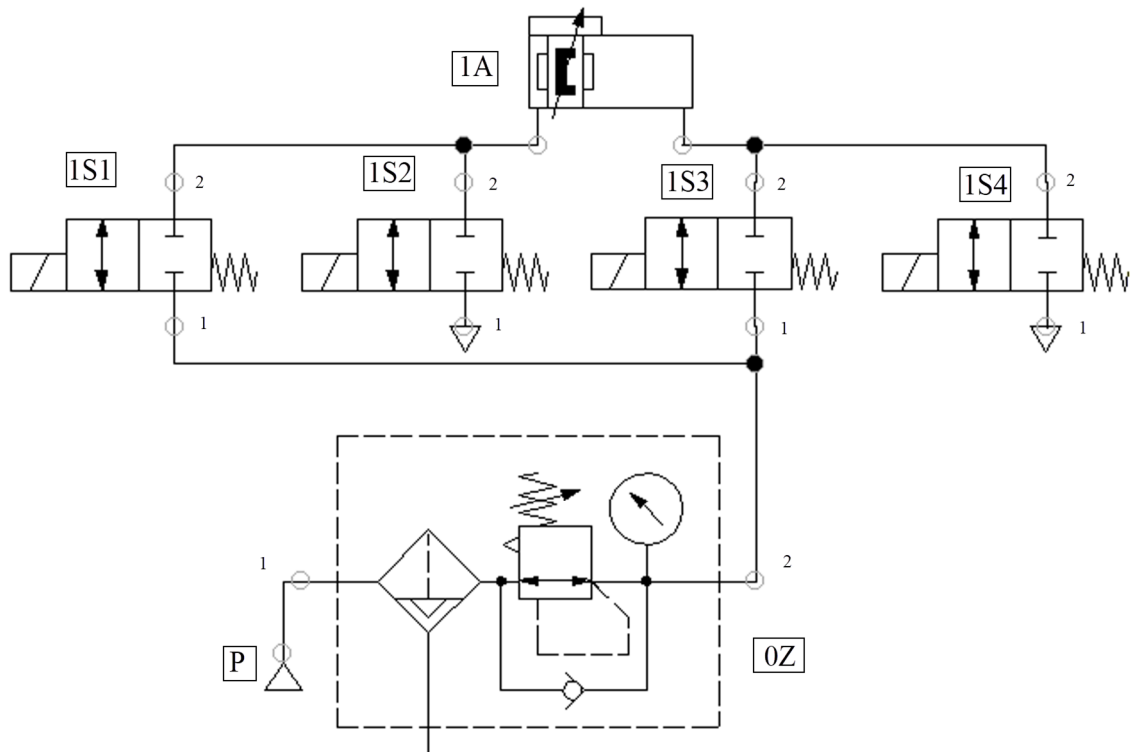


Слика 32. Управљачка шема PWM управљања са два 3/2 нормално затворена разводна вентила

На слици 33 приказана је реализација са четири моностабилна, 2/2 нормално затворена разводна вентила. Покретање клипа цилиндра у десну страну омогућено је активирањем разводника 1S1, преко кога

¹⁷ Регулатор је компонента или скуп компоненти које омогућавају аутоматско одвијање неког процеса према одређеном закону или законима управљања на тај начин што се прати регулисана величина, пореди се њена тренутна вриједност за жељеном и генерише се одговарајући управљачки сигнал. Код основних закона управљања, њихово дејство може линеарно зависити од грешке, њеног интеграла и њеног првог извода по времену. На основу ове чињенице, изведена је основна подјела регулатора на пропорционални (П), интегрални (И) и диференцијални (Д). Комбинацијом наведених типова регулатора, могуће је добити и сложеније облике, као што су ПИ, ПД и ПИД, који представља најсложенији облик и који има три подесива параметра: појачање K_p , интегралну временску константу T_i и константу диференцирања T_d [158], [159].

се лијева комора пуни ваздухом под притиском, и разводника 1S4, преко кога се врши испуст ваздуха из десне коморе у атмосферу. Покретање клипа цилиндра у лијеву страну омогућено је активирањем разводника 1S3, преко кога се десна комора пуни ваздухом под притиском, и разводника 1S2, преко кога се врши испуст ваздуха из лијеве коморе у атмосферу. Главна предност реализације овог типа је могућност блокирања клипа цилиндра у жељеном положају без додатног довођења и потрошње ваздуха под притиском, што се постиже искључивањем свих соленоида.



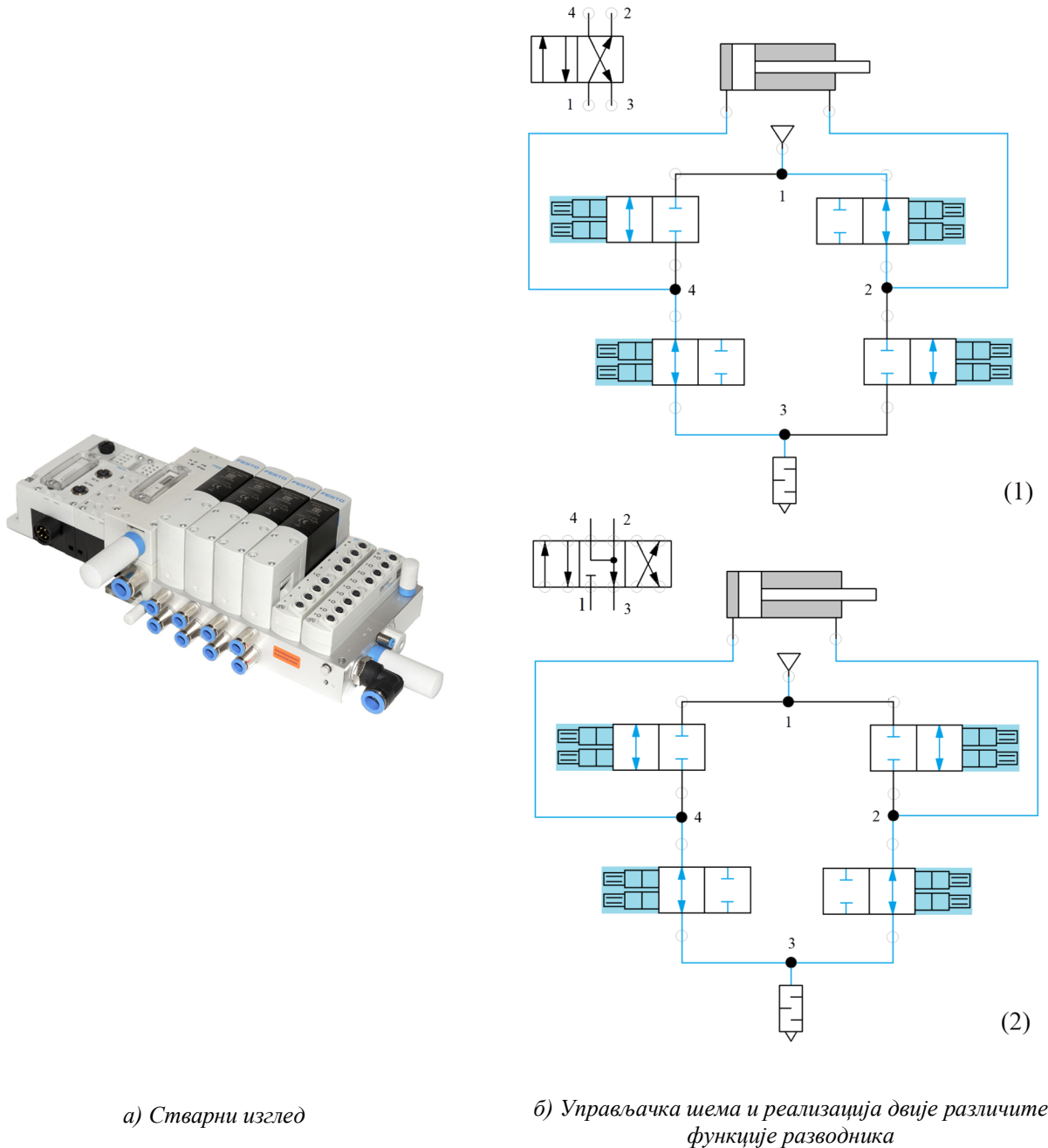
Слика 33. Управљачка шема PWM управљања са четири 2/2 нормално затворена, реверзибилна разводна вентила

Историјски гледано, примјене и паралелног повезивања компоненти и прекидачких технологија познате су деценијама уназад. У патенту из 1930. коришћена су три паралелно повезана електрично активирани разводна вентила са различитим протоком [121]. У патенту из 1968. први пут је примијењена прекидачка технологија за ABS (њем. *Antiblockiersystem*) кочнице аутомобила [122]. Као што је већ раније речено, оба приступа се користе и данас, поготово у посљедње вријеме откако су дефинисани концепти Индустрије 4.0. Очекује се да ће дигитални флуидни системи у концепту Индустрије 4.0 [123] боље испунити неке захтјеве у вези са флуидним погонима од аналогних система [115], [124], [125]. Наиме:

- омогућено је софтверско реконфигурисање система у складу са тренутним захтјевима што значи да се исти склоп може користити, на примјер, за регулацију протока и регулацију притиска,
- технологија паралелног повезивања вентила обезбјеђује редундантност¹⁸, што значајно повећава поузданост и сигурност у раду,
- смањени су трошкови производње јер се прекидачки вентили могу производити по нижој цијени од пропорционалних, а самим тим смањени су и трошкови одржавања и набавке резервних дијелова,
- повећана је ефикасност и омогућена је рекулација енергије, и слично.

¹⁸ Појам редундантан подразумева оног који је сувишан, прекомјеран, који се може занемарити.

У складу са претходно изнесеним, дигитални флуидни системи данас су једна од интересантнијих тема за истраживање, како у области хидраулике [115], [124]–[127], тако и у области пнеуматике [96], [98], [99], [101], [119], [120], [128]–[131]. Велики свјетски произвођачи такође примјењују поменуте технике, па је тако компанија Festo развила један од најсавременијих дигиталних пнеуматских система – дигитално вентилско острво под називом VTEM [102]. Изглед поменутог система и управљачка шема приказани су на слици 34. Код управљачке шеме, дате су двије форме за приказ реализације функције 4/2 (слика 34, положај десно, позиција 1) и 4/3 разводника (слика 34, положај десно, позиција 2).



Слика 34. Дигитално вентилско острво произвођача Festo ознаке VTEM [102]

Коришћењем овог дигиталног вентилског острва, могуће је софтверским путем реализовати следеће апликације: управљање доводом и одводом ваздуха, основне функције управљања кретањем пнеуматских радних елемената, функције које омогућавају пропорционални управљачки разводници, пропорционалну регулацију притиска, дијагностификовање цурења ваздуха под притиском, и слично. Потребно је још напоменути и то да су, приликом реализације овог вентилског острва, коришћени савремени,

пиезоелектрични разводници, који, за разлику од стандардних електрично активираних разводника, немају проблем са прегријавањем због константног постојања електричне струје, као ни проблем са инерцијом покретних дијелова, али су, међутим, због специјалне технологије израде, знатно скупљи.

Као што је већ раније речено, циљ израде ове докторске дисертације је развој модела за даљинско управљање дигиталним пнеуматским системима у концепту Индустрије 4.0. Главни циљ је остварен развојем неколико међусобно независних експерименталних постројења и интеграцијом њихових појединих елемената у један свеобухватни дигитални пнеуматски управљачки систем, сличан дигиталном вентилском острву VTEM, те развојем припадајућих софтверских рјешења [131]. Умјесто пиезоелектричних разводника, у овом случају, коришћени су стандардни 3/2, електрично активирани разводни вентили. Блокирањем одговарајућих водава, од поменутих 3/2 разводних вентила добијени су вентили који имају исту функционалност коју омогућавају и 2/2 разводни вентили. Као што је већ раније напоменуто, одговарајућу комбинацијом 2/2 разводних вентила, деактивирањем свих соленоида, могуће је држање клипа цилиндра у жељеној позицији, без додатног довођења ваздуха под притиском, односно без додатне потрошње ваздуха. У поређењу са пиезоелектричним разводницима, стандардни електрично активирани разводници са кратким временом отварања и затварања су јефтнији, а њиховим коришћењем, уз примјену PWM управљања, могуће је реализовати сличне функције које омогућавају пиезоелектрични разводници, као што су:

- управљање доводом и одводом ваздуха под притиском, односно омогућавање напајања управљачког система ваздухом под притиском и омогућавање испуста ваздуха под притиском у атмосферу у тачно дефинисаном кораку,
- управљање кретањем и позиционирањем пнеуматских радних елемената, са држањем клипа цилиндра у жељеној позицији, без додатне потрошње ваздуха под притиском, и слично.

Додатно, у овај систем су интегрисани и новоразвијени даљински управљан регулатор притиска и даљински управљан пригушно-неповратни вентил, који се користе за директну промјену управљачких параметара током самог процеса рада, односно за регулацију радног притиска и брзине кретања радних елемената. Примјена ових компоненти је, свакако, у складу са концептом Индустрије 4.0, јер повећава флексибилност производног система, омогућавајући реализацију различитих функција комбинацијом више различитих управљачких поступака, уз могућност смањења потрошње ваздуха под притиском и повећања поузданости управљачког система [131]. Да би промјена управљачких параметара могла бити аутоматски изведена током самог процеса рада, потребно је дефинисати критеријум по коме ће се систем понашати. У овом случају, дефинисана су два критеријума:

- продуктивност (минимално вријеме завршетка операције рада), и
- енергетска ефикасност (минимална потрошња ваздуха под притиском).

У складу са претходно дефинисаним, у зависности од тренутног захтјева (на примјер, промјене карактеристика предмета рада, односно наиласка другачијег предмета рада од онога са којим је систем претходно руковао), управљачки систем сам бира један од унапријед припремљених алгоритама, по коме ће се понашати у датом тренутку. На примјер, уколико је потребно подићи предмет рада на неки ниво тачно дефинисаном брзином, без заустављања у међупозицијама, користи се традиционално ON-OFF управљање за активирање/деактивирање разводних вентила, јер је потребно остварити само двије крајње

позиције цилиндра (крајњи увучени и крајњи извучени положај), а даљински управљан пригушно-неповратни вентил се користи за регулацију брзине. Уколико је, међутим, потребно подићи један предмет рада на неки ниво, са додатним заустављањем у међупозицијама (на примјер, због извођења додатних операција рада) и са најмањом могућом потрошњом ваздуха под притиском, за управљање кретањем и позиционирањем цилиндра користи се PWM управљање, јер обезбјеђује мању потрошњу ваздуха под притиском од пропорционалног управљања [98], а даљински управљан регулатор притиска се користи за додатно смањење вриједности радног притиска у систему, и на тај начин директно утиче на додатно смањење потрошње ваздуха [112]. Дакле, различитим комбинацијама, могуће је остварити различите функције, у складу са тренутним захтјевима, баш као што то омогућава и дигитално вентилско острво VTEM.

Осим што се, у овом случају, користе јефтинији разводници и што је омогућена тренутна промјена управљачких параметара у току процеса рада, овај систем нуди и додатну могућност, даљинско управљање системом. На тај начин, додатно се утиче на повећање поузданости истог, јер, у случају појаве непредвиђене ситуације, чак и са удаљене локације, могуће је приступити систему, промијенити управљачке параметре и покренути систем, ручним режимом рада. Детаљан приказ овог система, као и свих његових подсистема, биће представљен у поглављу 3.

ПОГЛАВЉЕ 3 – ИСТРАЖИВАЊЕ

Што се размишљање чешиће и постојаније њима бави, двије ствари испуњавају душу увијек новим дивљењем и страхопоштовањем: звјездано небо изнад мене и морални закон у мени.

(Имануел Кант, Критика практичног ума)

3.1 Методологија истраживања

Постоји мноштво различитих одређења појма науке [132]–[134], а према једном од њих, наука је процес испитивања и истраживања те посебан начин мишљења [134]. Свако истраживање у суштини нужно обухвата:

- постављање питања,
- развој поступака како би се дали одговори на питања,
- планирање и извршавање одговарајућих истраживачких поступака,
- рационално тумачење и анализу резултата добијених поменутим поступцима, и
- коришћење резултата и тумачења за предвиђање других догађаја.

Према томе, може се закључити да свако научно истраживање, па и оно спроведено у оквиру ове докторске дисертације, представља заправо дуготрајан процес који се састоји из већег броја фаза, које су детаљно приказане и објашњене у наставку рада.

3.1.1 Фазе истраживања

Истраживање спроведено приликом израде ове докторске дисертације било је подијељено у четири фазе. Фазе су реализоване секвенцијално, а успјешност сваке наредне зависила је од успјешности претходне.

Фаза I

Прва фаза истраживања обухватила је детаљно упознавање са предметом истраживања и актуелним стањем у области коришћењем богате научне и стручне литературе. Анализирани су постојећи дигитални флуидни погони, а посебан акценат стављен је на дигиталну пнеуматику и могућност даљинског управљања таквим системима. На основу тога, формиране су теоријске подлоге за израду докторске дисертације представљене у поглављу 2.

Фаза II

Друга фаза истраживања обухватила је развој три експериментална постројења под називом:

- „даљински управљан пнеуматски кружни манипулатор“ (потпоглавље 3.2),

- „даљински управљана пнеуматска опруга“ (потпоглавље 3.3), и
- „уређај за даљинску регулацију протока ваздуха под притиском“ (потпоглавље 3.4).

Поменута постројења развијена су као јединствене, смислене цјелине, и притом представљају уређаје које је могуће користити као помоћна наставна средства, али су уједно и модули чији се дијелови могу интегрисати у неким другим, сложенијим системима. Циљ израде поменутих експерименталних постројења био је да се докаже да је даљинским путем могуће:

- управљати кретањем пнеуматских радних елемената активирањем/деактивирањем командних разводника на тачно дефинисан начин и у тачно дефинисаном кораку,
- регулисати притисак у управљачком систему и на тај начин индиректно управљати силом, и
- регулисати проток у управљачком систему коришћењем пригушно-неповратног вентила и на тај начин индиректно управљати брзином.

Фаза III

У оквиру треће фазе истраживања развијено је експериментално постројење под називом „даљински управљан дигитални флуидни погон“, који је детаљно описан у потпоглављу 3.5. Поменуто постројење представља свеобухватни систем у коме су интегрисани поједини елементи претходно развијених постројења. На тај начин, омогућено је да се искључиво софтверским путем, чак и са удаљене локације:

- управља доводом и одводом ваздуха под притиском у управљачком систему,
- управља кретањем цилиндра без клипњаче са заустављањем у међупозицијама по потреби,
- регулише притисак у управљачком систему, и
- регулише брзина кретања цилиндра.

Фаза IV

На основу резултата и закључака добијених и изведених током претходних фаза, четврта и последња фаза истраживања обухватила је развој модела и алгоритма за даљинско управљање дигиталним пнеуматским системима, у случајевима када се као критеријум усвоје:

- минимална потрошња ваздуха под притиском односно максимална енергетска ефикасност, или
- минимално вријеме завршетка операције рада односно максимална продуктивност.

Поменути модел је у потпуности развијен у складу са принципима Индустрије 4.0. Све то је детаљно описано у поглављу 4.

3.1.2 Истраживачке методе

Комплексност и мултидисциплинарност предмета истраживања ове докторске дисертације створили су потребу за примјеном већег броја истраживачких метода. Приликом избора метода, биране су оне које ће обезбиједити систематичност, валидност, поузданост, објективност, тачност и поновљивост.

Методе дескрипције и компилације

Метода дескрипције подразумијева једноставно описивање чињеница, процеса и предмета у природи и друштву те њихових односа и веза, без научног тумачења и објашњења. Метода компилације подразумијева навођење туђих резултата научноистраживачког рада, односно туђих спознаја, опажања,

закључака, и слично. Као такве, ове методе коришћене су у првој фази истраживања за приказивање теоријских основа неопходних за истраживање и преглед актуелног стања у области истраживања.

Математичка метода и метода експеримента

Математичка метода је системски поступак који подразумева примјену математичке логике, математичких релација, математичких симбола и математичких операција у научноистраживачком раду. Метода експеримента подразумева експериментално испитивање неке појаве на моделу или стварном систему и добијање резултата, на примјер, мјерењем неких величина. Поменуте методе, коришћене су у другој, трећој и четвртој фази истраживања. У другој фази, након извршене математичке анализе и дефинисања функција преноса система и осталих параметара потребних за управљање, експериментално је доказивана могућност даљинског управљања кретањем пнеуматских радних елемената, те даљинске промјене притиска и брзине у пнеуматским управљачким системима, што је детаљно приказано у потпоглављима 3.2, 3.3 и 3.4. У трећој фази, након извршене математичке анализе, експериментално је доказивана могућност развоја софтверски реконфигурабилног, даљински управљаног пнеуматског управљачког система, који има могућност тренутне промјене управљачких параметара у току процеса рада, што је детаљно приказано у потпоглављу 3.5. У четвртој фази, испитиван је предложени модел за подешавање параметара дигиталног пнеуматског управљачког система, уколико се као критеријум постави минимално вријеме завршетка операције рада или минимална потрошња ваздуха под притиском.

Метода анализе

Метода анализе подразумева поступак научног истраживања рашчлањивањем сложених појмова, судова и/или закључака на њихове једноставније, саставне дијелове. Као таква, она је коришћена у другој и трећој фази истраживања приликом развоја експерименталних постројења.

Методe индукције и генерализације

Метода индукције подразумева примјену индуктивног начина размишљања приликом доношења закључака, при чему се на основу анализе појединачних чињеница долази до закључка о општем суду. Важно је напоменути да поузданост индуктивног закључка зависи и од броја испитаних случајева и чињеница и од репрезентативности истих за одређену појаву. Метода генерализације подразумева мисаони поступак уопштавања, помоћу кога се од једног посебног појма долази до уопштенијег који је по степену виши од осталих појединачних. Обје ове методе коришћене су у посљедњој фази истраживања, односно приликом извођења општих закључака о даљинском управљању дигиталном пнеуматиком у концепту Индустије 4.0.

3.1.3 Лабораторије и опрема за експериментални рад

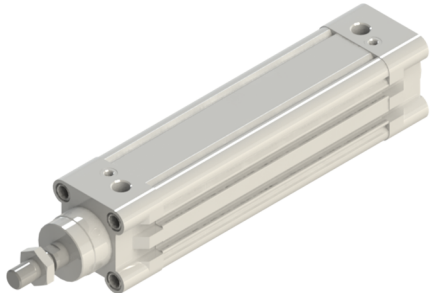
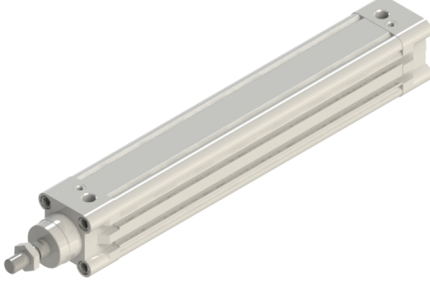

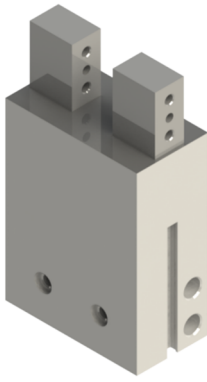
Сва истраживања у оквиру ове докторске дисертације извршена су у Лабораторији за аутоматизацију и програмабилне логичке контролере, која припада Катедри за мехатронику, роботiku и аутоматизацију Факултета техничких наука у Новом Саду.

Опрема за експериментални рад


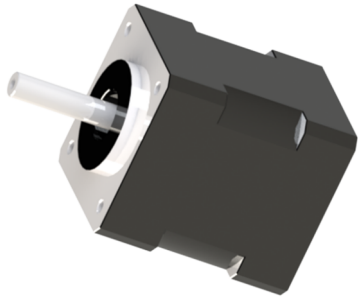
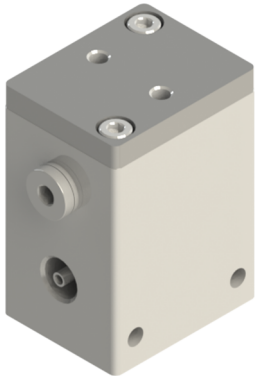
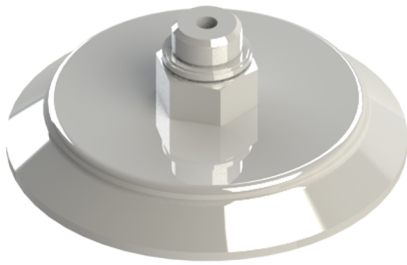
За реализацију експерименталних постројења, као и за извођење неопходних мјерења, коришћена је различита опрема детаљно описана у наставку рада.

1. **Радни елементи:** Приликом истраживања коришћени су различити радни елементи као што су пнеуматски цилиндри двосмјерног дејства, пнеуматска хватаљка, пнеуматски цилиндар без клипњаче, корачни електромотори и вакуум хватаљка. У потпоглављима 3.2-3.5, приликом детаљног описа експеримената, јасно је дефинисано када је и зашто неки радни елемент коришћен. У овом дијелу рада, у табели 1, приказани су коришћени радни елементи, дате су њихове основне карактеристике и дефинисана је количина која је коришћена приликом рада.

Табела 1. Коришћени радни елементи и њихове карактеристике¹⁹

Опис	Ознака	Модел компоненте	Основне карактеристике	Количина
Пнеуматски цилиндар двосмјерног дејства	Festo DNC-32-100-PPV-A		<ul style="list-style-type: none"> • Погонски притисак: 0,6 bar – 12 bar • Теоријска сила приликом извлачења на притиску од 6 bar: 483 N • Теоријска сила приликом увлачења на притиску од 6 bar: 415 N • Максимална енергија удара у крајњим позицијама: 0,2 J 	6
Пнеуматски цилиндар двосмјерног дејства	Festo DNC-32-200-PPV-A		<ul style="list-style-type: none"> • Погонски притисак: 0,6 bar – 12 bar • Теоријска сила приликом извлачења на притиску од 6 bar: 483 N • Теоријска сила приликом увлачења на притиску од 6 bar: 415 N • Максимална енергија удара у крајњим позицијама: 0,2 J 	1
Пнеуматски цилиндар двосмјерног дејства	Festo DNC-32-600-PPV-A		<ul style="list-style-type: none"> • Погонски притисак: 0,6 bar – 12 bar • Теоријска сила приликом извлачења на притиску од 6 bar: 483 N • Теоријска сила приликом увлачења на притиску од 6 bar: 415 N • Максимална енергија удара у крајњим позицијама: 0,2 J 	1
Пнеуматска хватаљка	Festo HGP-25-A-B		<ul style="list-style-type: none"> • Погонски притисак: 2 bar – 8 bar • Прихватна сила по прихvatној чељусти код отварања на притиску од 6 bar: 185 N • Прихватна сила по прихvatној чељусти код затварања на притиску од 6 bar: 160 N 	1

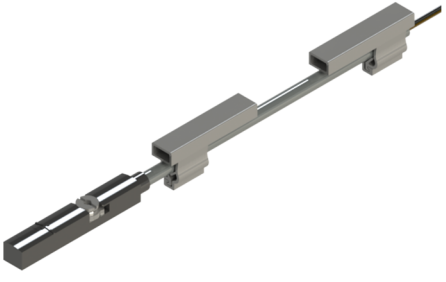


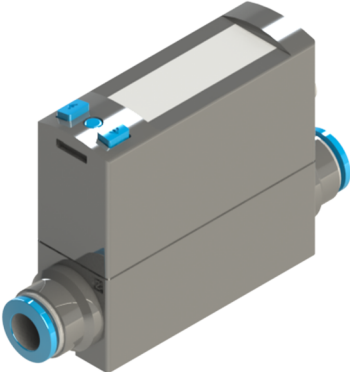
¹⁹ Напомена: Основне карактеристике компоненти преузете су из каталога произвођача.

Опис	Ознака	Модел компоненте	Основне карактеристике	Количина
Пнеуматски цилиндар без клипњаче	<i>Festo</i> DGPL-25-600-PPV-A-B-KF-GK-SH-D2		<ul style="list-style-type: none"> • Погонски притисак: 2 bar – 8 bar • Теоријска сила приликом кретања на десну страну на притиску од 6 bar: 295 N • Теоријска сила приликом на лијеву страну на притиску од 6 bar: 295 N • Двосмјерни начин функционисања 	1
Корачни електромотор	NEMA 14		<ul style="list-style-type: none"> • Корак: 1,8° • Јачина електричне струје: 1,33 A • Отпорност: 2,1 Ω • Индуктивност: 2,5 mH • Обртни момент: 0,14 Nm • Број проводника: 4 	3
Вакуум хватаљка састављена од вакуум генератора и вакуум сисаљке	<i>Festo</i> VAK-1/4		<ul style="list-style-type: none"> • Погонски притисак: 1,5 bar – 10 bar • Пнеуматски импулс одбацивања • Функционисање на принципу Лавалове млазнице 	1
	<i>Festo</i> VAS-75-1/4-NBR		<ul style="list-style-type: none"> • Ефективни пречник усисавања: 60 mm • Сила држања на називном радном притиску: 197 N 	1

2. Сензори: Истраживање обављено у склопу ове докторске дисертације захтијевало је коришћење више врсте сензора: магнетних сензора за детекцију крајњих положаја клипњача пнеуматских цилиндара и затворености/отворености пнеуматске хватаљке, дигиталне мјерне летве за читавање положаја клипа цилиндра без клипњаче, протокомјера за читавање протока ваздуха под притиском, сензора притиска за читавање вриједности притиска у управљачком систему, сензора за детекцију предмета рада и слично. У потпоглављима 3.2-3.5, приликом детаљног описа експеримената, јасно је дефинисано када је и зашто неки сензор коришћен. У овом дијелу рада, у

табели 2, приказани су неки коришћени сензори, дате су њихове основне карактеристике и дефинисана је количина која је коришћена приликом рада.

Табела 2. Коришћени сензори и њихове карактеристике²⁰

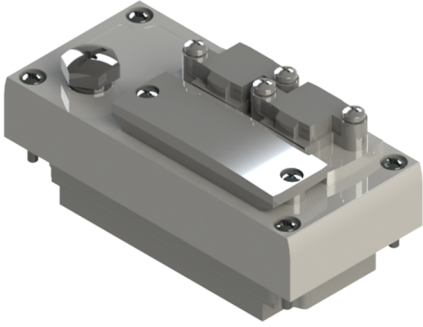
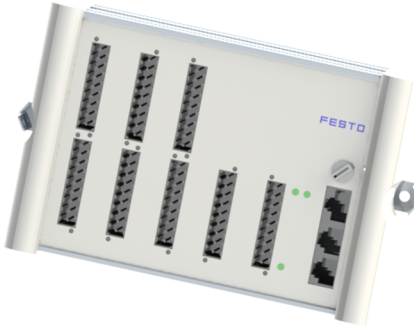
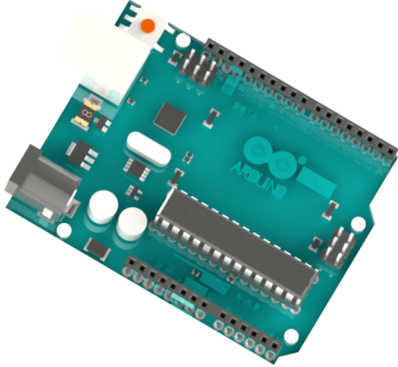
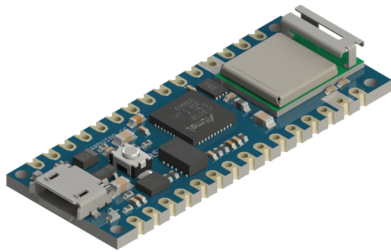
Опис	Ознака	Модел компоненте	Основне карактеристике	Количина
Магнетни сензор положаја	Festo SME-8M-DS-24V-K-0.2-OE		<ul style="list-style-type: none"> • Функција: нормално отворен контакт • Радни напон: 5 V – 30 V • Максимална јачине електричне струје на излазу: 500 mA 	13
Линеарна мјерна летва	Festo MME-MTS-600-TLF-AIF		<ul style="list-style-type: none"> • Мјерни опсег: 0 mm – 600 mm • Резолуција: 0,01 mm • Радни напон: 24 V (-15/+20%) • Интерфејс: CAN²¹ 	1
Сензор притиска	Danfoss MBS 3000, 060G1102		<ul style="list-style-type: none"> • Мјерни опсег: -1 bar – +15 bar • Типична грешка читавања: до 0,5% • Максимално вријеме одговора: 4 ms • Радни напон: 10 V – 30 V • Аналогни излазни сигнал: 4 mA -20 mA 	2
Сензор протока	Festo SFEI-LF-F200-HQ8-P2I-M12		<ul style="list-style-type: none"> • Мјерни опсег: $10 \frac{l}{min} - 200 \frac{l}{min}$ • Типична грешка читавања: $\pm 3\%$ • Радни притисак: 0 bar – 10 bar • Аналогни излазни сигнал: 4 mA -20 mA 	1

²⁰ Напомена: Основне карактеристике компоненти преузете су из каталога произвођача.

²¹ CAN [160] (енг. *Controller Area Network*) протокол је комуникациони протокол намјенски развијен од стране компаније *Bosh Rexroth* за примјене у аутомобилској индустрији као одговор исте на потребу за брзом и поузданом комуникацијом између уређаја унутар аутомобила. Хардверски дио системи сачињавају проводници са упреденим парцима, а комуникациони водови који се користе су високонапонски, CAN-H (енг. *High*) и нисконапонски, CAN-L (енг. *Low*). Коришћењем CAN протокола, омогућава се веома брза комуникација, до $1 \frac{Mb}{s}$.

3. **Контролери:** За управљање развијеним системима коришћене су двије различите врсте ПЛК и неколико различитих врста микроконтролерских развојних окружења. У потпоглављима 3.2-3.5, приликом детаљног описа експеримената, јасно је дефинисано када је и зашто неки ПЛК и/или микроконтролер коришћен. У овом дијелу рада, у табели 3, посебно су приказани неки контролери, дате су њихове основне карактеристике и дефинисана је количина која је коришћена приликом рада.

Табела 3. Коришћени контролери и њихове карактеристике²²

Опис	Ознака	Модел компоненте	Основне карактеристике	Количина
ПЛК	Festo CPX-CEC		<ul style="list-style-type: none"> • Главни елемент модуларног терминала у који је могуће интегрисати велики број различитих модула за дигиталне улазе/излазе, аналогне улазе/излазе и слично 	1
ПЛК	Festo FC 660		<ul style="list-style-type: none"> • Дигитални улази: 32 • Дигитални излази: 16 • Аналогни улази: 3 • Аналогни излази: 1 • Портови за серијску комуникацију: 2 • Тајмери • Бројачи 	2
Микроконтролерско развојно окружење	Arduino UNO		<ul style="list-style-type: none"> • Микроконтролер: ATmega328P • Номинални напон: 5 V • Дигитални пинови: 8 • Пинови за аналогне улазе: 6 • Пинови за PWM излаз: 6 • Такт: 16 MHz 	2
Микроконтролерско развојно окружење	Arduino NANO		<ul style="list-style-type: none"> • Микроконтролер: ATmega328P • Номинални напон: 5 V • Дигитални пинови: 16 • Пинови за аналогне улазе: 8 • Пинови за PWM излаз: 6 • Такт: 16 MHz 	1

²² Напомена: Основне карактеристике компоненти преузете су из каталога произвођача.

4. Софтверски пакети: Приликом реализације корисничких апликација, коришћено је више објектно-оријентисаних програмских језика који омогућавају креирање стандардних десктоп апликација: LabVIEW, C#, Java. За даљинско управљање, коришћена је намјенски развијена софтверска платформа SEyeClon. Поред тога, за писање програма за ПЛК и микроконтролере коришћени су одговарајући програмски језици Codesys 2.3 и FST 4.21, односно програмско окружење Arduino IDE, респективно, и слично.
5. Остала опрема: Под осталом опремом подразумевају се:
 - помоћне пнеуматске компоненте, као што су извор напајања ваздухом под притиском - компресор, припремне групе, разводни вентили, регулатори притиска, пригушно-неповратни вентили, разне врсте прикључка и конвертора, пнеуматска цријева, и слично,
 - помоћне електронске и електричне компоненте, као што су исправљачи за добијање једносмјерне електричне струје, драјвери за корачне електромоторе, управљачка електроника, релејни модули, проводници, и слично,
 - помоћне механичке компоненте, као што су екструдирани алуминијумски профили, носеће пластичне и алуминијумске плоче, машински елементи за причвршћивање и везу, и слично.

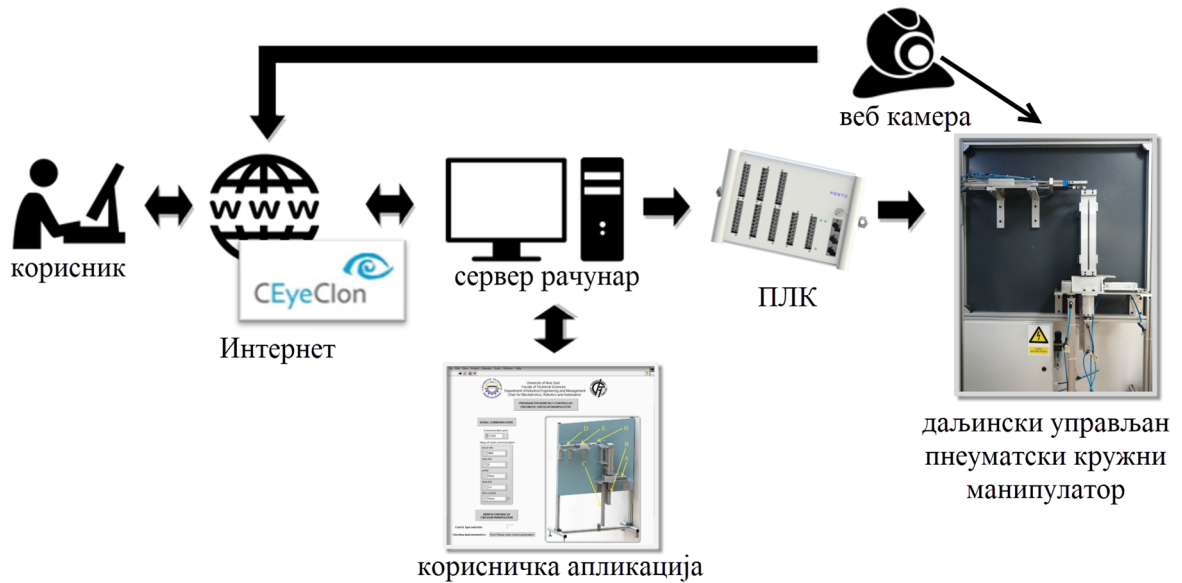
3.2 Експеримент 1: Даљински управљан пнеуматски кружни манипулатор

Даљински управљан пнеуматски кружни манипулатор [63], [84], [85], [135], [136] развијен је са циљем да се докаже могућност даљинског управљања пнеуматским радним елементима у систему који се састоји од већег броја истих. Поред тога, пнеуматски кружни манипулатор представља уређај који се користи у наставном процесу на Факултету техничких наука у Новом Саду, у склопу предмета „Аутоматизација процеса рада“ и „Аутоматизација процеса рада 2“, на основним академским студијама на студијским програмима Мехатроника и Индустријско инжењерство, респективно, како би студенти, на практичном примјеру, додатно продубили знања из области пнеуматског управљања. Уређај се користи и у склопу предмета „Имплементација аутоматских система“ и „Енергетска ефикасност система ваздуха под притиском“ на мастер академским студијама на студијским програмима Мехатроника и Индустријско инжењерство, респективно, како би студенти, на практичном примјеру, додатно продубили знања из области одржавања пнеуматских управљачких система, димензионисања управљачких компоненти, енергетске ефикасности, и слично.

Даљински управљан пнеуматски кружни манипулатор је мехатронички уређај који се састоји од неколико међусобно повезаних цјелина (слика 35):

- основне механичке конструкције која, поред носеће конструкције направљене од екстудираних алуминијумских профила и радних елемента, подразумева и остале неопходне машинске елементе и дијелове (на примјер, елементе за везу као што су вијци и навртке), и друге компоненте (на примјер, разводне вентиле) позициониране у управљачки орман,
- главног управљачког уређаја – ПЛК, позиционираног такође у управљачком орману,
- сервер рачунара са инсталираним софтвером SEyeClon Viewer [60],
- веб камере постављене у непосредној близини уређаја како би се уживо могао пратити рад истог, и

- софтверског дијела који укључује корисничку апликацију за даљинско управљање уређајем, као и извршни програм за ПЛК.



Слика 35. Структура даљински управљаног пнеуматског кружног манипулатора [135]

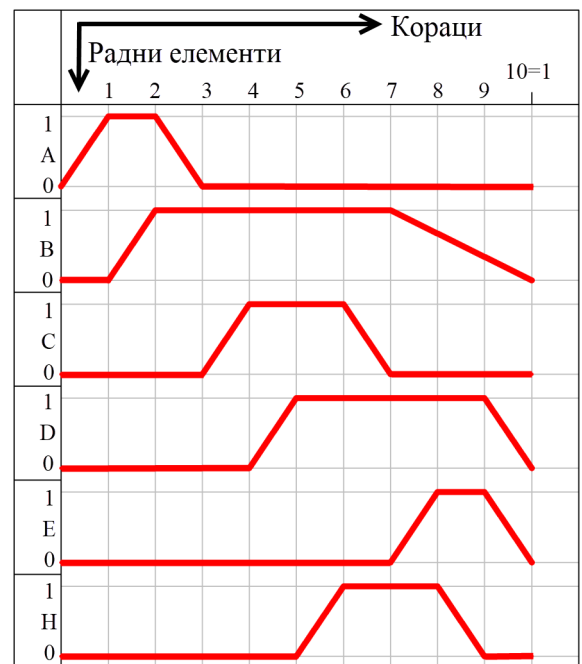
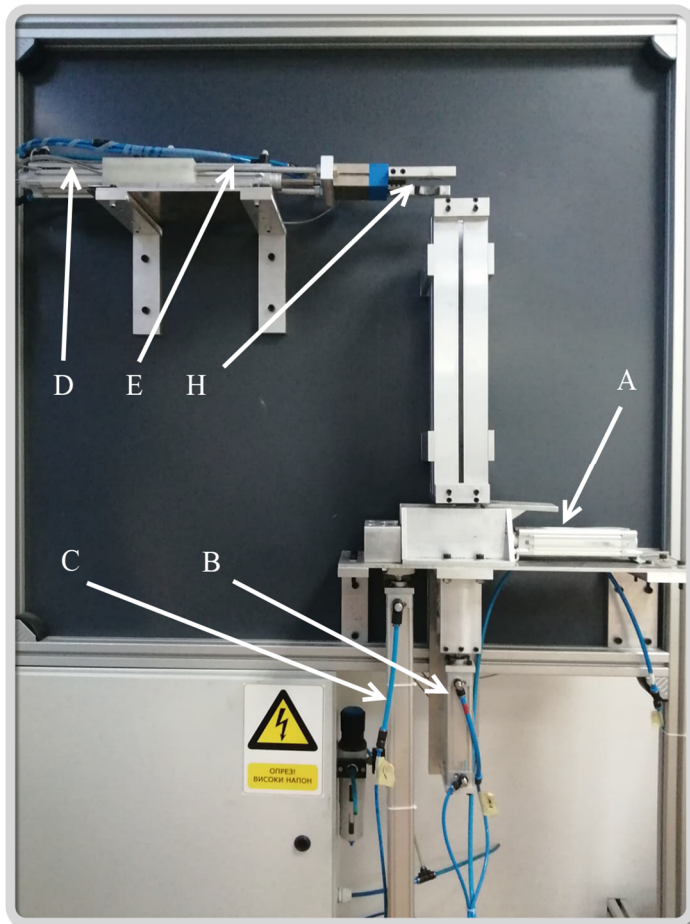
3.2.1 Хардверска реализација пнеуматског кружног манипулатора

На слици 36, положај лијево, приказана је механичка конструкција даљински управљаног пнеуматског кружног манипулатора. Састоји се од пет пнеуматских цилиндара двосмјерног дејства (слика 36, ознаке А-Е) и једне пнеуматске хватаљке (слика 36, ознака Н). Предмети рада, ваљкастог облика, пречника 80 mm и висине 100 mm, различитих маса, постављени су у вертикални магацин за складиштење. У магацин је могуће смјестити највише шест предмета рада. На најнижој тачки, први хоризонтално постављени пнеуматски цилиндар (слика 36, ознака А) гура предмет рада напријед. Након тога, извлачи се клипњача првог вертикално постављеног цилиндра (слика 36, ознака В), која придржава преостале предмете рада и омогућава неометан повратак клипњаче цилиндра А у почетни, крајњи увучени положај. Затим се извлачи клипњача другог вертикално постављеног цилиндра (слика 36, ознака С) и подиже један предмет рада на виши ниво. У сљедећем кораку, извлачи се клипњача другог хоризонтално постављеног цилиндра (слика 36, ознака D) и позиционира хватаљку (слика 36, ознака Н) у положај за хватање предмета рада. Хватаљка се затвара и преузима предмет рада, а након тога, клипњача цилиндра С се враћа у почетни, крајњи увучени положај. Затим се клипњаћа трећег хоризонтално постављеног цилиндра (слика 36, ознака Е), који заједно са цилиндром D формира вишеположајни цилиндар, извлачи и позиционира хватаљку тачно изнад вертикалног магацина за складиштење. Истовремено, клипњача цилиндра В се увлачи и ослобађа се простор за један предмет рада у магацину. Хватаљка се отвара и отпушта предмет рада који се даље, под дејством силе гравитације, креће кроз магацин. На тај начин се завршава један циклус рада у ком предмети „круже“ кроз манипулатор, па отуда и потиче његов назив. Сви коришћени цилиндри су произвођача Festo, ознаке DNC-32-100-PPV-A (цилиндри А, В, D и Е), односно ознаке DNC-32-600-PPV-A (цилиндар С). Захваљујући томе што цилиндри D и Е имају идентичан ход, формиран је вишеположајни цилиндар који остварује три могућа положаја:

- положај 1: када су увучене клипњаче оба цилиндра, омогућава се неометано подизање предмета рада,

- положај 2: када је извучена клипњача било ког од цилиндара D и E, хватаљка се позиционира у положај за хватање предмета рада, и
- положај 3: када су извучене клипњаче оба цилиндра, хватаљка се позиционира у положај за отпуштање предмета рада, односно тачно изнад вертикалног магацина за складиштење.

Коришћена пнеуматска хватаљка је, такође, произвођача Festo, ознаке HGP-25-A-B. Потребно је напоменути и то да је сва помоћна опрема, као што су, на примјер разводни вентили, смјештена у управљачком орману. Ради лакшег разумијевања рада манипулатора, на слици 36, положај десно, приказан је и дијаграм пут-корак²³.

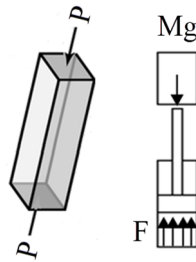


Слика 36. Даљински управљан пнеуматски кружни манипулатор – физичка реализација, лијево и дијаграм пут-корак, десно [63], [135]

Као што се из претходно наведеног може закључити, пнеуматски кружни манипулатор обавља једноставне операције, типичне за индустријско руковање предметима рада, као што су изузимање предмета рада из складишта, премјештање предмета рада на друго радно мјесто, складиштење предмета рада, и слично [135]. Као такав, намјенски је развијен као модуларни уређај, који се једноставним трансформацијама може прилагодити различитим врстама пнеуматског управљања и на коме је могуће симулирати различите ситуације које могу да се јаве у индустријским процесима. У тим ситуацијама, могу да се јаве различите врсте напрезања као што су, на примјер, притисак, затезање или савијање [135], [136].

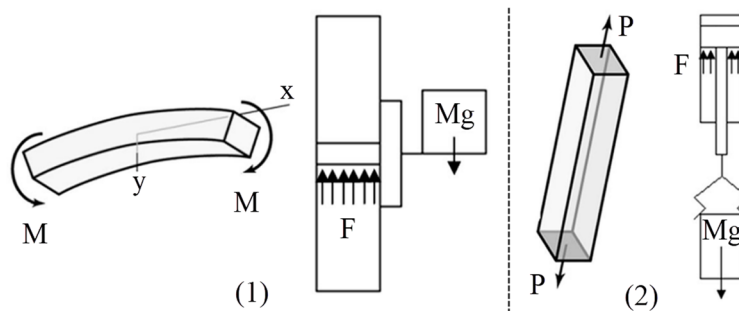
²³ Дијаграм пут-корак један је од начина за графичко представљање управљачког проблема и одвијање операција рада. Покрети радних елемената представљају се у облику зависности пређеног пута од одговарајућих корака, при чему се под кораком подразумева промјена стања било ког радног елемента [86]–[88].

Један примјер такве трансформације могуће је извршити са цилиндром С, који подиже предмете рада на виши ниво (слика 36). Клипњача тог цилиндра, у датом случају, оптерећена је на притисак (слика 37).



Слика 37. Приказ врсте оптерећења клипњаче цилиндра (лијево) и скица ситуације у систему (десно) [135], [136]

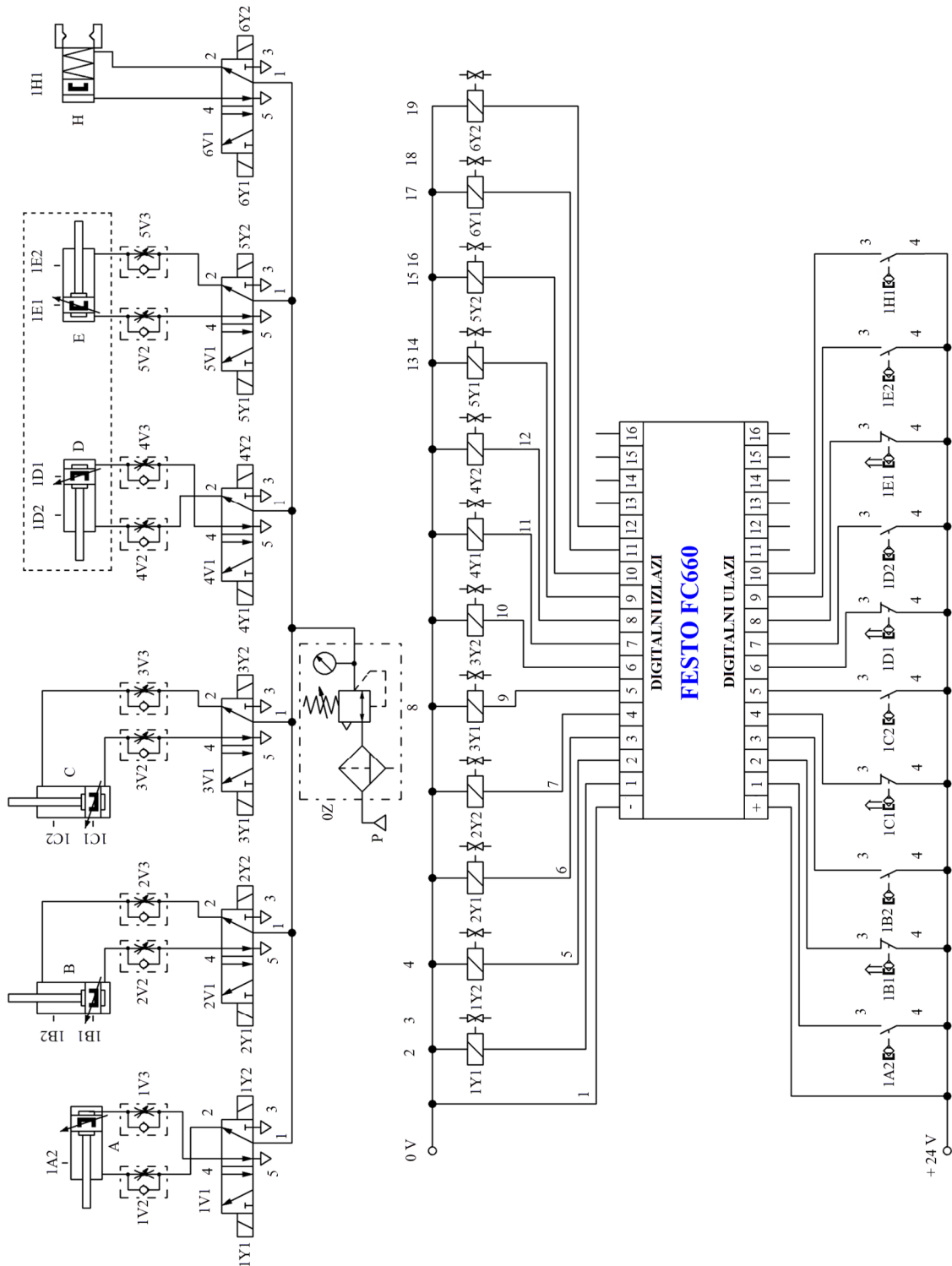
Уколико би, умјесто поменутог цилиндра, за подизање предмета рада, био коришћен цилиндар без клипњаче, са одговарајућим носачем или са интегрисаном вакуум хватаљком која прихвата предмет рада, носећи елемент био би оптерећен на савијање (слика 38, позиција 1). Даље, уколико би цилиндар С, са интегрисаном вакуум хватаљком, био постављен тако да је, у крајњем увученом положају клипњаче, на горњем нивоу у односу на магацин, односно да се клипњача спушта на нижи ниво приликом извлачења, иста би била оптерећена на затезање (слика 38, позиција 2).



Слика 38. Различите врсте оптерећења (лијево) и скица ситуације у систему (десно) за два случаја: 1 – савијање, 2 - затезање [135], [136]

Пнеуматска управљачка шема

За управљање радом пнеуматског кружног манипулатора коришћен је ПЛК произвођача Festo, ознаке FC660. На дигиталне улазе поменутог ПЛК доведени су сигнали са магнетних сензора положаја који су коришћени за детекцију положаја клипњача пнеуматских цилиндара или пнеуматске хватаљке. Дигитални излази поменутог ПЛК повезани су на соленоиде командних разводних вентила свих радних елемената. Коришћењем традиционалног ON-OFF управљања, простим активирањем, односно деактивирањем разводних вентила на тачно дефинисан начин, у складу са дијаграмом пут-корак, омогућава се кретање радних елемената и извршење радног циклуса манипулатора. На сваки пнеуматски цилиндар уграђена су по два пригушно-неповратна вентила, директно на прикључцима, како би се регулисала брзина кретања пригушењем излазног ваздуха. Пнеуматска управљачка шема, заједно са шемом повезивања улаза и излаза ПЛК, приказана је на слици 39.



Слика 39. Пнеуматска управљачка шема и шема повезивања ПЛК

3.2.2 Софтверска реализација пнеуматског кружног манипулатора

Софтверски дио пнеуматског кружног манипулатора састоји се од три значајне цјелине: софтверског пакета SEyeClon Viewer [60], корисничке апликације и извршног програма за ПЛК.

SEyeClon Viewer (слика 40) је дио SEyeClon платформе и користи се за повезивање са удаљеним системом путем интернета. Стога је неопходно да корисници на својим рачунарима имају инсталиран поменути софтвер. Након покретања истог, корисници морају да унесу приступну лозинку, коју су претходно добили од администратора, у поље „AccessKey“ (слика 40, позиција 1). Лозинка се издаје са ограниченим временом трајања и може се искористити само у тачно дефинисаном временском интервалу.

У супротном, корисник неће моћи да приступи удаљеном систему. Уколико је приступна лозинка исправна, након клика на дугме „Login“ (слика 40, позиција 2), кориснику се отвара прозор са приказом тренутно доступних управљачких система, једним или више њих. Избором одговарајућег, корисник се повезује са удаљеним рачунаром на коме је инсталирана корисничка апликација за управљање удаљеним системом [61], [63], [82], [135].



Слика 40. Главни прозор програма CEyeClon Viewer

У овом случају, у питању је апликација под називом „Circular_Manipulator.exe“ [137], развијена у објектно-оријентисаном програмском језику за графичко програмирање LabVIEW [138]. Поменути апликација приказана је на слици 41. Након покретања апликације, корисник прво мора да подеси параметре серијске комуникације (слика 41, позиција 1) како би се успјешно повезао са управљачким системом. У наредном кораку, дефинише се жељени мод управљања, уносом карактера А, В или С у поље „Control type selection“ (слика 41, позиција 2). Уколико су унијети исправни карактери, у пољу „Checking input parameters“ (слика 41, позиција 3), након покретања апликације кликом на стрелицу из главне линије (слика 41, позиција 4), исписаће се сљедећи текст: „Look at the camera! :).“ У супротном, уколико се у поље „Control type selection“ унесе неки други карактер или стринг, након покретања апликације, у пољу „Checking input parameters“, исписаће се сљедећи текст: „Error! Please, enter correct parameters!.“ Након покретања апликације, у случају исправног уноса жељеног типа управљања, пнеуматски кружни манипулатор започиње радни циклус који подразумијева манипулацију једним предметом рада – од изузимања из складишта са најниже позиције до поновног смјештања у складиште на највишу позицију.



Слика 41. Корисничка апликација [63], [135]

Потребно је нагласити и то да се управљање означено са А односи на основни управљачки циклус (слика 36). Управљање означено са В специфично је по томе што се, након радног хода вертикално постављеног цилиндра С, његова клипњача задржава у извученом положају 5 s (на примјер, због потребе да се обави нека додатна операција са предметом рада), па се тек онда наставља према основном управљачком циклусу. Управљање означено са С специфично је по томе што је код вишеположајног цилиндра имплементиран другачији редослијед извлачења клипњача цилиндара – прво се извлачи клипњача цилиндра Е, па онда клипњача цилиндра D (према основном циклусу, извлачење клипњача иде обрнутим редослиједом). За покретање новог циклуса рада, неопходно је зауставити апликацију кликом на црвено дугме из насловне линије (слика 41, позиција 5), унијети нове податке и поново покренути апликацију на претходно описани начин. Важно је напоменути и то да је апликацију могуће покренути поново тек након завршетка једног циклуса рада манипулатора. У случају неисправног уноса карактера за избор управљања, апликација се, након покретања, аутоматски деактивира.

Комуникација између сервер рачунара и самог ПЛК, који управља радом манипулатора, обавља се коришћењем серијске, RS232²⁴ комуникације. Након пријема информације о жељеном типу управљања, ПЛК извршава одговарајући програм и манипулатор ради на један на три могућа начина. Програмирање

²⁴ RS232-C/V.24 (према америчком стандарду EIA) представља 9-пински или 25-пински интерфејс за размјену података путем серијског порта на рачунару, који се у њемачком стандарду (ITU-T) води под ознаком V.24standard, и који је веома често у употреби.

ПЛК извршено је у програмском окружењу FST 4.21, које је специфично само за контролере произвођача Festo, у програмском језику који се назива „Листа инструкција“ (енг. *Statment List*) [106].

За уживо праћење рада пнеуматског кружног манипулатора, у његовој непосредној близини, инсталирана је и веб камера. Веб камера је интегрисана у окружење SEyeClon Viewer и покреће се аутоматски, приликом повезивања са изабраним системом. Уколико повезивање са камером, из неког разлога, не буде усјешно извршено, неопходно је посебно покренути исту. То се постиже покретањем софтвера VLC player, избором опције Media/Open network stream/Network из насловне линије и кликом на дугме Play. Претходно је неопходно уписати одговарајућу IP адресу камере.

3.2.3 Управљачки алгоритам

Управљачки алгоритам²⁵ представљен је помоћу графичког начина приказа, односно дијаграма тока. Такав начин записивања извршења инструкција има неколико предности над псеудокодом, јер се записивање врши коришћењем општеприхваћених, међународних симбола и не зависи од говорног језика онога који саставља алгоритам. Поред тога, графички приказ је прегледан, једноставан и омогућава лако проналажење грешака, те лако упоређивање са неким другим рјешењима.

Постоје три елементарне алгоритамске структуре – линијска, разграната и циклична. Линијском структуром назива се низ алгоритамских корака који се изводе безусловно, један за другим, односно, након завршетка i -те инструкције одмах се извршава $i+1$ инструкција (секвенца). Под разгранатом структуром подразумијева се извођење два или више различитих поступака при чему избор једног од њих зависи од неког услова (селекција). Разликују се два типа селекција. Први тип, у случају испуњења задатог услова, подразумијева извршење i -те инструкције, односно онемогућава њено извршење све док се постављени услов не испуни, а други тип, у случају испуњења задатог услова, подразумијева извршење i -те инструкције, а у случају да постављени услов није испуњен, подразумијева извршење неке j -те инструкције. Циклична структура обезбјеђује понављање неких корака алгоритма потребан број пута (итерација). Разликују се три типа итерација. Први тип представља итерацију са изласком на врху код које се прво провјерава постављени услов и, уколико је исти испуњен, дозвољава се извршавање инструкција унутар итерације. У супротном, прелази се на извршавање инструкција ван итерације. Други тип представља итерацију са изласком на дну код које се инструкције унутар итерације извршавају све док се не испуни постављени услов, након чега се прелази на извршавање инструкција ван итерације. Трећи тип представља итерацију са изласком у средини чије извршавање се може прекинути у било ком дијелу.

У овом случају, користи се сложени облик алгоритамске структуре (слика 42), добијен комбинацијом претходно дефинисаних елементарних структура. Састоји се од три јасне цјелине од којих се једна извршава на корисничкој страни, друга на серверској, а трећа у самом управљачком систему.

²⁵ У последње вријеме, ријеч „алгоритам“ се најчешће везује за рачунарске науке. Као такав, алгоритам, у суштини, представља тачно дефинисану процедуру која се састоји од низа инструкција које омогућавају рјешавање неког проблема трансформацијом улазних величина у излазне на одређени начин. Под подразумијева се да се поменуте инструкције могу извршити на рачунару [161]. Треба напоменути и то да, као што постоји више начина за рјешавање неког математичког задатка, постоји и више алгоритама који рјешавају неки проблем. Оно што је сигурно јесте да сваки алгоритам мора да се састоји од коначног броја корака, међусобно условљених на начин да је на наредни могуће прећи само ако је претходни успјешно извршен, и да поступак проласка кроз кораке мора бити тачан, недвосмислен и јасан.



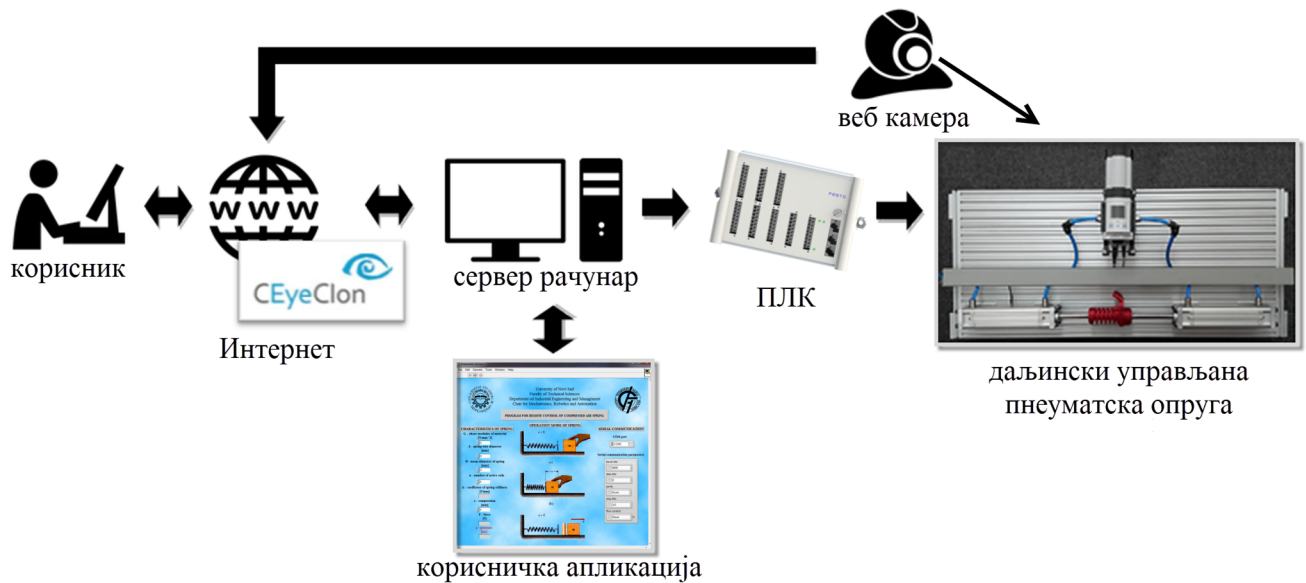
Слика 42. Управљачки алгоритам

3.3 Експеримент 2: Даљински управљана пнеуматска опруга

Даљински управљана пнеуматска опруга [61], [139]–[141] развијена је са циљем да се докаже могућност даљинске регулације притиска у пнеуматским управљачким системима, односно даљинског управљања по сили. Притом, даљински управљана пнеуматска опруга представља уређај који се користи у наставном процесу на Факултету техничких наука у Новом Саду, у склопу предмета „Компоненте технолошких система“ и „Аутоматизација процеса рада 1“ на основним академским студијама на студијским програмима Мехатроника и Индустијско инжењерство, респективно, како би студенти продубили знања из основа пнеуматике, али и теорије о механичким опругама [61], [140]. Као таква, даљински управљана пнеуматска опруга симулира рад механичке опруге при различитим условима, приликом сабијања. Различити услови добијају се софтверском промјеном параметара којима се описује рад опруга.

Као и даљински управљан пнеуматски кружни манипулатор, и даљински управљана пнеуматска опруга је мехатронички уређај који се састоји од неколико међусобно повезаних цјелина (слика 43):

- основне механичке конструкције која, поред носеће конструкције направљене од екструдираних алуминијумских профила и радних елемената са наставцима за клипњачу у облику опруге, односно људске шаке, подразумијева и остале неопходне машинске елементе и дијелове (на примјер, елементе за везу као што су вијци и навртке), и друге компоненте (на примјер, електрично управљан регулатор притиска, смјештен са предње стране носеће конструкције како би корисник и визуелно, на екрану регулатора, могао уживо пратити промјену вриједности притиска),
- главног управљачког уређаја – ПЛК, смјештеног са задње стране носеће конструкције,
- сервер рачунара са инсталираним софтвером CEyeClon Viewer,
- веб камере постављене у непосредној близини уређаја како би се уживо могао пратити рад истог, и
- софтверског дијела који укључује корисничку апликацију за даљинско управљање уређајем, као и извршни програм за ПЛК.



Слика 43. Структура даљински управљане пнеуматске опруге [61]

3.3.1 Опруге као машински елементи

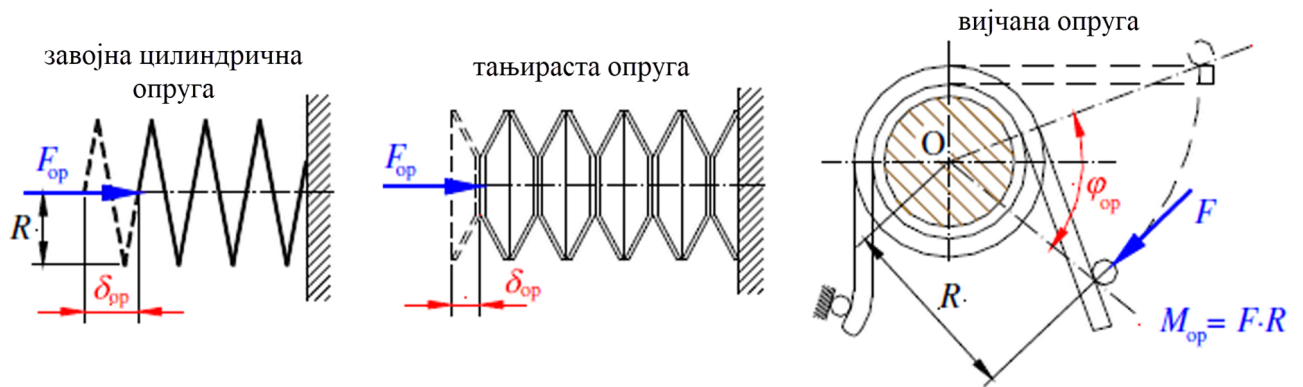
Опруге су машински елементи који се користе за еластично повезивање машинских дијелова и то на оним мјестима гдје је потребно, деформацијом опруге, акумулирати енергију у виду потенцијалне енергије која се касније може примијенити за [142]:

- остваривање силе током краћег временског периода (на примјер, у оквиру окидача на сатном механизму, и слично),
- остваривање сталне силе током дужег временског периода (на примјер, у оквиру сигурносних вентила, и слично),
- акумулацију удара (на примјер, у оквиру амортизера код возила),
- распоdjелу сила (на примјер, у оквиру сједишта),
- ограничавање силе (на примјер, у оквиру сигурносних спојница),
- мјерење силе (на примјер, у оквиру динамометара), и слично.

Поред подјеле опруга према начину употребе, опруге се могу подијелити и према врстама напрезања која се јављају при њиховом деформисању па тако постоје савојне, увојне и сложено оптерећене опруге и еластични, односно гумени ослонци. Даље, опруге се могу подијелити и према врсти материјала од којег су израђене, али и према облику, па тако постоје завојне цилиндричне, тањирасте, лиснате, вијчане, и друге опруге. Један од значајнијих начина подјела опруга је и према еластичности, у зависности од које се разликују опруге са константном крутошћу, односно линеарне опруге, и опруге са промјенљивом (прогресивном или дегресивном) крутошћу, односно нелинеарне опруге. Деформација опруге описује се помоћу једног од два параметра:

- помјераја из равнотежног положаја (елонгације) - δ_{op} , или
- угаоног помјераја опруге - φ_{op} .

Крива која представља међусобну зависност оптерећења опруге (F_{op} или M_{op}) и њене деформације (δ_{op} или φ_{op}) назива се карактеристика опруге. На слици 44 приказани су неки облици опруга и параметри којима се описују њихове деформације.



Слика 44. Облици опруга и параметри којима се описују њихове деформације

Под крутошћу опруге подразумева се сила која је потребна за остваривање јединичног помјераја ($\delta_{op} = 1$) или јединичног угла ($\varphi_{op} = 1$). Крутост опруге изражава се преко коефицијента крутости k који је, како је већ претходно наглашено, код линеарних опруга константан, као што се може видјети из формула 4 и 5, и са слике 45:

$$k = \frac{F_{op}}{\delta_{op}} = const. \quad (4)$$

$$k = \frac{M_{op}}{\varphi_{op}} = const. \quad (5)$$

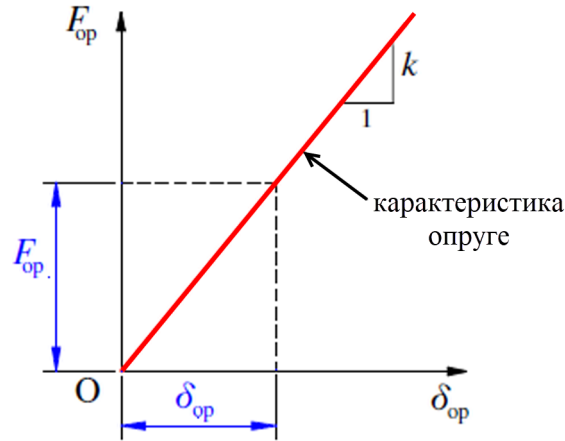
Код линеарних завојних цилиндричних опруга, коефицијент крутости зависи искључиво од геометријских карактеристика и од врсте материјала од којег је опруга израђена па се може прорачунати коришћењем формуле 6:

$$k = \frac{G \cdot d^4}{8 \cdot D^3 \cdot n_a} \quad (6)$$

гдје је G модул смицања²⁶ материјала од којег је опруга направљена, d пречник, односно дебелина намотаја, D унутрашњи пречник опруге, а n_a број намотаја. Модул смицања материјала одређује се према формули 7:

$$G = \frac{E}{2 \cdot (1 + \nu)} \quad (7)$$

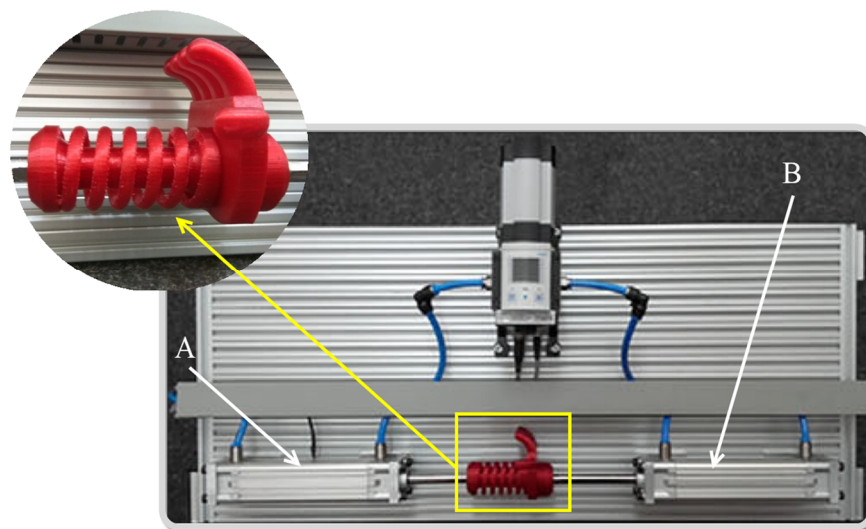
гдје је E Јунгов модул еластичности²⁷ материјала од кога је опруга направљена, а ν Поасонов коефицијент²⁸.



Слика 45. Карактеристика и коефицијент крутости линеарне опруге

3.3.2 Хардверска реализација пнеуматске опруге

Механичка конструкција даљински управљане пнеуматске опруге приказана је на слици 46. Састоји се од два пнеуматска цилиндра двосмјерног дејства, произвођача Festo, ознаке DNC-32-100-PPV-A, од којих један симулира опругу (слика 46, ознака А), а други силу потребну да се опруга изведе из равнотежног положаја (слика 46, ознака В). Наставци за клипњаче поменутих цилиндара направљени су тако да сликовито приказују процес сабијања механичке опруге под дејством људске шаке.



Слика 46. Даљински управљана пнеуматска опруга – физичка реализација

²⁶ Модул смицања је карактеристична константа у механици која дефинише природу материјала при смицању. Јединица за модул смицања у Међународном систему је $\frac{N}{m^2}$, али се користе и друге јединице, на примјер $\frac{N}{mm^2}$.

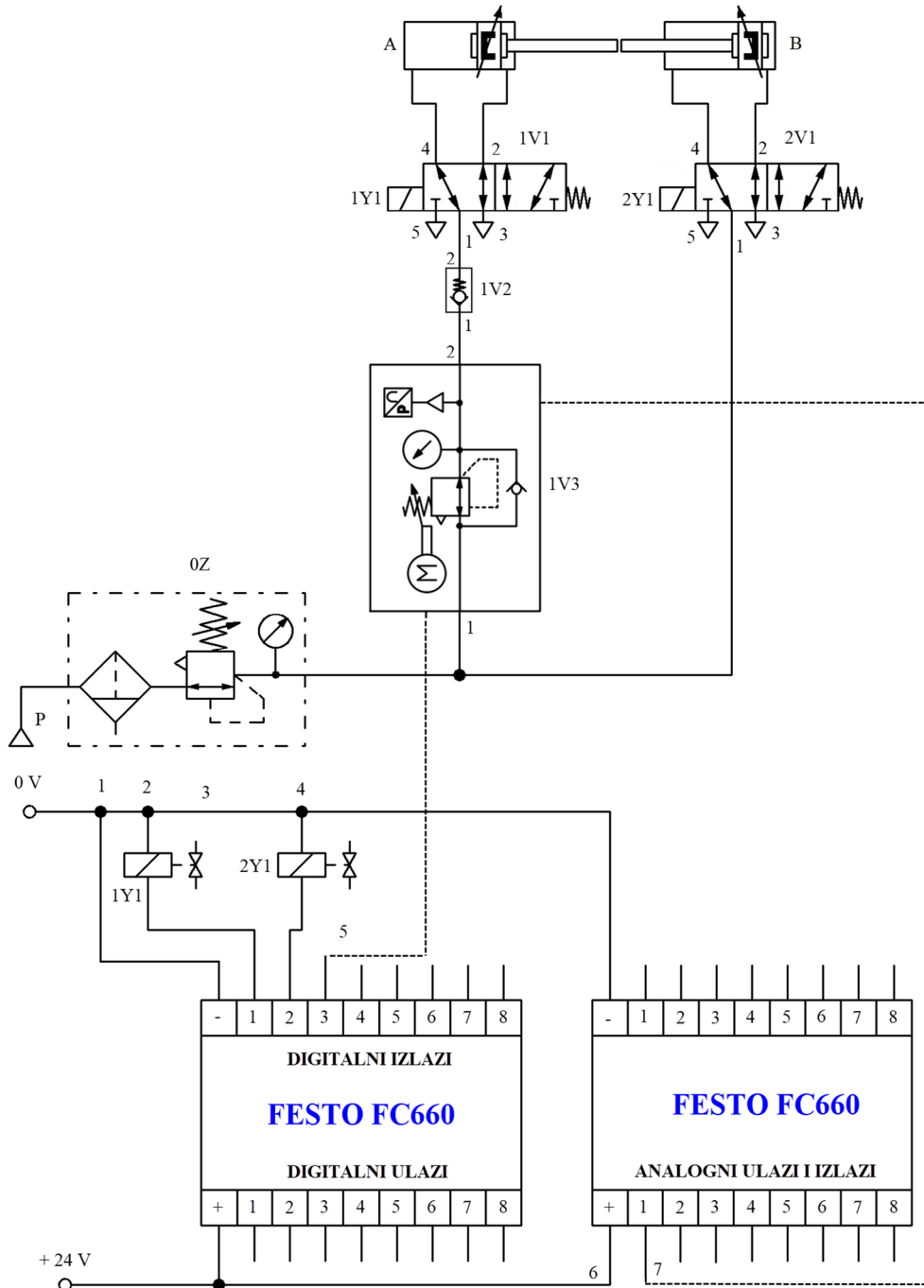
²⁷ Јунгов модул еластичности представља мјеру крутости материјала и једнак је односу напона и процентуалног издужења у линеарном или еластичном дијелу дијаграма напрезања.

²⁸ Поасонов коефицијент је бездимензиона карактеристика материјала, чија вриједност зависи од врсте материјала. Представља везу између подужне и попречне дилатације материјала.

Вијчаним везама, пнеуматски цилиндри повезани су за носећу плочу, формирану од екструдираних алуминијумских профила, која је постављена под углом од 60° у односу на хоризонталну раван. Изнад цилиндара, постављен је електрично управљан регулатор притиска, произвођача Festo, ознаке MS6-LRE-1/4-D7-OP-PI-SK5-VK5-VJBE, на чијем екрану је могуће пратити све промјене притиска и читавати тренутну вриједност. Главни управљачки уређај, ПЛК, произвођача Festo, ознаке FC660, заједно са осталом неопходном опремом (припремна група, разводни вентили, извор најапања, и слично), постављен је са задње стране плоче.

Пнеуматска управљачка шема

Пнеуматска управљачка шема, заједно са шемом повезивања улаза и излаза ПЛК, приказана је на слици 47.



Слика 47. Пнеуматска управљачка шема и шема повезивања ПЛК

У почетном положају, оба разводна вентила (слика 47, ознаке 1V1 и 2V1) су активирани. На тај начин, ваздух под притиском се, директно са извора најапања, доводи до клипњачине стране цилиндра В, који

симулира силу потребну да се опруга изведе из равнотежног положаја, и он се налази у крајњем увученом положају. Са друге стране, преко електрично управљаног регулатора притиска (слика 47, ознака 1V3) и неповратног вентила (слика 47, ознака 1V2), ваздух под притиском, чија је вриједност мања од оне на изласку из припремне групе (због постојања регулатора притиска), доводи се до клипне стране цилиндра А, који симулира опругу, и он се налази у крајњем извученом положају. Након активирања соленоида 2Y1 разводног вентила 2V1, ваздух под притиском се, директно са извора напајања, доводи до клипне стране цилиндра В, који започиње процес извлачења клипњаче, уз истовремено потискивање клипњаче цилиндра А ка увученом положају, због разлике у притисцима, односно силама. На тај начин се симулира поступак сабијања опруге под дејством неке силе пошто не постоји могућност испуста ваздуха под притиском у атмосферу у датом положају, због присуства неповратног вентила. Након неког времена, ПЛК деактивира соленоид 2Y1 разводног вентила 2V1, и након тога, клипњача цилиндра А се извлачи, а клипњача цилиндра В увлачи, и тиме се симулира повратак опруге у равнотежни положај након престанка дејства силе. На тај начин, заокружен је један циклус симулације рада пнеуматске опруге [61], [137], [140]. Потребно је напоменути и то да би симулација додатно добила на сликовитости, уколико би, умјесто моностабилног разводног вентила 5/2 (слика 47, ознака 2V1), био коришћен 5/3 разводни вентил, са средњим одзраченим положајем. На тај начин, након деактивације одговарајућег соленоида, при позиционирању вентила у средњи одзрачени положај, клипњача цилиндра А би заиста потискивала клипњачу цилиндра В (као што то и иначе ради опруга), односно не би додатно био коришћен ваздух са извора напајања за повратак клипњаче цилиндра В у крајњи увучени положај.

3.3.3 Софтверска реализација пнеуматске опруге

Као и у случају даљински управљаног пнеуматског кружног манипулатора, тако и у случају даљински управљане пнеуматске опруге, софтверски дио се састоји од три значајне цјелине: софтверског пакета SEyeClon Viewer, корисничке апликације и извршног програма за ПЛК. Као што је већ раније речено, SEyeClon Viewer се користи за приступ удаљеном сервер рачунару на чијем је десктопу инсталирана корисничка апликација под називом „Pneumatic_Spring.exe“ [137].

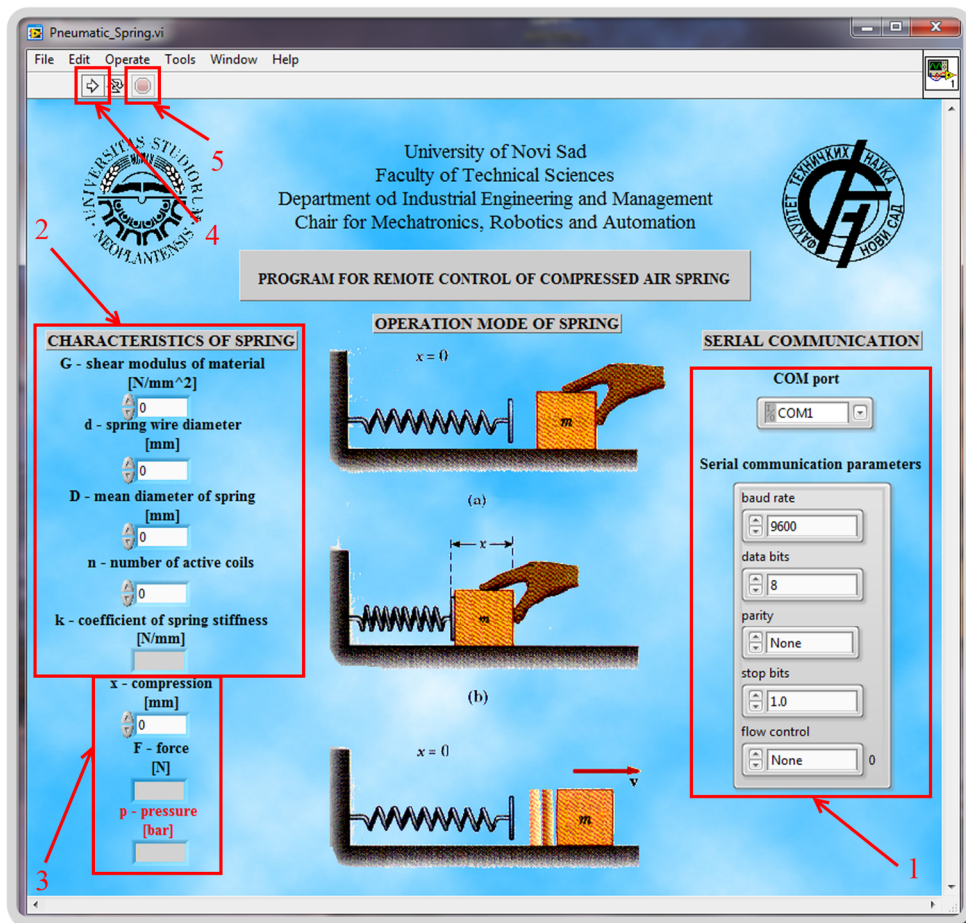
Корисничка апликација (слика 48) развијена је у програмском језику LabVIEW [138]. Након покретања апликације, корисник прво мора да подеси параметре серијске комуникације (слика 48, позиција 1) како би се успјешно повезао са управљачким системом. У наредном кораку (слика 48, позиција 2), корисник уноси карактеристике опруге: модул смицања материјала од кога је опруга направљена у $\frac{N}{mm^2}$ (поље „G – shear modulus of material“), пречник, односно дебљину намотаја у mm (поље „d – spring wire diameter“), унутрашњи пречник опруге у mm (поље „D – mean diameter of spring“), и број намотаја опруге (поље „n – number of active coils“), на основу којих се, коришћењем формуле 6, прорачунава коефицијент крутости опруге у $\frac{N}{mm}$ (поље „k – coefficient of spring stiffness“). Након тога (слика 48, позиција 3), уносом жељеног помјераја у mm (поље „x – compression“), прорачунава се вриједност силе у опрузи у N (поље „F – force“) примјеном Хуковог закона (формула 7):

$$F = k \cdot x \quad (7)$$

Приликом трансформације силе у опрузи у радни притисак у управљачком систему, уз напомену да се занемарују сила трења и други утицију, користи се формула 8 (слика 48, позиција 3):

$$p = \frac{F}{A} \quad (8)$$

при чему је A површина попречног пресека пнеуматског цилиндра и директно зависи од његовог пречника. Потребно је напоменути и то, да се приликом прорачуна вриједности притиска, врши трансформација вриједности притиска из Pa у чешће коришћену јединицу bar . Поменути прорачун, извршава се, након покретања апликације кликом на стрелицу из насловног менија (слика 48, позиција 4). Прорачуната вриједност притиска подешава се на електрично управљаном регулатору притиска. Неопходно је напоменути и то да ће, уколико је прорачуната вриједност притиска испод $0,5 bar$, односно преко $6 bar$, на регулатору притиска бити подешене вриједности од тачно $0,5 bar$, односно $6 bar$, респективно, због ограничења која долазе са извора напајања ваздухом под притиском.

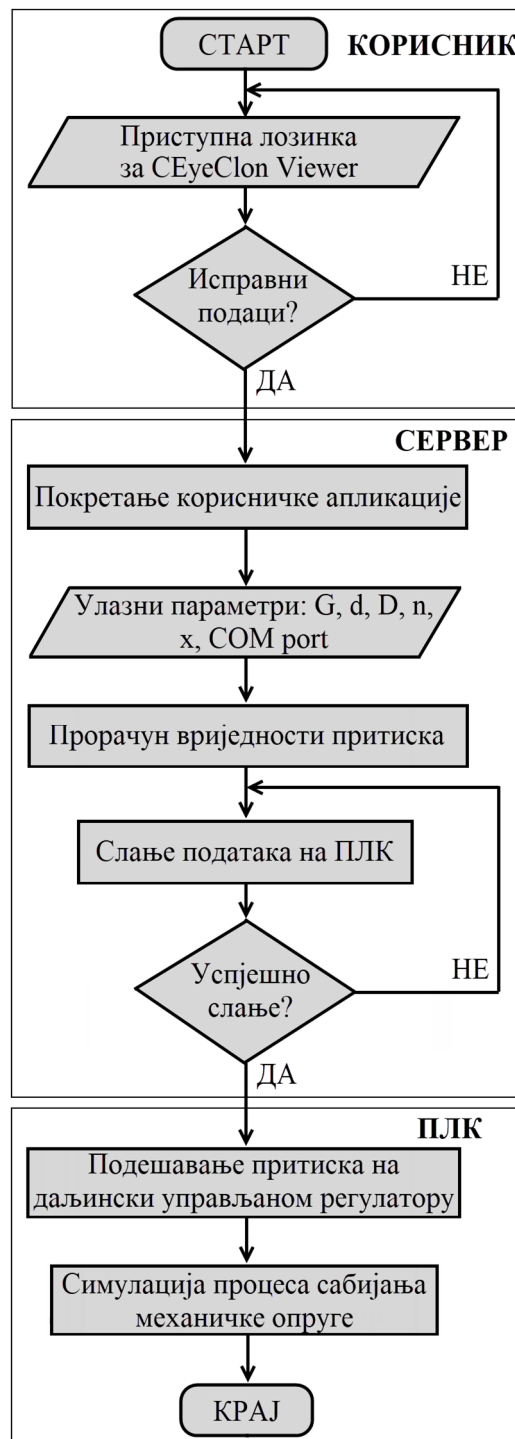


Слика 48. Корисничка апликација [61], [137]

Након покретања апликације, започиње један циклус симулације рада механичке опруге при задатим условима, којим управља ПЛК на начин дефинисан приликом описа пнеуматске управљачке шеме у потпоглављу 3.3.2. Комуникација између ПЛК и сервер рачунара обавља се серијским путем, преко RS232. Програмирање ПЛК извршено је у програмском окружењу FST 4.21. Поновно покретање апликације могуће је само након завршетка једног циклуса рада, кликом на црвено дугме из насловног менија (слика 48, позиција 5), уносом нових параметара и поновним кликом на стрелицу из насловног менија. Као и у случају пнеуматског кружног манипулатора, и у случају даљински управљане пнеуматске опруге, за уживо праћење рада, неопходно је покренути и веб камеру, на начин описан у потпоглављу 3.2.2.

3.3.4 Управљачки алгоритам

Ради лакшег размијевања рада пнеуматске опруге, на слици 49, у форми дијаграма тока, приказан је управљачки алгоритам. Управљачки алгоритам се састоји од три јасне цјелине. Корисник уноси податке потребне за приступ сервер рачунару. Уколико су подаци неисправни, приступ се одбија. У случају уноса исправних података, корисник приступа удаљеном сервер рачунару и покреће корисничку апликацију. Након дефинисања улазних параметара, врши се прорачун вриједности радног притиска у управљачком систему и та вриједност се путем серијске комуникације прослијеђује на ПЛК. У случају неуспјешног слања, поступак се понавља. На самом крају, ПЛК подешава жељену вриједност радног притиска на регулатору и извршава се један циклус симулације рада механичке опруге.



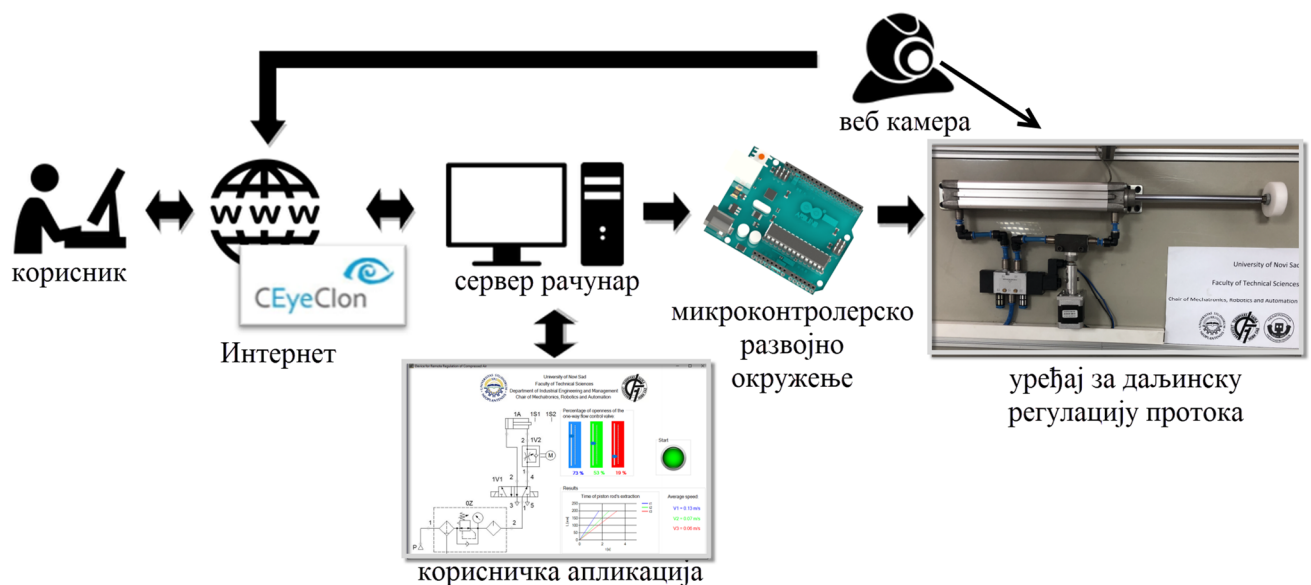
Слика 49. Управљачки алгоритам [61]

3.4 Експеримент 3: Уређај за даљинску регулацију протока ваздуха под притиском

Уређај за даљинску регулацију протока ваздуха под притиском, у чијој је основи даљински управљан пригушно-неповратни вентил [143]–[145], развијен је са циљем да се докаже могућност даљинске регулације протока у пнеуматским управљачким системима, односно даљинског управљања по брзини. Притом, поменути уређај се користи у наставном процесу на Факултету техничких наука у Новом Саду, у склопу предмета „Компоненте технолошких система“ и „Аутоматизација процеса рада 1“ на основним академским студијама на студијским програмима Мехатроника и Индустрijско инжењерство, респективно, како би студенти продубили знања из основа пнеуматике. Потребно је напоменути и то да је главна компонента овог уређаја (даљински управљан пригушно-неповратни вентил) развијена са циљем да, у будућности, постане комерцијално доступна на тржишту.

Као и даљински управљан пнеуматски кружни манипулатор и даљински управљана пнеуматска опруга, и уређај за даљинску регулацију протока ваздуха под притиском је мехатронички уређај који се састоји од неколико међусобно повезаних цјелина (слика 50):

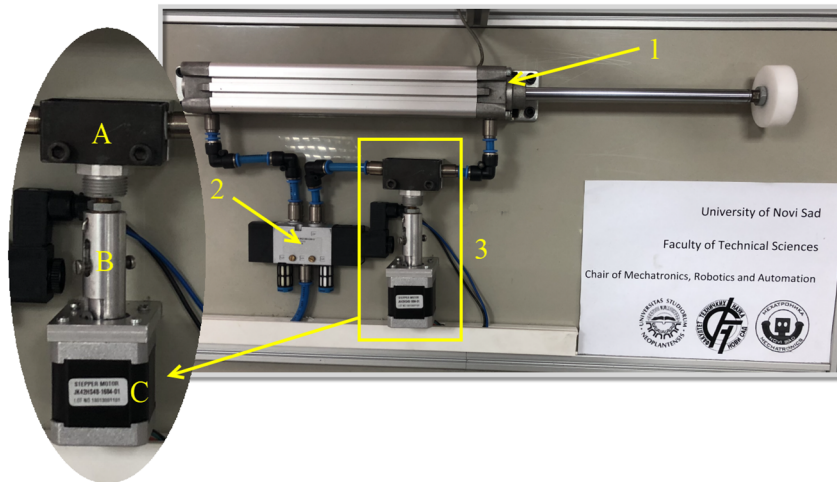
- основне механичке конструкције која, поред носеће конструкције направљене од екструдираних алуминијумских профила и пластичне плоче, подразумева и пнеуматски цилиндар двосмјерног дејства као радни елемент, даљински управљан пригушно-неповратни вентил и остале неопходне машинске елементе и дијелове (на примјер, елементе за везу као што су вијци и навртке), и друге компоненте (на примјер, командни разводник),
- главног управљачког уређаја – микроконтролерског развојног окружења са припадајућом управљачком електроником и извором напајања, смјештеног са задње стране носеће конструкције,
- сервер рачунара са инсталираним софтвером CEyeClon Viewer,
- веб камере постављене у непосредној близини уређаја како би се уживо могао пратити рад истог, и
- софтверског дијела који укључује корисничку апликацију за даљинско управљање уређајем, као и извршни програм за микроконтролер.



Слика 50. Структура уређаја за даљинску регулацију протока ваздуха под притиском [144], [145]

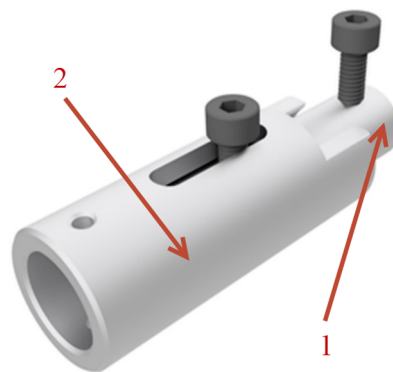
3.4.1 Хардверска реализација уређаја за даљинску регулацију протока ваздуха под притиском

Механичка конструкција уређаја за даљинску регулацију протока ваздуха под притиском приказана је на слици 51. Састоји се од једног цилиндра двосмјерног дејства, произвођача Festo, ознаке DNC-32-200-PPV-A (слика 51, позиција 1), припадајућег командног, 5/2 моностабилног разводног вентила, електрично активiranог (слика 51, позиција 2) и даљински управљаног пригушно-неповратног вентила (слика 51, позиција 3), који су позиционирани на носећу конструкцију, која је постављена под углом од 60° у односу на хоризонталну раван.



Слика 51. Уређај за даљинску регулацију ваздуха под притиском – физичка реализација

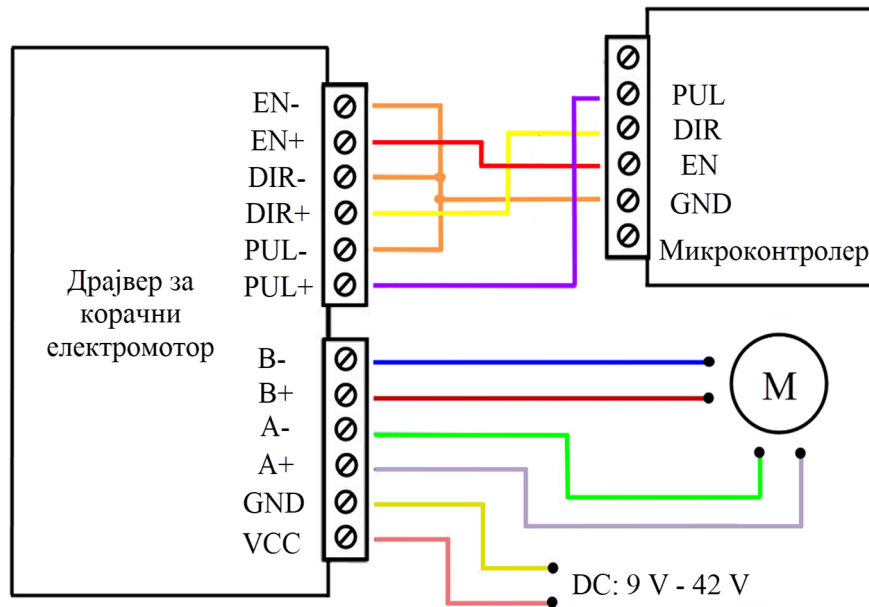
На слици 51 посебно је истакнут даљински управљан пригушно-неповратни вентил састављен од три компоненте: стандардног пригушно-неповратног вентила, произвођача Festo, ознаке GRA-1/4-B (слика 51, ознака А), намјенски развијене спојнице (слика 51, ознака В) и корачног електромотора, ознаке NEMA 14 (слика 51, ознака С). Потребно је напоменути да се спојница (слика 52), која повезује пригушно-неповратни вентил и корачни електромотор, састоји из два дијела: унутрашњег (слика 52, позиција 1) и спољашњег (слика 52, позиција 2). На тај начин, омогућавају се два типа кретања: транслаторно (увлачење и извлачење унутрашњег дијела спојнице) и ротационо (обртно кретање спољашњег дијела спојнице), чиме се обртање осовине корачног електромотора трансформише у одвртање, односно завртање подешавајућег вијка пригушно-неповратног вентила.



Слика 52. Спојница корачног електромотора и пригушно-неповратног вентила

За управљање приказаним системом користи се микроконтролерско развојно окружење, Arduino UNO, које је постављено са задње стране носеће конструкције. Поред тога, са задње стране носеће конструкције

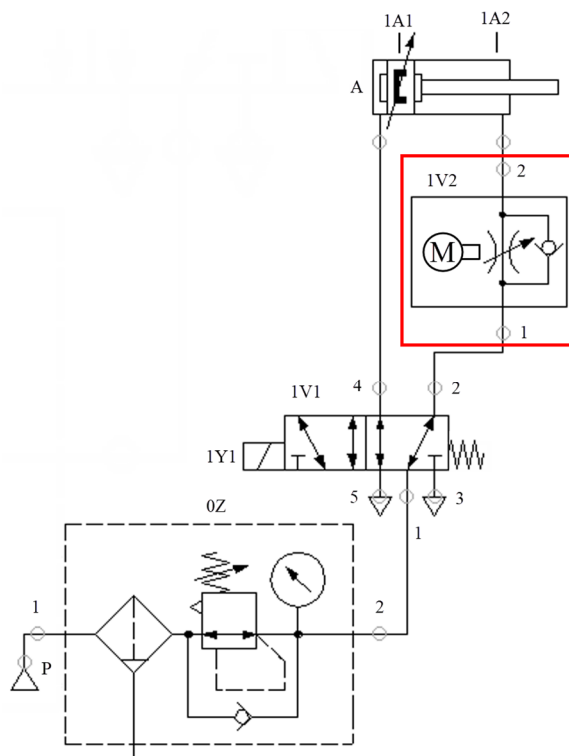
постављене су и све остале неопходне компоненте, као што су драјвер за корачни електромотор, управљачка електроника, исправљач за добијање једносмјерне електричне струје, припремна група, и слично. Шема повезивања корачног електромотора, одговарајућег драјвера и микроконтролера приказана је на слици 53.



Слика 53. Шема повезивања корачног електромотора, драјвера за електромотор и микроконтролера

Пнеуматска управљачка шема

Пнеуматска управљачка шема приказана је на слици 54.



Слика 54. Пнеуматска управљачка шема

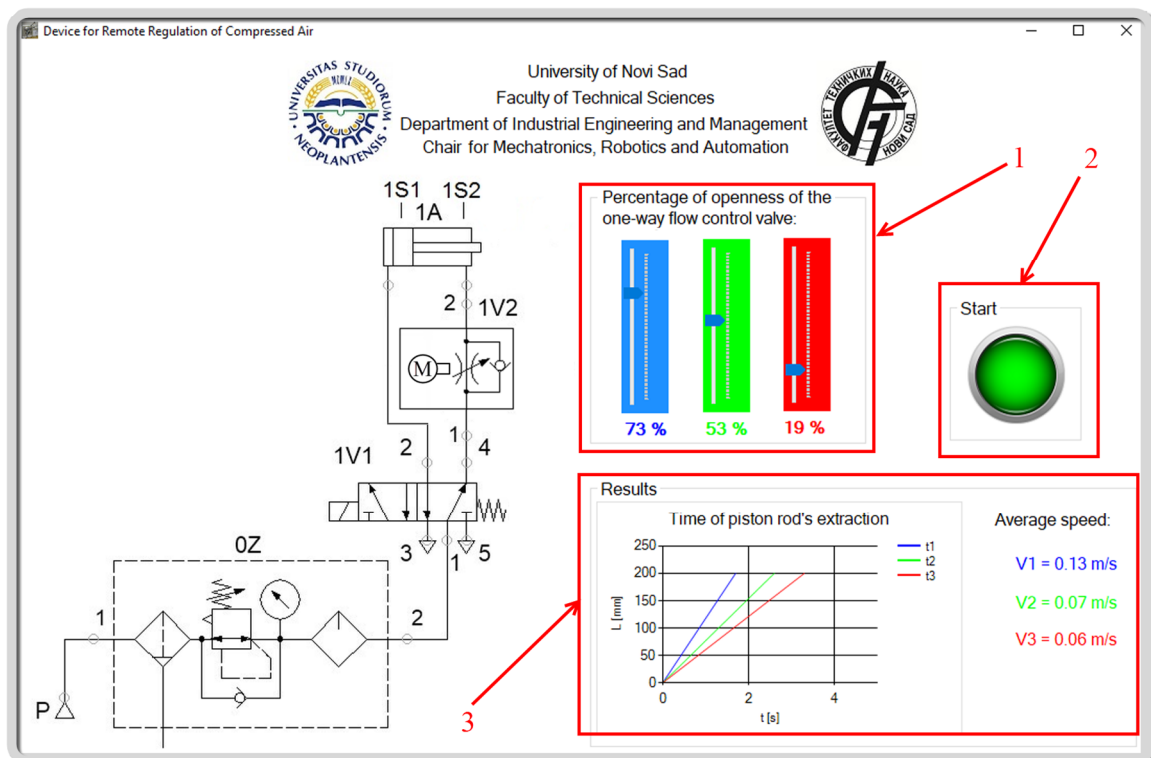
Са управљачке шеме се види да је цилиндар двосмјерног дејства (слика 54, ознака А) у почетном увученом положају. Након подешавања вриједности протока на даљински управљаном пригушно-неповратном

вентилу (слика 54, ознака 1V2) и активирања соленоида (слика 54, ознака 1Y1) разводног вентила (слика 54, ознака 1V1), клипњача цилиндра се извлачи до крајњег извученог положаја контролисаном брзином, уз пригушење излазног ваздуха. У крајњем извученом положају, клипњача цилиндра остаје до деактивирања соленоида, последице чега се враћа у почетни, крајњи увучени положај. За детекцију крајњих положаја клипњаче користе се магнетни сензори положаја (слика 54, ознаке 1A1 и 1A2).

Потребно је напоменути да је, по узору на симбол електрично управљаног регулатора притиска (слика 29а), у раду [131] предложен симбол за нову компоненту – даљински управљан пригушно-неповратни вентил. Тај нови симбол је, на шеми са слике 54, уоквирен црвеним правоугаоним обликом.

3.4.2 Софтверска реализација уређаја за даљинску регулацију протока ваздуха под притиском

Као и у случају даљински управљаног пнеуматског кружног манипулатора и даљински управљане пнеуматске опруге, тако и у случају уређаја за даљинску регулацију протока ваздуха под притиском, софтверски дио сачињавају три значајне цјелине: софтверски пакет CEyeClon Viewer, корисничка апликација и извршни програм за микроконтролер. Као што је већ раније речено, CEyeClon Viewer се користи за приступ удаљеном сервер рачунару на којем је инсталирана корисничка апликација под називом „Device_For_Remote_Regulation_Of_Compressed_Air.exe“, која је развијена у објектно-оријентисаном програмском језику C#²⁹ (слика 55).



Слика 55. Корисничка апликација [144], [145]

Након покретања апликације, корисник преко три различито обојена виртуелна клизача дефинише три различита степена отворености пригушно-неповратног вентила (слика 55, позиција 1). Кликом на дугме

²⁹ C# је један од најмлађих програмских језика. Први пут се појавио 2000. године као саставни дио развојног окружења .NET Framework 1.0. До данас је представљено неколико верзија овог програмског језика, а најновија, под називом C# 8, при развојном окружењу .NET Framework 4.8 и развојном окружењу Visual Studio 2019 version 16.3, представљена је у септембру 2019. године. C# се убраја у групу објектно-оријентисаних програмских језика а намијењен је за израду апликација за .NET Framework платформу [162].

за старт (слика 55, позиција 2), започиње радни циклус који подразумева три извлачења клипњаче до крајњег положаја различитим брзинама, које зависе од степена отворености пригушно-неповратног вентила. Степен отворености пригушно-неповратног вентила мијења се обртањем корачног електромотора у одговарајућем смјеру и то на тачно одређени начин, у складу са формулом 9 [144], [145]:

$$y = -0,00000039 \cdot x^4 + 0,00009728 \cdot x^3 - 0,00876049 \cdot x^2 + 0,38686869 \cdot x + 0,12167832 \quad (9)$$

гдје је x степен отворености пригушно-неповратног вентила, а y у број обртаја корачног електромотора. Потребно је напоменути да је дата формула добијена дефинисањем функције преноса система, која је инверзна функцији која дефинише однос броја обртаја подешавајућег вијка пригушно-неповратног вентила и жељеног протока, при радном притиску у опсегу од 5 bar до 6 bar, по препоруци произвођача [146]. У случају када је дефинисан степен отворености од 0%, пригушно-неповратни вентил остварује функцију неповратног вентила, јер је у том случају омогућен проток ваздуха под притиском само у једном смјеру. У случају када је дефинисан степен отворености од 100%, пригушно-неповратни вентил омогућава максимални могући проток при задатим условима.

Након подешавања степена отворености пригушно-неповратног вентила, клипњача цилиндра се извлачи до крајњег извученог положаја а затим, аутоматски, враћа у почетни. У доњем десном углу корисничке апликације (слика 55, позиција 3) прорачунава се остварена средња брзина кретања радног елемента за дати случај и приказује се на два начина, у графичком и нумеричком облику. У наредном кораку, корачни електромотор се позиционира у почетни положај (потпуно затворен), а затим се цијели поступак понавља на претходно описани начин још два пута.

За управљање развијеним системом користи се микроконтролерско развојно окружење Arduino UNO, чије је програмирање извршено у окружењу Arduino IDE³⁰, специфичном за писање и учитавање програма на развојна окружења Arduino. Окружење Arduino IDE подржава програмирање коришћењем програмских језика C³¹ и C++³², уз коришћење посебних правила структурирања кода. Комуникација између сервер рачунара и поменутог окружења остварује се серијским путем.

3.4.3 Управљачки алгоритам

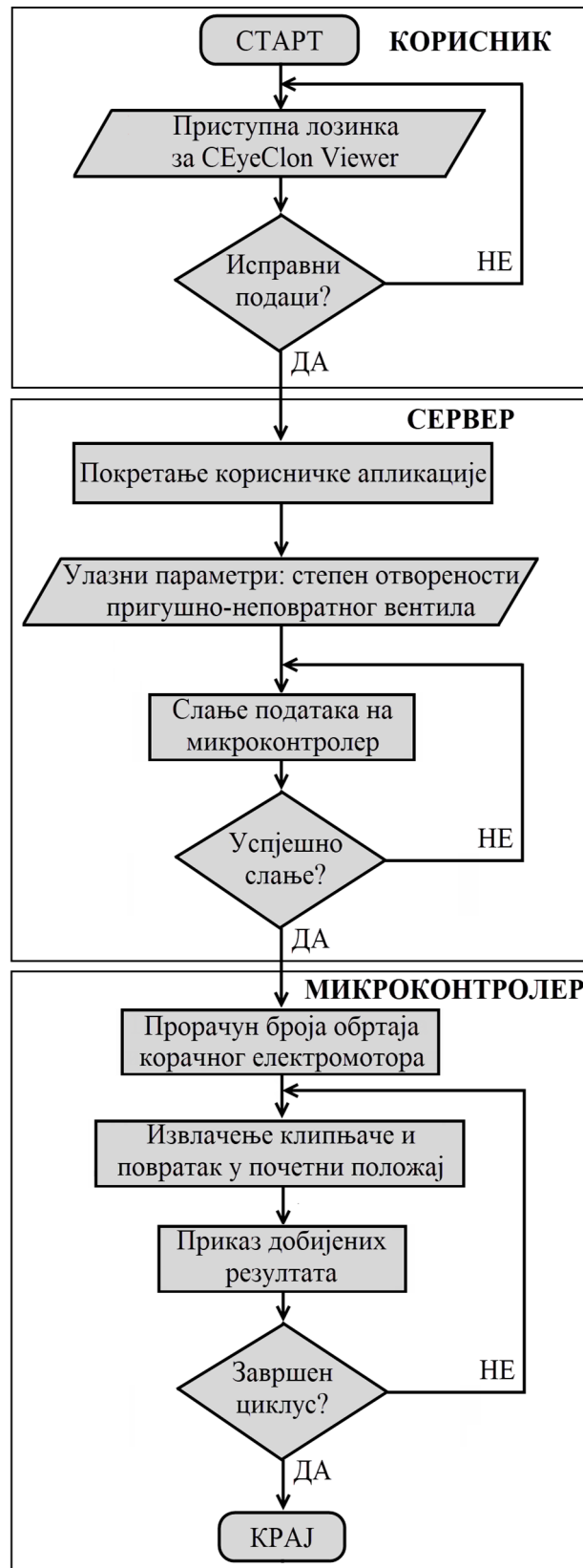
Управљачки алгоритам, у форми дијаграма тока, приказан је на слици 56. Састоји се од три јасне цјелине које се редом извршавају на корисничкој страни, на сервер рачунару и у самом управљачком систему. У случају уноса исправне лозинке, корисник приступа удаљеном сервер рачунару и покреће корисничку апликацију. Након дефинисања жељених степена отворености пригушно-неповратног вентила, те вриједности се путем

³⁰ Скраћеница за енгл. *Integrated Development Environment*

³¹ Програмски језик C је процедурални програмски језик развијен 1972. године. Језик је развио Денис Ричи. Основни циљ развоја језика био је да се направи језик који ће моћи да замијени машинске језике, који су веома зависни од рачунара. C је језик опште намјене, средњег нивоа, који користи структуриране типове података и управљачке структуре, што је карактеристика виших програмских језика. Са друге стране, подржава и манипулацију битовима, приступ помоћу адресе, и слично, што су карактеристике нижих програмских језика [163].

³² Појавом нових техника у програмирању, у програмски језик C су 1980. године додате класе, провјера и конверзије типова аргумената приликом позивања функције итд. Тако добијени језик назван је C са класама. Послије даљег проширивања, додавањем виртуелних функција и преклапања оператора, језик 1983/84. године коначно добија садашње име, C++. Име јасно наводи на закључак да се не ради о новом језику већ о проширењу постојећег („++“ у језику C представља оператор повећавања). Језик се временом усавршавао и допуњавао па је званични стандард за програмски језик C++ усвојен 1997. године и важећи је и данас, када C++ представља један од најважнијих и најмоћнијих објектно-оријентисаних програмских језика [164].

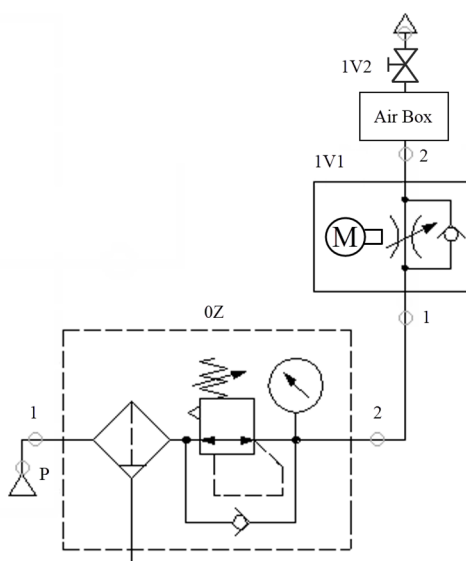
серијске комуникације прослијеђују на микроконтролер. У случају неуспјешног слања, поступак се понавља. На самом крају, микроконтролер, преко корачног електромотора, подешава степен отворености пригушно-неповратног вентила и омогућава извлачење клипњаче цилиндра контролисаном брзином. Тај поступак понавља се три пута и тиме се завршава један циклус рада уређаја.



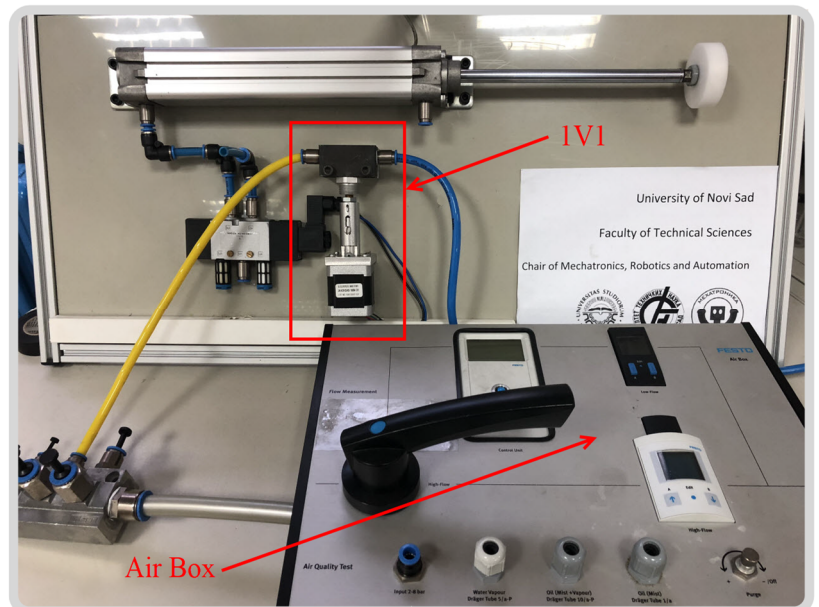
Слика 56. Управљачки алгоритам [144], [145]

3.4.4 Даљински управљан пригушно-неповратни вентил

Како је идеја да основна компонента уређаја за даљинску регулацију протока ваздуха под притиском – даљински управљан пригушно-неповратни вентил, постане комерцијално доступна на тржишту, посебна пажња посвећена је даљем развоју њеног прототипа. Као што је већ претходно објашњено, формула 9, којом се одређује број обртаја корачног електромотора у зависности од степена отворености пригушно-неповратног вентила, изведена је на основу карактеристике протока, преузете из каталога произвођача [146], и мјеродавна је за вриједности притиска од 5 bar до 6 bar. Податак који је кориснику значајнији од степена отворености пригушно-неповратног вентила је сама вриједност протока, при тачно дефинисаном притиску, у опсегу ширем од опсега између 5 bar и 6 bar. Због тога је извршено експериментално одређивање вриједности протока које пригушно-неповратни вентил даје при некој вриједности радног притиска. Коришћењем лабораторијског уређаја AirBox, ознаке GHDA-FQ-M-FDMJ-A [147], произвођача Festo, у који је уграђен сензор протока ознаке SFE1-LF-F200-HQ8-P2I-M12, мјерен је проток ваздуха под притиском на излазу из пригушно-неповратног вентила, за различите положаје корачног електромотора. Степен отворености пригушно-неповратног вентила мијењан је од потпуно затвореног до потпуно отвореног, у тачно дефинисаним корацима. Ради стабилизације улазног притиска, прије припремне групе, постављен је резервоар ваздуха под притиском, запремине 24 l. Извршено је подешавање регулатора притиска на припремној групи на различите вриједности. Експериментално је утврђено да се проток, са повећањем степена отворености пригушно-неповратног вентила, повећава и да, у једном тренутку, улази у засићење, при чему се достиже горња, односно максимална вриједност протока. Та максимална вриједност се мијења са промјеном улазног притиска и то на тај начин да се, у случају повећања улазног притиска, повећава и максимална вриједност протока. Тако је, на примјер, утврђено да је, за постављену експерименталну инсталацију, максимална вриједност протока једнака $\sim 90 \frac{l}{min}$ за радни притисак од 2 bar, односно $\sim 180 \frac{l}{min}$ за радни притисак од 5 bar и 6 bar. Поменута експериментална инсталација приказана је на слици 57.



а) Пнеуматска управљачка шема инсталације



б) Експериментална поставка

Слика 57. Експериментално одређивање вриједности протока

Након одређивања вриједности протока за различите степене отворености пригушно-неповратног вентила (тачно дефинисан број корака корачног електромотора), дефинисане су инверзне полиномске функције које описују зависност броја корака корачног електромотора од протока (а то је вриједност коју корисник задаје), и то као тросегментне, због оптималног смањења грешке апроксимације функција [148]. Потребно је напоменути да су, за различите вриједности улазног притиска, добијене полиномске функције истог степена, али са различитим коефицијентима. Тако су, на примјер, за вриједност улазног притиска од 2 bar добијене функције исказане формулама 10-12 [148]:

- за вриједност протока до $16,2 \frac{l}{min}$:

$$y = -0,9456 \cdot x^5 + 53,1125 \cdot x^4 - 1162,9 \cdot x^3 + 12361 \cdot x^2 - 63249 \cdot x + 124310, \quad (10)$$

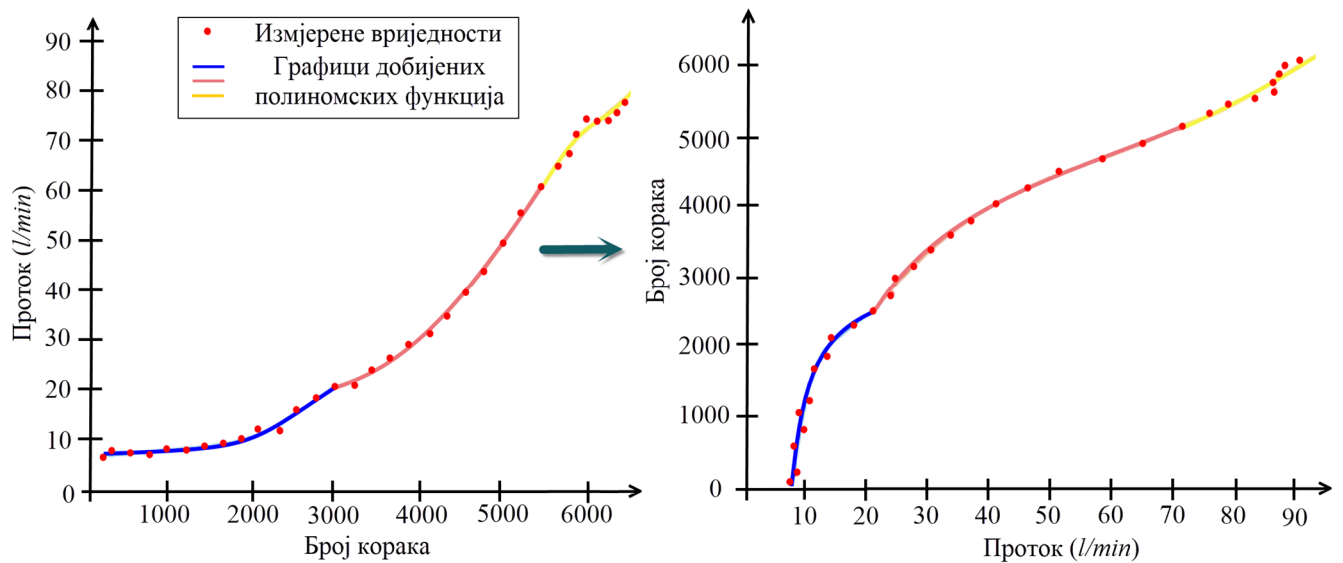
- за вриједност протока између $16,2 \frac{l}{min}$ и $53,44 \frac{l}{min}$:

$$y = 0,0079 \cdot x^3 - 2,0819 \cdot x^2 + 181,7664 \cdot x - 95,6121, \text{ и} \quad (11)$$

- за вриједност протока преко $53,44 \frac{l}{min}$:

$$y = -0,0029 \cdot x^3 + 1,0739 \cdot x^2 - 59,8008 \cdot x + 5476,9, \quad (12)$$

при чему је, у све три наведене формуле, y број корака корачног електромотора, а x вриједност протока. Ради лакшег разумијевања претходно описаног поступка, исти је приказан на слици 58.



Слика 58. Поступак трансформације полиномских функција добијених на основу мјерења вриједности протока ваздуха под притиском у инверзне функције [148]

На исти начин одређене су функције које описују зависност броја корака корачног електромотора од протока, за вриједности улазног притиска од 5 bar (формуле 13-15), односно за вриједности улазног притиска од 6 bar (формуле 16-18). За вриједност улазног притиска од 5 bar добијене су функције [148]:

- за вриједност протока до $22 \frac{l}{min}$:

$$y = -0,4833 \cdot x^5 + 55,7874 \cdot x^4 - 2498,1 \cdot x^3 + 54694 \cdot x^2 - 588460 \cdot x + 2497600, \quad (13)$$

- за вриједност протока између $22 \frac{l}{min}$ и $34,5 \frac{l}{min}$:

$$y = 0,5159 \cdot x^3 - 50,9 \cdot x^2 + 1721,3 \cdot x - 17652, \text{ и} \quad (14)$$

- за вриједност протока преко $34,5 \frac{l}{min}$:

$$y = 0,0008357 \cdot x^3 - 0,4 \cdot x^2 + 76,1915 \cdot x - 28,1594, \quad (15)$$

а за вриједност улазног притиска од 6 bar [148]:

- за вриједност протока до $30 \frac{l}{min}$:

$$y = 0,0391 \cdot x^5 - 4,6447 \cdot x^4 + 211,4728 \cdot x^3 - 4523,1 \cdot x^2 + 43908 \cdot x - 141810, \quad (16)$$

- за вриједност протока између $30 \frac{l}{min}$ и $100 \frac{l}{min}$:

$$y = -0,00034188 \cdot x^3 + 0,0246 \cdot x^2 + 34,7992 \cdot x + 825,7898, \text{ и} \quad (17)$$

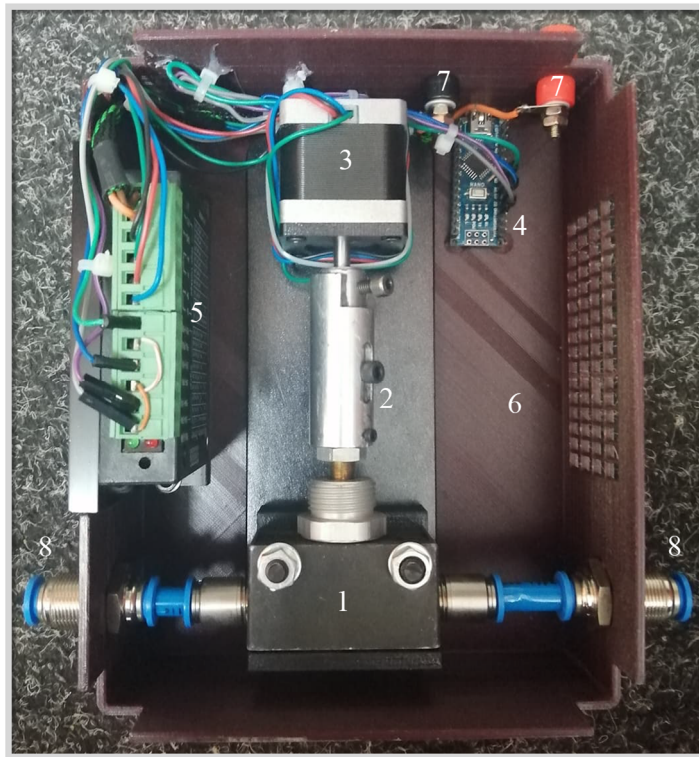
- за вриједност протока преко $100 \frac{l}{min}$:

$$y = 0,0025 \cdot x^3 - 1,1123 \cdot x^2 + 173,1489 \cdot x - 4563,9, \quad (18)$$

при чему је, у свих шест наведених формула, y број корака корачног електромотора, а x вриједност протока. Битно је напоменути да су поменуте функције добијене коришћењем опције polyfit у програмском окружењу Matlab.

Механичка конструкција прототипа даљински управљаног пригушно-неповратног вентила

Физичка реализација прототипа даљински управљаног пригушно-неповратног вентила приказана је на слици 59. Као што је већ претходно речено, даљински управљан пригушно-неповратни вентил састоји се од стандардног пригушно-неповратног вентила, у овом случају, произвођача Festo, ознаке GRA-1/4-B (слика 59, позиција 1), намјенски креиране спојнице (слика 59, позиција 2) и корачног електромотора, ознаке NEMA 14 (слика 59, позиција 3).



Слика 59. Прототип даљински управљаног пригушно-неповратног вентила, без поклопаца [148]

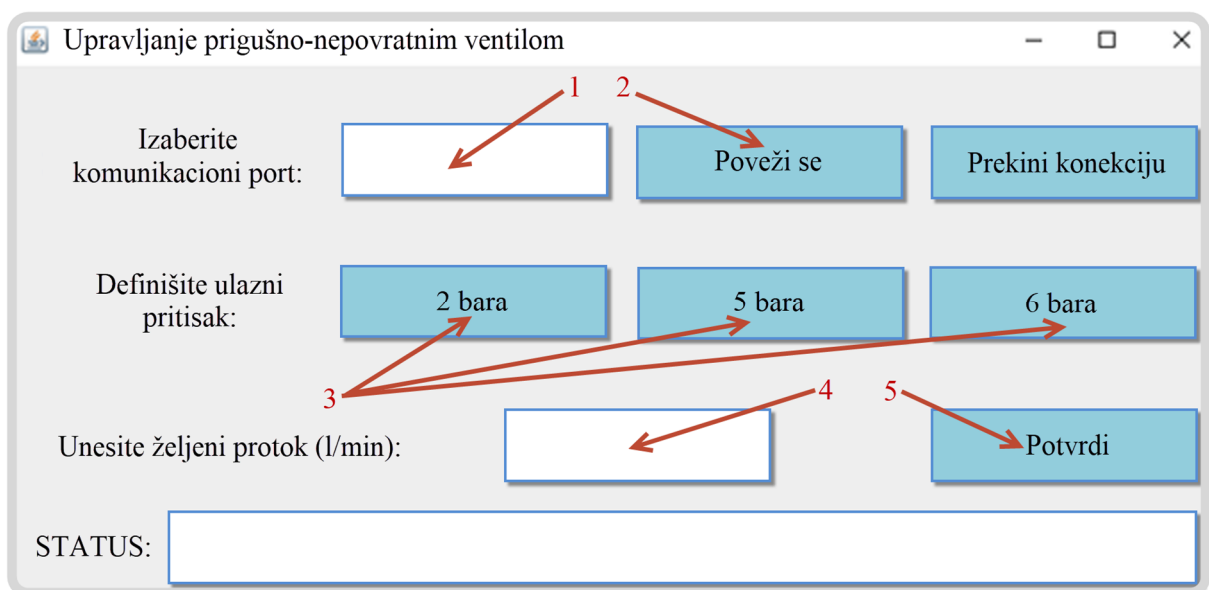
За управљање радом корачног електромотора, искоришћено је микроконтролерско развојно окружење Arduino NANO (слика 59, позиција 4), а веза између микроконтролера и корачног електромотора

остварена је коришћењем одговарајућег драјвера (слика 59, позиција 5). Главно кућиште (слика 59, позиција 6), као и сви неопходни носачи, направљени су на 3Д штампачу од PLA³³.

На самом кућишту, остављени су отвори за прикључке за напајање (слика 59, позиција 7), испод којих се налази отвор за Arduino NANO USB порт, и прикључци за радне водове пригушно-неповратног вентила (слика 59, позиција 8). Десна бочна страна кућишта дјелимично је направљена у облику решетке, због хлађења. На све четири стране кућишта (у угловима) остављени су жљебови за једноставно причвршћивање поклопца на само кућиште.

Софтверски дио

За потребе тестирања рада развијеног прототипа даљински управљаног пригушно-неповратног вентила, у програмском језику Java³⁴ развијена је апликација под називом „Upravljanje_prigušno-nepovratnim_ventilom.exe“, приказана на слици 60. Комуникација између главне управљачке јединице, микроконтролерског развојног окружења Arduino NANO и рачунара на коме је инсталирана корисничка апликација обавља се серијским путем. Због тога је, на почетку рада, у пољу „Izaberite komunikacioni port“ (слика 60, позиција 1), потребно унијети назив порта, на примјер „COM 1“. Брзина преноса података је унапријед дефинисана. У наредном кораку, потребно је кликнути на дугме „Poveži se“ (слика 60, позиција 2). Уколико је повезивање уређаја успјешно обављено, у пољу „STATUS“, биће исписана порука: „Uređaj je uspješno povezan.“ Уколико повезивање из неког разлога није успјешно завршено, у пољу „STATUS“, биће исписана порука: „Neuspješno povezivanje. Pokušajte ponovo.“



Слика 60. Корисничка апликација

³³ PLA (скраћеница од *Poly lactide*) је врста органске пластике. Потпуно је биоразградива. Издржава температуре до 60 °C, без деформисања. Не мрви се и дозвољава завршну обраду (на примјер, полирање, глодање, и слично). Такође, дозвољава и бојење. Често се примјењује у поступцима 3Д штампе.

³⁴ Java је објектно-оријентисани програмски језик, развијен од стране компаније Sun Microsystems. Језик има синтаксу која је слична синтакси програмских језика C и C++, али је много строжи при превођењу. Прва званична верзија овог програмског језика објављена је 1995. године. Java је данас веома често у употреби, пошто је то један од језика који се званично користе за израду мобилних апликација за Android уређаје [165].

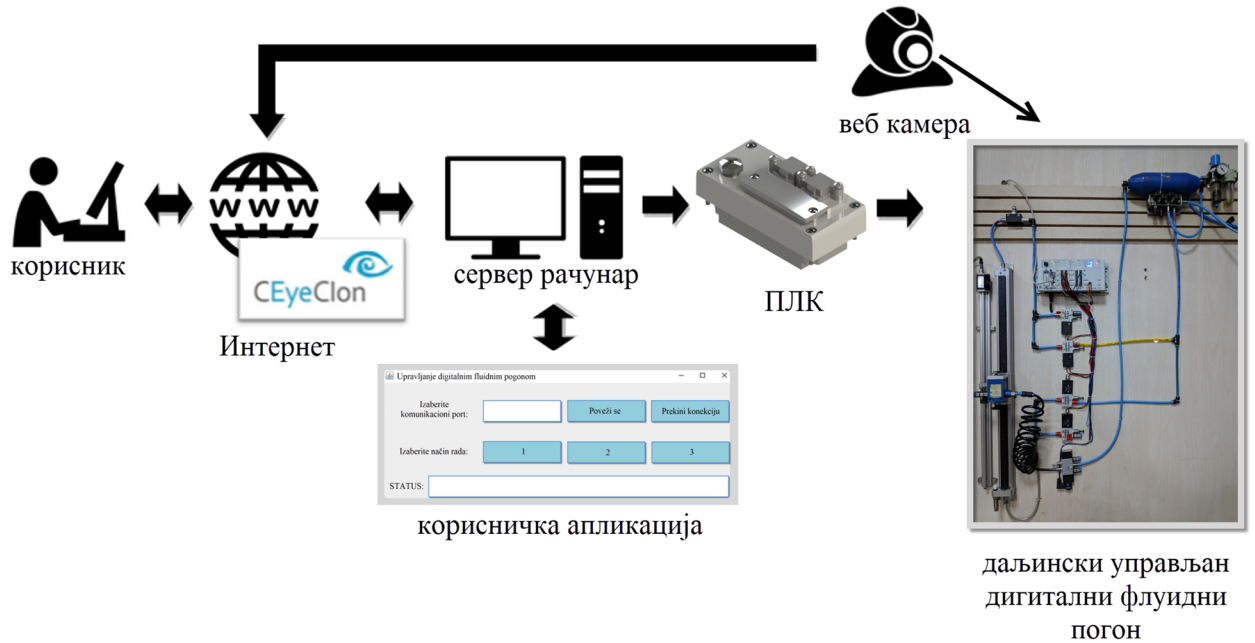
Након успјешног повезивања са главним микроконтролером, корисник дефинише вриједност улазног притиска кликом на жељено дугме (слика 60, позиција 3), при чему су, у овој апликацији за тестирање функционалности и тачности развијеног прототипа, дефинисане три вриједности улазног притиска: 2 bar, 5 bar и 6 bar. У наредном кораку, корисник уноси жељени проток (слика 60, позиција 4) који мора бити у унапријед дефинисаном опсегу, од нула до максималне вриједности (која се мијења у складу са улазним притиском и која је једнака $\sim 90 \frac{l}{min}$ за радни притисак од 2 bar, односно $\sim 180 \frac{l}{min}$ за радни притисак од 5 bar и 6 bar). Кликком на дугме „Potvrđi“ (слика 60, позиција 5), корисник шаље информацију микроконтролеру, који затим, према унапријед утврђеном алгоритму, подешава позицију корачног електромотора, односно управља радом пригушно-неповратног вентила. Уколико је вриједност жељеног протока изван дефинисаног опсега, након клика на дугме „Potvrđi“, у пољу „STATUS“, биће исписана порука: „Definisani protok nije u dozvoljenim granicama. Ponovo unesite novu vrijednost protoka.“ Уколико је жељена вриједност протока унутар дефинисаног опсега, микроконтролер ће, након прорачуна броја обртаја, подесити позицију корачног електромотора, и на тај начин, даљински управљан пригушно-неповратни вентил ће дати жељени проток.

3.5 Експеримент 4: Даљински управљан дигитални флуидни погон

Даљински управљан дигитални флуидни погон [131] је прототип индустријског уређаја за руковање предметима рада, развијен са циљем да се докаже могућност развоја и имплементације софтверски реконфигурабилног пнеуматског управљачког система, који има могућност подешавања управљачких параметара у току процеса рада. Такав систем достиже потребан ниво флексибилности, која је једна од главних карактеристика Индустрије 4.0, а који подразумијева руковање различитим предметима рада, уз уштеду енергије (уколико је функција критеријума максимална енергетска ефикасност) или времена (уколико је функција критеријума максимална продуктивност). Додатно, даљински управљан дигитални флуидни погон се користи у наставном процесу на Факултету техничких наука у Новом Саду, у склопу предмета „Имплементација аутоматских система“ на мастер академским студијама на студијским програмима Мехатроника и Индустријско инжењерство, како би студенти продубили знања из области дигиталне пнеуматике.

Као и сви претходно описани системи, и даљински управљан дигитални флуидни погон је мехатронички систем који се састоји од неколико међусобно повезаних цјелина (слика 61):

- основне механичке конструкције која, поред носеће конструкције направљене од дрвета (у питању је прототип уређаја), подразумијева и остале неопходне машинске елементе и дијелове (на примјер, елементе за везу као што су вијци и навртке), и друге компоненте (на примјер, разводне вентиле),
- главног управљачког уређаја – ПЛК, смјештеног са предње стране носеће конструкције,
- сервер рачунара са инсталираним софтвером SEyeClon Viewer,
- веб камере постављене у непосредној близини уређаја како би се уживо могао пратити рад истог, и
- софтверског дијела који укључује корисничку апликацију за даљинско управљање уређајем, као и извршни програм за ПЛК.



Слика 61. Структура даљински управљаног дигиталног флуидног погона

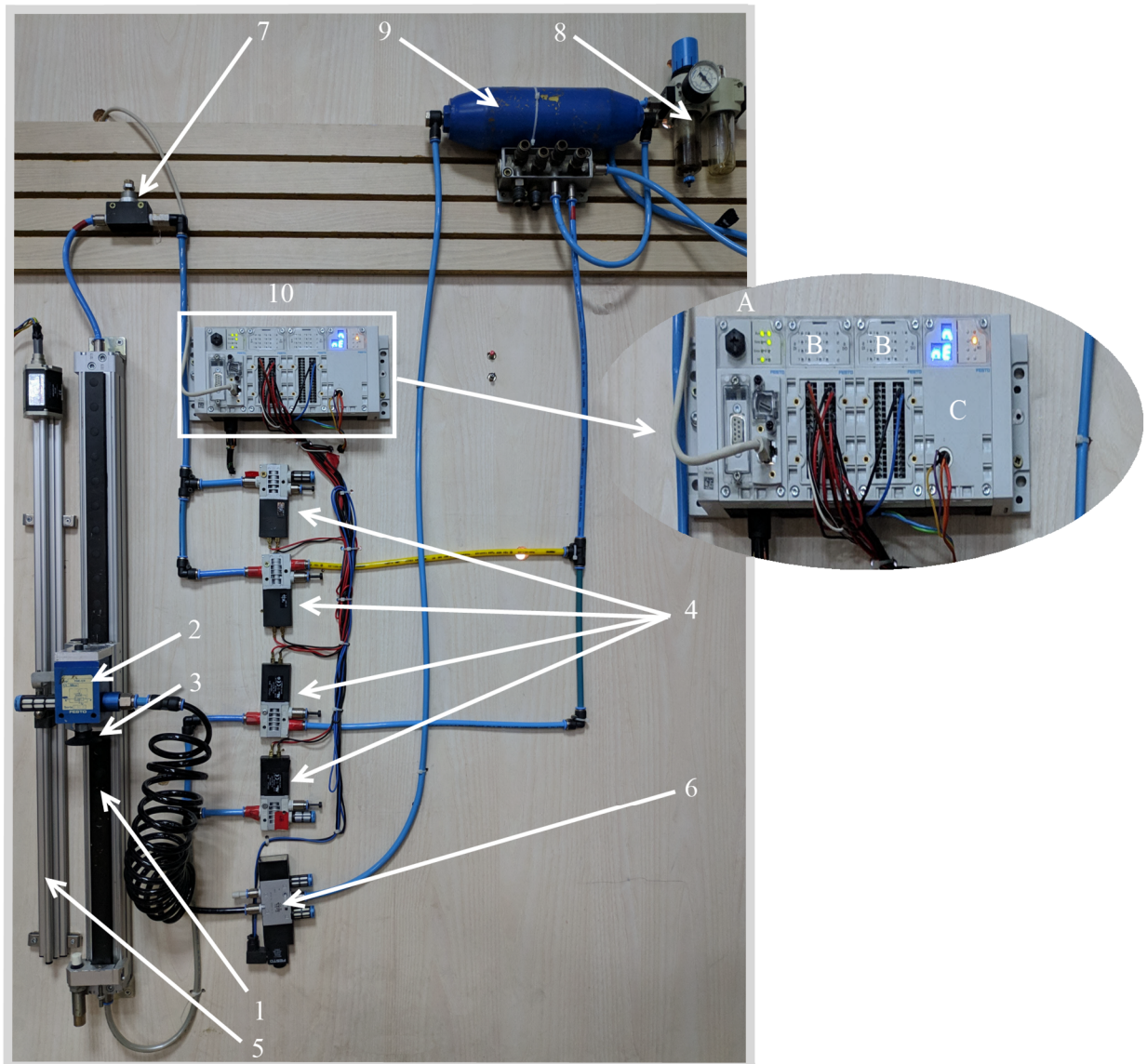
3.5.1 Хардверска реализација система

Механичка конструкција даљински управљаног дигиталног флуидног погона приказана је на слици 62. Сам уређај састоји се од два пнеуматска радна елемента, пнеуматског цилиндра без клипњаче, произвођача Festo, ознаке DGPL-25-600-PPV-A-B-KF-SH-D2 (слика 62, позиција 1) и вакуум хватаљке, која се састоји од вакуум генератора, произвођача Festo, ознаке VAK-1/4 (слика 62, позиција 2) и вакуум сисаљке, произвођача Festo, ознаке VAS-40-1/4-NBR (слика 62, позиција 3).

За управљање кретањем и позиционирањем пнеуматског цилиндра без клипњаче, коришћени су моностабилни 3/2 разводни вентили, електрично активирани, произвођача Festo, ознаке MHE3-MS1H-3/2G-1/8 (слика 62, позиција 4), који имају веома кратко вријеме отварања ($2,8\text{ ms}$) и затварања ($2,3\text{ ms}$), и који се могу користити за PWM управљање. Од поменутих вентила, блокирањем одговарајућих водова, направљени су 2/2 разводни вентили и примијењено је PWM управљање са четири 2/2 разводна вентила, о којем је било ријечи у потпоглављу 2.1.4. За континуално праћење позиције клипа цилиндра без клипњаче коришћена је отпорничка мјерна летва, односно дигитални енкодер, произвођача Festo, ознаке MME-MTS-600-TLF-AIF (слика 62, позиција 5). За управљање радом вакуум хватаљке, који подразумијева хватање и отпуштање предмета рада, коришћен је моностабилни 5/2 разводни вентил, електрично активирањем (слика 62, позиција 6), од кога је блокирањем одговарајућих водова направљен 3/2 разводни вентил. За регулацију брзине кретања пригушењем излазног ваздуха приликом кретања на горе, односно приликом подизања предмета рада, коришћен је пригушно-неповратни вентил, произвођача Festo, ознаке GRA-1/4-B (слика 62, позиција 7). За обезбјеђење ваздуха под притиском одговарајућих карактеристика, коришћена је припремна група (слика 62, позиција 8). За додатну стабилизацију притиска, приликом хватања предмета рада, коришћен је додатни резервоар ваздуха под притиском, запремине $0,75\text{ l}$ (слика 62, позиција 9).

Главни управљачки уређај је ПЛК (слика 62, позиција 10), произвођача Festo, ознаке CPX-CEC [149] (слика 62, ознака А). Овај тип ПЛК је такав да се надграђује додатним модулима. У овом случају, искоришћена су два улазно/излазна модула, ознаке CPX-8DE-8DA, са прикључним блоком ознаке CPX-AB-

8-KL-4POL (слика 62, ознака В). Поред тога, искоришћен је и један мјерни модул, ознаке CPX-CMIX (слика 62, ознака С), који се користи за читавање позиције са мјерне летве, преко CAN комуникационог протокола.



Слика 62. Даљински управљан дигитални флуидни погон – физичка реализација

Као што је већ раније напоменуто, за потребе израде ове докторске дисертације, даљински управљан дигитални флуидни погон је развијен као прототип, за потребе тестирања и испитивања понашања система у различитим условима. Различити услови рада добијају се промјеном самих предмета рада или промјеном неких управљачких параметара, као што је, на примјер, степен отворености пригушно-неповратног вентила, односно вриједност протока, чиме се мијења брзина кретања клипа радног елемента. У складу са тим, направљена су три различита предмета рада, истих габаритних димензија, али различитих маса, како би се омогућила симулација понашања система при различитим условима рада, односно да би се испитао један од главних концепата Индустије 4.0, који се тиче флексибилности система и тога да ли систем несметано може да прихвати различите предмете рада. Израђени предмети рада (слика 63) су ваљкастог облика, пречника 80 mm , висине 100 mm . Један предмет рада направљен је од пластике па је његова маса $\sim 0,5\text{ kg}$ (слика 63, ознака А). Друга два предмета рада направљена су од челика с тим што један има рупу у средишњем дијелу па је његова маса $\sim 1\text{ kg}$ (слика 63, ознака В), а други не, па је његова маса $\sim 4\text{ kg}$ (слика 63, ознака С). Потребно је напоменути и то да је, приликом хватања предмета рада, предмет рада са рупом у

средишњем дијелу био окренут наопачке у односу на положај приказан на слици 63, како би вакуум сисаљка несметано могла ухватити исти.



Слика 63. Израђени предмети рада [150]

Пнеуматска управљачка шема

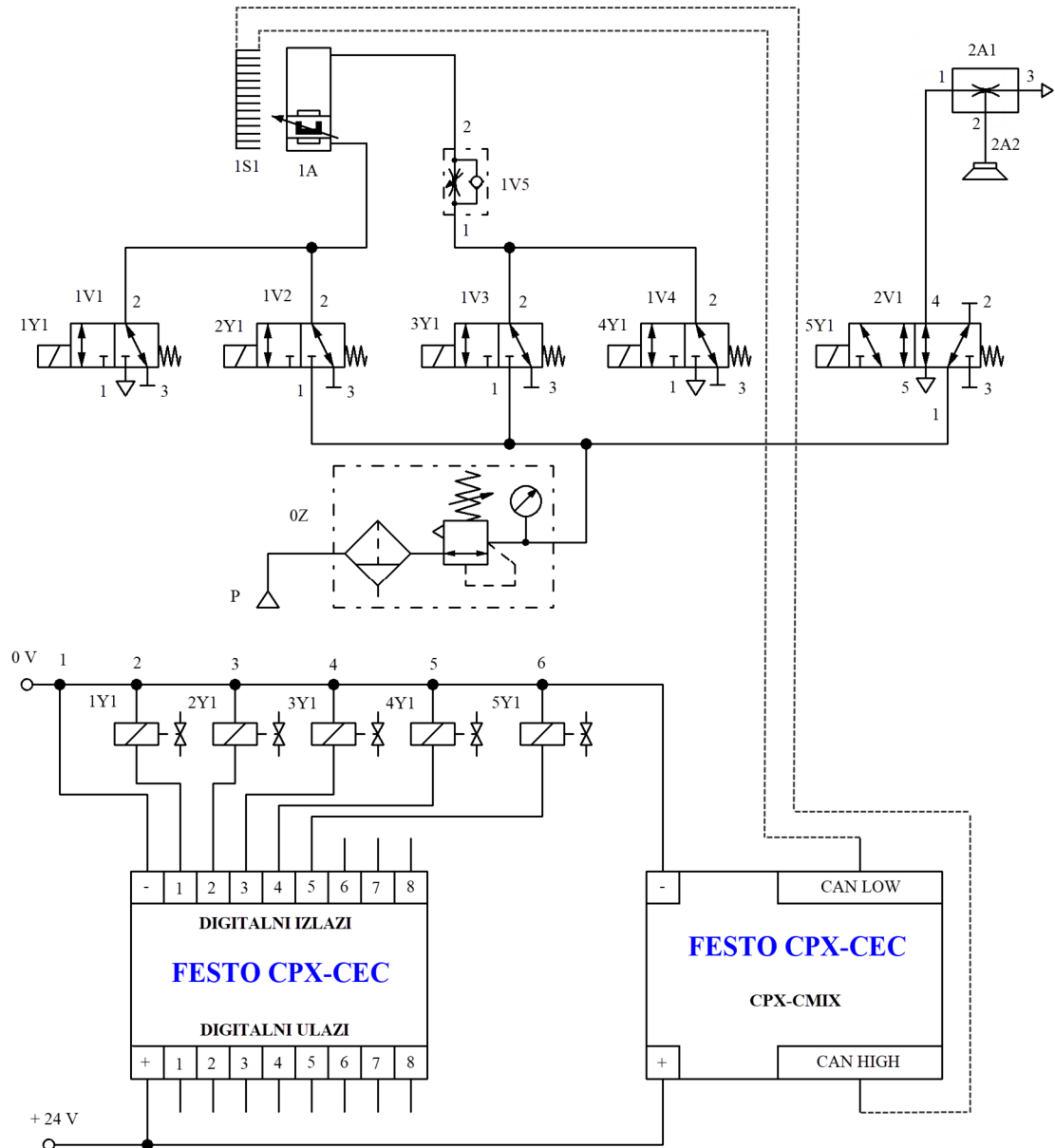
Полазна пнеуматска управљачка шема, заједно са шемом повезивања улаза и излаза ПЛК, приказана је на слици 64. У почетном тренутку, клип цилиндра без клипњаче (слика 64, ознака 1А), за који је крутом везом везана и вакуум хватаљка, коју сачињавају вакуум генератор (слика 64, ознака 2А1) и вакуум сисаљка (слика 64, ознака 2А2), налази се у доњем положају, односно положају за хватање предмета рада. За потребе тестирања рада система, предмети рада су ручно постављани у положај за хватање, па је приликом даљинског управљања, у једном тренутку, омогућена манипулација само једним предметом рада. Хватање предмета рада омогућено је активирањем соленоида 5Y1 разводног вентила 2V1.

Након хватања предмета рада, започиње процес његовог подизања до крајњег положаја на један од три могућа начина који су, за потребе израде ове докторске дисертације, дефинисани тако се обезбиједи потенцијално заустављање у три међупозиције од којих се свака налази у различитој трећини укупне дужине хода цилиндра (једна у првој, једна у другој и једна у трећој). У складу са тим, омогућено је:

1. аутоматско подизање до крајњег положаја (600 mm) без заустављања у међупозицијама,
2. подизање до крајњег положаја (600 mm) са заустављањем у двије међупозиције, од којих је прва на 17% укупне дужине хода (102 mm), а друга на 51% укупне дужине хода (306 mm), и
3. подизање до крајњег положаја (600 mm) са заустављањем у једној међупозицији, која се налази на 83% укупне дужине хода (498 mm) [151], [152].

Током кретања клипа на горе, активирани су соленоиди 2Y1 и 4Y1 разводних вентила 1V2 и 1V4, респективно, а деактивирани су соленоиди 1Y1 и 3Y1 разводних вентила 1V1 и 1V3, респективно. На тај начин, ваздух под притиском директно са извора напајања, преко прикључака 1 и 2 разводног вентила 1V2, пуни доњу комору, а из горње се, преко прикључака 2 и 1 разводног вентила 1V4, ваздух испушта у атмосферу. Приликом кретања клипа у супротном смјеру, активирани су соленоиди 1Y1 и 3Y1 разводних вентила 1V1 и 1V3, респективно, а деактивирани су соленоиди 2Y1 и 4Y1 разводних вентила 1V2 и 1V4, респективно. На тај начин, ваздух под притиском директно са извора напајања, преко прикључака 1 и 2 разводног вентила 1V3, пуни горњу комору, а из доње се, преко прикључака 2 и 1 разводног вентила 1V1, ваздух испушта у атмосферу. Битно је напоменути и то да се, уколико се у неком тренутку деактивирају

соленоиди сва четири разводна вентила (1V1-1V4), клип цилиндра зауставља у тренутно постигнутој међупозицији. Пригушно-неповратни вентил 1V5 користи се за регулацију брзине кретања приликом кретања клипа на горе, односно приликом подизања предмета рада, уз пригушење излазног ваздуха.



Слика 64. Пнеуматска управљачка шема

У оквиру ове докторске дисертације, акценат је стављен на анализу позиционирања клипа цилиндра приликом подизања предмета рада. Позиционирање клипа цилиндра у међупозиције омогућено је примјеном PWM управљања, уз пригушење излазног ваздуха, и то на тај начин да се PWM сигнал доводи само на разводни вентил који служи за испуст ваздуха под притиском у атмосферу, односно на разводни вентил 1V4, док је соленоид 2Y1 разводног вентила 1V2, у том случају, константно активиран. Случај повратка клипа у доњи положај, без предмета рада, не анализира се посебно, па се само, због смањења брзине кретања (а већ је раније објашњено да иста утиче на поузданост и радни вијек компоненте), PWM сигнал доводи на оба разводна вентила (1V1 и 1V3).

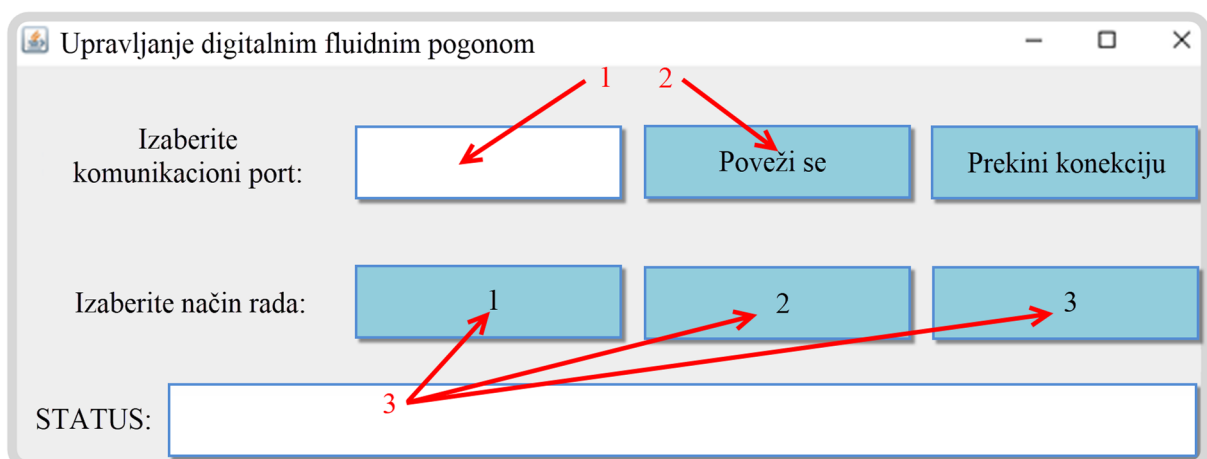
3.5.2 Софтверска реализација система

Као и у случају претходно описаних система, тако и у случају даљински управљаног дигиталног флуидног погона, софтверски дио сачињавају три значајне цјелине: софтверски пакет SEyeClon Viewer, корисничка апликација и извршни програм за ПЛК. Као што је већ раније напоменуто, SEyeClon Viewer се користи за приступ удаљеном рачунару на коме је инсталирана корисничка апликација под називом „Upravljanje_digitalnim_fluidnim_pogonom.exe“ (слика 65).

Поменута апликација развијена је у објектно-оријентисаном програмском језику Јава, а намијењена је за тестирање рада система. Комуникација између главне управљачке јединице, ПЛК и рачунара на коме је инсталирана корисничка апликација обавља се серијским путем. Због тога је, након покретања апликације, у поље „Izaberite komunikacioni port“ (слика 65, позиција 1), потребно унијети назив отвореног комуникационог порта, на примјер „COM 1“. Брзина преноса података је унапријед дефинисана.

Кликом на дугме „Poveži se“ (слика 65, позиција 2) започиње процес повезивања сервер рачунара са ПЛК. Уколико је повезивање уређаја успјешно извршено, у пољу „STATUS“, биће исписана порука: „Uređaj je uspješno povezan.“ Уколико повезивање, након истека предвиђеног времена, из неког разлога није успјешно завршено, у пољу „STATUS“, биће исписана порука: „Nuspješno povezivanje. Pokušajte ponovo.“

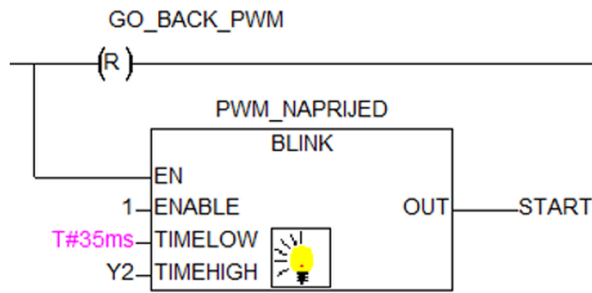
У наредном кораку, кликом на једно од три доступна дугмета, означених бројевима од један до три (слика 65, позиција 3), корисник дефинише начин рада система, односно начин подизања предмета рада, и шаље информацију ка ПЛК, који даље управља радом система. Подизање предмета рада се обавља, како је већ раније објашњено, без заустављања у међупозицијама (опција 1), са заустављањем у двије међупозиције на 17%, односно 51% укупне дужине хода (опција 2), и са заустављањем у једној међупозицији на 83% укупне дужине хода (опција 3). Пошто, у тренутној фази развоја система, поступак допремања предмета рада није аутоматизован, приликом тестирања рада система на даљину, корисник га може покренути само једном.



Слика 65. Корисничка апликација

Извршни програм за ПЛК написан је у програмском окружењу CODESYS [153], у програмском језику који се назива „Љествичасти дијаграм“ (енг. *Ladder Diagram*). Посебна пажња посвећена је реализацији PWM управљања, како би се омогућило тачно позиционирање клипа цилиндра у неку од међупозиција. То се постиже на тај начин што се, са отпорничке мјерне летве, континуално читава тренутна позиција клипа и пореди са жељеном. У случају постојања грешке позиционирања, која се одређује као разлика жељене и

постигнуте позиције, формира се фактор испуне PWM сигнала, који се даље користи за управљање разводним вентилом преко кога се ваздух под притиском из горње коморе цилиндра испушта у атмосферу. Начин формирања фактора испуне PWM сигнала приказан је на слици 66 (активирање промјенљиве START) [151].



Слика 66. Формирање PWM сигнала [151]

Регулисан прилаз жељеној позицији уз формирање одговарајућег PWM сигнала, у овом случају, омогућава ПД регулатор, који је, на основу извршених експерименталних испитивања, показао најбоље резултате. Регулатор је ријешен програмски и представља блок интегрисан у програмско окружење CODESYS. Излаз из регулатора, односно управљачка величина $u(t)$ одређује се примјеном формуле 19:

$$u(t) = K_p \cdot \left(e(t) + T_d \cdot \frac{de(t)}{dt} \right) \quad (19)$$

гдје је K_p појачање пропорционалног дејства, T_d временска константа диференцијалног дејства и $e(t)$ грешка позиционирања, односно разлика између жељене и тренутне позиције. Подешавање параметара регулатора извршено је експерименталним путем.

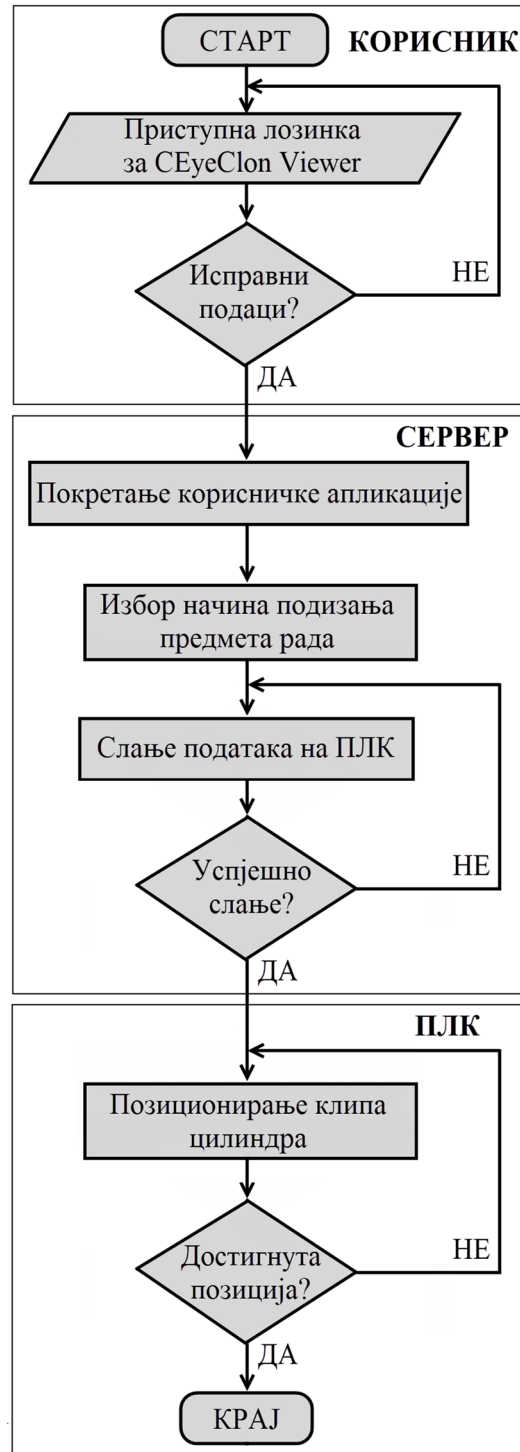
3.5.3 Управљачки алгоритам

Управљачки алгоритам, у форми дијаграма тока, приказан је на слици 67. Као и код претходно описаних система, састоји се од три јасне цјелине које се редом извршавају на корисничкој страни, на сервер рачунару и у самом управљачком систему.

Прије покретања система, корисник у апликацији SEyeClon Viewer, у предвиђена поља, мора да унесе приступну лозинку, коју добија од администратора. Као што је већ претходно објашењено, приступ систему омогућен је само у тачно дефинисано вријеме, након чега лозинка истиче. У случају уноса тачних података, корисник може да приступи сервер рачунару на коме је инсталирана корисничка апликација. Уколико су унешени подаци нетачни, односно непознати систему, приступ се одбија и захтијева се унос тачних података.

Након приступа сервер рачунару, корисник покреће корисничку апликацију и омогућава повезивање са ПЛК. У сљедећем кораку, дефинише се избор начина подизања предмета рада. Уколико подаци из неког разлога нису успјешно послати ка ПЛК, поступак се понавља.

Након пријема информације о изабраном режиму рада, ПЛК започиње поступак подизања предмета рада. У било ком режиму, без обзира да ли се захтијева позиционирање у међупозицијама или не, континуално се прати позиција клипа цилиндра (очитавају се подаци са отпорничке мјерне летве). У случају успјешног, завршног позиционирања у крајњу горњу позицију, програм престаје са радом.



Слика 67. Управљачки алгоритам

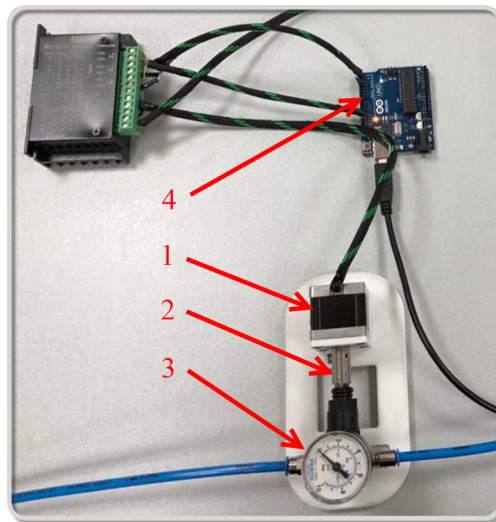
3.5.4 Даљински управљан регулатор притиска

Већ раније, у потпоглављу 2.1.4, је напоменуто да интеграција додатних елемената, као што су даљински управљан пригушно-неповратни вентил, који је детаљно објашњен у потпоглављу 3.4.4, и даљински управљан регулатор притиска, у неки дигитални пнеуматски управљачки систем, подиже флексибилност тог система на виши ниво и омогућава потпуну функционалност, коју омогућавају, на примјер, и савремена дигитална вентилска острва [102]. Под тим се подразумијева прилагођавање пнеуматског управљачког система различитим захтјевима, у реалном времену, без физичке замјене разводних вентила, искључиво софтверским путем. Због тога је, у склопу ове докторске дисертације, посебно разматрана могућност развоја и имплементације даљински управљаног регулатора притиска, који би био сличан по

функционалности тренутно комерцијално доступним електрично активирним регулаторима притиска [113], о којима је било ријечи у потпоглављу 2.1.3, а притом примјеренији за мање системе, погодан чак и за појединачне радне елементе, те јефтинији, па је израђен и његов прототип, а у будућности би се приступило изради компоненте која би била комерцијално доступна на тржишту.

Прије саме израде прототипа даљински управљаног регулатора притиска, изабран је стандардни регулатор притиска са растерећењем, из дидактичког сета произвођача Festo, каталошког броја 539756, са уграђеним аналогним манометром. Експерименталним путем (слика 68), коришћењем корачног електромотора (слика 68, позиција 1) и намјенски развијене спојнице (слика 68, позиција 2), развијене по принципу сличном оном који је коришћен и приликом развоја спојнице за даљински управљан пригушно-неповратни вентил, преко које је електромотор повезан са главом подешавајућег вијка регулатора притиска (слика 68, позиција 3), утврђено је како се понаша поменути регулатор притиска, и то на сљедећи начин [154]:

- На почетку мјерења, регулатор притиска био је практично у потпуности затворен, односно секундарни притисак је био 0 bar .
- Микроконтролер, који се налази у склопу развојног окружења (слика 68, позиција 4), а који управља радом корачног електромотора, био је испрограмиран тако да га периодично закреће за тачно дефинисан број корака, након чега би, за постигнуту вриједност секундарног притиска, у корацима од $0,25 \text{ bar}$, био записиван коришћени број корака електромотора.
- Поступак је понављан до постизања вриједности од 6 bar на излазу из регулатора притиска.

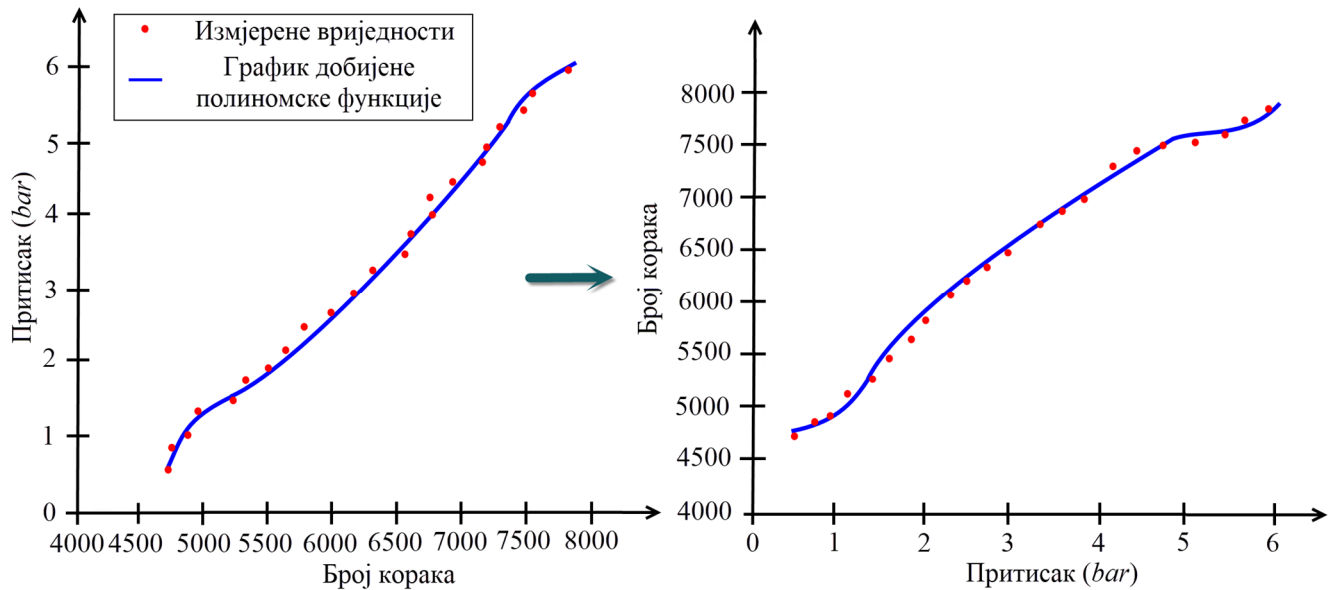


Слика 68. Експериментално одређивање вриједности притиска [154]

Након одређивања вриједности секундарног притиска на регулатору притиска за различите положаје главе његовог подешавајућег вијка (који директно зависе од положаја корачног електромотора), дефинисана је инверзна полиномска функција приказана формулом 20, која представља зависност броја корака корачног електромотора од притиска [154]:

$$y = 0,5096 \cdot x^7 - 10,9791 \cdot x^6 + 93,0751 \cdot x^5 - 387,9048 \cdot x^4 + 790,5952 \cdot x^3 - 594,9242 \cdot x^2 + 402,545 \cdot x + 4620,2849 \quad (20)$$

гдје је у број корака корачног електромотора, а x вриједност секундарног притиска. Bitно је напоменути да је поменута функција добијена коришћењем опције `polyfit` у програмском окружењу Matlab. Ради лакшег разумијевања претходно објашњеног поступка, исти је приказан на слици 69.

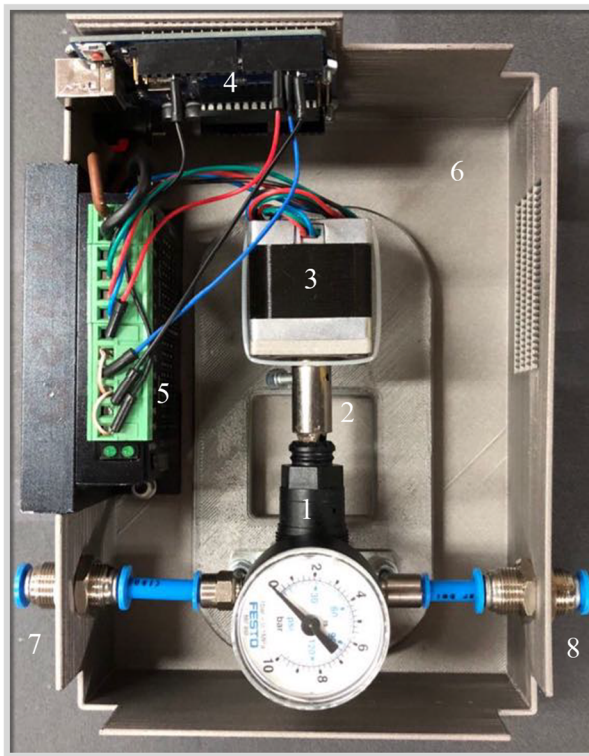


Слика 69. Поступак трансформације полиномске функције добијене на основу мјерења вриједности притиска у инверзну функцију [154]

Механичка конструкција прототипа даљински управљаног регулатора притиска

Физичка реализација прототипа даљински управљаног регулатора притиска приказана је на слици 70. Као и даљински управљан пригушно-неповратни вентил, и даљински управљан регулатор притиска састоји се од три главне компоненте: стандардног регулатора притиска са растеређењем, у овом случају, из дидактичког сета произвођача Festo, каталогског броја 539756 (слика 70, положај лијево, позиција 1), намјенски креиране спојнице (слика 70, положај лијево, позиција 2) и корачног електромотора, ознаке NEMA 14 (слика 70, положај лијево, позиција 3). За управљање радом корачног електромотора, искоришћено је микроконтролерско развојно окружење Arduino UNO (слика 70, положај лијево, позиција 4), а веза између микроконтролера и корачног електромотора остварена је коришћењем одговарајућег драјвера (слика 70, положај лијево, позиција 5). По узору на прототип даљински управљаног пригушно-неповратног вентила, и у овом случају, главно кућиште (слика 70, положај лијево, позиција 6), као и сви неопходни носачи, направљени су на 3Д штампачу од PLA.

На самом кућишту, остављени су отвори за прикључке за напајање (слика 70, положај десно, позиција 1), изнад којих се налази отвор за Arduino UNO USB порт (слика 70, положај десно, позиција 2), и прикључци за радне водове регулатора притиска (примарни притисак - слика 70, положај лијево, позиција 7, и секундарни притисак - слика 70, положај лијево, позиција 8). Десна бочна страна кућишта дјелимично је направљена у облику решетке, због хлађења. На све четири стране кућишта (у угловима) остављени су жљебови за једноставно причвршћивање поклопа на само кућиште. На поклопу кућишта (слика 70, положај десно, позиција 3), остављен је отвор кроз који пролази аналогни манометар (слика 70, положај десно, позиција 4), како би корисник и визуелно могао да очитава вриједност и/или прати промјене вриједности притиска у систему.



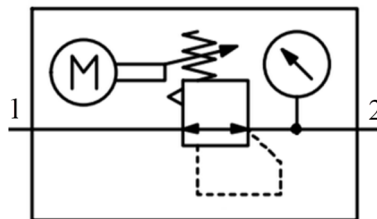
а) Без поклопца



б) Са поклопцем

Слика 70. Прототип даљински управљаног регулатора притиска [154]

Оно што је још битно напоменути јесте да је овај даљински управљан регулатор притиска развијен без уградње додатног неповратног вентила, па је, у складу са тим, предложен и његов симбол. Поменути симбол приказан је на слици 71.

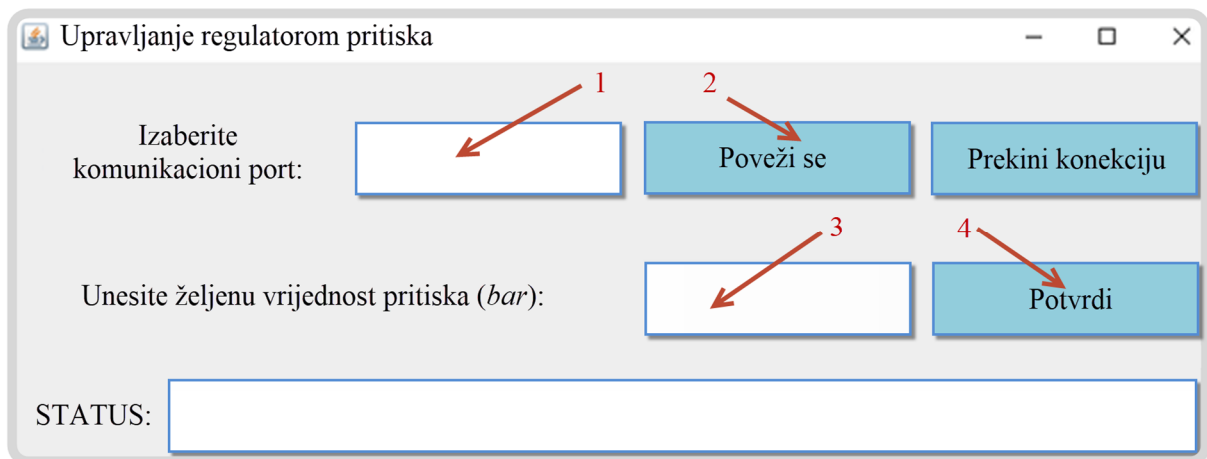


Слика 71. Предложени симбол за новоразвијени даљински управљан регулатор притиска

Софтверски дио

Као и у случају даљински управљаног пригушно-неповратног вентила, тако је, и у случају даљински управљаног регулатора притиска, за потребе тестирања рада развијеног прототипа, у програмском језику Java, развијена апликација под називом „Upravljanje_regulatorom_pritiska.exe“, приказана на слици 72. Комуникација између главне управљачке јединице, микроконтролерског развојног окружења Arduino UNO и рачунара на коме је инсталирана корисничка апликација обавља се серијским путем. Због тога је, на почетку, у пољу „Izaberite komunikacioni port“ (слика 72, позиција 1), потребно унијети назив порта, на примјер „COM 1“. Брзина преноса података је унапријед дефинисана. У наредном кораку, потребно је кликнути на дугме „Poveži se“ (слика 72, позиција 2). Уколико је повезивање уређаја успјешно обављено, у пољу „STATUS“, биће исписана порука: „Uređaj je uspješno povezan.“ Уколико повезивање из неког разлога није успјешно завршено, у пољу „STATUS“, биће исписана порука: „Neuspješno povezivanje. Pokušajte ponovo.“

У наредном кораку, корисник уноси жељену вриједност секундарног притиска (слика 72, позиција 3) која мора бити у унапријед дефинисаном опсегу, од 0 bar до 6 bar, што је условљено вриједношћу примарног притиска. Кликом на дугме „Potvrđi“ (слика 72, позиција 4), корисник шаље информацију микроконтролеру, који затим, према унапријед утврђеном алгоритму, подешава позицију корачног електромотора, односно управља радом регулатора притиска. Уколико је жељена вриједност секундарног притиска изван дефинисаног опсега, након клика на дугме „Potvrđi“, у пољу „STATUS“, биће исписана порука: „Definisani pritisak nije u dozvoljenim granicama. Ponovo unesite novu vrijednost pritiska.“ Уколико је жељена вриједност секундарног притиска унутар дефинисаног опсега, микроконтролер ће, након прорачуна броја обртаја, подесити позицију корачног електромотора, и на тај начин ће даљински управљан регулатор притиска дати жељену вриједност притиска на излазу.



Слика 72. Корисничка апликација

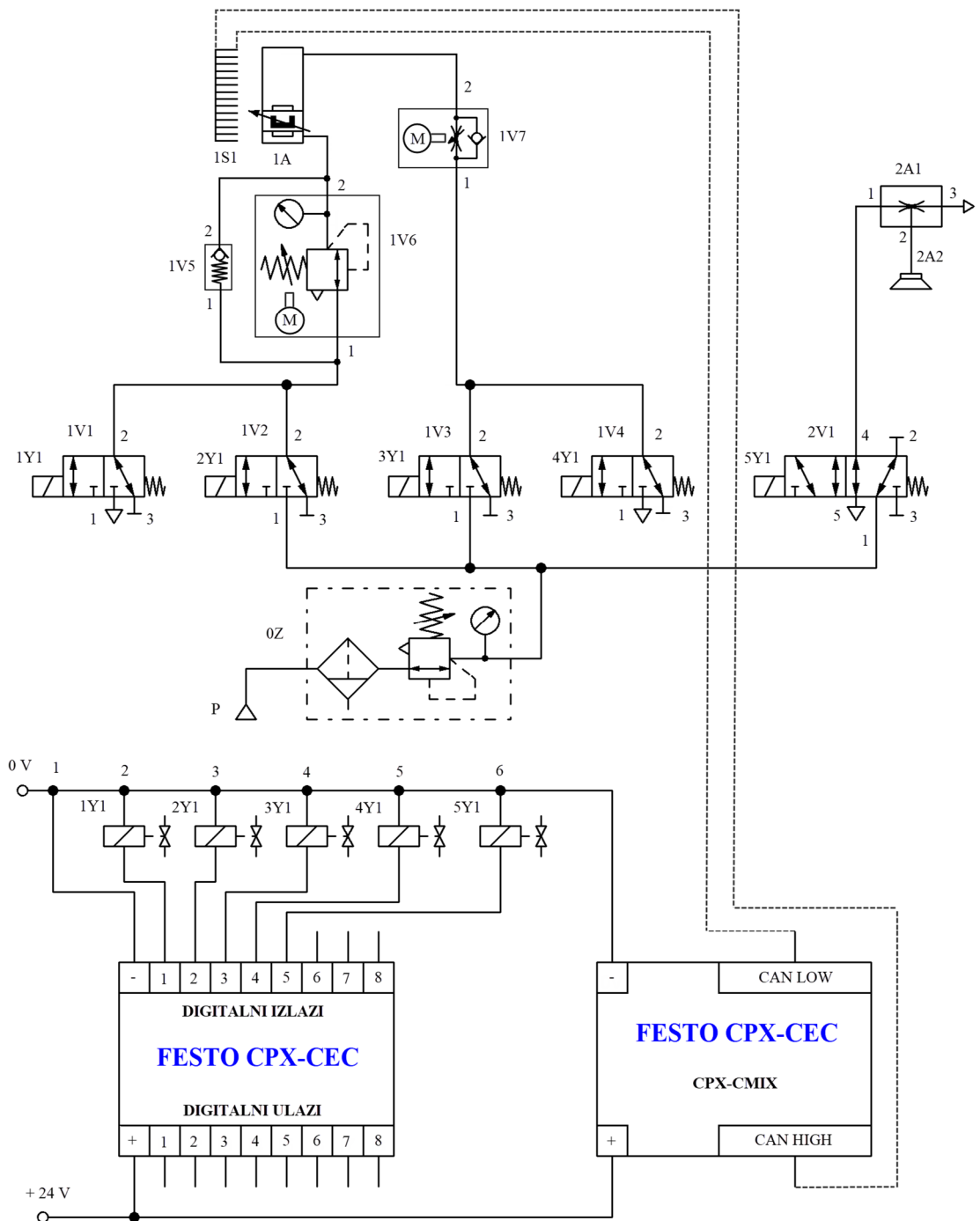
Интеграција даљински управљаног регулатора притиска и даљински управљаног пригушно-неповратног вентила у развијени дигитални флуидни погон

Већ раније је напоменуто да дигитални пнеуматски системи имају доста предности и омогућавају имплементацију различитих типова управљања. Тако, на примјер, PWM управљање омогућава имплементацију различитих типова регулатора, од једноставних ПИД регулатора до најсложенијих начина нелинеарног управљања. Тиме се остварују перформансе сличне онима које дају пропорционално управљани пнеуматски системи, али по знатно нижој цијени, јер се, у случају PWM управљања, користе брзи и јефтине електромагнетни разводни вентили, којима се управља помоћу дигиталног система управљања у реалном времену.

Ако се у један такав систем, чија је управљачка шема приказана на слици 73, уграде даљински управљан регулатор притиска (слика 73, ознака 1V6) и даљински управљан пригушно-неповратни вентил (слика 73, ознака 1V7), омогућава се потпуна функционалност у смислу да је, у том случају, могуће, искључиво софтверском промјеном, остварити различите функције, као што су, на примјер:

- омогућавање прекида напајања управљачког система ваздухом под притиском (деактивирани соленоиди 2Y1, 3Y1 и 5Y1 разводних вентила 1V2, 1V3 и 2V1, респективно), односно успостављање довода ваздуха под притиском директно са извора напајања ка управљачком систему (активирани соленоиди 2Y1, 3Y1 и 5Y1 разводних вентила 1V2, 1V3 и 2V1, респективно),

- омогућавање испуста, односно одвода ваздуха под притиском из комора радних елемената у атмосферу (активирани соленоиди 1Y1 и 4Y1 разводних вентила 1V1 и 1V4, респективно, при чему су деактивирани соленоиди 2Y1, 3Y1 и 5Y1 разводних вентила 1V2, 1V3 и 2V1, респективно),
- кретање клипа пнеуматског цилиндра без клипаче на горе, уз хватање предмета рада (активирани соленоиди 2Y1, 4Y1 и 5Y1 разводних вентила 1V2, 1V4 и 2V1, респективно, при чему се деактивирани соленоиди 1Y1 и 3Y1 разводних вентила 1V1 и 1V3, респективно), односно кретање клипа пнеуматског цилиндра без клипаче у супротном смјеру, на примјер, без предмета рада (активирани соленоиди 1Y1 и 3Y1 разводних вентила 1V1 и 1V3, респективно, при чему су деактивирани соленоиди 2Y1, 4Y1 и 5Y1 разводних вентила 1V2, 1V4 и 2V1, респективно),



Слика 73. Интеграција даљински управљаног регулатора притиска и даљински управљаног пригушно-неповратног вентила у дигитални флуидни погон

- омогућавање позиционирања у међупозицијама, на примјер, приликом кретања клипа на горе, са предметом рада (активирани соленоиди 2Y1 и 5Y1 разводних вентила 1V2 и 2V1, респективно, соленоид 4Y1 разводног вентила 1V4 под PWM сигналом, а деактивирани соленоиди 1Y1 и 3Y1 разводних вентила 1V1 и 1V3, респективно; након достизања жељене позиције, деактивирани соленоиди 1Y1-4Y1 разводних вентила 1V1-1V4, респективно, при чему је и даље активиран соленоид 5Y1 разводног вентила 2V1, који омогућава држање предмета рада),
- управљање по сили даљинском регулацијом притиска, на примјер, у радном воду који омогућава подизање предмета рада, чиме се директно утиче на повећање енергетске ефикасности система, јер је позната чињеница да се, смањивањем радног притиска у систему, смањује и потрошња ваздуха под притиском; потребно је нагласити и то да је у поменутом случају, на примјер, у паралели са даљински управљаним регулатором притиска, неопходно уградити и неповратни вентил,
- управљање по брзини даљинском регулацијом протока, на примјер, приликом подизања предмета рада на горе, уз пригушење излазног ваздуха, чиме се директно утиче на повећање поузданости система јер се продужава радни вијек компоненте, тиме што се систем погони потребном, а не максимално могућом брзином; додатно, омогућава се синхронизација времена трајања подизања предмета рада са неком другом операцијом, уколико је то потребно, и слично.

3.5.5 Подсистем за детекцију предмета рада

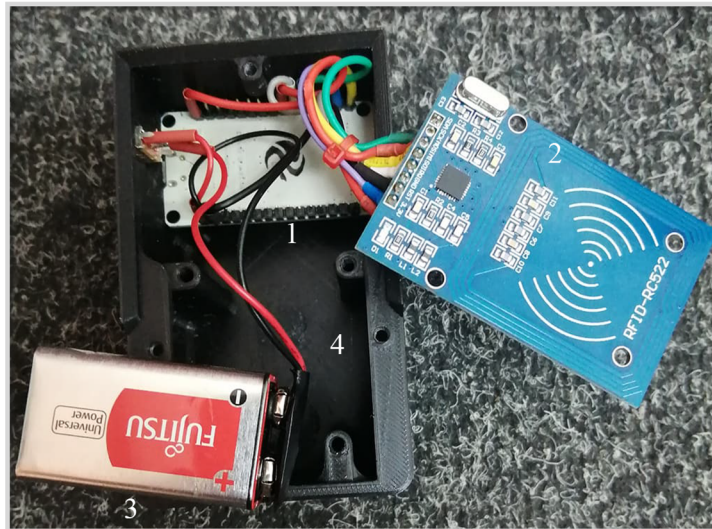
У склопу идеје о повећању степена аутоматизације претходно описаног даљински управљаног дигиталног флуидног погона, са интегрисаним даљински управљаним регулатором притиска и даљински управљаним пригушно неповратним вентилом, јавила се потреба за развојем подсистема за детекцију предмета рада, у складу са концептом Индустрије 4.0. Основна идеја подразумијева то, да сваки од три коришћена предмета рада (слика 63), који насумичним редослиједом долазе до извршног система, у складу са захтјевом за повећањем флексибилности, на неки начин познаје своје карактеристике и да их управљачком систему може прослиједити у тренутку када се то од њега захтијева. На основу те информације, управљачки систем генерише одговарајуће инструкције како би руковање сваким предметом рада било извршено на оптималан начин. Дакле, предмети рада су носиоци информације, па су на њих постављени RFID анти-метални тагови (јер су два типа предмета рада направљена од челика).

У складу са преходно изнесеним, у склопу ове докторске дисертације, развијен је прототип новог сензорског склопа за детекцију предмета рада, заснован на принципима ВТ (енг. *Bluetooth*)³⁵ и RFID технологија [150], који је јефтинији од тренутно комерцијално доступних RFID читача. Тај сензорски склоп може да чита податке са RFID тагова, који су постављени на предмете рада, и/или уписује податке на тагове, шаље потребну информацију управљачком систему и, за потребе овог истраживања и тестирања рада, шаље податке ка рачунару на коме је инсталирана корисничка апликација, како би корисник и визуелно могао да прати шта се дешава у самом систему. Потребно је напоменути и то да су омогућена два типа приступа, преко проводника (серијском везом) и бежичним путем (примјеном ВТ технологије).

³⁵ ВТ је стандардизовани протокол за бежичну комуникацију, намијењен за комуникацију између више уређаја са малом потрошњом. Коришћењем ВТ технологије, могуће је повезати различите типове уређаја као што су десктоп рачунари, лаптоп рачунари, мобилни телефони, дигитални фото апарати, и слично [166].

Механичка конструкција прототипа сензорског склопа за детекцију предмета рада

Физичка реализација прототипа сензорског склопа за детекцију предмета рада [150], приказана је на слици 74.



а) Елементи развијеног прототипа сензорског склопа



б) Елементи интегрисани у кућиште



в) Сензорски склоп са постављеним поклопцем

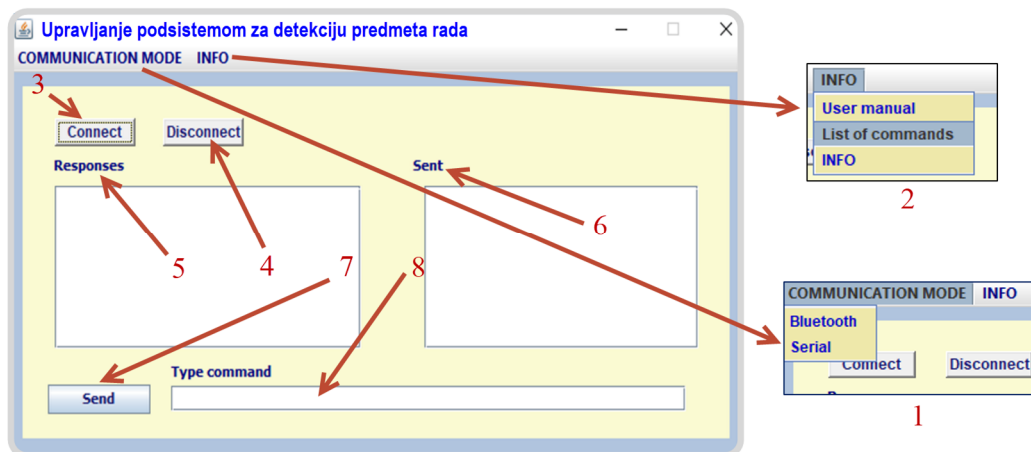
Слика 74. Прототип сензора за детекцију предмета рада [150]

Као што се може видјети са слике 74 (горњи положај), сензорски склоп за детекцију предмета рада састоји се од три главна елемента: главног управљачког уређаја, микроконтролера ESP32 (слика 74, горњи положај, позиција 1), модула за упис података на тагове и/или читање података са тагова, ознаке RFID-RC522, који ради на принципу RFID технологије (слика 74, горњи положај, позиција 2) и извора напајања једносмјерном електричном струјом (слика 74, горњи положај, позиција 3). Поменути елементи интегрисани су у кућиште (слика 74, горњи положај, позиција 4), израђено од PLA на 3Д штампачу. Начин интеграције елемента у кућиште приказан је, такође, на слици 74 (доњи лијеви положај). Са бочне стране кућишта, остављени је отвор за главни прекидач (слика 74, доњи десни положај, позиција 1), испод кога се налази отвор за USB порт, преко кога се сензорски склоп са управљачким системом или неким рачунаром може повезати и серијским путем. Да би се елементи сензорског склопа заштитили на одговарајући начин, на врх кућишта постављен је поклопац (слика 74, доњи десни положај, позиција 2), израђен такође од PLA на 3Д штампачу, причвршћен вијцима.

Софтверски дио

За потребе тестирања рада развијеног прототипа сензорског склопа за детекцију предмета рада, у програмском језику Java, развијена је корисничка апликација (слика 75) под називом „Upravljanje_podsistemom_za_detekciju_predmeta_rada.exe“ [150]. У главном прозору апликације, који се отвара након покретања, налази се неколико битних елемената:

- падајући мени „COMMUNICATION MODE“ (слика 75, позиција 1), помоћу кога се бира начин комуникације са сензорским склопом (серијска веза или BT),
- падајући мени „INFO“ (слика 75, позиција 2), помоћу кога се добија листа команди које је могуће задати сензорском склопу, као и листа одговора које сензорски склоп даје, те детаљно корисничко упутство за употребу апликације,
- два дугмета „Connect“ (слика 75, позиција 3) и „Disconnect“ (слика 75, позиција 4), који се користе за успостављање, односно за прекидање везе са сензорским склопом, респективно,
- двије листе „Responses“ (слика 75, позиција 5) и „Sent“ (слика 75, позиција 6), које приказују све поруке које су примљене од сензорског склопа, односно све инструкције које су послате ка сензорском склопу, респективно, и
- дугме „Send“ (слика 75, позиција 7), кликом на које се ка сензорском склопу шаље одговарајућа инструкција, претходно уписана у поље под називом „Type command“ (слика 75, позиција 8).

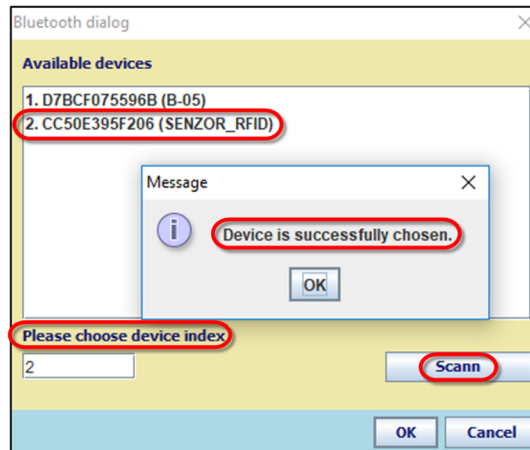


Слика 75. Корисничка апликација [150]

Потребно је напоменути и то да се, приликом повезивања са развијеним сензорским склопом, у случају повезивања преко BT, уређај бира из листе доступних уносом његовог редног броја у поље „Please, choose device index“. Листа доступних уређаја појављује се након скенирања, које се покреће кликом на дугме „Scan“. Уколико је уређај успјешно повезан, појављује се дијалог са поруком „Device is successfully chosen“. Претходно описани поступак приказан је на слици 76. Поступак повезивања серијском везом је скоро па идентичан, с тим што се жељени уређај, из листе доступних, бира уносом пуног назива комуникационог порта који је отворен, у поље „Please, choose COM port“.

Листа команди које је могуће послати ка развијеном сензорском склопу приказана је у табели 4. На сваку од задатих команди, сензорски склоп мора одговорити у предвиђеном временском року. Поред тога, у тренутку скенирања одговарајућег тага, односно детекције присуства неког предмета рада, сензорски склоп мора обавијестити управљачки систем и/или корисника о томе који предмет рада је у питању тачно

дефинисаном поруком (табела 4, мод Run), како би управљачки систем могао да генерише одговарајуће управљачке инструкције.



Слика 76. Избор уређаја за повезивање [150]

Табела 4. Списак команди и одговора у систему сензора за детекцију предмета рада [150]

Команда	Значење команде	Одговор од стране склопа
Idle	Сензорски склоп се поставља у неактивно стање.	<ul style="list-style-type: none"> • ОК – у случају успјешно извршене команде • FAILED – у случају неуспјешно извршене команде
Run	Сензорски склоп се поставља у радни режим. Након детекције предмета рада, сензорски склоп ка управљачком систему и/или кориснику шаље одговарајућу информацију.	<ul style="list-style-type: none"> • ОК – у случају успјешно извршене команде • FAILED – у случају неуспјешно извршене команде
Prog	Сензорски склоп се поставља у стање програмирања картице. Након ове команде, апликација очекује команду „Write“.	<ul style="list-style-type: none"> • ОК – у случају успјешно извршене команде • FAILED – у случају неуспјешно извршене команде
Write	Сензорски склоп се поставља у стање уписа података на таг. Након ове команде, апликација очекује команду у хексадецималном формату за упис на таг.	<ul style="list-style-type: none"> • ОК – у случају успјешно извршене команде • FAILED – у случају неуспјешно извршене команде

3.5.6 Идејно софтверско рјешење

Главни циљ ове докторске дисертације је, као што је претходно више пута наглашено, развој модела за даљинско управљање дигиталним пнеуматским системима у концепту Индустрије 4.0. Развојем прототипа даљински управљаног дигиталног флуидног погона, направљено је тест постројење за руковање различитим предметима рада, при чему разлике међу предметима рада нису велике, односно ријеч је о предметима рада који припадају заједничкој класи (у конкретном случају, предмети рада имају исте габаритне димензије, али различите масе). Ово експериментално постројење послужило је за испитивање различитих могућности које нуде дигитални пнеуматски системи.

Развијени систем, коришћењем PWM управљања, уз интеграцију даљински управљаног регулатора притиска и даљински управљаног пригушно-неповратног вентила, омогућава потпуну функционалност као и савремена дигитална вентилска острва [102], искључиво софтверском реконфигурацијом, без

физичке замјене компоненти. Под тим се подразумејева прилагођавање управљачког поступка тренутном захтјеву, односно предмету рада са којим се рукује у датом тренутку, уз директну промјену управљачких параметара (промјена радног притиска, промјена степена отворености пригушно-неповратног вентила чиме се мијења проток, и слично) у току самог процеса рада. Притом, мора се водити рачуна о функцији критеријума, која може бити или продуктивност (минимално вријеме завршетка операције рада), или енергетска ефикасност (минимална потрошња енергије, односно минимална потрошња ваздуха под притиском). Прилагођавање управљачког поступка, дакле, подразумејева правилан избор управљачких инструкција у реалном времену, и њихово тренутно извршење, уз директну промјену управљачких параметара. Управљачке инструкције су унапријед генерисане, на основу додатних испитивања.

Та додатна испитивања, у конкретном случају, подразумејувала су одређивање потрошње ваздуха под притиском приликом подизања предмета рада и времена трајања поменутог операције рада, при различитим условима [155], [156]. Различити услови добијени су на тај начин што су мијењани:

- радни притисак (у опсегу од 3 *bar* до 6 *bar*, са кораком од 1 *bar*),
- проток, односно степен отворености пригушно-неповратног вентила (у опсегу од 30% до 90% са кораком од 20%, уз додатак када је пригушно-неповратни вентил потпуно отворен), и
- оптерећење (три различита предмета рада, приказана на слици 63).

Мјерења су извршена тако што је, прије улаза у систем (чија је управљачка шема приказана на слици 73), односно прије припремне групе, ради стабилизације притиска, постављен резервоар запремине 24 *l*. На улазу у резервоар, постављен је сензор притиска произвођача Danfoss, ознаке MBS 3000, 060G1102. Коришћењем поменутог сензора, мјерена је вриједност притиска у резервоару, прије и након завршетка операције подизања предмета рада. Експеримент је извођен тако што је резервоар, у почетку, напуњен до максималне вриједности притиска (~8 *bar*). Додатни доток ваздуха под притиском директно са извора напајања, за вријеме извођења експеримента, био је блокиран. У циљу добијања тачних резултата, током једног мјерења, систем је био подешен да 10 пута подигне један исти предмет рада. То је урађено због тога што је, у неким случајевима, вријеме подизања предмета рада веома кратко, а проток веома мали, те сензор, уколико би било узето у обзир само једно подизање предмета рада, не би дао одговарајући податак. Подешавање регулатора притиска и пригушно-неповратног вентила, током експеримента, вршено је ручно. Такође, и спуштање клипа цилиндра ка крајњем доњем положају, у циљу добијања резултата само за подизање предмета рада (раније је напоменуто да се у склопу ове докторске дисертације анализира само овај случај), вршено је ручно. Резултати, о којима ће детаљно бити ријечи у поглављу 4, су записивани у одговарајућу табелу, па је, на основу пада притиска у резервоару, коришћењем Бојл-Мариотовог закона, уз претпоставку да је температура константна, израчуната потрошња ваздуха под притиском, коришћењем формула 21-24:

$$V_1 = \frac{p_1 \cdot V_r}{p_{atm}}, \quad (21)$$

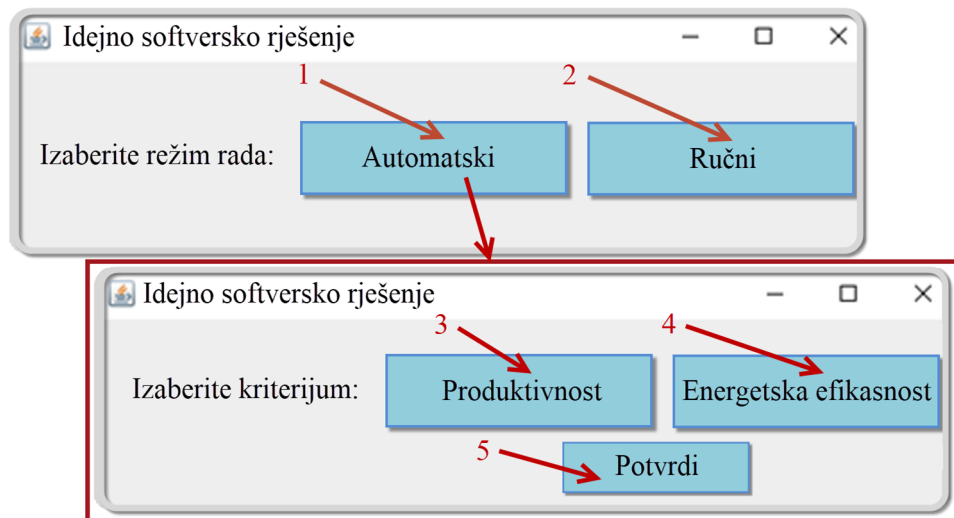
$$V_2 = \frac{p_2 \cdot V_r}{p_{atm}}, \quad (22)$$

$$\Delta V = V_1 - V_2, \quad (23)$$

$$V = \frac{\Delta V}{10}, \quad (24)$$

гдје је V_1 количина ваздуха у резервоару на почетку рада у Nl , V_2 количина ваздуха у резервоару након 10 циклуса подизања предмета рада у Nl , V_r запремина резервоара у l , p_1 апсолутни притисак у резервоару на почетку рада у bar , p_2 апсолутни притисак у резервоару након 10 циклуса подизања предмета рада у bar , p_{atm} атмосферски притисак у bar , ΔV утрошена количина ваздуха под притиском за 10 циклуса подизања предмета рада у Nl , и V утрошена количина ваздуха под притиском по једном циклусу подизања предмета рада у Nl . Паралелно са одређивањем потрошње ваздуха под притиском, измјерено је и вријеме трајања подизања предмета рада за различите услове, у свим случајевима.

На основу добијених резултата, у програмском језику Java, развијена је корисничка апликација под називом „Idejno_softversko_rješenje.exe“, приказана на слици 77, која се може користити за управљање неким дигиталним пнеуматским системом, са интегрисаним даљински управљаним регулатором притиска и даљински управљаним пригушно-неповратним вентилом, који је сличан прототипу даљински управљаног дигиталног флуидног погона, и који је у потпуности аутоматизован. Апликација омогућава два режима рада, аутоматски (слика 77, позиција 1) и ручни (слика 77, позиција 2).



Слика 77. Идејно софтверско рјешење

Аутоматски режим рада подразумијева то да, управљачки систем сам, у зависности од тога са којим предметом рада се рукује у датом тренутку, што се детектује новоразвијеним сензорским склопом (описаним у потпоглављу 3.5.5), подешава одговарајуће управљачке параметре и извршава одговарајуће управљачке инструкције у реалном времену. Ти параметри се односе на радни притисак (подешавање вриједности секундарног притиска на даљински управљаном регулатору притиска) и проток (подешавање степена отворености пригушно-неповратног вентила). Преостале управљачке инструкције односе се на начин управљања кретањем радних елемената (да ли је потребно заустављање у међупозицијама или не, односно да ли се користи PWM управљање или само ON-OFF управљање, и слично). Подешавање параметара врши се у складу са претходно изабраним критеријумом продуктивности (слика 77, позиција 3), или енергетске ефикасности (слика 77, позиција 4), пошто су раније, експерименталним путем, одређени потрошња ваздуха под притиском и вријеме завршетка операције подизања предмета рада за сваки предмет рада понаособ за различите случајеве, односно одређено је колики је минимални радни притисак потребан за подизање предмета рада и који је оптимални

проток у неком случају. Систем се у аутоматски режим рада ставља кликом на дугме „Potvrđi“ (слика 77, позиција 5), након претходно изабраног критеријума.

Ручни режим рада подразумева ручно подешавање свих управљачких параметара, чак и даљинским путем, у складу са тренутним захтјевом, као што је већ објашњено раније приликом опис начина функционисања апликација приказаних на сликама 60 (корисничка апликација за управљање даљински управљаним пригушно-неповратним вентилом), 65 (корисничка апликација за управљање даљински управљаним дигиталним флуидним погоном), 72 (корисничка апликација за управљање даљински управљаним регулатором притиска) и 75 (корисничка апликација за управљање сензорским склопом за детекцију предмета рада). У случају потребе за даљинским управљањем, апликација се може покренути преко софтверског пакета SceneClon Viewer. Имплементација ручног режима рада, који је остављен као резервни, и даљинског управљања системом додатно повећава његову безбједност и поузданост, јер је, на примјер, у случају појаве отказа или непланираног застоја, систему могуће приступити чак и са удаљене локације, промијенити управљачке параметре и поново покренути систем или га довести у безбједан положај. Потребно је напоменути још и то да се развијена апликација, у било ком тренутку, може надградити додатним опцијама.

ПОГЛАВЉЕ 4 – АНАЛИЗА РЕЗУЛТАТА И ДИСКУСИЈА

Појмови ума служе схватању, као што појмови разума служе разумијевању (опажаја).

(Имануел Кант, Критика чистог ума)

У оквиру потпоглавља 3.1.2, приликом дефинисања истраживачких метода, напоменуто је да је једна од коришћених метода и метода експеримента, која подразумева експериментално испитивање неке појаве на моделу, или прототипу уређаја, или на стварном систему, и добијање резултата, на примјер, мјерењем неких величина. У склопу потпоглавља 3.2-3.5, детаљно су приказана сва експериментална постројења, на којима су вршена различита експериментална испитивања. У оквиру овог поглавља, анализирани су најважнији резултати добијени поменутих испитивањима, нумеричким, графичким или чисто вербалним путем.

4.1 Надградња постојећих пнеуматских управљачких система

4.1.1 Даљинско управљање кретањем пнеуматских радних елемената

Пнеуматски кружни манипулатор је мехатронички уређај који је састављен од већег броја пнеуматских радних елемената. Конкретно, састоји од пет пнеуматских цилиндара двосмјерног дејства и једне пнеуматске хватаљке.

Опште је позната чињеница да се управљање системима овог типа, који се састоје од већег броја пнеуматских радних елемената, веома често реализује као програмско или програмабилно, односно као управљање које се одвија према унапријед дефинисаном програму или алгоритму. За реализацију овог типа управљања, развијени су многобројни системски инжењерски поступци, који подразумевају или искључиво пнеуматске реализације, или примјену ПЛК. У склопу развоја и имплементације пнеуматског кружног манипулатора, реализовано је и управљање истим коришћењем ПЛК, које подразумева просто активирање, односно деактивирање (ON-OFF управљање) соленоида разводних вентила према унапријед утврђеном алгоритму, у складу са испуњеношћу неког услова, завршетком неке претходне операције и/или процеса, и слично.

У циљу осавремењавања управљачких система, у складу са сталном потребом за прилагођавањем новим захтјевима који се јављају, најчешће од стране тржишта, и који се стално мијењају, обично без неког одређеног редослиједа, јавља се и потреба за повременим измјенама у управљачким поступцима и производним процесима, понекад и са удаљене локације, измјеном редослиједа одвијања операција,

промјеном управљачких параметара, и слично. Тако су развијени поступци даљинског управљања, које подразумијева управљање системом без директног физичког контакта са истим, и које данас често представља саставни дио савремених индустријских процеса, било да је ријеч о даљинском управљању унутар саме фабрике, или чак из најудаљенијих крајева свијета. Како су пнеуматски управљачки системи једни од најзаступљенијих у индустријским процесима, примјена даљинског управљања није заобишла ни њих. Даљинско управљање оваквим система нарочито је пожељно примјенити у ситуацијама када приступ самом систему није једноставан и лак за оператера, а обавезно у случају када приступ опреми, из неког разлога, није уопште безбједан за истог.

У складу са претходно изнесеним, у оквиру ове докторске дисертације, развијен је начин за даљинско управљање пнеуматским кружним манипулатором како би се показало да је могуће, постојећи пнеуматски управљачки систем, којим се управља коришћењем стандардних, ON-OFF разводних вентила, надградити тако да се даљинским путем омогући кретање пнеуматских радних елемената, према унапријед утврђеном алгоритму. Након извршених многобројних тестирања рада система коришћењем већег броја софтверских рјешења за управљање на даљину, дефинисано је да је, за даљинско управљање аутоматизованим системима, најпогодније примјенити SEyeClon платформу. У поређењу са другим софтверским рјешењима која се користе за управљање на даљину, SEyeClon платформа показује неколико предности:

- У поређењу са даљинским приступом аутоматизованом систему коришћењем TeamViewer-а или даљинским приступом систему чији главни контролер посједује режим рада назван веб сервер, преко веб страница, безбједност је на знатно вишем нивоу. Приступ систему преко SEyeClon платформе могућ је само у тачно дефинисано вријеме, при чему је, након приступа сервер рачунару, кориснику доступна само корисничка апликација за даљинско управљање (коју није могуће мијењати ни на који начин) и VLC player, како би се преко њега покренуо приказ система са веб камере (ако се претходно, из неког разлога, не покрене аутоматски).
- За разлику од даљинског управљања системима коришћењем LabVIEW апликација, коришћење SEyeClon платформе не захтијева додатно подешавање комуникационих портова, нити искључивање заштитних система, као што су Windows Firewall или неки антивирусни систем, и слично.
- Замјена постојећих управљачких система новим на SEyeClon платформи је веома једноставна и лака. Једном подешени комуникациони параметри за приступ сервер рачунару остају исти. Приликом повезивања новог система, потребно је само омогућити неки вид комуникације између сервер рачунара и система, и на сервер рачунару инсталирати нову корисничку апликацију.

Додавање нових управљачких система на SEyeClon платформу је, такође, веома лако и једноставно, али захтијева коришћење додатног сервер рачунара, пошто је на један рачунар могуће повезати само један управљачки систем. То је, у суштини, и главни недостатак овог начина даљинског управљања аутоматизованим системима. На овај начин, коришћењем SEyeClon платформе и развојем одговарајуће корисничке апликације, омогућено је даљинско управљање пнеуматским кружним манипулатором. Тиме је доказан први дио Хипотезе 1, који говори о томе да је постојећи пнеуматски систем могуће надградити тако да се даљинским путем омогући управљање кретањем пнеуматских радних елемената.

4.1.2 Даљинска регулација притиска у пнеуматским управљачким системима

Пнеуматске компоненте се, уобичајено, пројектују за максимални радни притисак између 8 *bar* и 10 *bar*. Јасно је да максимални радни притисак није увијек и оптимални, па је, у пракси, најчешћи радни притисак једнак 6 *bar*. У складу са тим, могуће је, у опсегу између 6 *bar* и 10 *bar*, дефинисати и подручје типичне индустријске примјене ваздуха под притиском. У неким системима, за поједине операције рада, и вриједност притиска од 6 *bar* је превише, јер је оптимални радни притисак, у суштини, онај при коме радни елемент може да оствари постављене задатке. У таквим системима, приликом извршења неких операција рада, могуће је додатно смањити радни притисак, чиме се остварују енергетске уштеде јер се смањује потрошња ваздуха под притиском. Да би се поступак смањивања притиска извршио на одговарајући начин, без застоја у раду система, потребно је константно пратити извршење циклуса рада управљачког система, и у тачно дефинисаном кораку, на неки начин, обавијестити исти о томе да је могуће смањити радни притисак.

За подешавање радног притиска, у општем случају, користе се регулатори притиска, који могу бити или чисто механички (подешавање секундарног притиска остварује се ручним обртањем главе подешавајућег вијка) или електрично управљани (подешавање секундарног притиска остварује се на тај начин што се управља кретањем неког електромотора који је преко одговарајуће спојнице повезан са главом подешавајућег вијка). Приликом развоја даљински управљане пнеуматске опруге (која служи за симулацију рада механичке опруге при различитим условима, а која је детаљно описана у потпоглављу 3.3), коришћен је електрично управљан регулатор притиска, произвођача Festo. Поменути регулатор на предњој страни има уграђен екран за приказ тренутне вриједности притиска, у дигиталном облику. Имплементацијом неког система за даљинско управљање на пнеуматску опругу (у конкретном случају, то је SEeyeClon платформа) и развојем одговарајуће корисничке апликације, омогућава се даљинска регулација притиска, односно даљинско управљање по сили.

У складу са претходно изнесеним, закључује се, да је могуће постојећи пнеуматски систем, надградити тако да се у њему омогући даљинска регулација радног притиска, који представља један од управљачких параметара. То је могуће постићи или замјеном стандардног, ручно подешавајућег регулатора притиска новим електрично управљаним регулатором притиска (који су велики свјетски произвођачи пнеуматске опреме већ развили или развијају), уз имплементацију додатног комуникационог система и развој одговарајуће корисничке апликације, или уградњом нових елемената у неки пнеуматски управљачки систем. На овај начин, доказан је и други дио Хипотезе 1 који говори о томе да је постојећи пнеуматски систем могуће надградити тако да се омогући даљинска промјена управљачког параметра (радни притисак), чиме се остварује један вид управљања по сили, јер су притисак и сила у директној сразмјери.

Сагледавањем ширег контекста, који подразумејева и смањење трошкова, а притом прати трендове које доноси Индустрија 4.0, и који се односи на убрзан развој нових технологија и њихово константно усавршавање, у склопу ове докторске дисертације разматрана је могућност развоја новог, даљински управљаног регулатора притиска (који је детаљно описан у потпоглављу 3.5.4 и за који је предложен и нови симбол), који би био примјеренији за мање системе, чак и за појединачне радне елементе, а био би и јефтинији од комерцијално доступних [113]. Поред тога, остављена је и могућност његове додатне надградње. У том циљу, развијен је и прототип новог, даљински управљаног регулатора притиска [154].

Да би се испитала функционалност било ког управљачког система, или једног његовог дијела, потребно је испитати његову тачност и поновљивост. Због тога су на прототипу новоразвијеног даљински управљаног регулатора притиска урађена експериментална испитивања постизања жељене вриједности секундарног притиска, при различитим вриједностима примарног притиска. Мјерења су извршена коришћењем сензора притиска произвођача Danfoss, ознаке MBS 3000, 060G1102. Добијени резултати приказани су у табели 5. Римским бројевима од I до V означен је редни број тестирања постизања жељене вриједности секундарног притиска. Анализом резултата, закључује се да максимална апсолутна грешка постизања жељене вриједности притиска, која се прорачунава као разлика постигнуте и жељене вриједности, износи $-0,24 \text{ bar}$, и то при жељеној вриједности радног притиска од $5,6 \text{ bar}$.

Табела 5. Резултати мјерења постигнутне вриједности секундарног притиска на новоразвијеном даљински управљаном регулатору притиска [154]

Жељена вриједност притиска (<i>bar</i>)	Постигнута вриједност притиска (<i>bar</i>)				
	I	II	III	IV	V
1,7	1,71	1,76	1,71	1,66	1,68
2,4	2,36	2,41	2,32	2,33	2,34
3,5	3,43	3,47	3,41	3,42	3,4
4,3	4,18	4,24	4,2	4,2	4,14
5,6	5,41	5,47	5,41	5,43	5,36

У табели 6 приказана је прорачуната релативна грешка постизања жељене вриједности притиска за свако мјерење посебно. Релативна грешка прорачунава се као количник апсолутне грешке и жељене вриједности, и у овом случају, максимална апсолутна вриједност исте износи $4,29\%$, и то у случају, када је жељена вриједност притиска $5,6 \text{ bar}$.

Табела 6. Прорачуната релативна грешка

Жељена вриједност притиска (<i>bar</i>)	I	II	III	IV	V
1,7	0,58%	3,52%	0,58%	-2,36%	-1,18%
2,4	-1,67%	0,42%	-3,33%	-2,92%	-2,5%
3,5	-2%	-0,86%	-2,57%	-2,29%	-2,86%
4,3	-2,8%	-1,4%	-2,33%	-2,33%	-3,72%
5,6	-3,39%	-2,32%	-3,39%	-3,04%	-4,29%

Анализом релативне грешке (график 1), закључује се да је расипање резултата у складу са нормалном, Гаусовом расподелом³⁶ пошто је, скоро у свим случајевима, апсолутна вриједност релативне грешке мања од 4%. На основу тога, постигнути резултати могу се оцијенити као добри, узимајући у обзир да је ријеч о систему управљања без повратне спреге. Грешка која се јавља последица је неколико узрока:

- креирања полиномске функције преноса система (формула 20) на основу мањег, коначног скупа вриједности добијених експерименталним испитивањем,
- тачности позиционирања корачног електромотора, и
- грешке самог мјерења.

Расипање резултата је највеће при најнижој испитиваној вриједности притиска (1,7 bar). То се дешава због тога што се ваздух под притиском ка излазу из регулатора пропушта тек након неколико обртаја главе подешавајућег вијка, односно од тренутка у ком креће подизање мембране (у случају када се иде од ниже ка вишој вриједности), или што је потребно неко вријеме да се омогући проток ваздуха кроз растеретне отворе (у случају када се иде од више ка нижој вриједности). У тим случајевима, било који додатни мањи обртај главе подешавајућег вијка изазива брзу промјену секундарног притиска, и грешка је већа. Након тога, повећање, односно смањење вриједности секундарног притиска је приближно линеарно зависно од броја обртаја главе подешавајућег вијка, и расипање резултата постизања жељене вриједности притиска је мање.

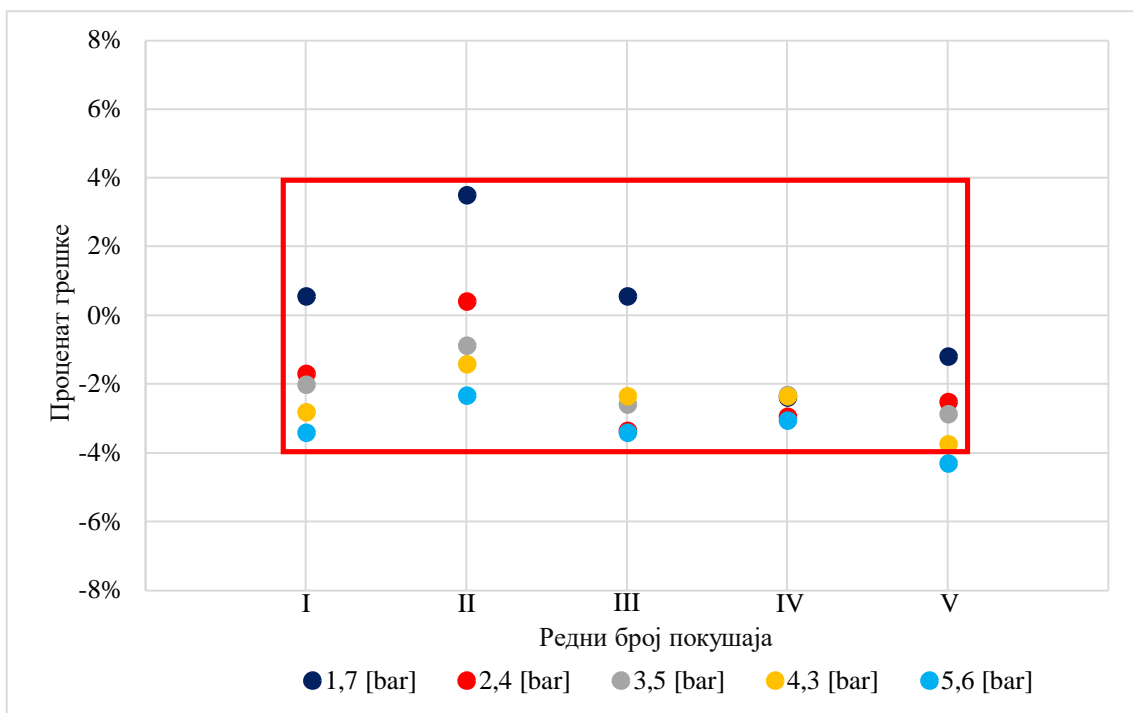


График 1. Релативна грешка постизања жељене вриједности секундарног притиска на новоразвијеном даљински управљаном регулатору притиска

³⁶ Расипање мјерних резултата најчешће се одвија према расподели који се назива нормална, поготово када грешку изазива велики број узрока који су, притом, међусобно независни. Овом расподелом се бавио Карл Фридрих Гаус (Брауншвајг, 30.04.1777. године – 23.02.1855. године, њемачки математичар и научник), проучавао њене законитости и извео једначину криве: $y = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} \cdot e^{-\frac{1}{2}\left(\frac{x-\bar{x}_0}{\sigma}\right)^2}$ гдје је \bar{x}_0 аритметичка средина бесконачног скупа мјерних резултата, а σ стандардна девијација бесконачног скупа. Стандардна девијација је мјера расипања резултата, односно мјера квалитета. Крива је у облику звона и што је мање расипање, мјерење је боље [167]. Аналогно, што је мање расипање резултата позиционирања, то је већа поновљивост и уређај је квалитетнији.

Како је, у склопу ове докторске дисертације, развијен само прототип даљински управљаног регулатора притиска, потребно је напоменути да постоји више начина за побољшање истог, прије развоја финалног производа. Један од њих подразумијева увођење интерног напајања једносмјерном електричном струјом, а други, омогућавање приступа главном управљачком уређају, развојном окружењу Arduino UNO, коришћењем Wi-Fi комуникације. На тај начин би се избјегла употреба жичаних проводника. Додатно, постоји могућност промјене драјвера за корачни електромотор, као и самог развојног окружења (на примјер, да се искористи Arduino NANO), чиме би се смањило потребан простор, а самим тим и габаритне димензије уређаја.

4.1.3 Даљинска регулација протока у пнеуматским управљачким системима

Под појмом протока у пнеуматским управљачким системима подразумијева се количина ваздуха која протекне у јединици времена кроз посматрани попречни пресјек. Дакле, проток је, у првом реду, зависан од површине попречног пресјека. Један од начина за промјену површине, односно карактеристике протока подразумијева употребу пригушно-неповратних вентила, јер се примицањем или одмицањем конусног вијка може регулисати количина ваздуха која се пропушта у једном смјеру. У другом смјеру, проток ваздуха је неометан. На тај начин, пригушно-неповратни вентили се користе за смањење брзине кретања пнеуматских радних елемената и веома често су у употреби, јер је пожељно да радни елемент ради оптималном, а не максимално могућом брзином. На тај начин, омогућава се и продужење радног вијeka компоненте што директно утиче на повећање поузданости система.

Пригушно-неповратни вентили се, по правилу, уграђују између командног разводног вентила и радног елемента (често и на сам радни елемент), и као такви, понекад су тешко приступачни оператерима, а могућа је ситуација да је, у неком систему, често потребно мијењати брзину кретања радних елемената. У тим случајевима, потребно је омогућити подешавање пригушно-неповратног вентила, односно регулацију протока даљинским путем. Стога је, у склопу ове докторске дисертације, разматрана могућност развоја прототипа даљински управљаног пригушно-неповратног вентила [148], који би, уз додатне модификације, могао постати комерцијално доступна компонента.

На поменутом прототипу, у циљу испитивања његове тачности и поновљивости, извршена су експериментална испитивања постизања жељене вриједности протока, при различитим вриједностима радног притиска. Мјерења су извршена коришћењем лабораторијског уређаја AirBox, ознаке GHDA-FQ-M-FDMJ-A, произвођача Festo, у који је уграђен сензор протока ознаке SFE1-LF-F200-HQ8-P2I-M12. Добијени резултати, за вриједност улазног притиска од 6 bar, приказани су у табели 7³⁷. Римским бројевима од I до III означен је редни број тестирања постизања жељење вриједности протока.

Анализом резултата, закључује се да максимална апсолутна грешка износи $-4,14 \frac{l}{min}$, и то за жељену вриједност од $176 \frac{l}{min}$. Оно што је примјетно јесте да се, у складу са повећањем вриједности протока, прије уласка у засићење, повећава и апсолутна грешка, што је последица карактеристике самог вентила, гдје се при веома малим крајњим обртајима подешавајућег конусног вијка (до потпуно отвореног положаја), проток, а самим тим и грешка, значајно повећавају.

³⁷ Напомена: Примјери добијених резултата, за вриједности радног притиска од 2 bar и 5 bar, приказани су у табелама 15 и 16 у прилогу.

Табела 7. Резултати мјерења постигнутне вриједности протока на новоразвијеном даљински управљаном пригушно-неповратном вентилу при улазном притиску од 6 bar [148]

Жељена вриједност протока ($\frac{l}{min}$)	Постигнута вриједност протока ($\frac{l}{min}$)		
	I	II	III
48	48,42	47,9	48,15
80	80,02	79,56	80,01
128	126,58	127,45	126,23
156	154,22	152,84	154,64
176	172,23	171,86	172,87

У табели 8 приказана је прорачуната релативна грешка постизања жељене вриједности протока за свако мјерење. Максимална апсолутна вриједност релативне грешке једнака је 2,35%, за жељену вриједност протока од $176 \frac{l}{min}$.

Табела 8. Прорачуната релативна грешка

Жељена вриједност протока ($\frac{l}{min}$)	I	II	III
48	0,87%	-0,21%	0,31%
80	0,03%	-0,55%	0,01%
128	-1,11%	-0,43%	-1,38%
156	-1,14%	-2,03%	-0,87%
176	-2,14%	-2,35%	-1,77%

Анализом релативне грешке (график 2), закључује се да је расипање резултата веома мало пошто је апсолутна вриједност релативне грешке увијек мања од 2,5%. На основу тога, постигнути резултати могу се оцијенити као врло добри, узимајући у обзир да је ријеч о систему управљања без повратне спреге. Грешка која се јавља посљедица је истих узрока као и у случају даљински управљаног регулатора притиска:

- креирања полиномских функција преноса система (формуле 16-18) на основу мањег, коначног скупа вриједности добијених експерименталним испитивањем,
- тачности позиционирања корачног електромотора, и
- грешке самог мјерења.

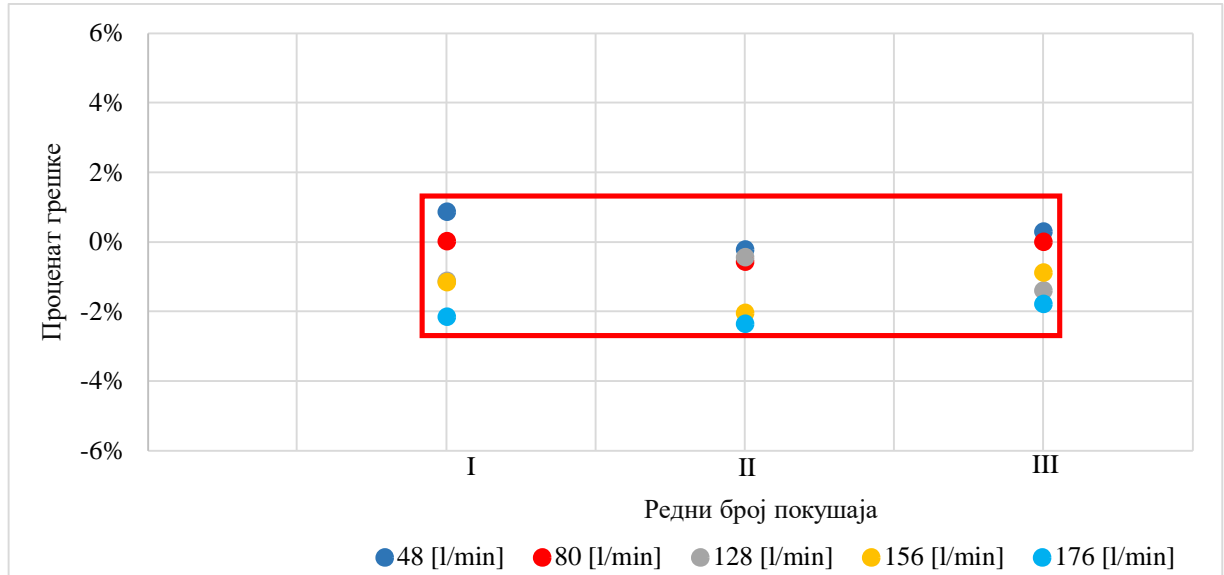


График 2. Релативна грешка постизања жељене вриједности протока на даљински управљаном пригушно-неповратном вентилу

Интеграцијом даљински управљаног пригушно-неповратног вентила у неки пнеуматски управљачки систем, омогућава се даљинска промјена управљачког параметра (проток ваздуха под притиском), односно даљинско управљање по брзини. Тиме је доказан и посљедњи дио Хипотезе 1, који говори о томе да је постојећи пнеуматски систем могуће надградити тако да се омогући даљинска регулација протока у систему чиме се остварује даљинско управљање по брзини. На овај начин, узимајући у обзир и претходно доказано, у потпуности је доказана Хипотеза 1.

Оно што је свакако неопходно напоменути јесте то да постоји више начина за побољшање развијеног прототипа даљински управљаног пригушно-неповратног вентила, прије развоја финалног производа. Као и у случају даљински управљаног регулатора притиска, и у овом случају, могуће је интегрисати интерни извор напајања једносмјерном електричном струјом. Поред тога, могуће је имплементирати нов начин приступа главном управљачком уређају, микроконтролерском развојном окружењу Arduino NANO, препрограмирањем истог, коришћењем Wi-Fi комуникације, како би се избјегла употреба жичаних проводника. Додатно, постоји могућност промјене драјвера за корачни електромотор, чиме би се смањио потребан простор, а самим тим и габаритне димензије уређаја.

4.2 Развој флексибилног, дигиталног пнеуматског управљачког система

Убрзан развој различитих индустријских грана и технолошких дисциплина у посљедњих неколико година доноси значајне измјене у свијету производње. Оне се, у највећој мјери, огледају у томе да произвођачи настоје да побољшају ефикасност производње скраћењем времена трајања производног циклуса, уз могућност прилагођавања производног процеса различитим врстама производа, како би се, у реалном времену, задовољиле специфичне, чак и индивидуалне жеље купаца. Самим тим, пред инжењере широм свијета, постављени су нови захтјеви, који превазилазе стандардне мехатроничке системе, који подразумијевају извршење циклуса рада према унапријед утврђеном алгоритму и извјештавање о његовом статусу. Савремени мехатронички системи прерастају у кибернетско-физичке системе, који коришћењем умрежене комуникације, заједно са повратним информацијама, које долазе из производног процеса кроз добар сензорски систем, директно побољшавају ефикасност тог процеса на тај начин што омогућавају

тренутну измјену истог (на примјер, прелазак на обраду нове врсте производа у реалном времену), промјеном одговарајућих управљачких параметара, и то, само софтверским путем.

Поменуте промјене условиле су промјене и код пнеуматских управљачких система, који су данас, значајан дио индустријских производних процеса. Велики свјетски произвођачи пнеуматске опреме данас производе дигитална пнеуматска вентилска острва [102], која комбинацијом различитих технологија, омогућавају различите функције и прилагођавање пнеуматског управљања различитим захтјевима у кратком временском року, без физичке замјене компоненти. То представља и главну предност ове технологије, а иста је омогућена захваљујући способности пнеуматских система да се прилагоде новим рачунарским и електронским технологијама.

У склопу ове докторске дисертације, разматрана је могућност развоја флексибилног пнеуматског управљачког система, искључиво софтверски реконфигурабилног, те је развијен прототип индустријског уређаја за руковање предметима рада ваљкастог облика, назван даљински управљан дигитални флуидни погон (који је детаљно описан у потпоглављу 3.5). Захваљујући интеграцији новоразвијених компоненти, даљински управљаног пригушно-неповратног вентила и даљински управљаног регулатора притиска, поменути прототип је развијен тако да омогућава реализацију скоро свих функција које омогућавају и савремена дигитална вентилска острва [102]. Међутим, исти је знатно јефтинији, јер се, умјесто посебних изведби пиезоелектричних разводних вентила, користе стандардни, електрично активирани разводни вентили, који су специфични само по томе што имају веома кратко вријеме отварања и затварања. На тај начин, омогућена је примјена PWM управљања поменутиим разводним вентилима, што је даље условило омогућавање позиционирања клипа цилиндра у међупозицијама.

Приликом истраживања, дефинисана су три начина рада система:

1. аутоматско подизање предмета рада до крајњег положаја (600 mm) без заустављања у међупозицијама,
2. подизање предмета рада до крајњег положаја (600 mm) са заустављањем у двије међупозиције, од којих је прва на 17% укупне дужине хода (102 mm), а друга на 51% укупне дужине хода (306 mm), и
3. подизање предмета рада до крајњег положаја (600 mm) са заустављањем у једној међупозицији, која се налази на 83% укупне дужине хода (498 mm) [151], [152], као што је детаљно објашњено у потпоглављу 3.5.1.

Најједноставнији начин рада је, свакако, позиционирање само у крајњим положајима, које подразумијева примјену стандардног ON-OFF управљања, о чему је већ раније било дискусије, па овдје неће бити посебно образлагано. Оно што је интересантно за анализу јесте позиционирање у међупозицијама, које је вршено у два случаја, са најтежим израђеним предметом рада (чија је маса $\sim 4\text{ kg}$), при радном притиску од 6 bar , уз пригушење излазног ваздуха, са степеном отворености пригушно-неповратног вентила од 50% и 80%. Јасно је да је позиционирање лакше ако је брзина мања, односно ако је степен отворености пригушно-неповратног вентила, а самим тим и проток, мањи, па ће посебно бити анализиран неповољнији случај, односно случај у ком је степен отворености пригушно-неповратног вентила једнак 80%. Резултати позиционирања, добијени коришћењем отпорничке мјерне летве,

приказани су у табелама 9 и 10³⁸. Римским бројевима од I до V означен је редни број тестирања заустављања клипа цилиндра у некој међупозицији приликом подизања предмета раада.

Табела 9. Резултати позиционирања клипа цилиндра при подизању предмета рада уз степен отворености пригушно-неповратног вентила од 80% са заустављањем у двије међупозиције [152]

Жељена позиција (mm)	Постигнута позиција (mm)				
	I	II	III	IV	V
102	104	101	99	100	104
306	305	304	308	304	303

Табела 10. Резултати позиционирања клипа цилиндра при подизању предмета рада уз степен отворености пригушно-неповратног вентила од 80% са заустављањем само у једној међупозицији [152]

Жељена позиција (mm)	Постигнута позиција (mm)				
	I	II	III	IV	V
498	500	500	502	498	501

Анализом резултата, закључује се да максимална апсолутна грешка износи 4 mm, и да се јавља приликом заустављања клипа у жељеној позицији од 498 mm. Прорачуната релативна грешка, за свако мјерење, обједињено је приказана у табели 11. За разлику од максималне апсолутне грешке, која се јавља приликом заустављања клипа у жељеној позицији од 498 mm, максимална апсолутна вриједност релативне грешке јавља се приликом заустављања клипа у жељеној позицији од 102 mm, и једнака је 2,94%.

Табела 11. Прорачуната релативна грешка

Жељена позиција (mm)	I	II	III	IV	V
102	1,96%	-0,98%	-2,94%	-1,96%	1,96%
306	-0,33%	-0,65%	0,65%	-0,65%	-0,98%
498	-0,4%	-0,4%	-0,8%	0%	-0,6%

Анализом релативне грешке (график 3), закључује се да је у већини ситуација мања од 2%, те да је расипање резултата веома мало. На основу тога, добијени резултати могу се оцијенити као добри. Оно што је потребно нагласити јесте, да се веће расипање резултата јавља само у случају када је потребно извршити позиционирање у првој трећини хода цилиндра. То је посљедица ограничења у систему и дешава се због тога што профил брзине, у општем случају, има приближно трапезни облик, односно што је убрзање на самом почетку хода, због дотока ваздуха под притиском, велико па због тога што је краћи

³⁸ Напомена: Примјери добијених резултата позиционирања за степен отворености пригушно-неповратног вентила од 50% приказани су у табелама 17 и 18 у прилогу.

пут, грешка позиционирања је већа. У средњем и крајњем дијелу хода, клип цилиндра се креће приближно константном брзином, са благим успорењем, и позиционирање је тачније, јер регулатор на располагању има више времена. Ради једноставности разумијевања, на графику 4, приказан је један примјер профила брзине клипа цилиндра³⁹, за случај подизања најтежег предмета рада, при радном притиску од 6 bar, уз пригушење излазног ваздуха, са степеном отворености пригушно-неповратног вентила од 70%.

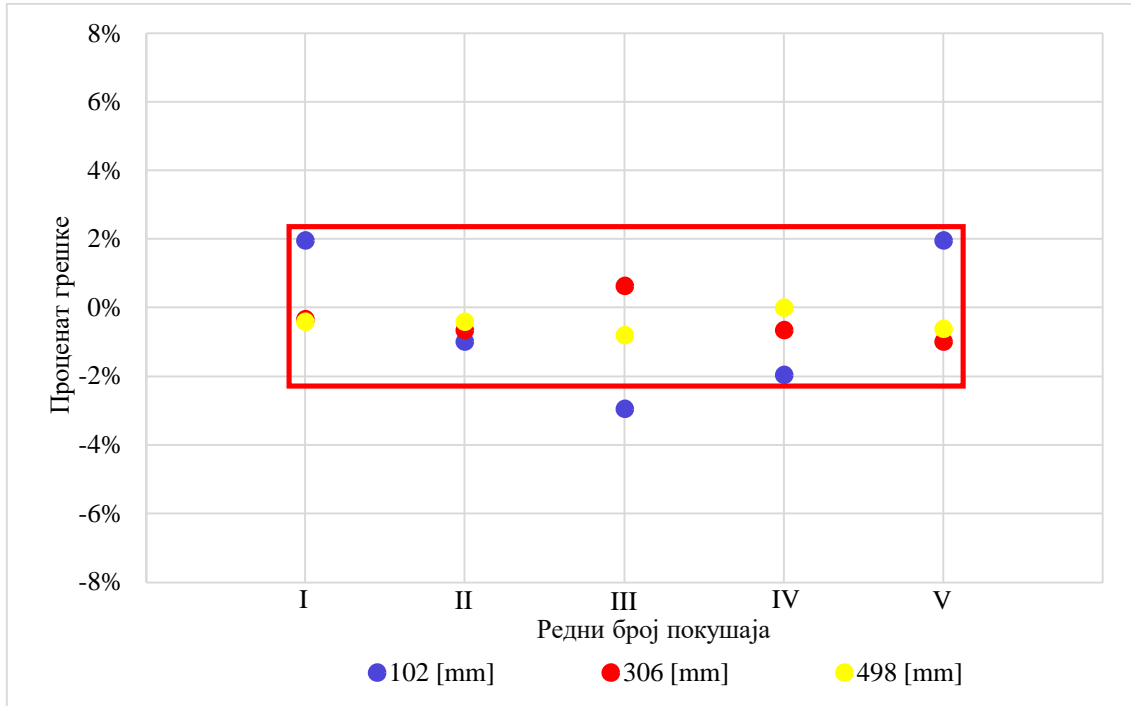


График 3. Релативна грешка позиционирања

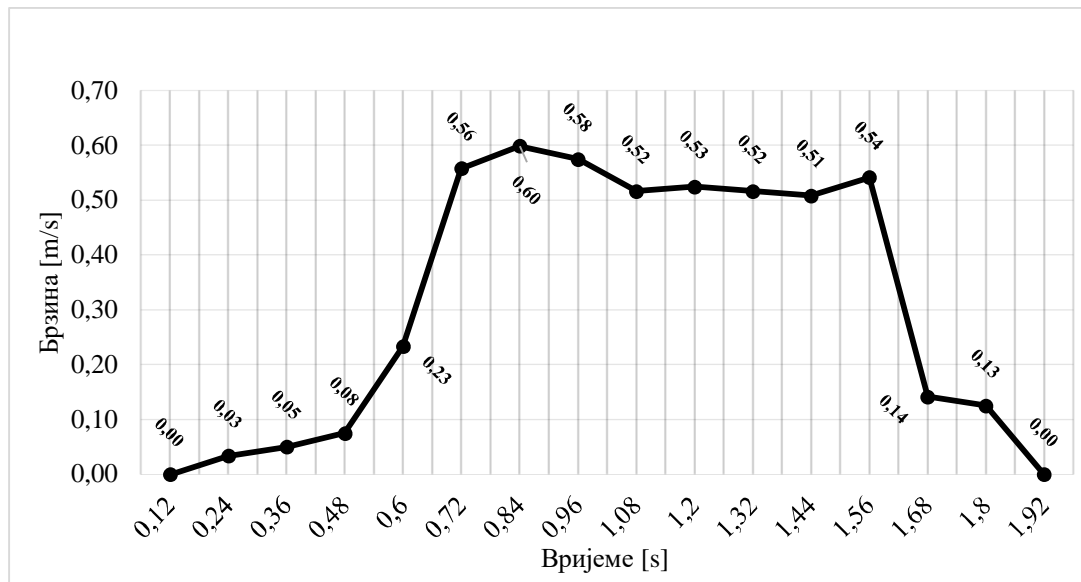


График 4. Профил брзине клипа цилиндра при подизању најтежег предмета рада, при радном притиску од 6 bar и проценту отворености пригушно-неповратног вентила од 70% [156]

³⁹ Профил брзине за све остале случајеве детаљно су приказани у [156].

Друга значајна цјелина даљински управљаног дигиталног флуидног погона јесте софтверско рјешење. Подлогу за софтверско рјешење дала су мјерења којима су одређени потрошња ваздуха под притиском и времена позиционирања, за различите случајеве, детаљно описане у потпоглављу 3.5.6.

У табели 12 приказана је прорачуната потрошња ваздуха под притиском, по једном циклусу подизања предмета рада, у зависности од промјене оптерећења (три предмета рада са истим габаритним димензијама али различитих маса) и притиска (четири различите вриједности радног притиска у опсегу од 3 bar до 6 bar, са кораком од 1 bar). Оно што се може примијетити јесте утицај масе предмета рада, гдје са повећањем исте, долази и до благог пораста потрошње ваздуха. Такође, још једном је потврђена чињеница да се потрошња ваздуха под притиском повећава и са повећањем вриједности радног притиска.

Табела 12. Потрошња ваздуха под притиском за различите случајеве подизања предмета рада⁴⁰

Утрошена количина ваздуха под притиском по циклусу подизања предмета рада [Nl]		Маса предмета рада [kg]		
		~ 0,5	~ 1	~ 4
Радни притисак [bar]	3	0,64	0,67	0,72
	4	0,74	0,8	0,81
	5	0,88	0,92	0,95
	6	0,9	1,02	1,03

Времена позиционирања клипа цилиндра у крајњи горњи положај, уз подизање предмета рада, за један случај (при максималном протоку, односно у случају када је пригушно-неповратни вентил скроз отворен), приказана су у табели 13⁴¹. Анализом резултата закључује се да се повећањем радног притиска у систему, вријеме потребно за подизање предмета рада смањује, односно да се повећањем масе предмета рада, вријеме потребно за подизање истих повећава. У неким случајевима, због веома кратког времена подизања, као и грешке мјерења, резултати су практично идентични, али не одступају од генералног закључка који је раније изведен.

На основу претходно приказаних резултата, развијено је идејно софтверско рјешење (које је детаљно описано у потпоглављу 3.5.6), које омогућава имплементацију два критеријума:

- продуктивности (минимално вријеме завршетка операције рада), или
- енергетске ефикасности (минимална потрошња ваздуха под притиском).

Током рада система, прате се два управљачка параметра: радни притисак и проток ваздуха под притиском, односно степен отворености пригушно-неповратног вентила, који су директно пропорционални. У складу са тренутним захтјевом, омогућава се подешавање претходно поменутих параметара на даљински управљаном регулатору притиска и даљински управљаном пригушно-неповратном вентилу, искључиво

⁴⁰ Напомена: Комплетни резултати мјерења приказани су у [155].

⁴¹ Напомена: Резултати мјерења времена трајања подизања предмета рада за све остале случајеве детаљно су приказани у прилогу у табелама 19-22.

софтверским путем. Тако је, на примјер, уколико је потребно подићи предмет рада, чија је маса $\sim 1 \text{ kg}$, за $\sim 3 \text{ s}$, како би се, на примјер, синхронизовало вријеме трајања поменуте операције рада са неком другом, уз минималну потрошњу ваздуха, то могуће урадити на оптималан начин при радном притиску од 3 bar и са степеном отворености пригушно-неповратног вентила од 70% (табела 20 у прилогу).

Табела 13. Вријеме потребно за подизање предмета рада до крајњег положаја при максималном могућем протоку за различите случајеве оптерећења и радног притиска

Потребно вријеме [s]		Маса предмета рада [kg]		
		$\sim 0,5$	~ 1	~ 4
Радни притисак [bar]	3	1,44	1,50	2,16
	4	1,12	1,18	1,59
	5	0,85	0,90	1,05
	6	0,85	0,85	0,96

На основу свега претходно изнесеног, могуће је развити модел за даљинско управљање дигиталним пнеуматским системима у концепту Индустрије 4.0, и то на сљедећи начин:

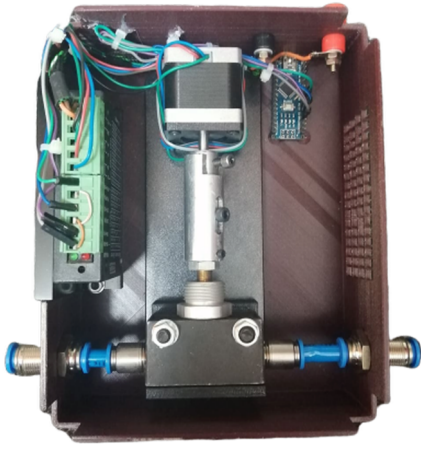
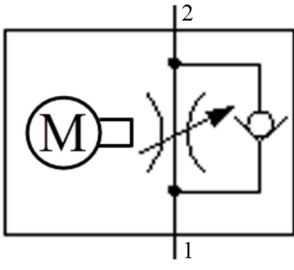
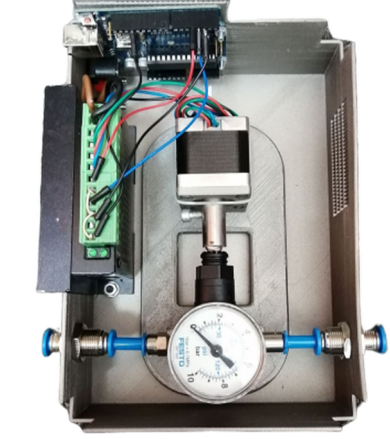
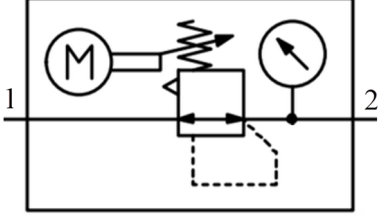
1. Приликом развоја пнеуматског управљачког система, прво је потребно дефинисати операцију или операције рада које исти мора да обави и дефинисати групу сличних предмета рада који ће бити коришћени у систему. Предмети рада могу бити различити, односно могу имати различите карактеристике али морају припадати некој заједничкој класи, односно разлике међу предметима не смију бити велике. На примјер, ако је критеријум сличности геометријска и димензиона сличност, они морају имати исти облик и димензије али су различитих маса.
2. У складу са дефинисаним операцијама рада, потребно је изабрати одговарајуће пнеуматске радне елементе и дефинисати који вид управљања је потребно примијенити, односно да ли се захтијева позиционирање само у крајњим положајима (примјена стандардног ON-OFF управљања) или је неопходно остварити и неколико додатних међупозиција (на примјер, примјеном PWM управљања).
3. Потребно је омогућити успјешно одвијање операција рада и при случајном редослиједу наиласка предмета рада, односно производни процес ускладити чак и са индивидуалним жељама купаца, спуштањем серије производа на јединични ниво, у складу са концептом Индустрије 4.0. Да би се то омогућило, потребно је имплементирати више управљачких алгоритама, како би управљачки систем знао који да одабере у датом тренутку. То је могуће урадити тако што се дефинише тачан број различитих случајева који могу да се јаве приликом одвијања производног процеса. За сваки од поменутих случајева, потребно је дефинисати карактеристике које га описују и, експерименталним путем, утврдити који су потребни управљачки параметри (као што су, на примјер, радни притисак у систему и проток ваздуха под притиском), да би се операција рада извршила на оптималан начин.

4. Извршење било које операције рада на оптималан начин подразумева постојање неког критеријума, па је, у складу са тим, потребно дефинисати критеријуме по којима се систем може понашати. На примјер, усвојени критеријуми могу бити продуктивност или енергетска ефикасност.
5. Потребно је омогућити два режима рада система: аутоматски и ручни.
 - У случају аутоматског режима рада, потребно је имплементирати неки систем за детекцију предмета рада (на примјер, у систем интегрисати одговарајући сензорски склоп који помоћу, на примјер, RFID технологије може да бесконтактно чита податке са тагова који се налијељени на предмете рада, или да уписује одговарајуће податке на исте) и елементе коју омогућавају софтверску промјену параметара од значаја (на примјер, у систем интегрисати даљински управљан регулатор притиска како би се омогућила регулација притиска у реалном времену, односно даљински управљан пригушно-неповратни вентил како би се омогућила регулација протока у реалном времену).
 - У случају ручног режима рада, потребно је омогућити промјену управљачких параметара и даљинским путем, у циљу повећања безбједности. То подразумева имплементацију неког начина за даљинско управљање (на примјер, примјену SEyeClon платформе).

Развојем модела за даљинско управљање дигиталним пнеуматским системима у концепту Индустрије 4.0 и његовом имплементацијом на развијени прототип даљински управљаног дигиталног флуидног погона, доказана је и Хипотеза 2, која говори о томе да се, пнеуматски управљачки системи могу формирати тако да буду искључиво софтверски реконфигурабилни (без физичке замјене компоненти), уз могућност даљинске промјене управљачких параметара (протока ваздуха под притиском и/или радног притиска) чиме достижу ниво флексибилности потребан да се задовоље основни концепти Индустрије 4.0. Развој таквих савремених, софтверски реконфигурабилних система захтијева и развој нових компоненти, па су тако, као што је већ раније речено, у склопу ове докторске дисертације, развијена и два прототипа нових компоненти, даљински управљаног пригушно-неповратног вентила и даљински управљаног регулатора притиска (о којима је детаљно било ријечи у потпоглављима 3.4.4 и 3.5.4). Нове компоненте подразумевају и примјену нових симбола, па су, у складу са тим, за поменуте новоразвијене компоненте, и предложени нови симболи (табела 14).

Дакле, сада присутан правац развоја савремених пнеуматских управљачких система подразумева њихово прерастање из облика стандардних мехатроничких у умрежене кибернетско-физичке системе, који омогућавају непрекидан проток информација и правовремену реакцију у складу са тренутним захтјевом. Тиме се омогућава директно побољшање производних процеса, на тај начин што се омогућава производња више различитих врста производа у оквиру исте производне линије, па се, самим тим, скраћује вријеме одговора на специфичне захтјеве купаца, уз уштеду енергије, материјала и новца, што је у складу са основним коцептом Индустрије 4.0.

Табела 14. Новоразвијене компоненте и предложени симболи

Опис	Слика компоненте	Предложени симбол
<p>Даљински управљан пригушно-неповрати вентил</p>		
<p>Даљински управљан регулатор притиска</p>		

ПОГЛАВЉЕ 5 – ЗАКЉУЧЦИ И ПРАВЦИ ДАЉИХ **ИСТРАЖИВАЊА**

Онај реални суд који изражава асерцију правила у супсумираном случају јесте закључак (conclusio).

(Имануел Кант, Критика чистог ума)

Једна од главних карактеристика степена развоја друштва је производња, која има за циљ добијање друштвено корисних производа. Временом, у складу са развојем цивилизације, и производња се мијењала од ручне, преко ручно-механизоване и механизоване, до аутоматизоване. Под аутоматизованом производњом подразумијева се производња при којој је утицај човјека, током производног процеса, сведен на најмању могућу мјеру, али је човјек итекако присутан током самог поступка стварања система, надгледања његовог рада, и слично. Данашњу производњу карактерише нови приступ, који у први план ставља прилагодљивост производње специфичним, индивидуалним захтјевима купаца, при чему се тежи скраћивању времена трајања производног процеса и уштеди енергије. Тај нови приступ са собом доноси нова индустријска револуција, названа Индустрија 4.0.

У складу са претходно наведеним да се закључити да, како би се испунили постављени захтјеви, мора доћи и до унапређења и надградње постојећих производних система неком савременом опремом и комуникационим системима, у сврху омогућавања непрекидне размјене информација и преноса способности одлучивања и доношења одлука на такозване паметне производе, технолошке и производне системе. Према томе, постојећи системи се морају, на одговарајући начин, прилагодити савременим технологијама и достигнућима. Управо захваљујући својој способности да се прилагоде новим електронским и рачунарским технологијама, пнеуматски управљачки системи, већ деценијама, успјешно остају незаобилазан дио индустријских производних процеса. У овој докторској дисертацији, управо је разматрана могућност надградње постојећих и/или имплементације потпуно нових, софтверски реконфигурабилних пнеуматских управљачких система, који су у стању да испрате савремене трендове које доноси Индустрија 4.0.

Један од трендова који доноси Индустрија 4.0 је и даљинско управљање. Имплементација даљинског управљања пнеуматским системима повећава флексибилност и омогућава многе предности због континуалног надгледања процеса рада и управљања истим без директног, физичког контакта са објектом управљања. Слободно се може се рећи и да је посебно значајна у случајевима када приступ систему није безбједан за оператера. У склопу ове докторске дисертације, реализацијом неколико експерименталних

постројења показано је, да је постојеће пнеуматске управљачке системе, могуће надградити тако да се даљинским путем омогући:

- управљање кретањем пнеуматских радних елемената,
- промјена радног притиска у систему чиме се директно утиче на силу, и
- промјена протока ваздуха под притиском чиме се директно утиче на брзину кретања радних елемената.

То је постигнуто на тај начин што су развијени одговарајући уређаји, у које су интегрисани и прототипови новоразвијених компоненти, даљински управљаног пригушно-неповратног вентила и даљински управљаног регулатора притиска. За новоразвијене компоненте су предложени и нови симболи.

Оно што такође, чак и у првом реду, доноси Индустрија 4.0, јесте прилагођавање производног процеса тренутном захтјеву у реалном времену. Да би се то омогућило, потребно је развити и имплементирати управљачки систем који може да оствари што је могуће више различитих функција. У циљу скраћења времена трајања производног циклуса, прилагођавање тренутном захтјеву треба бити изведено искључиво софтверским путем, без физичке замјене компоненти. Реализацијом даљински управљаног дигиталног флуидног погона, уз интеграцију даљински управљаног пригушно-неповратног вентила и даљински управљаног регулатора притиска, показано је да је могуће развити и имплементирати дигитални пнеуматски управљачки систем, који омогућава реализацију више функција као што су:

- даљинско управљање доводом и одводом ваздуха под притиском,
- даљинско управљање кретањем и позиционирањем пнеуматских радних елемената,
- даљинска промјена притиска у систему, и
- даљинска промјена протока ваздуха под притиском.

На поменутом експерименталном постројењу, тестиран је модел за даљинско управљање дигиталним пнеуматским системима у концепту Индустрије 4.0, који представља посебан допринос ове докторске дисертације, и који омогућава аутономан рад система у складу са изабраним критеријумом:

- продуктивности (минимално вријеме завршетка операције рада), или
- енергетске ефикасности (минимална потрошња ваздуха под притиском).

Примјена резултата добијених истраживањем у оквиру ове докторске дисертације могућа је у свим индустријским, а потом и неиндустријским системима, у којима постоје радни елементи који се снабдијевају ваздухом под притиском.

Будуће истраживање биће усмјерено на даље праћење савремених трендова Индустрије 4.0 и даље усавршавање развијених система. Притом, посебна пажња биће посвећена даљем развоју даљински управљаног пригушно-неповратног вентила и даљински управљаног регулатора притиска, како би исти, постали комерцијално доступни на тржишту. Да би се то и остварило, поменуте компоненте потребно је додатно усавршити:

- имплементацијом Wi-Fi комуникације,
- увођењем интерног напајања употребом батерије,
- смањивањем габаритног простора замјеном постојећих елемената новим, и слично.

Додатно, потребно је даље радити на усавршавању постојећих управљачких алгоритама за новоразвијене компоненте, на примјер, увођењем повратне спреге, како би се постојеће грешке што више смањиле и како би се добили још бољи резултати. Такође, потребно је даље радити и на усвршавању постојећих

управљачких алгоритама за позиционирање пнеуматских радних елемената примјеном PWM управљања, како би се грешке позиционирања елиминисале, а систем учинио питомијим за корисника.

У циљу имплементације модела за даљинско управљање дигиталним пнеуматским системима на неки индустријски уређај за руковање предметима рада, након усавршавања постојећих компоненти и постојећих управљачких алгоритама, исти ће бити примијењен на даљински управљаном пнеуматском кружном манипулатору, при чему ће бити омогућене различите изведбе истог, детаљно описане у потпоглављу 3.2.1 (трансформације манипулатора за прилагођавање различитим врстама пнеуматског управљања). Након тога, биће извршена и интеграција манипулатора у сложеније системе. Заједно са индустријским роботима и неким другим манипулаторима за обраду, монтажу, и слично, пнеуматски кружни манипулатор формира праве, комплексне аутоматизоване ћелије, идентичне индустријским. У таквим ћелијама могуће је вршити различите симулације процеса рада и испитивати различите утицаје, а све у циљу додатног побољшања ефикасности производних процеса.

ЛИТЕРАТУРА

- [1] Д. Зеленовић, *Пројектовање производних система*, седмо издање, Нови Сад: Универзитет у Новом Саду, Факултет техничких наука, 2012.
- [2] И. Ћосић, Д. Шешлија, П. Видицки, *Основе индустријског инжењерства и менаџмента - системски прилаз*, друго издање. Нови Сад: Универзитет у Новом Саду, Факултет техничких наука, 2018.
- [3] N. von Tunzelmann, “Historical coevolution of governance and technology in the industrial revolutions,” *Struct. Chang. Econ. Dyn.*, vol. 14, no. 4, pp. 365–384, 2003.
- [4] N. von Tunzelmann, “Innovation and Industrialization: A Long-Term Comparison,” *Technol. Forecast. Soc. Change*, vol. 56, no. 1, pp. 1–23, 1997.
- [5] E. Hobsbawm, *Doba revolucije*. Zagreb: Školska knjiga, 1987.
- [6] VDI nachrichten, “Industrie 4.0: Mit dem Internet der Dinge auf dem Weg zur 4. industriellen Revolution.” [Online]. Available: <https://www.vdi-nachrichten.com/Technik-Gesellschaft/Industrie-40-Mit-Internet-Dinge-Weg-4-industriellen-Revolution>, 01.04.2011. [Accessed: 12-Oct-2018].
- [7] Industrie 4.0 Working Group, “Recommendations for implementing the strategic initiative INDUSTRIE 4.0 - Final report of the Industrie 4.0 Working Group,” 2013.
- [8] “How Will Industry 4.0 Impact U.S Manufacturing?” [Online]. Available: <https://www.augmate.io/how-will-industry-4-0-impact-u-s-manufacturing/>. [Accessed: 24-Nov-2018].
- [9] A. Rojko, “Industry 4.0 Concept: Background and Overview,” *Int. J. Interact. Mob. Technol.*, vol. 11, no. 5, pp. 77–90, 2017.
- [10] Y. Liao, F. Deschamps, E. de F. R. Loures, L. F. P. Ramos, “Past, present and future of Industry 4.0 - a systematic literature review and research agenda proposal,” *Int. J. Prod. Res.*, vol. 55, no. 12, pp. 3609–3629, 2017.
- [11] V. Roblek, M. Meško, A. Krapež, “A Complex View of Industry 4.0,” *SAGE Open*, vol. 6, no. 2, pp. 1–11, 2016.
- [12] A. Gilchrist, *Industry 4.0: The Industrial Internet of Things*. Nonthaburi: Apress, 2016.
- [13] H. Lasi, H. G. Kemper, P. Fettke, T. Feld, M. Hoffmann, “Industry 4.0,” *Bus. Inf. Syst. Eng.*, vol. 6, no. 4, pp. 239–242, 2014.
- [14] “Qualification for Industry 4.0.” [Online]. Available: <https://www.festo-didactic.com/int-en/highlights/qualification-for-industry-4-0/?fbid=aW50LmVuLjU1Ny4xNy4xMC43NDMwLjQzMjg>. [Accessed: 17-Oct-2019].
- [15] S. Wang, J. Wan, D. Zhang, D. Li, C. Zhang, “Towards smart factory for industry 4.0: A self-organized multi-agent system with big data based feedback and coordination,” *Comput. Networks*, vol. 101, pp. 158–168, 2016.

- [16] T. Stock, G. Seliger, “Opportunities of Sustainable Manufacturing in Industry 4.0,” *Procedia CIRP*, vol. 40, pp. 536–541, 2016.
- [17] M. A. K. Bahrin, M. F. Othman, N. H. N. Azli, M. F. Talib, “Industry 4.0: A Review on Industrial Automation and Robotic,” *J. Teknol.*, vol. 6, no. 13, pp. 137–143, 2016.
- [18] E. Hofmann, M. Rüsich, “Industry 4.0 and the current status as well as future prospects on logistics,” *Comput. Ind.*, vol. 89, pp. 23–34, 2017.
- [19] R. Y. Zhong, X. Xu, E. Klotz, S. T. Newman, “Intelligent Manufacturing in the Context of Industry 4.0: A Review,” *Engineering*, vol. 3, no. 5, pp. 616–630, 2017.
- [20] M. Brettel, N. Friederichsen, M. Keller, M. Rosenberg, “How Virtualization, Decentralization and Network Building Change the Manufacturing Landscape: An Industry 4.0 Perspective,” *Int. J. Mech. Aer. Ind. Mech. Man. Eng.*, vol. 8, no. 1, pp. 37–44, 2014.
- [21] D. Kolberg, D. Zühlke, “Lean Automation enabled by Industry 4.0 Technologies,” *IFAC-PapersOnLine*, vol. 48, no. 3, pp. 1870–1875, 2015.
- [22] T. H. J. Uhlemann, C. Lehmann, R. Steinhilper, “The Digital Twin: Realizing the Cyber-Physical Production System for Industry 4.0,” *Procedia CIRP*, vol. 61, pp. 335–340, 2017.
- [23] D. Wohlfeld, V. Weiss, B. Becker, “Digital Shadow – From production to product,” in *17th Stuttgart International Symposium Automotive and Engine Technology, Stuttgart, Germany, March 14, 2017 - March 15, 2017*, pp. 783–794.
- [24] B. Bajči, D. Šešlija, V. Reljić, I. Milenković, S. Dudić, J. Šulc, “Augmented Reality as an Advanced Learning Tool for Pneumatic Control,” in *5th Experiment@International Conference, Funchal (Madeira Island, Portugal, June 12, 2019 - June 14, 2019)*, pp. 415–418.
- [25] B. Bajči *et al.*, “Work-in-Progress: Development of Augmented Reality Application for Learning Pneumatic Control,” in *16th International Conference on Remote Engineering and Virtual Instrumentation, Bengaluru, India, February 03, 2019 - February 06, 2019*, pp. 711–718.
- [26] R. Masoni *et al.*, “Supporting Remote Maintenance in Industry 4.0 through Augmented Reality,” *Procedia Manuf.*, vol. 11, pp. 1296–1302, 2017.
- [27] I. Maly, D. Sedlacek, P. Leitao, “Augmented reality experiments with industrial robot in industry 4.0 environment,” in *IEEE International Conference on Industrial Informatics, Poitiers, France, July 19, 2016 - July 21, 2016*, 2017, pp. 176–181.
- [28] J. Kovar, K. Muralova, F. Ksica, J. Kroupa, O. Andrs, Z. Hadas, “Virtual reality in context of Industry 4.0 proposed projects at Brno University of Technology,” in *17th Int. Conf. Mechatronics - Mechatronika, Prague, Czech Republic, December 7, 2016 - December 9, 2016*, pp. 1–7.
- [29] J. Томић, М. Миловановић, *Виртуална инструментација применом LabVIEW програма*. Нови Сад: Универзитет у Новом Саду, Факултет техничких наука, 2012.
- [30] P. J. Mosterman, J. Zander, “Industry 4.0 as a Cyber-Physical System study,” *Softw. Syst. Model.*, vol. 15, no. 1, pp. 17–29, 2016.
- [31] C. Liu, P. Jiang, “A Cyber-physical System Architecture in Shop Floor for Intelligent Manufacturing,” *Procedia CIRP*, vol. 56, pp. 372–377, 2016.
- [32] P. Poonpakdee, J. Koiwanit, C. Yuangyai, “Decentralized Network Building Change in Large Manufacturing Companies towards Industry 4.0,” *Procedia Comput. Sci.*, vol. 110, pp. 46–53, 2017.
- [33] D. Zelenović, “Flexibility—a condition for effective production systems,” *Int. J. Prod. Res.*, vol. 20, no. 3, pp. 319–337, 1982.
- [34] M. Groover, *Automation, Production Systems and Computer Integrated Manufacturing*, 2nd ed. New Jersey: Prentice Hall, 2001.
- [35] A. De Toni, S. Tonchia, “Manufacturing flexibility: A literature review,” *Int. J. Prod. Res.*, vol. 36, no. 6, pp. 1587–1617, 1998.
- [36] H. A. El Maraghy, “Flexible and reconfigurable manufacturing systems paradigms,” *Flex. Serv. Manuf. J.*, vol. 17, no. 4, pp. 261–276, 2006.
- [37] P. H. Brill, M. Mandelbaum, “On measures of flexibility in manufacturing systems,” *Int. J. Prod. Res.*, vol. 27, no. 5, pp. 747–756, 1989.

- [38] D. D. Yao, J. A. Buzacott, "Modelling the performance of flexible manufacturing systems," *Int. J. Prod. Res.*, vol. 23, no. 5, pp. 945–959, 1985.
- [39] M. Barad, D. Sipper, "Flexibility and Types of Changes in FMSs: A Timed Petri-Nets Assessment of Machine Flexibility," *Int. J. Adv. Manuf. Technol.*, vol. 5, pp. 292–306, 1990.
- [40] Д. Зеленовић, Ј. Годоровић, *Теорија поузданости техничких система*, пето издање, Нови Сад: Универзитет у Новом Саду, Факултет техничких наука, 2004.
- [41] D. J. Bennett, B. W. Jenney, "Reliability: Its Implications Systems Design in Production," *Int. J. Manag. Science*, vol. 3, no. 4, pp. 433–440, 1980.
- [42] O. Kaplinski, M. Milosz, "Reliability of complex production systems," *Civ. Eng. Syst.*, vol. 13, no. 1, pp. 61–73, 1996.
- [43] K. Windt, M. T. Hütt, "Exploring due date reliability in production systems using data mining methods adapted from gene expression analysis," *CIRP Ann. - Manuf. Technol.*, vol. 60, no. 1, pp. 473–476, 2011.
- [44] E. A. Elsayed, R. E. Turley, "Reliability analysis of production systems with buffer storage," *Int. J. Prod. Res.*, vol. 18, no. 5, pp. 637–645, 1980.
- [45] L. Görkemli, S. K. Ulusoy, "Fuzzy Bayesian reliability and availability analysis of production systems," *Comput. Ind. Eng.*, vol. 59, no. 4, pp. 690–696, 2010.
- [46] С. Турајлић, *Програмабилни логички контролери*. Београд: Универзитет у Београду, Електротехнички факултет, 2011.
- [47] M. G. Golzar, H. R. Tajozakerin, "A new intelligent remote control system for home automation and reduce energy consumption," in *Asia Modelling Symposium 2010 - 4th International Conference on Mathematical Modelling and Computer Simulation, Kota Kinabalu, Malaysia, May 26, 2010 - May 28, 2010*, pp. 174–180.
- [48] Y. Erol, H. H. Balik, S. Inal, D. Karabulut, "Safe and Secure PIC Based Remote Control Application for Intelligent Home," *Int. J. Comput. Sci. Netw. Secur.*, vol. 7, no. 5, pp. 179–182, 2007.
- [49] M. Eremia, L. Toma, M. Sanduleac, "The Smart City Concept in the 21st Century," *Procedia Eng.*, vol. 181, pp. 12–19, 2017.
- [50] T. Bakici, E. Almirall, J. Wareham, "A Smart City Initiative: The Case of Barcelona," *J. Knowl. Econ.*, vol. 4, no. 2, pp. 135–148, 2013.
- [51] F. Leccese, "Remote-control system of high efficiency and intelligent street lighting using a zig bee network of devices and sensors," *IEEE Trans. Power Deliv.*, vol. 28, no. 1, pp. 21–28, 2013.
- [52] R. Caponetto, G. Dongola, L. Fortuna, N. Riscica, D. Zufacchi, "Power consumption reduction in a remote controlled street lighting system," in *International Symposium on Power Electronics, Electrical Drives, Automation and Motion, Ischia, Italy, June 11, 2008 - June 13, 2008*, pp. 428–433.
- [53] "Sistem za telemenadzment." [Online]. Available: http://www.minel-schreder.rs/sr/tehnika_osvetljenja/telemenadzment.html. [Accessed: 25-Nov-2018].
- [54] K. R. Thorp, L. F. Tian, "A review on remote sensing of weeds in agriculture," *Precis. Agric.*, vol. 5, no. 5, pp. 477–508, 2004.
- [55] D. J. Mulla, "Twenty five years of remote sensing in precision agriculture: Key advances and remaining knowledge gaps," *Biosyst. Eng.*, vol. 114, no. 4, pp. 358–371, 2013.
- [56] W. G. M. Bastiaanssen, D. J. Molden, I. W. Makin, "Remote sensing for irrigated agriculture: Examples from research and possible applications," *Agric. Water Manag.*, vol. 46, no. 2, pp. 137–155, 2000.
- [57] N. Wang, N. Zhang, M. Wang, "Wireless sensors in agriculture and food industry - Recent development and future perspective," *Comput. Electron. Agric.*, vol. 50, no. 1, pp. 1–14, 2006.
- [58] N. Bukvić, S. Sivčev, V. Reljić, Z. Vranešević, "Didaktički model staklenika sa mehatroničkim elementima," *XIII međunarodni naučno-stručni simpozijum INFOTEH-JAHORINA 2014, Jahorina, Republika Srpska (BiH), 19. mart, 2014 - 21. mart, 2014*, pp. 1165–1168.
- [59] "ZGSM." [Online]. Available: <https://www.zgsm-china.com/>. [Accessed: 24-Oct-2019].
- [60] "CEyeClon platforma." [Online]. Available: <http://ceyclon.com/en/home/>. [Accessed: 25-Nov-2018].

- [61] V. Reljić, I. Milenković, B. Bajči, D. Šešlija, J. Šulc, “Remotely controlled compressed air spring- Design and implementation for distance education,” *Comput. Appl. Eng. Educ.*, vol. 26, no. 6, pp. 2131–2140, 2018.
- [62] T. Zurcher, “Distance education in energy efficient drive technologies by using remote workplace,” in *11th International Conference on Remote Engineering and Virtual Instrumentation, Porto, Portugal, February 26, 2014 - February 28, 2014*, pp. 139–143.
- [63] V. Reljić, B. Bajči, J. Šulc, D. Šešlija, S. Dudić, “Remote Control of Pneumatic Circular Manipulator Using CEyeClon Platform,” in *4th Experiment@ International Conference, Faro, Portugal, June 6, 2017 – June 8, 2017*, pp. 103–104.
- [64] D. Lowe, P. Newcombe, B. Stumpers, “Evaluation of the Use of Remote Laboratories for Secondary School Science Education,” *Res. Sci. Educ.*, vol. 43, no. 3, pp. 1197–1219, 2013.
- [65] L. Gomes, S. Bogosyan, “Current trends in remote laboratories,” *IEEE Trans. Ind. Electron.*, vol. 56, no. 12, pp. 4744–4756, 2009.
- [66] M. Bjekić, M. Šćurović, M. Božić, M. Rosić, S. Antić, “Using computer for measurement and visualization of rotating magnetic field in AC machines,” *Comput. Appl. Eng. Educ.*, vol. 25, no. 4, pp. 608–624, 2017.
- [67] B. Popović, N. Popović, D. Mijić, S. Stankovski, G. Ostojić, “Remote control of laboratory equipment for basic electronics courses: A LabVIEW-based implementation,” *Comput. Appl. Eng. Educ.*, vol. 21, no. S1, pp. E110–E120, 2013.
- [68] B. R. P. Chandra, K. P. Geevarghese, K. V. Gangadharan, “Design and Implementation of Remote Mechatronics Laboratory for e-Learning Using LabVIEW and Smartphone and Cross-platform Communication Toolkit (SCCT),” *Procedia Technol.*, vol. 14, pp. 108–115, 2014.
- [69] M. Casini, A. Garulli, A. Giannitrapani, A. Vicino, “A remote lab for experiments with a team of mobile robots,” *Sensors*, vol. 14, no. 9, pp. 16486–16507, 2014.
- [70] F. W. Bruns, H.-H. Erbe, “Remote Learning of Mechatronics,” *IFAC Proc. Vol.*, vol. 37, no. 19, pp. 7–16, 2004.
- [71] Y. Daineko, V. Dmitriyev, M. Ipalakova, “Using virtual laboratories in teaching natural sciences: An example of physics courses in university,” *Comput. Appl. Eng. Educ.*, vol. 25, no. 1, pp. 39–47, 2017.
- [72] F. A. Senese, C. Bender, J. Kile, “The internet chemistry set: web-based remote laboratories for distance education in chemistry,” *Interact. Multimed. Electron. J. Comput. Learn.*, vol. 2, no. 2, pp. 4–7, 2002.
- [73] A. Klein, G. Wozny, “Web Based Remote Experiments for Chemical Engineering Education. The Online Distillation Column,” *Educ. Chem. Eng.*, vol. 1, no. 1, pp. 134–138, 2006.
- [74] A. M. Josceanu, P. Postelnicescu, A. M. Dumitrescu, V. Plesu, C. Stefan, “Remote Control Experiments in Chemical Engineering,” *Chem. Eng. Trans.*, vol. 18, pp. 1–6, 2009.
- [75] A. Güllü, O. Aki, H. Kuscü, “Remote Access for Education and Control of Mechatronics Systems,” *Procedia - Soc. Behav. Sci.*, vol. 176, pp. 1050–1055, 2015.
- [76] A. Melkonyan, D. Akopian, C. L. P. Chen, “Work in Progress - Real-time remote internet-based communication laboratory,” in *39th Frontiers in Education Conference, San Antonio, USA, October 18-, 2009- October 21, 2009*, pp. 1–6.
- [77] D. Šešlija, R. Doroslovački, V. Katić, D. Vilotić, I. Kovačević, “Razvoj udaljenih eksperimenata na inženjerskim studijskim programima,” *XXII Skup TRENDovi RAZVOJA: “NOVE TEHNOLOGIJE U NASTAVI”*, Zlatibor, Srbija, 16. februar, 2016 - 19. februar, 2016, pp. 1–8.
- [78] M. Tawfik *et al.*, “Shareable educational architectures for remote laboratories,” in *Technologies Applied to Electronics Teaching Conference, Vigo, Spain, June 13, 2012 – June 15, 2012*, pp. 122–127.
- [79] J. García-Zubia, P. Orduña, D. López-de-Ipiña, G. R. Alves, “Addressing software impact in the design of remote laboratories,” *IEEE Trans. Ind. Electron.*, vol. 56, no. 12, pp. 4757–4767, 2009.
- [80] B. Bajči, S. Dudić, J. Šulc, I. Milenković, D. Šešlija, V. Reljić, “Remote system for measuring geometric tolerances: Roundness,” in *13th International Conference on Remote Engineering and Virtual Instrumentation, Madrid, Spain, February 24, 2016 - February 26, 2016*, pp. 285–286.

- [81] E. Haque, F. Ahmed, S. Das, K. M. Salim, "Implementation of remote laboratory for engineering education in the field of Power electronics and Telecommunications," in *3rd International Conference on Advances in Electrical Engineering, Dhaka, Bangladesh, December 17, 2015 - December 19, 2015*, pp. 213–216.
- [82] J. Šulc, B. Bajči, V. Reljić, I. Milenković, D. Šešlija, S. Dudić, "Automatic manipulator for remote measurement of linear dimensions—development and integration in education courses," *Comput. Appl. Eng. Educ.*, vol. 26, no. 4, pp. 947–958, 2018.
- [83] National Instruments, "Distance-learning remote laboratories using LabVIEW," 2006.
- [84] V. Reljić, D. Šešlija, S. Dudić, I. Milenković, J. Šulc, B. Bajči, "Upravljanje na daljinu pneumatskim kružnim manipulatorom," *XXII Skup TRENDOMI RAZVOJA: "NOVE TEHNOLOGIJE U NASTAVI"*, Zlatibor, Srbija, 16. februar, 2016 - 19. februar, 2016, pp. 1–4.
- [85] V. Reljić, B. Bajči, J. Šulc, D. Šešlija, S. Dudić, "Remote control of pneumatic circular manipulator using CompactRIO controller," in *6th International Conference TECHNICS AND INFORMATICS IN EDUCATION, Čačak, Serbia, May 28, 2016 - May 29, 2016*, pp. 385–390.
- [86] Д. Кнежевић, Д. Шешлија, А. Милашиновић, С. Лалаш, *Уљна хидраулика и пнеуматика*. Бања Лука: Универзитет у Бањој Луци, Машински факултет, 2018.
- [87] С. Дудић, Д. Шешлија, И. Милenković, Ј. Шулиц, В. Релић, Б. Бајчи, *Збирка решених задатака са теоријским оснaвaма из пнеуматског управљања*. Нови Сад: Универзитет у Новом Саду, Факултет техничких наука, 2017.
- [88] М. Стојиљковић, *Логичка синтеза пнеуматског управљања*. Ниш: Универзитет у Нишу, Машински факултет, 2002.
- [89] A. A. M. Faudzi, K. Suzumori, S. Wakimoto, "Development of an intelligent pneumatic cylinder for distributed physical human-machine interaction," *Adv. Robot.*, vol. 23, no. 1–2, pp. 203–225, 2009.
- [90] K. Suzumori, J. Tanaka, T. Kanda, "Development of an intelligent pneumatic cylinder and its application to pneumatic servo mechanism," in *International Conference on Advanced Intelligent Mechatronics, Monterey, USA, July 24, 2005 - July 28, 2005*, pp. 479–484.
- [91] R. Bublitz, H. Murrenhoff, "Intelligent proportional pneumatic valves and drives for field bus applications," in *5th International Symposium on Fluid Power, Nara, Japan, November 12, 2002 - November 15, 2002*, pp. 727–732.
- [92] K. Osman, A. A. M. Faudzi, M. F. Rahmat, N. D. Mustafa, M. A. Azman, K. Suzumori, "System Identification model for an Intelligent Pneumatic Actuator (IPA) system," in *IEEE International Conference on Intelligent Robots and Systems, Vilamoura, Portugal, October 7, 2012 - October 12, 2012*, pp. 628–633.
- [93] V. Blagojević, D. Šešlija, M. Stojiljković, S. Dudić, "Efficient control of servo pneumatic actuator system utilizing by-pass valve and digital sliding mode," *Sadhana - Acad. Proc. Eng. Sci.*, vol. 38, no. 2, pp. 187–197, 2013.
- [94] D. X. Ba, T. Q. Dinh, K. K. Ahn, "An Integrated Intelligent Nonlinear Control Method for a Pneumatic Artificial Muscle," *IEEE/ASME Trans. Mechatronics*, vol. 21, no. 4, pp. 1835–1845, 2016.
- [95] M. Yamazaki, S. Yasunobu, "An intelligent control for state-dependent nonlinear actuator and its application to pneumatic servo system," in *SICE Annual Conference, Takamatsu (Kagawa), Japan, September 17, 2007 - September 20, 2007*, pp. 2194–2199.
- [96] S. Čajetinac, D. Šešlija, S. Aleksandrov, M. Todorović, "PWM control and identification of frequency characteristics of a pneumatic actuator using PLC controller," *Elektron. ir Elektrotehnika*, vol. 123, no. 7, pp. 21–26, 2012.
- [97] K. Ahn, S. Yokota, "Intelligent switching control of pneumatic actuator using on/off solenoid valves," *Mechatronics*, vol. 15, no. 6, pp. 683–702, 2005.
- [98] S. Čajetinac, D. Šešlija, V. Nikolić, M. Todorović, "Comparison of PWM control of pneumatic actuator based on energy efficiency," *Facta Univ. - Ser. Electron. Energ.*, vol. 25, no. 2, pp. 93–101, 2012.
- [99] A. Messina, N. I. Giannoccaro, A. Gentile, "Experimenting and modelling the dynamics of pneumatic actuators controlled by the pulse width modulation (PWM) technique," *Mechatronics*, vol. 15, no. 7, pp. 859–881, 2005.

- [100] M. C. Shih, M. A. Ma, "Position control of a pneumatic cylinder using fuzzy PWM control method," *Mechatronics*, vol. 8, no. 3, pp. 241–253, 1998.
- [101] M. Taghizadeh, A. Ghaffari, F. Najafi, "Modeling and identification of a solenoid valve for PWM control applications," *Comptes Rendus - Mec.*, vol. 337, no. 3, pp. 131–140, 2009.
- [102] "Digital simplicity: Festo Motion Terminal VTEM." [Online]. Available: <https://www.festo.com/vtem/nl/cms/motion-terminal.htm>. [Accessed: 28-Nov-2018].
- [103] German Institute for Standardisation (Deutsches Institut für Normung), *DIN 19226:1968: CONTROL ENGINEERING - DEFINITIONS AND TERMS*. 1968.
- [104] Д. Марчетић, М. Гецић, Б. Марчетић, *Програмабилни логички контролери и комуникациони протоколи у електроенергетици*, треће издање, Нови Сад: Универзитет у Новом Саду, Факултет техничких наука, 2016.
- [105] В. Поробић, *Програмабилни логички контролери и комуникациони протоколи у електроенергетици - примери са решењима*, друго издање, Нови Сад: Универзитет у Новом Саду, Факултет техничких наука, 2016.
- [106] С. Станковски, Г. Остојић, М. Раковић, Ј. Тарјан, И. Шенк, М. Николић, *Збирка решених задатака из: Програмирања и примене програмабилних логичких контролера*. Нови Сад: Универзитет у Новом Саду, Факултет техничких наука, 2009.
- [107] H. Meixner, R. Kobler, *Uvod u pneumatiku*. Novi Sad: Univerzitet u Novom Sadu, Fakultet tehničkih nauka, 1979.
- [108] P. Qian, G. Tao, J. Chen, B. Lu, "Modeling and Simulation of Stick-Slip Motion for Pneumatic Cylinder Based on Meter-In Circuit," *Appl. Mech. Mater.*, vol. 130–134, pp. 775–780, 2012.
- [109] W. Gauchel, "Energy-saving pneumatic systems," *O+P Oelhydraulik und Pneum.*, vol. 50, no. 1, pp. 1–22, 2006.
- [110] S. Campbell, "Guidelines for Selecting Pneumatic Cylinders," 2011. [Online]. Available: <https://www.machinedesign.com/pneumatics/guidelines-selecting-pneumatic-cylinders>. [Accessed: 13-Nov-2019].
- [111] Festo Didactic, *Pneumatics - Basic level, Workbook TP 101*. Festo, 2019.
- [112] D. Šešlija, S. Dudić, I. Milenković, "Cost effectiveness analysis of pressure regulation method on pneumatic cylinder circuit," *Int. Energy J.*, vol. 17, no. 2, pp. 89–98, 2017.
- [113] "Festo Electrical Pressure Regulators MS6N-LRE." [Online]. Available: <https://www.festo.com/media/pim/713/D15000100122713.PDF>. [Accessed: 14-Nov-2019].
- [114] С. Чајетинац, "Прилог развоју модела одлучивања за избор електропнеуматског управљања," докторска дисертација, Универзитет у Новом Саду, Факултет техничких наука, 2012.
- [115] M. Linjama, "Digital fluid power - State of art," in *12th Scandinavian International Conference on Fluid Power, Tampere, Finland, May 18, 2011 - May 20, 2011*, pp. 1–23.
- [116] M. Sorli, S. Pastorelli, "Performance of a pneumatic force controlling servosystem: Influence of valves conductance," *Rob. Auton. Syst.*, vol. 30, no. 3, pp. 283–300, 2000.
- [117] P. Greshniakov, H. Handroos, V. Sverbilov, "Position control of pneumatic cylinder actuated by low-cost on / off valves pulse number modulation," in *Global Fluid Power Society PhD Symposium, Samara, Russia, July 18, 2018 - July 20, 2018*, 2018, pp. 1–7.
- [118] C.-Y. Cheng, J.-C. Renn, "Improving the Steady-State Response of Full-Digital Pneumatic Motor Speed Control Using Two-Step Current Control Scheme," in *International Symposium on Computer, Consumer and Control, Taichung, Taiwan, June 4, 2012 - June 6, 2012*, pp. 573–576.
- [119] C. Ferraresi, "A new PCM-PWM combined technique for pneumatic flow-regulating valves," in *Joint Hungarian–British Mechatronics Conference, September 21, 1994 - September 23, 1994, Budapest*, pp. 385–390.
- [120] E. J. Barth, Jianlong Zhang, M. Goldfarb, "Sliding mode approach to PWM-controlled pneumatic systems," in *Am. Control Conf. (IEEE Cat. No.CH37301), Anchorage, USA, May 8, 2002 - May 10, 2002*, pp. 2362–2367.
- [121] F. Rickenberg, "Valve," US Patent No. 1757059, 1930.

- [122] R. Ballard, "System for minimizing skidding," US Patent No. 3528708, 1968.
- [123] E. De Carolis, "Using Pneumatics for IIoT," 2019. [Online]. Available: <https://www.machinedesign.com/iiot/using-pneumatics-iiot>. [Accessed: 19-Nov-2019].
- [124] R. Scheidl, M. Linjama, S. Schmidt, "Is the future of fluid power digital?," *Proc. Inst. Mech. Eng. Part I J. Syst. Control Eng.*, vol. 226, no. 6, pp. 721–723, 2012.
- [125] R. Brandstetter, T. Deubel, R. Scheidl, B. Winkler, K. Zeman, "Digital hydraulics and 'industrie 4.0,'" *Proc. Inst. Mech. Eng. Part I J. Syst. Control Eng.*, vol. 231, no. 2, pp. 82–93, 2017.
- [126] P. Drumea, I. Pavel, G. Matache, "Digital hydraulic motors," in *International Conference on Hydraulics and Pneumatics, Baile Govora, Romania, November 9, 2016 - November 11, 2016*, pp. 50–55.
- [127] P. Drumea, R. Radoi, B. Tudor, I. Bordeasu, "Digital hydraulics solutions," in *International Conference on Hydraulics and Pneumatics, Baile Govora, Romania, November 9, 2016 - November 11, 2016*, pp. 73–79.
- [128] N. Ye, S. Scavarda, M. Betemps, A. Jutard, "Models of a Pneumatic PWM Solenoid Valve for Engineering Applications," *J. Dyn. Syst. Meas. Control*, vol. 114, no. 4, pp. 680–688, 1992.
- [129] P. Abreu, M. De Fatima Chou Zal, J. S. Valiente, L. De La Torre, M. T. Restivo, "Remote experiments with pneumatic circuit using a double rod cylinder," in *5th Experiment@ International Conference, Funchal (Madeira Island), Portugal, June 12, 2019 - June 14, 2019*, pp. 410–414.
- [130] M. B. R. M. Francisco, M. J. G. C. Mendes, J. M. F. Calado, "An Electro-pneumatic Prototype to Support the Teaching of Industry 4.0 Concepts," in *5th Experiment@ International Conference, Funchal (Madeira Island), Portugal, June 12, 2019 - June 14, 2019*, pp. 428–433.
- [131] V. Reljić, D. Šešlija, I. Milenković, B. Bajči, S. Dudić, J. Šulc, "Concept of remotely controlled digital pneumatic system in accordance with Industry 4.0 approach," in *5th Experiment@ International Conference, Funchal (Madeira Island), Portugal, June 12, 2019 - June 14, 2019*, pp. 419–423.
- [132] К. Попер, *Логика научног открића*. Београд: НОЛИТ, 1973.
- [133] Н. Сесардић, *Филозофија науке*. Београд: НОЛИТ, 1980.
- [134] A. Graziano, M. Raulin, *Research Methods: A Process of Inquiry*, 8th ed. Boston: Pearson International Edition, Allyn & Bacon, 2013.
- [135] V. Reljić, B. Bajči, I. Milenković, J. Šulc, D. Šešlija, S. Dudić, "Development of an experimental setup for remote testing of pneumatic control," *Int. J. Online Eng.*, vol. 14, no. 1, 2018.
- [136] V. Reljić, D. Šešlija, J. Šulc, B. Bajči, S. Dudić, I. Milenković, "Modular Construction of Circular Manipulator as a Test Bed for Testing Pneumatic Control," in *9th International Symposium KOD 2016 - Machine and Industrial Design in Mechanical Engineering, Balatonfüred, Hungary, June 9, 2016 - June 12, 2016*, pp. 225–228.
- [137] Д. Шешлија, С. Дудић, *Каталог лабораторијских наставних модула са удаљеним експериментима*. Нови Сад: Универзитет у Новом Саду, Факултет техничких наука, 2016.
- [138] "What Is LabVIEW?" [Online]. Available: <https://www.ni.com/en-rs/shop/labview.html>. [Accessed: 24-Nov-2019].
- [139] В. Рељић, И. Миленковић, Д. Шешлија, Ј. Шулиц, С. Дудић, "Даљински управљана пнеуматска опруга," техничко решење М85, Универзитет у Новом Саду, Факултет техничких наука, 2015.
- [140] V. Reljić, P. Vidicki, B. Bajči, D. Šešlija, J. Šulc, "Using of remote controlled pneumatic spring in teaching," in *6th International Conference TECHNICS AND INFORMATICS IN EDUCATION, Čačak, Serbia, May 28, 2016 – May 29, 2016*, pp. 391–396.
- [141] V. Reljić, I. Milenković, D. Šešlija, S. Dudić, J. Šulc, "Development of Remote Controlled Pneumatic Spring," in *12th International Scientific Conference MMA 2015 - Flexible Technologies, Novi Sad, Serbia, September 25, 2015 - September 26, 2015*, pp. 195–198.
- [142] С. Кузмановић, *Машински елементи*. Нови Сад: Универзитет у Новом Саду, Факултет техничких наука, 2007.
- [143] J. Šulc, V. Reljić, B. Bajči, D. Šešlija, T. Buač, "Development of Pneumatic Valve Remote Control," in *8th PSU-UNS International Conference on Engineering and Technology, Novi Sad, Serbia, June 8, 2017 - June 10, 2017*, pp. 1–4.

- [144] B. Bajči, S. Dudić, J. Šulc, V. Reljić, D. Šešlija, I. Milenković, “Demonstration: Using Remotely Controlled One-Way Flow Control Valve for Speed Regulation of Pneumatic Cylinder,” in *15th International Conference on Remote Engineering and Virtual Instrumentation, Duesseldorf, Germany, March 21, 2018 - March 23, 2018*, pp. 144–152.
- [145] В. Релић, Б. Бајчи, Ј. Шулиц, С. Дудић, И. Миленковић, Д. Шешлија, “Уређај за даљинску регулацију ваздуха под притиском,” техничко решење М85, Универзитет у Новом Саду, Факултет техничких наука, 2018.
- [146] “One-way flow control valves GR/GRA, in-line installation.” [Online]. Available: https://www.festo.com/cat/xdki/data/doc_engb/PDF/EN/GRX-VFOI_EN.PDF. [Accessed: 10-Dec-2019].
- [147] “Festo AirBox type GHDA-FQ-M-FDMJ-A – Operating instructions,” 2006.
- [148] Ж. Тришић, “Развој и тестирање даљински управљаног пригушно-неповратног вентила за пнеуматске системе,” дипломски рад, Универзитет у Новом Саду, Факултет техничких наука, 2019.
- [149] “Terminal CPX.” [Online]. Available: https://www.festo.com/net/SupportPortal/Files/425512/CPX-CEC_2014-11c_8042603g1.pdf. [Accessed: 10-Jan-2020].
- [150] М. Ковач, “Развој система за комуникацију између предмета рада и флексибилног пнеуматског система,” дипломски рад, Универзитет у Новом Саду, Факултет техничких наука, 2019.
- [151] С. Плавшић, “Тачност позиционирања пнеуматског погона са ширинско импулсним управљањем,” дипломски рад, Универзитет у Новом Саду, Факултет техничких наука, 2019.
- [152] З. Адамов, “Однос пропорционалног и ширинско импулсног пнеуматског управљања у погледу потрошње и позиционирања,” Нови Сад, дипломски рад, Универзитет у Новом Саду, Факултет техничких наука, 2019.
- [153] “CODESYS.” [Online]. Available: <https://www.codesys.com/>.
- [154] П. Кнежевић, “Развој и тестирање даљински управљаног регулатора притиска за пнеуматске системе,” дипломски рад, Универзитет у Новом Саду, Факултет техничких наука, 2019.
- [155] З. Ердџан, “Испитивање потрошње ваздуха под притиском при различитим вредностима притиска, протока и оптерећења,” дипломски рад, Универзитет у Новом Саду, Факултет техничких наука, 2019.
- [156] Л. Петровић, “Испитивање времена остваривања жељене позиције при различитим вредностима притиска, протока и оптерећења,” дипломски рад, Универзитет у Новом Саду, Факултет техничких наука, 2019.
- [157] The National Electrical Manufacturers Association, *NEMA ICS 61131-1-2005 (R2013) (Formerly NEMA IA 2.1-2005) - Programmable Controllers (PLC), Part 1: General Information*. 2005.
- [158] М. Стојић, *Континуални системи аутоматског управљања*. Београд: Наука, 1996.
- [159] М. Стојић, *Дигитални управљачки системи*, пето издање, Београд: Академска мисао, 2004.
- [160] S. Corrigan, “Application Report - Introduction to the Controller Area Network (CAN),” 2002.
- [161] Д. Обрадовић, *Основи рачунарства*. Нови Сад: Stylos, 2003.
- [162] “C# guide.” [Online]. Available: <https://docs.microsoft.com/en-us/dotnet/csharp/>. [Accessed: 08-Dec-2019].
- [163] Л. Краус, *Програмски језик C са решеним задацима*, седмо издање, Београд: Академска мисао, 2008.
- [164] Л. Краус, *Програмски језик C++ са решеним задацима*, седмо издање, Београд: Академска мисао, 2007.
- [165] “The Java™ Tutorials.” [Online]. Available: <https://docs.oracle.com/javase/tutorial/>. [Accessed: 30-Dec-2019].
- [166] “Bluetooth.” [Online]. Available: <https://www.bluetooth.com/>. [Accessed: 13-Jan-2019].
- [167] С. Милованчев, *Мерења у техници*, Нови Сад: Универзитет у Новом Саду, Факултет техничких наука, 2009.

ПРИЛОГ

Прилог 1. Резултати мјерења постигнуте вриједности протока на новоразвијеном даљински управљаном пригушно-неповратном вентилу

Табела 15. Резултати мјерења постигнутне вриједности протока на новоразвијеном даљински управљаном пригушно-неповратном вентилу при улазном притиску од 2 bar [148]

Жељена вриједност протока ($\frac{l}{min}$)	Постигнута вриједност протока ($\frac{l}{min}$)		
	I	II	III
9	8,94	9	9,23
25	25,51	25,4	25,6
34	34,44	34,63	35,44
52	53,15	52,79	50,98
67	67,33	65,23	67,1

Табела 16. Резултати мјерења постигнутне вриједности протока на новоразвијеном даљински управљаном пригушно-неповратном вентилу при улазном притиску од 5 bar [148]

Жељена вриједност протока ($\frac{l}{min}$)	Постигнута вриједност протока ($\frac{l}{min}$)		
	I	II	III
48	46,4	48,55	48,44
80	81,1	78,56	78,85
128	131,33	131,38	129,69
156	159,4	158,39	159,59
176	174	173,72	174,28

Прилог 2. Резултати позиционирања клипа цилиндра

Табела 17. Резултати позиционирања клипа цилиндра при подизању предмета рада уз степен отворености пригушно-неповратног вентила од 50% са заустављањем у двије међупозиције [152]

Жељена позиција (mm)	Постигнута позиција (mm)				
	I	II	III	IV	V
102	102	101	104	103	102
306	307	305	305	305	309

Табела 18. Резултати позиционирања клипа цилиндра при подизању предмета рада уз степен отворености пригушно-неповратног вентила од 50% са заустављањем само у једној међупозицији [152]

Жељена позиција (mm)	Постигнута позиција (mm)				
	I	II	III	IV	V
498	498	496	500	497	499

Прилог 3. Резултати мјерења времена трајања позиционирања клипа цилиндра у крајњи горњи положај за различите случајеве

Табела 19. Вријеме потребно за подизање предмета рада до крајњег положаја при степену отворености пригушно-неповратног вентила од 90%, за различите случајеве оптерећења и радног притиска

Потребно вријеме [s]		Маса предмета рада [kg]		
		~ 0,5	~ 1	~ 4
Радни притисак [bar]	3	1,52	1,66	2,24
	4	1,20	1,26	1,65
	5	0,90	0,90	1,22
	6	0,85	0,90	1,07

Табела 20. Вријеме потребно за подизање предмета рада до крајњег положаја при степену отворености пригушно-неповратног вентила од 70%, за различите случајеве оптерећења и радног притиска

Потребно вријеме [s]		Маса предмета рада [kg]		
		~ 0,5	~ 1	~ 4
Радни притисак [bar]	3	2,88	3,06	3,78
	4	2,52	2,59	2,69
	5	2,26	2,30	2,40
	6	1,70	1,70	1,92

Табела 21. Вријеме потребно за подизање предмета рада до крајњег положаја при степену отворености пригушно-неповратног вентила од 50%, за различите случајеве оптерећења и радног притиска

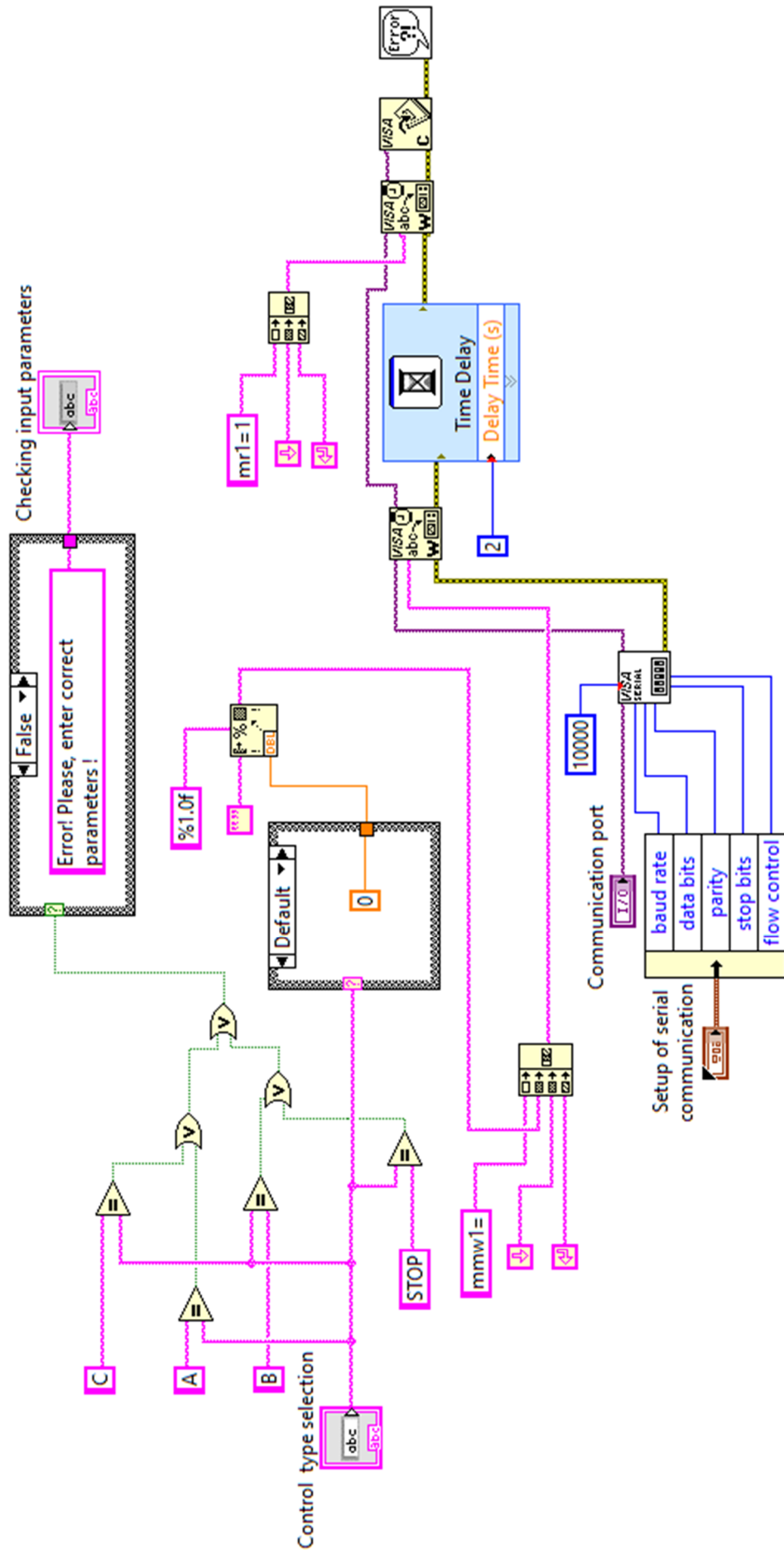
Потребно вријеме [s]		Маса предмета рада [kg]		
		~ 0,5	~ 1	~ 4
Радни притисак [bar]	3	3,68	3,75	5,04
	4	3,52	3,69	4,22
	5	3,22	3,25	3,35
	6	2,95	3,03	3,20

Табела 22. Вријеме потребно за подизање предмета рада до крајњег положаја при степену отворености пригушно-неповратног вентила од 30%, за различите случајеве оптерећења и радног притиска

Потребно вријеме [s]		Маса предмета рада [kg]		
		~ 0,5	~ 1	~ 4
Радни притисак [bar]	3	6,22	6,30	7,56
	4	5,90	5,95	6,32
	5	5,27	5,34	5,74
	6	4,06	4,12	5,20

Прилог 4. Примјер програмског кода за израду корисничке апликације

Због обимности документације, у овом прилогу приказан је примјер програмског кода једне израђене корисничке апликације. У питању је програмски код за корисничку апликацију под називом „Circular_Manipulator.exe“, која је приказана на слици 41 и која се користи за даљинско управљање пнеуматским кружним манипулатором, а која је развијена у објектно-оријентисаном програмском језику за графичко програмирање LabVIEW.



Слика 78. Програмски код за корисничку апликацију „Circular_Manipulator.exe“

Прилог 5. Примјер програмског кода за ПЛК

Због обимности документације, у овом прилогу приказан је један примјер програмског кода за ПЛК. У питању је програмски код за даљинско управљање пнеуматским кружним манипулатором, који је написан у програмском окружењу FST 4.21, које је специфично само за контролере произвођача Festo, у програмском језику који се назива „Листа инструкција“.

Allocation List

Operand	Symbol	Comment
00.0	AY1	IZVLACENJE IZBACIVACA
00.1	AY2	UVLACENJE IZBACIVACA
00.2	BY1	IZVLACENJE PODIZACA
00.3	BY2	UVLACENJE PODIZACA
00.4	CY1	IZVLACENJE LIJEVOG
00.5	CY2	UVLACENJE LIJEVOG
00.6	DY1	IZVLACENJE DESNOG
00.7	DY2	UVLACENJE DESNOG
01.0	HY1	HVATANJE PREDMETA RADA
01.1	HY2	OTPUSTANJE PREDMETA RADA
I0.0	A0	IZBACIVAC UVUCEN
I0.1	B0	PODIZAC UVUCEN
I0.2	B1	PODIZAC IZVUCEN
I0.3	LIJEVIO	LIJEVI UVUCEN
I0.4	LIJEVII	LIJEVI IZVUCEN
I0.5	DESNI0	DESNI UVUCEN
I0.6	DESNI1	DESNI IZVUCEN
I0.7	H	HVATALJKA
FU32		
R1(U)	REGISTAR1	
R2(U)	REGISTAR2	
T0	TAJMER	

Program 0 (V1) – PROBA

```

0001 STEP INIT
0002
0003 ""----- INICIJALIZACIJA PROMJENLJIVIH -----
""
0004
0005 IF NOP
0006 THEN RESET AY1 'IZVLACENJE IZBACIVACA
0007 SET AY2 'UVLACENJE IZBACIVACA
0008 RESET BY1 'IZVLACENJE PODIZACA
0009 SET BY2 'UVLACENJE PODIZACA
0010 RESET CY1 'IZVLACENJE LIJEVOG
0011 SET CY2 'UVLACENJE LIJEVOG
0012 RESET DY1 'IZVLACENJE DESNOG
0013 SET DY2 'UVLACENJE DESNOG
0014 RESET HY1 'HVATANJE PREDMETA RADA
0015 SET HY2 'OTPUSTANJE PREDMETA RADA
0016 LOAD V0
0017 TO REGISTAR2
0018 LOAD V0
0019 TO REGISTAR1
0020
0021 ""----- OTVORI SERIJSKU KOMUNIKACIJU -----
""
0022
0023 IF NOP
0024 THEN CFM 0 'OPENCOM
0025
0026 IF FU32
0027 = V0
0028 THEN NOP
0029
0030 ""----- UKLJUCIVANJE CI KOMANDI -----""
0031
0032 IF NOP
0033 THEN CFM 2 'F31
0034 WITH V0
0035 WITH V2
0036
0037 STEP
0038
0039 ""----- ZASTITA OD PREKOBROJNOG SLANJA
PODATAKA -----""
0040

```

```

0041 IF REGISTAR2
0042 = V1
0043 THEN
0044 LOAD V0
0045 TO REGISTAR2
0046
0047
0048 STEP
0049
0050 ""----- ISPITIVANJE PRIMLJENOG PODATKA.
IZBOR UPRAVLJANJA -----""
0051
0052 IF REGISTAR1
0053 = V1
0054 THEN
0055 JMP TO 1
0056
0057 IF REGISTAR1
0058 = V2
0059
0060 THEN JMP TO 11
0061
0062 IF REGISTAR1
0063 = V3
0064 THEN JMP TO 21
0065
0066 OTHRW
0067 JMP TO INIT
0068
0069 ""----- OSNOVNI UPRAVLJACKI CIKLUS -----""
0070
0071 STEP 1
0072
0073 IF A0 'IZBACIVAC UVUCEN
0074 AND B0 'PODIZAC UVUCEN
0075 AND LIJEVIO 'LIJEVI UVUCEN
0076 AND DESNI0 'DESNI UVUCEN
0077 THEN RESET AY2 'UVLACENJE IZBACIVACA
0078 SET AY1 'IZVLACENJE IZBACIVACA
0079 SET T0
0080 WITH 5s
0081
0082 STEP 2
0083
0084 IF N T0
0085 THEN RESET AY1 'IZVLACENJE IZBACIVACA
0086 SET AY2 'UVLACENJE IZBACIVACA
0087
0088 STEP 3
0089
0090 IF A0 'IZBACIVAC UVUCEN
0091 AND B0 'PODIZAC UVUCEN
0092 THEN RESET BY2 'UVLACENJE PODIZACA
0093 SET BY1 'IZVLACENJE PODIZACA
0094
0095 STEP 4
0096
0097 IF B1 'PODIZAC IZVUCEN
0098 THEN RESET CY2 'UVLACENJE LIJEVOG
0099 SET CY1 'IZVLACENJE LIJEVOG
0100
0101 STEP 5
0102
0103 IF LIJEVII 'LIJEVI IZVUCEN
0104 THEN
0105 RESET HY2 'OTPUSTANJE PREDMETA RADA
0106 SET HY1 'PRIHVATANJE PREDMETA RADA
0107 SET T0
0108 WITH 3s
0109
0110 STEP 6

```

```

0111
0112 IF H 'HVATALJKA
0113 AND N TO
0114 THEN RESET BY1 'IZVLACENJE PODIZACA
0115 SET BY2 'UVLACENJE PODIZACA
0116
0117
0118 STEP 7
0119
0120 IF B0 'PODIZAC UVUCEN
0121 THEN RESET DY2 'UVLACENJE DESNOG
0122 SET DY1 'IZVLACENJE DESNOG
0123
0124 STEP 8
0125
0126 IF DESNI1 'DESNI IZVUCEN
0127 THEN RESET HY1 'PRIHVATANJE PREDMETA RADA
0128 SET HY2 'OTPUSTANJE PREDMETA RADA
0129 SET T0
0130 WITH 3s
0131 STEP 9
0132
0133 IF N H 'HVATALJKA
0134 AND N TO
0135 THEN RESET CY1 'IZVLACENJE LIJEVOG
0136 RESET DY1 'IZVLACENJE DESNOG
0137 SET CY2 'UVLACENJE LIJEVOG
0138 SET DY2 'UVLACENJE DESNOG
0139 SET T0
0140 WITH 3s
0141
0142 STEP 10
0143
0144 IF N TO
0145 THEN JMP TO INIT
0146
0147 "----- CIKLUS SA ZADRSKOM - DODATNA
OPERACIJA RADA -----"
0148
0149 STEP 11
0150
0151 IF A0 'IZBACIVAC UVUCEN
0152 AND B0 'PODIZAC UVUCEN
0153 AND LIJEVIO 'LIJEVI UVUCEN
0154 AND DESNIO 'DESNI UVUCEN
0155 THEN RESET AY2 'UVLACENJE IZBACIVACA
0156 SET AY1 'IZVLACENJE IZBACIVACA
0157 SET T0
0158 WITH 5s
0159
0160 STEP 12
0161
0162 IF N TO
0163 THEN RESET AY1 'IZVLACENJE IZBACIVACA
0164 SET AY2 'UVLACENJE IZBACIVACA
0165
0166 STEP 13
0167
0168 IF A0 'IZBACIVAC UVUCEN
0169 AND B0 'PODIZAC UVUCEN
0170 THEN RESET BY2 'UVLACENJE PODIZACA
0171 SET BY1 'IZVLACENJE PODIZACA
0172
0173 STEP 13a
0174 IF B1 'PODIZAC IZVUCEN
0175 THEN SET T0
0176 WITH 5s
0177
0178 STEP 14
0179
0180 IF N TO
0181 THEN RESET CY2 'UVLACENJE LIJEVOG
0182 SET CY1 'IZVLACENJE LIJEVOG
0183
0184 STEP 15
0185
0186 IF LIJEVI1 'LIJEVI IZVUCEN
0187 THEN
0188 RESET HY2 'OTPUSTANJE PREDMETA RADA
0189 SET HY1 'PRIHVATANJE PREDMETA RADA
0190 SET T0
0191 WITH 3s
0192
0193 STEP 16

0194
0195 IF H 'HVATALJKA
0196 AND N TO
0197 THEN RESET BY1 'IZVLACENJE PODIZACA
0198 SET BY2 'UVLACENJE PODIZACA
0199
0200
0201 STEP 17
0202
0203 IF B0 'PODIZAC UVUCEN
0204 THEN RESET DY2 'UVLACENJE DESNOG
0205 SET DY1 'IZVLACENJE DESNOG
0206
0207 STEP 18
0208
0209 IF DESNI1 'DESNI IZVUCEN
0210 THEN RESET HY1 'PRIHVATANJE PREDMETA RADA
0211 SET HY2 'OTPUSTANJE PREDMETA RADA
0212 SET T0
0213 WITH 3s
0214
0215 STEP 19
0216
0217 IF N H 'HVATALJKA
0218 AND N TO
0219 THEN RESET CY1 'IZVLACENJE LIJEVOG
0220 RESET DY1 'IZVLACENJE DESNOG
0221 SET CY2 'UVLACENJE LIJEVOG
0222 SET DY2 'UVLACENJE DESNOG
0223 SET T0
0224 WITH 3s
0225
0226 STEP 20
0227
0228 IF N TO
0229 THEN JMP TO INIT
0230
0231 "----- CIKLUS SA IZMJENOM RADA TANDEM
CILINDRA -----"
0232
0233 STEP 21
0234
0235 IF A0 'IZBACIVAC UVUCEN
0236 AND B0 'PODIZAC UVUCEN
0237 AND LIJEVIO 'LIJEVI UVUCEN
0238 AND DESNIO 'DESNI UVUCEN
0239 THEN RESET AY2 'UVLACENJE IZBACIVACA
0240 SET AY1 'IZVLACENJE IZBACIVACA
0241 SET T0
0242 WITH 5s
0243
0244 STEP 22
0245
0246 IF N TO
0247 THEN RESET AY1 'IZVLACENJE IZBACIVACA
0248 SET AY2 'UVLACENJE IZBACIVACA
0249
0250 STEP 23
0251
0252 IF A0 'IZBACIVAC UVUCEN
0253 AND B0 'PODIZAC UVUCEN
0254 THEN RESET BY2 'UVLACENJE PODIZACA
0255 SET BY1 'IZVLACENJE PODIZACA
0256
0257 STEP 24
0258
0259 IF B1 'PODIZAC IZVUCEN
0260 THEN RESET DY2 'UVLACENJE DESNOG
0261 SET DY1 'IZVLACENJE DESNOG
0262
0263 STEP 25
0264
0265 IF DESNI1 'DESNI IZVUCEN
0266 THEN
0267 RESET HY2 'OTPUSTANJE PREDMETA RADA
0268 SET HY1 'PRIHVATANJE PREDMETA RADA
0269 SET T0
0270 WITH 3s
0271
0272 STEP 26
0273
0274 IF H 'HVATALJKA
0275 AND N TO
0276 THEN RESET BY1 'IZVLACENJE PODIZACA

```

0277 SET BY2 'UVLACENJE PODIZACA	0293
0278	0294 IF N H 'HVATALJKA
0279 STEP 27	0295 AND N T0
0280	0296 THEN RESET CY1 'IZVLACENJE LIJEVOG
0281 IF B0 'PODIZAC UVUCEN	0297 RESET DY1 'IZVLACENJE DESNOG
0282 THEN RESET CY2 'UVLACENJE LIJEVOG	0298 SET CY2 'UVLACENJE LIJEVOG
0283 SET CY1 'IZVLACENJE LIJEVOG	0299 SET DY2 'UVLACENJE DESNOG
0284	0300 SET T0
0285 STEP 28	0301 WITH 3s
0286	0302
0287 IF LIJEVI1 'LIJEVI IZVUCEN	0303 STEP 30
0288 THEN RESET HY1 'PRIHVATANJE PREDMETA RADA	0304
0289 SET HY2 'OTPUSTANJE PREDMETA RADA	0305 IF N T0
0290 SET T0	0306 THEN JMP TO INIT
0291 WITH 3s	0307
0292 STEP 29	