



UNIVERZITET U NIŠU
ELEKTRONSKI FAKULTET



Slobodan Č. Aleksandrov

**DALJINSKO UČENJE U MEHATRONICI
ZASNOVANO NA PRIMENI VIRTUELNIH
I REALNIH DIDAKTIČKIH SISTEMA**

doktorska disertacija

Niš, 2015.



University of Niš
Faculty of Electronic Engineering



Slobodan Č. Aleksandrov

**REMOTE LEARNING IN
MECHATRONICS BASED ON VIRTUAL
AND REAL DIDACTIC SYSTEMS**

doctoral dissertation

Niš, 2015.

AUTOR	
Ime i prezime	Slobodan Aleksandrov
Datum rođenja	20.08.1968.

DOKTORSKA DISERTACIJA	
Naziv	Daljinsko učenje u mehatronici zasnovano na primeni virtuelnih i realnih didaktičkih sistema
Broj strana	185+XIV
Broj slika	87
Broj tabela	22
Broj bibliografskih jedinica	84
Ustanova gde je rađena disertacija	Univerzitet u Nišu , Elektronski fakultet
Mentor	Prof. dr Zoran Jovanović, vanredni profesor
Broj odluke i datum prihvatanja teme doktorske disertacije	Elektronski fakultet, 07/03-012/14-006, 25.09.2014. Univerzitet u Nišu, 8/20-01-009/14-014, 08.12.2014.
Komisija za ocenu podobnosti teme	Prof. dr Zoran Jovanović, vanredni profesor Elektronskog fakulteta u Nišu, mentor Prof. dr Milica Naumović, redovni profesor Elektronskog fakulteta u Nišu Prof. dr Goran Đorđević, redovni profesor Elektronskog fakulteta u Nišu Prof. dr Leonid Stoimenov, redovni profesor Elektronskog fakulteta u Nišu Prof. dr Dragan Šešlija, redovni profesor Fakulteta tehničkih nauka u Novom Sadu
Komisija za odbranu disertacije	Prof. dr Zoran Jovanović, vanredni profesor Elektronskog fakulteta u Nišu, mentor Prof. dr Milica Naumović, redovni profesor Elektronskog fakulteta u Nišu Prof. dr Goran Đorđević, redovni profesor Elektronskog fakulteta u Nišu Prof. dr Leonid Stoimenov, redovni profesor Elektronskog fakulteta u Nišu Prof. dr Dragan Šešlija, redovni profesor Fakulteta tehničkih nauka u Novom Sadu
Naučna oblast	Elektrotehnika i računarstvo
Uža naučna oblast	Automatika
UDK broj	(004.738.4:159.953):(681.5:007.52)
Datum odbrane	

AUTHOR	
Name and surname	Slobodan Aleksandrov
Date of birth	20.08.1968.

DOCTORAL DISSERTATION	
Title	Remote learning in mechatronics based on virtual and real didactic systems
Number of pages	185+XIV
Number of figures	87
Number of tables	22
Number of references	84
Institution	University of Niš , Faculty of Electronic Engineering
Mentor	dr Zoran Jovanović, associate professor
Number of decision and the date of acceptance of the doctoral dissertation theme	Faculty of Electronic Engineering, 07/03-012/14-006, 25.09.2014. University of Niš, 8/20-01-009/14-014, 08.12.2014.
Commission for the assessment of the doctoral dissertation theme	dr Zoran Jovanović, associate professor, University of Niš, Faculty of Electronic Engineering, mentor dr Milica Naumović, full professor, University of Niš, Faculty of Electronic Engineering dr Goran Đorđević, full professor, University of Niš, Faculty of Electronic Engineering dr Leonid Stoimenov, full professor, , University of Niš, Faculty of Electronic Engineering dr Dragan Šešlija, full professor, University of Novi Sad, Faculty of Technical Sciences
Commission for the dissertation defence	dr Zoran Jovanović, associate professor, University of Niš, Faculty of Electronic Engineering, mentor dr Milica Naumović, full professor, University of Niš, Faculty of Electronic Engineering dr Goran Đorđević, full professor, University of Niš, Faculty of Electronic Engineering dr Leonid Stoimenov, full professor, , University of Niš, Faculty of Electronic Engineering dr Dragan Šešlija, full professor, University of Novi Sad, Faculty of Technical Sciences
Scientific field	Electrical Engineering and Computer Science
Field of Academic Expertise	Automation
UDK number	(004.738.4:159.953):(681.5:007.52)
Date of defence	

SADRŽAJ.....	V
ZAHVALNICA.....	VIII
REZIME.....	IX
ABSTRACT.....	XII
1 UVOD.....	1
1.1 Predmet i cilj disertacije.....	1
1.2 Naučne hipoteze.....	5
1.3 Naučne metode istraživanja.....	5
1.4 Očekivani naučni doprinos.....	6
1.5 Struktura rada.....	8
2 UČENJE NA DALJINU.....	10
2.1 Teorije učenja.....	12
2.1.1 Bihevioristička teorija učenja.....	13
2.1.2 Kognitivistička teorija učenja.....	13
2.1.3 Konstruktivistička teorija.....	14
2.1.4 Konektivistička teorija.....	16
2.2 Nastavne metode.....	16
2.3 Elektronsko učenje.....	18
2.4 Web tehnologije.....	21
2.5 Standardizacija elektronskog učenja.....	25
2.6 Sistem za upravljanje učenjem.....	27
2.6.1 LMS Moodle.....	27
3 MEHATRONSKI SISTEMI.....	32
3.1 Uvod.....	32
3.2 Postupci projektovanja mehatronskih sistema.....	35
3.2.1 Pristup baziran na modeliranju ograničenja.....	35
3.2.2 Projektovanje zasnovano na modelu sistema.....	40
3.3 Modeliranje i simulacija industrijskog robota.....	42
3.3.1 Direktna kinematika robota.....	46
3.3.2 Danavit-Hartenbergov analitički postupak.....	47
3.3.3 Inverzna kinematika robota.....	50
3.4 Upravljanje industrijskim robotom.....	52
3.4.1 Upravljanje u prostoru unutrašnjih koordinata.....	53

3.4.2 Upravljanje u prostoru spoljašnjih koordinata	54
3.4.3 Planiranje trajektorije	55
3.4.3.1 Planiranje kretanja robotske ruke “od tačke do tačke”	55
3.4.3.2 Planiranje kontinualnog kretanja robota po zadatoj putanji	57
3.4.3.3 Algoritmi za izbegavanje prepreka	57
3.5 Razvoj i verifikacija modela industrijskog robota	62
3.5.1 Kreiranje modela industrijskog robota u MATLAB-u	62
3.5.2 Simulacija industrijskog robota u MATLAB -u	66
3.5.3 Edukativne trajektorije	71
4 RAZVOJ I IMPLEMENTACIJA HIBRIDNOG MODELA UČENJA U MEHATRONICI.....	72
4.1 Karakteristike obrazovanja u mehatronci.....	72
4.2 Hibridni model učenja.....	75
4.3 LMS sistem Edmodo.....	79
4.4. Razvoj Web laboratorije mehatronike	81
4.4.1 Biblioteka virtuelnih laboratorijskih eksperimenata:	85
4.4.2 Biblioteka realnih laboratorijskih eksperimenata:	85
4. 5 Virtuelno okruženje za učenje.....	86
4.5.1 Softver za trodimenzionalnu simulaciju mehatronskih sistema- COSIMIR PLC	86
4.5.2 Softver za trodimenzionalnu simulaciju robota - COSIMIR ROBOTICS.....	90
4.6 Realni didaktički mehatronski sistemi	94
4.6.1 FESTO MPS - Robotska stanica	96
4.6.2 Programiranje industrijskog robota.....	97
4.6.3 FESTO MPS - Mehatronski sistem za sortiranje	100
4.6.4 FESTO MPS - Mehatronski sistem za distribuciju	103
4.6.5 FESTO – Modularni mehatronski sistem.....	105
4.6.6 Sistem za daljinsko upravljanje radom asihronog motora	106
4.7 Razvoj sistema za daljinski pristup laboratoriji mehatronike	107
4.7.1 Daljinski pristup na bazi programskog paketa Team Viewer	112
4.7.2 Sistem za programiranje robota na daljinu	114
4.7.3 Sistemi za upravljanje mehatronskih sistema na daljinu	115
4.7.4 Sistem za upravljanje elektropneumatskim sistemom na daljinu	116
5 ORGANIZACIJA I REZULTATI ISTRAŽIVANJA.....	117
5.1 Bootstrap metoda	118

5.2 Analiza primene virtuelnih i realnih didaktičkih sistema u mehatronici	121
5.2.1 Organizacija istraživanja	121
5.2.2 Analiza rezultata istraživanja	124
5.3 Analiza primene eksperimentalnog učenja na daljinu u mehatronici	133
5.4 Analiza primene hibridnog modela eksperimentalnog učenja na daljinu	143
6 ZAKLJUČAK	152
LITERATURA.....	155
PRILOG: Edukativne trajektorije	165
Vežba 1. Kretanje robota po trajektoriji sa jednom referentnom tačkom	165
Vežba 2. Kretanje robota od “tačke do tačke”	166
Vežba 3. Sortiranje delova prema boji i vrsti materijala.....	167
Vežba 4. Kretanje robota od “tačke do tačke” po kružnim putanjama	170
Vežba 5. Izbegavanje prepreke korišćenjem senzora	171
Vežba 6. Programiranje robota po složenim dvodimenzionalnim trajektorijama.....	172
Vežba 7. Programiranje robota po složenim putanjama	174
Vežba 8. Programiranje robota po složenim trodimenzionalnim putanjama	175
REČNIK TERMINA.....	177
SPISAK SLIKA	178
SPISAK TABELA	181
BIOGRAFIJA AUTORA.....	182
IZJAVA O AUTORSTVU.....	183
IZJAVA O ISTOVETNOSTI ŠTAMPANOG I ELEKTRONSKOG OBLIKA DOKTORSKE DISERTACIJE.....	184
IZJAVA O KORIŠĆENJU	185

ZAHVALNICA

Ova doktorska disertacija, predstavlja rezultat višegodišnjeg istraživačkog rada u primeni elektronskog učenja na daljinu u mehatronci, razvoju novih modela učenja, primeni novih nastavnih metoda i savremenih informaciono-komunikacionih tehnologija u obrazovanju. Posebna pažnja posvećena je analizi efekata primene hibridnog modela učenja u srednjem stručnom obrazovanju.

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

Posebnu zahvalnost dugujem svojoj dragoj porodici, koja uloženom trudu daje poseban smisao, zbog njihove nesebične podrške i razumevanja.

Takođe, zahvaljujem se učenicima koji su učestvovali u istraživanjima, kolegama koji su realizovali testiranja i svima onima koji su na direktan ili indirektan način imali udela u izradi ove doktorske disertacije.

REZIME

Mehatronika je interdisciplinarna oblast koja zahteva integraciju znanja iz različitih oblasti i primenu novih tehnologija u proces obrazovanja. Imajući u vidu da je obrazovanje u oblasti mehatronike kod nas aktuelno u poslednjih petnaest godina, mali je broj studija i istraživanja koji se bave analizom efekata primene učenja na daljinu u ovoj oblasti. Razvoj Interneta i računarske tehnike doveo je do pojave novih metodologija i tehnika namenjenih obrazovanju. Primenom novih nastavnih metoda, Interneta i učenja na daljinu, otvaraju se mogućnosti za razvoj novog pristupa nastavi. Integracijom elektronskog učenja na daljinu i novih virtuelnih i realnih didaktičkih sistema, stvara se savremeno stimulatívno okruženje za učenje, omogućava personalizacija procesa učenja, stvaraju uslovi za aktivnu nastavu, praćenje napredovanja učenika i studenata, olakšava se planiranje nastave, kreiranje i deljenje nastavnih materijala i laboratorijskih resursa. Primena novih tehnologija mora biti zasnovana na odgovarajućim teorijama učenja i metodologijama, u cilju integracije savremenih tehnologija u postojeći okvir nastavnog procesa. U ovoj doktorskoj disertaciji biće prikazan inovativni hibridni model učenja daljinskog učenja u mehatronici.

Predmet disertacije pripada veoma aktuelnim oblastima istraživanja u primeni učenja na daljinu. Doktorska disertacija obuhvata niz metodoloških postupaka projektovanja i implementacije didaktičkih sistema i informacionih tehnologija u procesu eksperimentalnog učenja na daljinu. Predmet istraživanja doktorske disertacije predstavlja razvoj hibridnog modela učenja u oblasti mehatronike primenom inovativnih nastavnih metoda i novih tehnologija, kao i integraciji eksperimentalnog modela učenja na daljinu u jedinstven sistem za upravljanje učenjem (Learning Management Systems – LMS). Posebna pažnja posvećena je definisanju edukativnih trajektorija, modeliranju i simulaciji u robotici, razvoju eksperimentalnog učenja na daljinu i efektima primene u stručnom obrazovanju. U eksperimentalnom delu doktorske disertacije realizovana su istraživanja u cilju validacije predloženog modela učenja. Doktorska disertacija obuhvata niz postupaka, procedura, analiza, sinteza i primene web alata neophodnih za primenu novih modela učenja u mehatronici. U domenu pedagoškog istraživanja, istaknut je značaj primene konektivističkog modela učenja u realizaciji učenja na daljinu, kroz primenu novih web alata i novih tehnoloških inovacija. Relevantni pokazatelji i analize efikasnosti, pouzdanosti, dostupnosti i fleksibilnosti implementiranog modela eksperimentalnog

učenja na daljinu i stepenu uticaja na unapređenje obrazovanja, takođe su prikazani u disertaciji.

U disertaciji su prikazana dosadašnja istraživanja u domenu učenja na daljinu, teorije učenja, nastavne metode i web alati. Predstavljene su najzačajnije teorije učenja i njihova primena u savremenom elektronskom učenju. Posebna pažnja posvećena je predstavljanju novih web tehnologija, standardizaciji elektronskog učenja i primeni sistema za upravljanje učenjem. Detaljno su predstavljene mehatronske komponente i sistemi koji se koriste u Web laboratoriji Tehničke škole Trstenik. Prikazani su osnovni zakoni direktne i inverzne kinematike, osnovni principi upravljanja industrijskim robotom i softverski alati za modeliranje, simulaciju, programiranje i upravljanje robotom. Posebna pažnja posvećena razvoju i verifikaciji modela industrijskog robota, definisanju edukativnih trajektorija kretanja robota, metodama za izbegavanje prepreka i analizi parametara sistema tokom kretanja robota.

U disertaciji je predstavljen razvijeni hibridni model učenja u mehatronici sa posebnim akcentom na značaj eksperimentalnog učenja na daljinu. Specifičnosti eksperimentalnog učenja na daljinu su analizirane sa aspekta pripreme nastavnih materijala, definisanja laboratorijskih vežbi, definisanja grupa u LMS sistemu *Edmodo*, kolaboraciji i komunikaciji u procesu učenja na daljinu, ocenjivanju i evaluaciji. Posebna pažnja posvećena je definisanju strukture Web laboratorije, razvoju sistema za daljinski pristup u realnom vremenu, i razvoju biblioteke edukativnih laboratorijskih vežbi.

Detaljno su prikazana istraživanja, merenja i rezultati istraživanja u primeni daljinskog učenja u mehatronici. Predstavljene su naučne metode za analizu rezultata merenja i detaljna statistička analiza dobijenih rezultata. Primenom Bootstrap metode izračunate su karakteristične vrednosti statističke funkcije raspodele: aritmetičke sredine, varijanse i standardne devijacije. Na osnovu dobijenih vrednosti generisanog skupa, kreiran je histogram raspodele verovatnoće i normalizovani oblik raspodele hipoteze. Na osnovu rezultata istraživanja potvrđene su glavne hipoteze doktorske disertacije. Veoma je važno integrisati Web laboratoriju u postojeći obrazovni sistem, u cilju praćenja napredovanja učenika i studenata i evaluacije nastavnog procesa. Posebna pažnja posvećena je efektima primene novih virtuelnih i realnih didaktičkih sistema u procesu obrazovanja, mogućnostima umrežavanja Web laboratorija i deljenju eksperimentalnih resursa na nivou srednjih stručnih škola. U toku istraživanja dokazane su hipoteze

doktorske disertaciji o značaju primene učenja na daljinu i efektima primene u srednjem stručnom obrazovanju.

Razvijeni model će omogućiti integraciju eksperimentalnog pristupa nastavi u postojeći sistem za upravljanje učenjem, a pogodan je za primenu u stručnom obrazovanju učenika, studenata i nastavnika. Sistem će pružiti velike mogućnosti u celoživotnom učenju kroz formalne i neformalne oblike nastave. Definisani hibridni model pružice sveobuhvatan okvir za uspešnu realizaciju različitih oblika učenja u okviru obrazovnog sistema. Dokazane hipoteze u disertaciji predstavljaju smernice za implementaciju elektronskog učenja na daljinu na svim nivoima obrazovanja. Primena rezultata istraživanja su od izuzetnog značaja. Elektronsko učenje na daljinu u skorijoj budućnosti biće obavezni integralni deo savremenog obrazovnog sistema na svim nivoima školovanja. Kvalitet, efikasnost i konkurentnost obrazovnih institucija zavisice od stepena primene IKT u nastavi i novih tehnologija.

Primena rezultata doktorske disertacije mogla bi da se verifikuje kroz razvoj Web laboratorija na nivou Zajednica stručnih škola i njihovo umrežavanje u Virtuelni laboratorijski centar za stručno obrazovanje (VLCSO). Razvijeni VLCSO bio bi umrežen sa srodnim fakultetima u zemlji i inostranstvu, u cilju stručnog usavršavanja nastavnika, istraživanja, realizacije međunarodnih projekata i povećanja mobilnosti nastavnika i učenika. Sledeće što bi proisteklo iz ove doktorske disertacije, je integracija daljinskog učenja u nastavne planove i programe svih obrazovnih profila, tako da se deo nastavnog programa (10% - 20%) realizuje primenom učenja na daljinu. Primenom LMS sistema biće unapređen kvalitet nastave, a nedeljno opterećenje učenika može biti smanjeno sa sadašnjih 30 na 24 časa.

Ključne reči: mehatronika, elektronsko učenje, eksperimentalno učenje na daljinu, hibridni model učenja, Sistem za upravljanje učenjem, Internet, didaktički sistemi, robotika, modeliranje, simulacija.

ABSTRACT

Mechatronics is an interdisciplinary field which requires knowledge from different areas and the application of new technologies into educational process. Keeping in mind that education in the field of mechatronics has been a live issue for the last fifteen years, there is a small number of studies and researches which deal with analysis of the effects of applied remote learning in this area. Development of the Internet and computer technology has led to occurrence of new methodologies and techniques designed for education. With the application of new teaching methods, the Internet and remote learning, new possibilities for the development of a new approach to teaching are opened. With the integration of electronic remote learning and new virtual and real didactical systems, a modern stimulating surroundings for learning are created, personalization of the process of learning is made possible, the conditions for active teaching and for monitoring of student's advancement are created, teaching planning is facilitated as well as creating and sharing teaching materials and laboratory resources. The application of new technologies has to be based on appropriate theories on learning and methodologies, for the purpose of integration of modern technologies into existing teaching process framework. In this doctoral dissertation, an innovative hybrid model of remote learning will be presented.

The subject of dissertation belongs to live fields of research in the application of remote learning. Doctoral dissertation includes a series of methodological proceedings of designing and implementation of didactical systems and computer technologies in the process of experimental remote learning. The subject of research of the doctoral dissertation represents the development of hybrid learning model in the field of mechatronics with application of innovative teaching methods and new technologies, as well as integration of experimental model of remote learning into singular system for learning management (Learning Management Systems – LMS). Particular attention is given to defining educational trajectories, modeling and simulation in robotics, development of experimental remote learning and the effect of its application in vocational education. In the experimental section of doctoral dissertation, researches for the purpose of validation the suggested model of learning are executed. The doctoral dissertation includes a series of proceedings, procedures, analysis, synthesis and applications of web tools which are necessary for the use of new models of learning in mechatronics. In the domain of pedagogical research, the importance of the use of connectivity model of

learning in the realization of remote learning is highlighted, and that through the application of new web tools and new technological innovations. Relevant indicators and analysis of efficiency, reliability, availability and flexibility of implemented model of model of experimental remote learning and degree of influence on development of education are also shown.

In the dissertation, up to the moment researches in the field of remote learning, theory of learning, teaching methods, and web tools are shown. The most significant theories of learning and their application are presented. Particular attention is put on the presentation of new technologies, standardization of electronic learning and the use of systems for learning management. Mechatronic components and systems used in the web laboratory of Technical School Trstenik were shown in detail. The basic laws of direct and inverse kinematics are shown, as well as the principles of industrial robot controlling and industrial tools for modeling, simulation, programming and robot control. Special attention is placed on the development and verification of a model of industrial robot, defining educational trajectories of robot movement, methods for obstacle evasion and analysis of system parameters during robot motion.

The developed hybrid model of learning in mechatronics is presented in the dissertation, with special emphasis on the importance of experimental remote learning. The specificities of experimental remote learning are analyzed from the aspect of teaching materials preparation, defining laboratory practice, defining groups in LMS system Edmodo, collaboration and communication in the process of remote learning, grading and evaluation. Special attention is given to defining the structure of web laboratory, the development of system for remote access in real time and the development of library of educational laboratory practices.

Researches, measuring and results of the research in the application of remote learning in mechatronics are shown in detail. Scientific methods for the analysis of results of measuring and detailed statistical analysis of acquired results are presented. With the use of Bootstrap method, characteristic values of statistical function of allocation are calculated: arithmetic means, variances and standard deviations. Histogram of probability distribution and normalized form of allocation hypothesis are created based on acquired values of generated set. On the basis of the results of the research, main hypothesis of doctoral dissertation are confirmed. It is very important to integrate Web laboratory into existing educational system for the purpose of monitoring student development and

evaluation of teaching process. Special attention is given to the effects of the application of new virtual and real didactical systems in educational process, the possibilities of networking Web laboratories and sharing experimental resources on the level of vocational schools. During the research, the hypothesis of doctoral dissertation on the significance of the application of remote learning and the effects of the use in vocational education are proven.

Developed model will enable integration of experimental approach to teaching into existing system of learning management and it is suitable for application in vocational education of students and teachers. The system will provide great opportunities for lifelong learning through formal and informal forms of teaching. Defined hybrid model will provide comprehensive framework for successful realization of various forms of learning inside educational system. Proven hypothesis in the dissertation represent the guidelines for the implementation of electronic remote learning at all levels of education. The application of the results of the research is of extreme importance. Electronic remote learning will in near future be compulsory integral element of modern educational system at all levels of education. Quality, efficiency and competitiveness of educational institutions will depend on the degree of the application of IKT systems in teaching and new technologies.

The application of the results of the doctoral dissertation could be verified through web laboratories at the level of The Association of Vocational Schools and their networking into Virtual Laboratory Center for Vocational Education (VLCSO). Developed VLCSO would be networked with similar faculties in the country and abroad, and for the purpose of professional development of teachers, researches, realization of international projects and increased mobility of teachers and students. The next thing which can arise from this doctoral dissertation is the integration of remote learning into teaching plans and programmes of all educational profiles, in a sense that a part of teaching programme (10% - 20%) is realized with the use of remote learning. With the application of LMS, the quality of teaching will be promoted, and weekly demand on students can be reduced from current 30 to 24 lessons.

Keywords: *mechatronics, e-learning, experiential remote learning, hybrid model of learning, Learning Management System, Internet, didactic systems, robotics, modeling, simulation.*

1 UVOD

1.1 Predmet i cilj disertacije

Razvoj i primena novih tehnologija u svim sferama društva zahteva dinamičan obrazovni sistem, koji svojom organizacijom može da odgovori na zahteve savremene industrije. Primena informacionih tehnologija i Interneta u obrazovanju, generiše razvoj inovativnih nastavnih metoda i tehnika koje menjaju tradicionalni pristup nastavi i stvaraju uslove za osavremenjavanje nastavnog procesa, standardizaciju i podizanja kvaliteta obrazovanja. Predmet istraživanja ove doktorske disertacije predstavlja razvoj savremenog hibridnog modela učenja na daljinu u oblasti mehatronike, primena modela u srednjem stručnom obrazovanju, analiza efekata primene i verifikacija razvijenog modela učenja. Primenom sistema za upravljanje učenjem i eksperimentalnog učenja na daljinu omogućava se korišćenje savremenih tehnologija u obrazovanju, bez obzira na geografsku lokaciju obrazovnih institucija, učenika, studenata i profesora. Za potrebe istraživanja formirana je Web laboratorija mehatronike i integrisana u jedinstven sistem za upravljanje učenjem (*eng. Learning Management System - LMS*). Daljinski pristup laboratoriji vrši se u realnom vremenu, a upravljanje i praćenje realizacije laboratorijskih vežbi vrši se preko IP Web kamera i Interneta. Posebna pažnja posvećena je analizi efekata primene novih virtuelnih i realnih didaktičkih sistema, i značaju daljinskog eksperimentalnog učenja u cilju osavremenjavanja srednjeg stručnog obrazovanja. U cilju verifikacije predloženog pristupa nastavi realizovana su istraživanja i izvršena je analiza rezultata primene daljinskog učenja u mehatronici.

Praćenje efekta primene novih nastavnih metoda i nastavnih sredstava je sporadično, tako da veoma često definisani modeli ne odgovaraju uzrastu učenika, nisu pogodni za sticanje praktičnih veština i kao takvi nisu primenjivi na svim nivoima obrazovanja u različitim naučnim oblastima. U svim savremenim obrazovnim sistemima učenik se nalazi u centru obrazovnog procesa, te je od neprocenjivog značaja sistematsko praćenje efekata primene novih nastavnih metoda i tehnologija, kao i povratna informacija o kvalitetu nastavnog procesa iz ugla učenika.

U doktorskoj disertaciji je definisan hibridni model učenja, koji je primenjen u realizaciji nastavnog procesa obrazovnog profila tehničar mehatronike-ogled u periodu od pet školskih godina. Praćenje kvaliteta nastavnog procesa vrši se analizom uspeha učenika na kraju svakog klasifikacionog perioda, anketiranjem svih učesnika u nastavnom procesu,

analizom uspeha na maturskom ispitu i na kraju školovanja, poređenjem uspeha sa ogleđnim odeljenjima i grupama. Cilj istraživanja je dobijanje relevantnih podataka o efikasnosti primene savremenih virtuelnih i realnih didaktičkih sistema u nastavi mehatronike u srednjem stručnom obrazovanju, sa posebnim akcentom na značaj eksperimentalnog učenja na daljinu. Na osnovu dobijenih rezultata mogu se identifikovati virtuelni i realni didaktički sistemi koji su pogodni za sticanje definisanih znanja i veština. Veoma je značajno evidentirati softverske modele koji ne daju željene rezultate i nisu primereni uzrastu učenika. Na osnovu istraživanja potrebno je definisati optimalne modele učenja u mehatronici, koji su bazirani na primeni savremenih didaktičkih sistema i elektronskog daljinskog učenja korišćenjem Web laboratorija.

Strategijom razvoja obrazovanja u Srbiji do 2020. godine i usvajanjem dokumenta Nacionalnog prosvetnog saveta *“Smernice za unapređivanje uloge informaciono-komunikacionih tehnologija u obrazovanju”* (2013.g.), naglašen je značaj i uloga novih tehnologija u sistemu obrazovanja i definisane su preporuke za integraciju Informaciono-komunikacionih tehnologija (IKT) u obrazovni sistem [1]. Primena elektronskog učenja na daljinu danas je zastupljena u svim vidovima formalnog i neformalnog obrazovanja. Korišćenjem Interneta i multimedijalnih nastavnih materijala, kod realizacije nastave u teorijskim predmetima veoma uspešno se ostvaruju definisani ciljevi učenja. Promocija i razvoj elektronskog učenja na daljinu deo su IPA Projekta *“Podrška razvoju ljudskog kapitala i istraživanja – opšte obrazovanje i razvoj ljudskog kapitala”*. Projekat je finansiran uz pomoć IPA fondova Evropske unije, a nosilac projekta je Ministarstvo prosvete, nauke i tehnološkog razvoja (2012.g.-2015.g). Ciljevi projekta su inoviranje opštih osnova učenja i nastave primenom IKT-a u osnovnim i srednjim školama, osavremenjavanje sistema stručnog usavršavanja nastavnika i jačanje saradnje između istraživača, nastavnika i kreatora obrazovne politike [2]. Ovaj projekat sistemski uvodi na velika vrata primenu hibridnog modela učenja, kombinaciju nastave u učionici i nastave na daljinu korišćenjem Internet mreže. Projekat obuhvata 200 škola, uključeno je 4000 nastavnika, koji će biti osposobljeni za korišćenje društvene obrazovne mreže Edmodo (www.edmodo.com, <http://srb.edmodo.com/>) i drugih Web 2.0 alata za razvoj nastavnih materijala, baza podataka, testova, upravljanje procesom učenja i slično.

Za primenu učenja na daljinu u oblastima tehničkih nauka, neophodno je LMS sistem proširiti formiranjem daljinskih Web laboratorija, kako bi se stvorili tehnički uslovi za sticanje praktičnih znanja i veština na daljinu. Obrazovanje u oblasti mehatronike zahteva integraciju teorijskih i praktičnih znanja primenom savremenih tehnologija i novih

nastavnih metoda. Nastava je zasnovana na eksperimentalnom pristupu učenju, projektnoj nastavi i problemski orijentisanoj nastavi. Razvojem i integracijom Web laboratorija u jedinstven LMS omogućava se: primena visokih tehnologija u obrazovanju, inovativni pristup u daljinskom izvođenju eksperimentima, transver specijalističkih znanja i veština, ostvarivanje definisanih kompetencija, sinergija učenja i istraživanja, komunikacija i saradnja između studenata i nastavnika, promocija atraktivnosti obrazovanja u oblasti tehnike, interaktivna saradnja između studenata, deljenje eksperimentalnih resursa između škola, fakulteta, univerziteta, objedinjavanje i definisanje Evropskog obrazovnog prostora i mobilnost učenika i nastavnika.

Mnoge studije i radovi predlažu različite alternativne pristupe koji primenjuju simulacione i realne modele u nastavi mehatronike. Na osnovu istraživanja došlo se do podataka iz kojih se može zaključiti da je ova tema izuzetno aktuelna i u okviru projekata Evropske unije, gde se u okviru Leonardo da Vinci programa realizovani projekti istraživanja: “*MARVEL–Virtual Laboratory in Mechatronics: Access to Remote and Virtual e-Learning*“ (2000-2006), “*MeRLab - Innovative Remote Laboratory in the E-training of Mechatronics*” (2007-2009), “*E-Pragmatic E-Learning and Practical Training of Mechatronics and Alternative Technologies in Industrial Community*”(2010-2012), “*EDUMEC- E-Learning Education and Innovative Remote Laboratory for Mechatronics*” (2011-2013), “*CLEM - CLoud services for E-learning in Mechatronics technology*”(2012-2013).

U okviru programa Leonardo da Vinci, realizovan je projekat *MARVEL*. Nosilac projekta je Univerzitet u Bremenu, Nemačka, a partneri su obrazovne institucije i industrijske kompanije iz Velike Britanije, Portugala, Švajcarske, Grčke i Kipra. Cilj projekta je implementacija i evaluacija virtuelnog okruženja za učenje u oblasti mehatronike, koje omogućava daljinski pristup laboratorijskoj opremi sa bilo koje geografske pozicije u realnom vremenu. Projekat je fokusiran na razvoj sistema za daljinski pristup skupoj laboratorijskoj opremi, sticanje praktičnih znanja i veština, uspostavljanje saradnje između fakulteta i socijalnih partnera iz industrije, stručno usavršavanje radnika i inženjera, transver novih tehnologija, uspostavljanje međunarodne saradnje i rad na zajedničkim projektima [3-6].

Cilj projekta *MeRLab* je primena elektronskog učenja na daljinu, sticanje teorijskih znanja i praktičnih veština u oblasti mehatronike korišćenjem Web laboratorija. Ovaj projekat je deo projekta Leonardo Da Vinci u okviru celoživotnog učenja, a ciljna grupa su svršeni učenici i studenti, kao i radnici i inženjeri iz industrije.

Projekat *E-Pragmatic* ima za cilj da unapredi i osavremeni obrazovanje i stručno usavršavanje u oblasti mehatronike. U projektu je učestvovalo 16 partnera iz osam evropskih zemalja. Uspostavljena je saradnja između obrazovnih institucija, privrednih komora i kompanija sledećih država: Nemačka, Slovenija, Austrija, Španija, Poljska, Holandija, Švajcarska i Turska. Koncept projekta je da svaka zemlja ima po dva partnera, jedna obrazovna institucija i jedan partner iz industrije. Projekat je realizovan kroz dva nivoa. U prvom nivou svaka obrazovna institucija je razvila obrazovni portal za daljinski pristup Web laboratorijama fakulteta, sa po dva modula za stručno usavršavanje radnika iz partnerske kompanije. Cilj drugog nivoa je uspostavljanje međunarodne saradnje između svih partnera i korišćenje razvijenih elektronskih kurseva, kao i korišćenje svih Web laboratorija [7].

Projekat *EDUMEC* obuhvata sedam partnera iz akademske zajednice i industrije, i obuhvata učešće partnera iz sledećih zemalja: Nemačke, Engleske, Češke, Slovačke i Turske. Cilj ovog projekta je promovisanje mehatronike, promocija novih nastavnih metoda, eksperimentalnih metoda i primera dobre prakse. Poseban akcenat u okviru ovog projekta dat je razvoju softverskih platformi za daljinski pristup Web laboratorijama, razvoj sistema za upravljanje učenjem (LMS), softvera za modeliranje i simulaciju, nastavnih materijala i softvera za trodimenzionalni obilazak laboratorija. U okviru ovog projekta definisani su nacionalni i međunarodni standardi u obrazovanju u oblasti mehatronike.

Projekat *CLEM* obuhvata sedam partnera iz akademske zajednice i industrije, i obuhvata učešće partnera iz sledećih zemalja: Velika Britanija, Francuska, Nemačka, Italija, Bugarska i Rumunija. Cilj projekta je promocija obrazovanja u oblasti mehatronike primenom Interneta i razvojem Web laboratorija mehatronike. Projekat podržava razvoj i razmenu nastavnih materijala, deljenje laboratorijskih resursa preko Interneta, razmena studenata i nastavnika u cilju sticanja praktičnih znanja i veština.

Na osnovu pomenutih projekata i drugih istraživanja u oblasti mehatronike, u ovoj doktorskoj disertaciji biće prikazan novi hibridni model za „on-line“ učenje, zasnovan na integraciji eksperimentalnog učenja u Web laboratoriji i integraciji LMS sistema za praćenje i upravljanje procesom učenja [8-11]. Kroz istraživanja, praćenja i analize dobijenih rezultata, biće prezentovani rezultati istraživanja, oblasti primene hibridnog modela učenja i pravci daljeg razvoja eksperimentalnog učenja na daljinu. Drugi aspekt doktorske disertacije predstavlja primena razvijenog modela, kroz formiranje mreže Web laboratorija na nivou Zajednica srednjih stručnih škola i tehničkih fakulteta, čime se

stvaraju uslovi za definisanje standarda i podizanje kvaliteta obrazovanja, dostupnost i optimalno korišćenje savremene laboratorijske opreme, rad na zajedničkim projektima, smanjenje cene obrazovanja, promocije atraktivnosti obrazovanja tehnike, povećanje mobilnosti učenika i nastavnika i integracija stručnog obrazovanja u jedinstven Evropski sistem obrazovanja.

1.2 Naučne hipoteze

Na osnovu definisanog predmeta istraživanja doktorske disertacije mogu se izdvojiti nekoliko glavnih hipoteza:

- Primena virtuelnih i realnih didaktičkih modela pozitivno utiče na postignuća učenika
- Primenom razvijenog hibridnog modela učenja postižu se bolji rezultati u odnosu na tradicionalni sistem obrazovanja
- Daljinsko eksperimentalno učenje u Web laboratorijama omogućava sticanje znanja i veština kao u lokalnim laboratorijama
- Stečena znanja primenom novih tehnologija primenjiva su u praksi
- Primenom predloženog hibridnog modela povećava motivacija kod učenika i dolazi do povećanja efikasnosti učenja
- Primenom eksperimentalnog učenja na daljinu postižu se bolji rezultati u odnosu na klasičan model nastave
- Percepcija sistema od strane učenika menja se tokom višegodišnje primene
- Integracija daljinskog učenja u postojeći obrazovni sistem povećava dostupnost novim tehnologijama i unapređuje komunikaciju i saradnju među svim učesnicima obrazovnog procesa

1.3 Naučne metode istraživanja

Multidisciplinarni karakter teme istraživanja podrazumeva značajnu primenu softverskih i matematičkih alata za obradu i sistematizaciju podataka tokom istraživanja. Za realizaciju istraživanja i obradu rezultata doktorske disertacije koristiće se različite naučne metode prikupljanja podataka i statističke obrade: metod sistematskog prikupljanja podataka, metod računarske obrade podataka, metoda statističkog istraživanja, metode dedukcije, analize, sinteze i generalizacije. Za prikupljanje podataka koristiće se upitnik,

na osnovu koga se mogu proučavati činjenice, vrednosti, mišljenja, stavovi, želje i ocene učenika. Za prezentovanje rezultata istraživanja koristiće se deskriptivna analiza i statistika, relaciona analiza i vremenska analiza. Rezultati istraživanja biće prezentovani tabelarno sa uporednim prikazima, grafičkim i tekstualnim opisom. Merenje relevantnih parametara i analiza dobijenih rezultata vršiće se statističkom metodom “*bootstrap*”. Dobijeni rezultati istraživanja treba da provere tačnost glavnih hipoteza doktorske disertacije.

1.4 Očekivani naučni doprinos

Tema istraživanja koja bi bila obuhvaćena ovom doktorskom disertacijom je fokusirana na:

- Razvoj i implementaciju hibridnog modela učenja primenom inovativnih nastavnih metoda i web tehnologija
- Razvoj Web laboratorije mehatronike i sistema za daljinski pristup laboratoriji
- Unapređivanje nastave u oblasti programiranja industrijskog robota primenom softvera za modeliranje, simulaciju i programiranje u virtuelnom i realnom okruženju
- Integraciju elektronskog učenja i daljinskog eksperimentalnog učenja u jedinstven sistem za upravljanje učenjem
- Primenu razvijenog hibridnog modela učenja u srednjem stručnom obrazovanju u oblasti mehatronike
- Prikaz, analizu i verifikaciju primene razvijenog modela učenja

Tema doktorske disertacije obuhvata niz postupaka, procedura, analiza, sinteza i primene web alata koji dovode do uspešne primene inovativnih modela učenja u mehatronici. Kroz istraživanja u modeliranju i simulaciji u robotici, razvoju algoritama za programiranje industrijskog robota, razvoju hibridnog postupka učenja i kreiranja modela takvog učenja, izvršiće se analiza i verifikacija modela hibridnog učenja. Rezultati verifikacije biće primenjeni u cilju kreiranja savremenog okruženja za učenje i poboljšanja rezultata učenja, kao i primene na druge srodne obrazovne oblasti. Dodatni cilj doktorske disertacije je razvoj biblioteke eksperimenata za učenje na daljinu, razvoj Web laboratorije mehatronike i sistema za daljinski pristup. Veoma je važno integrisati Web laboratoriju u jedinstven LMS u cilju praćenja napredovanja učenika i evaluacije nastavnog procesa. Posebna pažnja biće posvećena efektima primene novih virtuelnih i realnih didaktičkih

sistema u procesu obrazovanja, mogućnostima umrežavanja Web laboratorija i deljenju eksperimentalnih resursa na nivou zajednice srednjih stručnih škola.

Jedan od važnih ciljeva disertacije je istraživanje stavova učenika o značaju primene virtuelnih i realnih didaktičkih modela u nastavi, a posebno njihov uticaj na povećanje motivacije. Klasičan pristup nastavi je pokazao da je nedostatak motivacije jedan od važnijih činilaca za postizanje definisanih ishoda učenja. Povećanje motivacije učenika se može ostvariti kroz primenu inovativnih metoda, novih tehnologija i web alata koji su bliski sadašnjim generacijama učenika.

Prvi korak u istraživanju je razvoj simulacionog modela industrijskog robota, nakon čega sledi analiza i verifikacija modela. Sledeći korak je simulacija modela i programiranje industrijskog robota po složenim dvodimenzionalnim i trodimenzionalnim trajektorijama. Unapređivanje procesa programiranja industrijskog robota i eliminisanje nepredviđenih havarijskih oštećenja mehatronskih sistema kod izuzetno zahtevnih kinematičkih i dinamičkih trajektorija je od posebnog značaja za dalja istraživanja. U disertaciji su definisane karakteristične edukativne trajektorije za programiranje industrijskog robota, na osnovu kojih se vrši simulacija i optimizacija putanje robota u zavisnosti od definisanih zahteva i ograničenja.

Razvijeni model će omogućiti integraciju eksperimentalnog pristupa nastavi u postojeći sistem za upravljanje učenjem LMS, a pogodan je za primenu u stručnom obrazovanju učenika, studenata i nastavnika. Sistem će pružiti velike mogućnosti u celoživotnom učenju kroz formalne i neformalne oblike nastave. Definisani hibridni model pružiće sveobuhvatan okvir za uspešnu realizaciju različitih oblika učenja u okviru obrazovnog sistema. Originalnost se ogleda u definisanju metodološkog postupka projektovanja, implementacije didaktičkih sistema i informacionih tehnologija za unapređenje učenja na daljinu. Predloženim modelom će se definisati biblioteka mehatronskih eksperimenata, uputstva za realizaciju laboratorijskih vežbi i vodič za daljinski pristup Web laboratoriji. Razvijena Web laboratorija biće fleksibilna, omogućiće povezivanje Web laboratorije Tehničke škole Trstenik sa drugim obrazovnim ustanovama, u cilju promocije stručnog obrazovanja, stručnog usavršavanja nastavnika i naučne saradnje.

1.5 Struktura rada

U prvom poglavlju prikazani su predmet i ciljevi istraživanja u doktorskoj disertaciji. Postavljene su osnovne hipoteze, metode naučnog istraživanja i očekivani naučni doprinos. Dat je pregled najznačajnijih projekata i istraživanja u primeni elektornskog učenja u oblasti mehatronike.

U drugom poglavlju prikazana su dosadašnja saznanja u domenu učenja na daljinu, teorije učenja, nastavne metode i web alati značajni za realizaciju procesa učenja na daljinu. Predstavljene su najzačajnije teorije učenja i njihova primena u savremenom elektronskom učenju. Posebna pažnja posvećena je predstavljanju novih web tehnologija, standardizaciji elektronskog učenja i primeni sistema za upravljanje učenjem. Dat je prikaz najčešće korišćenog sistema za upravljanje učenjem *Moodle*.

Treće poglavlje doktorske disertacije posvećeno je analizi mehatronskih sistema sa posebnim akcentom na multidisciplinarnost mehatronike. Izvršena je analiza modela projektovanja mehatronskih sistema. U ovom poglavlju razvijen je i testiran karakterističan model mehatronskog sistema - model industrijskog robota. Prikazani su osnovni zakoni direktne i inverzne kinematike, osnovni principi upravljanja industrijskim robotom i softverski alati za modeliranje, simulaciju, programiranje i upravljanje robotom. U ovom poglavlju je prikazan značaj primene virtuelnih trodimenzionalnih (3D) modela u programiranju robota. Posebna pažnja posvećena metodama za izbegavanje prepreka i analizi parametara sistema tokom kretanja robota.

Četvrto poglavlje ima za cilj da predstavi razvijeni hibridni model učenja u mehatronici sa posebnim akcentom na značaj eksperimentalnog učenja na daljinu. Specifičnosti učenja na daljinu su analizirane sa aspekta pripreme nastavnih materijala, definisanja biblioteke laboratorijskih vežbi, sistema za daljinski pristup, definisanja grupa u LMS sistemu *Edmodo*, kolaboraciji i komunikaciji u procesu učenja na daljinu, ocenjivanju i evaluaciji. Prikazani su realni didaktički mehatronski sistemi, virtuelni didaktički sistemi i softverski paketi koji se koriste u Web laboratoriji mehatronike.

Peto poglavlje posvećeno je organizaciji istraživanja, merenjima i analizi rezultata istraživanja. Predstavljena je savremena naučna metoda za analizu rezultata merenja i detaljna statistička analiza dobijenih rezultata. Rezultati su predstavljani u formi uporedne analize oglednih i referentnih grupa. Primenom Bootstrap metode izračunate su karakteristične vrednosti statističke funkcije raspodele: aritmetičke sredine, varijanse i standardne devijacije. Na osnovu dobijenih vrednosti generisanog skupa, kreiran je

histogram raspodele verovatnoće i normalizovani oblik raspodele hipoteze. Na bazi rezultata istraživanja potvrđene su glavne hipoteze doktorske disertacije. Rezultati pokazuju značajne prednosti predloženog eksperimentalnog modela učenja na daljinu u ovoj doktorskoj disertaciji i mogućnosti njene primene u srednjem stručnom obrazovanju.

U zaključku je data sistematizacija i pregled naučnih doprinosa koji su proistekli iz doktorske disertacije, skup prednosti koje pruža definisani model učenja i mogućnosti za buduća istraživanja u oblasti daljinskog učenja.

U prilogu su date razvijene edukativne trajektorije kretanja industrijskog robota u virtuelnom i realnom okruženju.

2 UČENJE NA DALJINU

Razvoj i primena novih tehnologija u svim oblastima društva i industrije generiše zahteve za novim pristupom nastavi u cilju obrazovanja stručnjaka za XXI vek. Najrazvijenije svetske ekonomije baziraju svoj budući razvoj na istraživanjima i primeni novih tehnologija, tako da je unapređenje i osavremenjavanje nacionalnog obrazovnog sistema jedan od najvećih prioriteta. Globalizacija u svim segmentima ekonomskog razvoja, zahteva umrežavanje nacionalnih obrazovnih sistema u okviru jedinstvenog obrazovnog sistema Evropske unije, u cilju standardizacije nastavnog procesa i efikasnog transfera novih znanja i tehnologija.

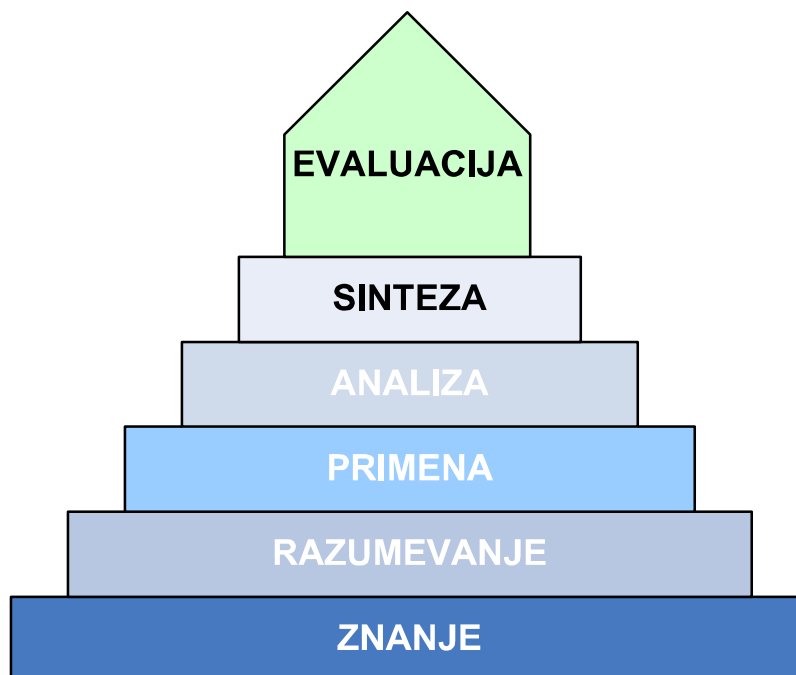
Obrazovanje predstavlja veoma kompleksan kontinualni nastavni proces, koji je usmeren na razvoju stavova, sticanju trajnih primenjivih znanja i veština. Proces obrazovanja ne završava se redovnim obrazovanjem, već se nastavlja kroz program celoživotnog učenja. Sistem obrazovanja zahteva savremene nastavne planove i programe, koji odgovaraju potrebama savremenog informatičkog društva. Nastavni proces u današnjem sistemu obrazovanja zasnovan je na sledećim oblicima nastave:

- Tradicionalna nastava – tradicionalna frontalna nastava u učionici sa 30 učenika „licem u lice“ (*eng. face-to-face*),
- Tradicionalna nastava koja je obogaćena korišćenjem informacionih tehnologija (multimedijalne prezentacije, video materijali)
- Hibridna ili mešovita nastava (*eng. hybrid, mixed, blended learning*) – predstavlja kombinaciju nastave u učionici i elektronskog učenja na daljinu
- Učenje na daljinu (*eng. distance learning*) – nastava koja je u potpunosti zasnovana daljinskom učenju primenom Internet tehnologija i virtuelnih učionica

Sistem obrazovanja mora biti otvoren za sve vrste novih tehnologija, kako bi mogao da odgovori zahtevima savremene industrije i društva. Proces unapređivanja obrazovanja je kontinualni proces kojim se bave državne institucije i velki broj istraživača iz različitih naučnih disciplina. Organizacija i modernizacija nastavnog procesa mora biti zasnovana na poštovanju opštih didaktičkih i metodičkih principa [12-14]. Jedan od široko prihvaćenih principa u procesu učenja, definisao je 1956.godine sa saradnicima psiholog Bendžamin Blum (1913-1999). Blumova taksonomija ciljeva vaspitanja i obrazovanja zasniva se na tri domena:

- Kognitivni domen (znanja)
- Psihomotorni domen (veštine)
- Afektivni domen (stavovi, vrednosti i interesovanja)

Na slici 2.1 prikazane su faze u procesu učenja po nivoima, od najnižeg do najvišeg. Blum je ciljeve i ishode učenja u okviru kognitivnog domena razvrstao u šest nivoa, od najnižeg nivoa prepoznavanja činjenica, kroz kompleksne i apstraktne nivoe, do najvišeg nivoa – evaluacija.



Slika 2.1: Blumova taksonomija

Prvi nivo “*znanje*” predstavlja proces sticanja osnovnih činjenica, podataka i pojmova koje učenici moraju znati, da bi se upoznali sa gradivom. Drugi nivo “*razumevanje*” predstavljaju kognitivni proces koji se koriste za razumevanje informacija, interpretaciju, poređenje, povezivanje i proširenje znanja. Na trećem nivou “*primena*” je primena usvojenih znanja kroz modifikaciju, demonstraciju i rešavanje problema korišćenjem usvojenih znanja i veština. Četvrti stepen Blumove taksonomije predstavlja nivo “*analiza*”, koji zahteva prepoznavanje smisla, identifikaciju komponenti, određivanje strukture, poređenje, klasifikaciju i sistemsku analizu. Peti nivo je “*sinteza*”, koji se zasniva na korišćenju postojećih znanja na osnovu kojih se vrši integracija znanja iz različitih oblasti, modifikacija i formulacija starih ideja u cilju stvaranja novih znanja. Najviši nivo je “*evaluacija*”, koja vrši procenu vrednosti teorija i izlaganja, bira na osnovu

argumenata, vrši verifikaciju vrednosti podataka, komparaciju i generisanje rezimea i zaključaka.

Tendencije razvoja obrazovanja su primena novih informacionih tehnologija, personalizacija učenja, nastava usmerena na sticanje kompetencija, problemski orijentisana nastava i eksperimentalna nastava. Savremeni nastavni planovi i programi u stručnom obrazovanju kreiraju se prema definisanim kompetencijama obrazovnih profila, sa jasno definisanim ciljevima i ishodima obrazovanja. Za svaki obrazovni profil definisane su stručne kompetencije, koje će učenik imati posle završetka školovanja. Za sticanje stručnih kompetencija, definisana su potrebna praktična znanja i veštine. Osnovna znanja stiču se kroz opšteobrazovne predmete, opšta stručna znanja stiču se kroz opšte stručne predmete, dok se praktične veštine stiču kroz stručne module. Primenom teorijskih znanja kroz praktičan rad, vrši se sinteza teorijskih znanja iz različitih oblasti u cilju sticanja praktičnih veština i razvoj stavova.

Dinamičan razvoj nauke i tehnike postavlja visoke zahteve obrazovnim institucijama u stručnom obrazovanju na svim nivoima školovanja. Najveći izazov u obrazovanju je: “Kako sa postojećom opremom i tehnologijom obrazovati stručne kadrove, koji će biti osposobljeni da upravljaju tehnološkim sistemima budućnosti?”. Obrazovanje u oblasti mehatronike predstavlja kompleksan nastavni proces i zahteva primenu savremenih nastavnih metoda i modernih didaktičkih sistema. Novi koncept obrazovanja u ovoj oblasti treba da omogući realno i virtuelno okruženje za obrazovanje, koje će povezati teorijska znanja i praktične veštine, primenom inovativnih nastavnih metoda. Za brz i pouzdan transvers znanja i novih tehnologija neophodno je korišćenje realnih i virtuelnih didaktičkih sistema. Cene savremenih mehatronskih didaktičkih sistema su veoma visoke, što predstavlja prepreku školama i fakultetima da obezbede dovoljan broj različitih sistema za sticanje praktičnih veština. Jedan od načina za rešavanje ovog problema je formiranje mreže Web laboratorija za daljinsko eksperimentalno učenje na nivou zajednica srednjih stručnih škola i Univerziteta, i deljenje laboratorijskih resursa.

2.1 Teorije učenja

Proces sticanja znanja i veština evaluira razvojem ljudskog društva. Različite teorije učenja analiziraju proces učenja sa različitih aspekata, u različitim vremenskim periodima. Ove teorije imaju različite karakteristične stavove, ali se u nekim delovima preklapaju i dopunjuju. Najznačajnije teorije učenja su:

- Bihevioristička teorija
- Kognitivistička teorija
- Konstruktivistička teorija
- Konektivistička teorija

2.1.1 Bihevioristička teorija učenja

Ova teorija učenja razvijena je krajem 19. i početkom 20. veka. Najznačajniji predstavnici ove teorije su: Ivan Pavlov, Edward Thorndike, John Watson i Burrhus Skinner. Bihevioristička teorija posmatra učenje kao promenu u ponašanju, koja je uslovljena stimulima iz spoljašnjeg okruženja (*Irena Chen*). Prema ovoj psihološkoj teoriji učenje predstavlja proces koji kao rezultat ima vidljivu promenu u ponašanju, do koje se dolazi ponavljanjem gradiva i postupaka. Ova teorija se zasniva samo na vidljivim rezultatima, dok su unutrašnji procesi smatraju nevažnim u procesu učenja. Kod ovog pristupa učenja unapred su definisani ishodi učenja, učenje je organizovano od lakšeg ka težem gradivu, od poznatog ka nepoznatom, od teorije ka praksi. Motivacija u procesu učenja je zasnovana na verbalnim pohvalama i pozitivnom vrednovanju. Praćenje napredovanja učenika vrši se stalnim testiranjem i ocenjivanjem učenika. Iako je ovo najstarija teorija učenja i usko vezana za klasičnu nastavu, pogodna je za pripremu kod izlaganja novog gradiva u nastavi gde je dominantan veliki broj podataka i formula. Značaj primene Biheviorističke teorije na elektronsko obrazovanje je:

- Definirati ishode i ciljeve učenja na početku učenja, kako bi učenici na kraju svake lekcije mogli da procene da li su dostigli očekivane ishode
- Redovno proveravati dostignuća učenika u okviru integrisanog sistema učenja i omogućiti trenutni uvid učenika u svoje rezultate
- Kreirati multimedijalne nastavne materijale tako da motivišu učenje. Nastavne sadržaje prezentovati od jednostavnog ka složenom, od poznatog ka nepoznatom, od teorije prema praksi
- Omogućiti brzu povratnu informaciju o napretku u procesu učenja i korektivne procedure ukoliko učenik ne uspeva da ostvari postavljene ciljeve

2.1.2 Kognitivistička teorija učenja

Ova teorija nastala je polovinom 20. veka i zasniva se na kognitivnoj psihologiji, koja učenje posmatra kao mentalni proces. Predstavnici ove teorije su: Jerome Bruner, David Merrill, Edward Tolman, Bernard Weiner, John Sweller, Jean Piaget i David

Ausebel. U proces učenja uključeni su: saznavanje, razmišljanje, pamćenje, apstrakcija, motivacija i metakognicija. Kognitivizam proučava način na koji učenici primaju i interpretiraju nastavni sadržaj, kako pamte, kako rešavaju probleme i formulišu koncepte. Kognitivisti za razliku od bihevorista smatraju da je učenje mnogo više od vidljive promene u ponašanja. Učenje predstavlja aktivan proces razvijanja misaonih struktura koje se uklapaju u postojeće znanje i strukture (akomodacija), a postojeće misaone strukture se menjaju i prilagođavaju pod dejstvom novog iskustva (asimilacija). Ove teorija se zasniva na sledećim stavovima: povećanje pažnje učenika, ograničen broj informacija, naglašavanje ključnih informacija, poštovanje redosleda informacija, grupisanje informacija u logičke celine, težina zadataka je odgovarajuća kognitivnom stepenu razvoja učenika, pružanju informacija u razumevanju novog gradiva i primeni novih tehnologija u prezentovanju novih informacija. Značaj primene Kognitivitičke teorije na elektronsko obrazovanje je:

- Najvažnije informacije moraju biti centralno pozicionirane i naglašene
- Nastavni materijal mora biti prilagođen uzrastu učenika i kognitivnom kapacitetu učenika
- Fokusirati pažnju na izlaganje
- Pre početka nastave koristiti pitanja koja imaju za cilj aktiviranje postojećih znanja učenika i motivisati ih za učenje
- Lekcije organizovati u manje logičke celine
- Povezivati teorijska znanja sa praktičnom primenom
- Nastavni materijal treba da uključi različite aktivnosti za različite stilove učenja
- Omogućiti proces praćenja napredovanja učenika kroz „on-line“ proveru i ocenjivanje

2.1.3 Konstruktivistička teorija

Konstruktivizam predstavlja jednu od kognitivnih teorija učenja, prema kome se usvajanje znanja zasniva na aktivnom učešću učenika u nastavnom procesu. Ova teorija nastala je osamdesetih godina 20. veka, a najznačajniji predstavnici su: Lav Simjonovič Vigotski, Jeanu Piaget, Jean Lave, John Dewey, Jerome Bruner i Giambattista Vico. Prema ovoj teoriji, učenicima mora biti omogućeno da samostalno konstituišu znanje na osnovu ličnih iskustava i hipoteza, umesto da ga u formi instrukcija dobijaju od nastavnika. Hipoteze se kontinuirano proveravaju kroz process društvene interakcije. Konstruktivističke teorije učenja analizirajući proces učenja, kreću se u rasponu od

shvatanja - po kojem je proces učenja dominantno uslovljen intelektualnim razvojem onoga ko uči (Pijaže), preko identifikovanja uslovljenosti procesa učenja načinom sagledavanja sveta (Bruner), do shvatanja da dominantan uticaj na razvoj kognitivnih sposobnosti ima društvena interakcija (Vigotski). Konstruktivistička teorija ne vidi učenika kao pasivnog subjekta kome se može preneti znanje, već kao aktivnog subjekta koji stiče znanja i veštine kroz proces analize informacija i ličnu interpretaciju naučenog. Uloga nastavnika je da usmerava učenike na samostalno istraživanje i logičko zaključivanje na osnovu prethodnih iskustava. Najvažnije preporuke Konstruktivističke škole su:

- Učenje mora biti stimulativan, interesantan i aktivan proces, koji u centar nastavnog procesa postavlja učenika
- Učenje mora biti svrsishodno za učenika, teorija mora biti usko povezana sa praksom, kako bi se stekle primenjiva praktična znanja
- Učenici sami kreiraju svoje znanje, kroz interaktivnu nastavu učenici istražuju i biraju izvore informacija, sami definišu brzinu i vreme učenja
- Saradničko učenje i timski rad

Značaj primene Konstruktivističke teorije na elektronsko obrazovanje je:

- Učenje mora biti aktivan proces – stimulisanje učenika da primenjuje usvojena teorijska znanja
- Učenike treba usmeriti da samostalno konstruišu znanja korišćenjem različitih izvora informacija, međusobnom interakcijom i interakcijom sa nastavnikom
- Vršnjačko učenje i rad u grupi povećava motivaciju za učenje
- Predvideti dovoljno vremena za analizu nastavnih materijala i davanje odgovora na praktična pitanja
- Nastavni materijali moraju biti kvalitetni, svrsishodni i smisleni
- Zadaci i projekti treba da omoguće primenu stečenih znanja
- Proces učenja mora biti interaktivan

2.1.4 Konektivistička teorija

Razvojem informaciono-komunikacijskih tehnologija, oblast obrazovanja dobija novu dimenziju, tako da postojeće teorije učenja ne mogu uspešno da objasne značaj primene novih tehnologija u procesu učenja. Konektivistička teorija predstavlja alternativnu teoriju učenja digitalnog doba. Ovu teoriju razvio je George Siemens 2004.godine. Konektivizam ističe značaj računarske tehnike, softvera i globalne računarske mreže u procesu učenja. Kod ove teorije akcenat nije na tome da se nauči što veći broj informacija, već da učenici steknu osnovna znanja i osposobe se da pretražuju, povezuju i koriste nova znanja. Akcenat se stavlja na značaj stalnog stručnog usavršavanja i doživotnom učenju. Najznačajnije preporuke konektivističke škole su:

- Primena Interneta i softverskih paketa u nastavi
- Učenje i znanje zasniva se na različitostima mišljenja
- Učenje je proces povezivanja više izvora informacija
- Učenje kroz povezivanje i umrežavanje
- Usvajanje novih znanja je važnije od trenutnog znanja
- Sticanje tačnih i ažurnih informacija
- Razlikovanje značajnih od bezvrednih informacija
- Proces učenja podrazumeva donošenja odluka

2.2 Nastavne metode

Obrazovanje predstavlja veoma složen nastavni proces, koji je usmeren na sticanje osnovnih i specijalističkih znanja i veština. U tom procesu primenjuju se različite nastavne metode koje su zasnovane na pedagoškim i didaktičkim principima. Na svim nivoima obrazovanja dominantni su sledeći oblici nastavnog rada: frontalni, grupni, rad u parovima i individualni. Ovi oblici nastavnog rada se kombinuju u toku školovanja, u zavisnosti od ciljeva i ishoda nastavnog procesa. Nastavne metode se mogu svrstati u tri velike grupe:

- verbalne metode (metoda usmenog izlaganja, metoda razgovora, metoda čitanja i rad na tekstu)
- vizuelne metode (metoda demonstracije i ilustrativna metoda)
- praktične metode (metoda laboratorijskih i praktičnih radova)

Za ostvarivanje definisanih nastavnih planova i programa, u tradicionalnoj nastavi stručnog obrazovanja dominantne su sledeće metode: monološka, dijaloška, demonstrativna i metoda praktičnih i laboratorijskih radova.

Monološka metoda je dominantna kod frontalnog oblika rada, kada nastavnik izlaže novo gradivo – „predavanja“ . Ova metoda je veoma ekonomična jer omogućava rad sa velikim brojem učenika – studenata (20-100), omogućava lakše postizanje sistematičnosti, racionalnosti i ima veliki vaspitni značaj. Kod ove metode predavanja su usmerena na prosečnog učenika, aktivan je samo nastavnik, dok učenici imaju ulogu slušalaca, veoma su pasivni, tako da nastavnik nema povratnu informaciju od učenika o kvantitetu i kvalitetu nastave.

Dijaloška metoda pogodna je za usvajanje novih znanja sa manjim grupama (20-30) i utvrđivanje gradiva. Nastava je zasnovana na heurističkom razgovoru – postavljanju razvojnih pitanja, logičkom razmišljanju i zaključivanju. Nastavnik kroz različita pitanja vodi učenike do otkrivanja novih znanja. Pitanja postavljaju i učenici, tako da ovom metodom oni postaju aktivni učesnici nastavnog procesa. Ova metoda podstiče aktivnost učenika, razvija logičko razmišljanje učenika, razvija samopouzdanje i samostalnost učenika. Nedostaci ove metode su: neekonomičnost, manja sistematičnost i nije pogodna za obradu gradiva u svim oblastima. Kombinacijom ove dve metode razvijena je *monološko-dijaloška* metoda koja je veoma česta kod predavanja nastavnika u osnovnom i srednjoškolskom obrazovanju.

Demonstrativna metoda omogućava usvajanje znanja korišćenjem modela, crteža, slika, šema, maketa, simulacija i video materijala. Na ovaj način se omogućava usvajanje trajnih znanja, razvija se proces posmatranja, zapažanja i zaključivanja, kao i povezivanje teorije i prakse. Ova metoda se kombinuje sa monološkom i dijaloškom metodom na časovima predavanja, laboratorijskih vežbi i praktičnog rada.

Metoda praktičnih i laboratorijskih radova omogućava proveru i primenu teorijskih znanja u laboratorijskim i realnim industrijskim uslovima. Kroz izvođenje eksperimenata, posmatranja, praćenja, merenja, zapažanja i analize svih rezultata omogućava se sticanje praktičnih znanja i veština, dokazivanje i potvrđivanje teorijskih znanja. Ova metoda je veoma skupa jer zahteva dobru opremljenost školskih laboratorija savremenom didaktičkom opremom i rad u malim grupama. Primenom ove metode povećava se interesovanje učenika, povećava njihova aktivnost, omogućava se sticanje trajnih primenjivih praktičnih znanja i veština.

Savremeni pristup nastavi u centar obrazovnog procesa postavlja učenika, kao aktivnog učesnika. Za ovakav pristup nastavi razvijene su inovativne nastavne metode koje su bazirane na primeni savremenih didaktičkih sistema, softverskih paketa za modeliranje i simulaciju, na primeni Internet tehnologija i novih web servisa. Za uspešno

ostvarivanje definisanih ishoda u savremenom nastavnom procesu kombinuju se nove metode i modeli učenja: ilustrativno mini-predavanje, vođena diskusija, studija slučaja, igranje uloga, učenje otkrivanjem, vršnjačko učenje, problemska nastava, projektna nastava, elektronsko učenje na daljinu, mobilno učenje, inteligentni tutorski sistemi, učenje kroz igru, obuka na radnom mestu, laboratorijska i praktična nastava, praktična obuka na daljinu primenom web tehnologija, primena novih web servisa: forumi, diskusione grupe, video-konferencije, kvizovi, ankete, izveštaji i slično.

2.3 Elektronsko učenje

Razvoj računarske tehnike, softvera i komunikacionih tehnologija omogućio je primenu informacionih tehnologija (IT) u svim segmentima savremenog društva. Od velikog je značaja primena IT u procesu obrazovanja. Jedan od najznačajnijih koncepata obrazovanja, predstavlja elektronsko učenje (*eng. e-learning*), koje pojavom Internet tehnologija dobija novu dimenziju i primenu – elektronsko učenje na daljinu (*eng. Distance Learning*). „Po definiciji Američke asocijacije ASTD iz 2001. godine (American Society for Trainers and Development) *e learning*, odnosno u prevodu **elektronsko učenje**, ili skraćeno **e učenje**, je metodologija kojom se *”nastavni sadržaj ili aktivnosti u učenju isporučuju uz pomoć elektronskih tehnologija”* [15].

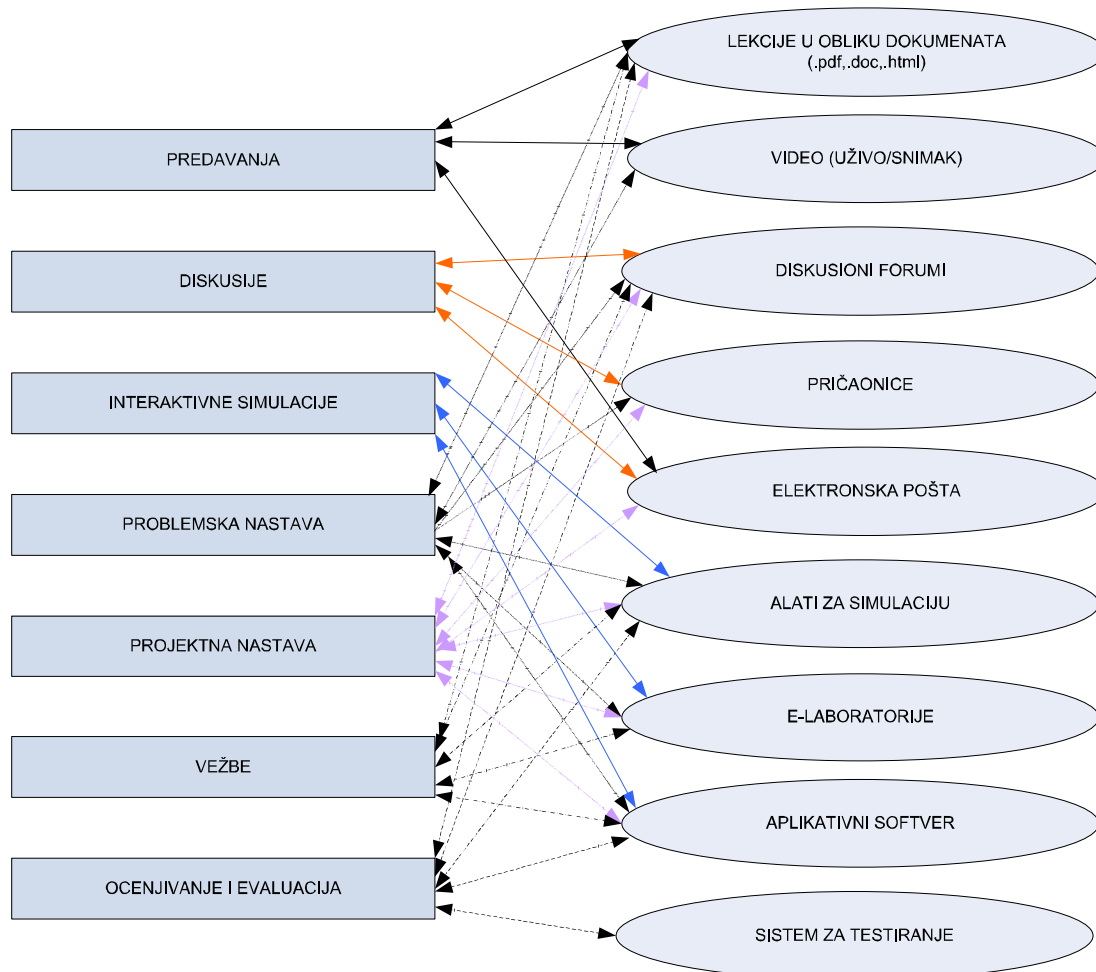
Prve značajne korake u razvoju učenja na daljinu napravio je engleski učitelj stenografije Isak Pitman u Engleskoj 1840.godine. On je učenicima koji su se nalazili u različitim gradovima zadavao da prepisuju kratke pasuse iz Biblije, a učenici su materijale vraćali nastavniku na ocenjivanje poštom. Na ovaj način, prvi put je prevaziđen problem geografske udaljenosti učenika i nastavnika.

Prvu primenu univerzitetskog učenja na daljinu, razvio je 1892.g. Univerzitet Penn State sa još dva univerziteta u Sjedinjenim Američkim Državama. Ovi Univerziteti su štampane materijale za učenje dostavljali studentima iz udaljenih krajeva, koji nisu mogli da pohađaju redovnu nastavu. Razvojem tehnike sistem učenja je vremenom obogaćen novim sadržajima: pojava radija (1920.) i televizije (1950.). Studenti su dobijali materijale za učenje, ali nisu imali mogućnost komunikacije sa profesorima i kolegama. Transfer znanja bio je jednosmeran, tako da studenti nisu mogli da dobiju informaciju o svom napredovanju u procesu učenja. Pojavom personalnih računara (1981.) počela je nova faza u razvoju učenja na daljinu. Izrada nastavnih materijala pomoću računara, omogućila je da se u lekcijama, pored teksta, nalazi zvuk, slike, animacije, video materijali i simulacije. Ovakvi elektronski nastavni materijali distribuirani su pomoću video traka, disketa i

kompakt diskova. Primenom Interneta i web tehnologija elektronsko učenje na daljinu dobija novu dimenziju i mnogo veću primenu.

Elektronsko učenje predstavlja veoma širok pojam koji obuhvata korišćenje različitih informacionih tehnologija u procesu učenja i sticanja veština: multimedijalni sadržaji lekcija, prezentacije, nastavni filmovi, elektronski testovi, različiti web orijentisani sadržaji i slično. Razvoj Interneta omogućio je razvoj elektronskog učenja na daljinu baziranog na web tehnologijama u realnom vremenu. Učenje na daljinu putem Interneta može se samostalno primenjivati u kreiranju različitih nastavnih kurseva, a veoma često se koristi kao dopuna tradicionalnom sistemu učenja. Kombinacija tradicionalnog sistema učenja i elektronskog učenja na daljinu naziva se hibridni model učenja (*eng. blended learning*). Za elektronsko učenje karakteristični su različiti nazivi na engleskom jeziku sa sličnim značenjem: *E-learning, Web Based Learning, On-line education, Distance learning, Distance training, Distance education, Distribute learning, Mobile learning, Virtual education, Remote learning, Blended learning, Advanced Distributed Learning* [15]. Zajednička karakteristika ovih termina predstavlja obrazovanje na daljinu primenom elektronskih i komunikacionih tehnologija. Elektronsko učenje evaluira razvojem računarske tehnike i informatike, tako da se definicije elektronskog učenja razlikuju, u zavisnosti u kom periodu su nastale. Osamdesetih godina prošlog veka, elektronsko učenje se definiše kao oblik obrazovanja u kome se lekcije isporučuju u elektronskoj formi. Pored distribucije nastavnih materijala u elektronskom učenju, veoma važan činilac predstavlja elektronska komunikacija između studenata i nastavnika, kao i međusobna komunikacija između studenata. Komunikacija se u početku odvijala asihrono razmenom elektronske pošte (e-mail) i preuzimanjem elektronskih knjiga i priručnika sa FTP servera (*off-line*). Sledeća faza u razvoju elektronskog učenja, predstavlja primena “*on-line*” web servisa, pomoću kojih se omogućava razmena poruka u realnom vremenu (*chat*), a kasnije audio i video servisa (Web TV, Web konferencije, praćenje predavanja preko Interneta). Danas, elektronsko učenje predstavlja čitav sistem postupaka, procesa i nastavnih materijala organizovanih u jedinstven sistem za upravljanje učenjem (*eng. Learning Management System - LMS*). Elektronsko učenje (*Webster, 2006.*) odlikuju sledeće karakteristike: visok nivo interaktivnosti, integracija simulacija i animacija, multimedijalna podrška, integracija učenja u učionici i razvoj hibridnih nastavnih sistema, podržanost različitim elektronskim materijalima u različitim formatima, utemeljenost na zajedničkom učenju učenika i nastavnika, sistem upravljanja učenjem zasnovan na mogućnostima Web-a.

Razvoj i dostupnost Internet tehnologija omogućio je transvers obrazovnog procesa iz “kalsične učionice” u “oblake”. Svi oblici nastave koje se realizuju u klasičnom sistemu školovanja, dobili su odgovarajući ekvivalent kroz primenu različitih web alata i novih nastavnih metoda. U radu [16] *Krneta i Ščepanović* dali su preporuke za razvoj i realizaciju učenja na daljinu, dok su u radu [15] istraživači *Turapova & Turapov 2005.* dali grafički prikaz odnosa klasičnih oblika nastave i odgovarajućih alata elektronskog učenja [17] (slika 2.2)



Slika 2.2: *Relacione veze između tradicionalnih didaktičkih metoda i e-alata (Turapova & Turapov, 2005)*

Kod elektronskog učenja nastavni plan i program u pogledu sadržaja, obima i kvaliteta u potpunosti mora odgovarati definisanim ishodima učenja. Kod realizacije nastave na daljinu, potrebno je na početku kursa definisati ciljeve i očekivane ishode, opis kursa, aktivnoati učenja, način ocenjivanja i dinamiku realizacije, koji su zasnovani na psihološko-pedagoškim principima.

2.4 Web tehnologije

Dominantan Internet servis koji se koristi više od 20 godina je World Wide Web (*WWW*). Ovaj mrežni servis omogućava komunikaciju i razmenu elektronskih informacija, bez obzira na geografski položaj korisnika. Autor koncepta današnjeg Interneta je profesor Tim Berners Li, koji je 1989. godine u Švajcarskoj definisao sistem *hiperteksta*, koji će raditi na globalnoj mreži bez obzira na tip operativnog sistema. Profesor Li je 1990. godine razvio mrežni servis zasnovan je na protokolu HTTP (*Hyper Text Transfer Protocol*) i načinu identifikacije dokumenata na Internetu – URI (*Unique Resource Indicator*). Za pregled dokumenata na Internetu definisan je čitač „WorldWideWeb“, koji je kasnije promenio ime u Nexus. Na NCSA Univerzitetu u Ilinoisu (SAD), 1992. godine razvijen je prvi grafički softver pod imenom MOSAIC, na osnovu koga je razvijen prvi Internet pretraživač Netscape. Razvoj Interneta i web servisa odvija se kroz tri generacije: Web 1.0 (1991-2003), Web 2.0 (2004- danas) i Web 3.0 koja je razvoju.

Prva generacija *Web 1.0* zasnovana je na HTML jeziku, karakterišu ga statičke strane, gde su tekst i slike postavljeni u okvire. Sadržaj stranica postavlja vlasnik sajta, a interakcija između korisnika i vlasnika sajta odvijala se uglavnom asihrono, preko elektronske pošte. Ovaj servis je poznat kao „*Read Only*“ *Web*, jer korisnici su mogli samo da čitaju postavljeni Web sadržaj, bez mogućnosti da ga proširuju i menjaju.

Druga generacija Web 2.0 je u velikoj meri promenila koncept Interneta, jer se zasniva na Web servisima i aplikacijama, konceptu deljenja informacija između korisnika, interakcije i saradnje. Platforma Web 2.0 je zasnovana na dinamičkim Web stranicama, koje se učitavaju na osnovu zahteva korisnika. Ona je poznata kao „*Read-Write*“ *Web*, zbog mogućnosti da korisnici koriste i generišu Web sadržaje. Osnovna karakteristika Web 2.0 je interaktivna komunikacija svih korisnika, koji utiču na izgled i sadržaj Web stranica. Karakteristični otvoreni standardi i aplikacije su: tags, wiki, blog, XML (*Extensible Markup Language*), RSS (*Really Simple Syndication*), CMS (*Content Management System*), API-a (*Application Programming Interface*), Ajax (*Asynchronous JavaScript And XML*) [16]. Aplikacije na Web 2.0 nisu više namenjeni samo za korišćenje računara, već su prilagođene za rad sa mobilnim uređajima, „tablet“ uređajima i PDA uređajima, bez obzira na tip operativnog sistema i proizvođača uređaja. Zajedničke osobine Web 2.0 aplikacija su:

- Programsko okruženje zasnovano na otvorenom kodu („*opensource interface*“)

- Konfiguracija po meri korisnika („*user-friendly*“)
- Mogućnost prenosa podataka i multimedijalnih sadržaja („*upload/download*“)

Web 2.0 je svoju ekspanziju postigao razvojem aplikacija za razmenu multimedijalnih sadržaja, komunikaciju u realnom vremenu i društvenih mreža: *YouTube, Flickr, Wikipedia, Facebook, Twitter, Google, Google Maps, SlideShare, Skype* i drugi [18].

Treća generacija Web 3.0 je tehnologija u razvoju, koja se zasniva na veštačkoj inteligenciji. Predviđa se da će se web pretraživači bazirani na Web 3.0 ponašati kao lični asistenti korisnika, koji će imati sve informacije o korisniku, povezivati informacije i kod pretraživanja na osnovu upita, generisati korisniku informaciju koja je usko povezana sa njegovim afinitetima, željama, potrebama, mestu stanovanja i potrebama. Savremeni pretraživači koriste kompleksne algoritme i kriterijume za rangiranje da bi dali brz i tačan odgovor na postavljeni upit. Tehnologija Web 3.0 zasnivaće se na „pametnim“ aplikacijama koje će znati gde se nalazimo, ko smo, koja su naša interesovanja i na osnovu analize podataka, vizuelizacije i drugih tehnika pretraživanja, obezbediti i predložiti korisnicima pravovremene i tačne informacije [19]. Razvoj Interneta u narednom periodu zasnivaće se na razvoju edukativnih igara (*Game theory*), modeliranju i simulaciji (*Modeling and Simulation*), opšte semantike (*General semantics*), govornog okruženja (*Narrative Environments*), društvu znanja (*Knowledge Space*), organizacionih promena (*Organizational change*) računarske lingvistike (*Computational Linguistics*) (Silver Aaron, 2010).

Sa razvojem Web tehnologija, došlo je do velikih promena u realizaciji elektronskog učenja na daljinu. Učenje bazirano na Web 1.0 tehnologijama poznato je pod nazivom *e-Learning 1.0*. Ovaj sistem je zasnovan na strukturiranim i organizovanim računarskim kursevima, koji su kreirani po ugledu na nastavu iz klasične učionice. Kurseve su kreirali profesionalni nastavnici, a svaki kurs je sastavljen od određenog broja multimedijalnih lekcija, tutorijala i testova. Materijali su postavljani na web servere, korisnici su preuzimali lekcije, samostalno izučavali sadržaj i rešavali zadate testove. Testove su pregledavali i ocenjivali nastavnici, a komunikacija se uglavnom odvijala asihrono, uglavnom preko elektronske pošte.

Pojavom Web 2.0 tehnologija, elektronsko učenje je dobilo novu formu poznatu kao *e-Learning 2.0*. Primenom socijalnog softvera, elektronsko učenje evaluira, dok se u proces kreiranja kurseva uključuju učenici. Težište obrazovnog procesa je pomerenom sa sadržaja na komunikaciju i saradnju između svih učesnika. Primenom ovog koncepta učenja, učenici rade i uče zajedno, omogućava im se velika kreativnost, povećava

motivisanost za rad, mogu međusobno da dele sadržaje i razmenjuju iskustva u cilju sticanja novih znanja i veština.

Elektronsko učenje dobija novu dimenziju brzim razvojem računarskih i internet tehnologija. Krajem 20.veka počeo je razvoj i implementacija sistema za upravljanje učenjem. Sistem za upravljanje učenjem predstavljaju sistemski organizovano softversko okruženje, zasnovan na pedagoškim i didaktičkim principima, koji obezbeđuje ekvivalentne uslove za učenje kao kod tradicionalnog sistema učenja. Ovi sistemi omogućavaju interaktivan rad kod obrazovanja na daljinu, praćenje aktivnosti učenja, napredovanja učenika i studenata, kao i formiranje baze podataka. U obrazovnim sistemima širom sveta koriste se različiti komercijalni LMS (*Blackboard Learning System, ANGEL_Learning, eCollege*) i nekomercijalni LMS (*ATutor, Moodle, Edmodo, ILIAS, Claroline*), koji se razlikuju po svojim karakteristikama i ceni. Najčešće korišćena besplatna platforma za kreiranje virtualne „on-line“- učionice je Moodle LMS (www.moodle.org). Ovaj sistem je pogodan za laku organizaciju kurseva, postavljanje lekcija, video i audio materijala, prezentacija, testova znanja, foruma, razmena poruka, chatova i drugi internet servisa. Sistem se koristi kao dopuna klasičnom sistemu obrazovanja ili kao sistem za kreiranje on-line kurseva, kod formalnog i neformalnog obrazovanja. Ovakav LMS sistem primenjiv je prvenstveno za sticanje teorijskih znanja. Za obrazovanje u oblasti tehnike, ovaj sistem nije potpun, jer ne omogućava rad sa laboratorijskom opremom i sistemima. Da bi sistem za upravljanje učenjem na daljinu bio potpun, neophodno je omogućiti daljinski pristup laboratoriji za sticanje praktičnih veština.

Elektronsko učenje na daljinu je svojom pojavom i razvojem omogućilo prenos znanja kroz komunikacioni sistem bez obzira na geografsku lokaciju polaznika. Elektronsko učenje se koristi za organizaciju različitih kurseva, stručnog usavršavanja i kao metod studiranja na daljinu. Glavne prednosti elektronskog učenja su:

- Prostorna i vremenska nezavisnost korisnika
- Široka dostupnost i učešće velikog broja korisnika
- 7/24-časovni pristup virtuelnoj učionici
- Interakcija između polaznika i predavača
- Individualno učenje – student samostalno definiše strategiju, dinamiku i vreme učenja
- Vršnjačko učenje - međusobna interakcija korisnika

- Kooperativno učenje – rad u timovima na projektu bez obzira na lokaciju i vreme
- Fleksibilnost i prilagodljivost sadržaja korisniku
- Multimedijalna podrška – demonstracija i simulacija
- Provera znanja i ocenjivanje u realnom vremenu
- Efikasnije učenje
- Obuka velikog broja korisnika u kratkom vremenskom intervalu
- Niži troškovi obrazovanja

Pored svojih prednosti, elektronsko učenje na daljinu ima i svoje nedostatke:

- Potrebna opšta znanja iz računarstva i informatike
- Starije generacije polaznika teže prihvataju ovaj vid učenja
- Zahteva se visok stepen samodiscipline
- Potrebna određena predznanja iz određenih oblasti
- Potrebna odgovarajuća hardverska oprema za pristup elektronskim kursovima
- Potreban sistem za postavljanje i održavanje virtuelne učionice
- Zahteva dug period za kreiranje nastavnih materijala
- Sistem u određenim oblicima ne omogućava individualnu motivaciju za učenje

Dinamičan razvoj nauke i primena novih tehnologija u svim sferama društva, zahteva stalno usavršavanje već svršenih srednjoškolaca, diplomiranih studenata kroz sistem za „*Celoživotno učenje*“. Zbog velikih troškova za organizovanje različitih seminara i odsustva sa posla, velike kompanije usmeravaju radnike na elektronsko učenje i studiranje. „Prema nekim istraživanjima ukupni troškovi mogu se smanjiti od 50 do 70%. Uštede u vremenu procenjuju se na 35-45% (izvor Deloitte Consulting)“[20].

Dominantan sistem u učenju na svim nivoima predstavlja tradicionalna nastava, koja zahteva prisustvo studenta u učionici. Transver znanja odvija se od nastavnika prema studentu, tako da nastavnik ima direktnu povratnu informaciju od studenta o efektima učenja. Studenti imaju mogućnost da utiču na intenzitet i nivo izlaganja profesora. U ovom sistemu ograničen je broj učenika u grupi, raspored predavanja je fiksna, a troškovi obrazovanja su veoma visoki. Glavni faktori uspešnog učenja predstavljaju: jasno definisani ciljevi i ishodi učenja, savremeni i kvalitetni nastavni planovi i programi, multimedijalna predavanja, prateći nastavni materijali, interakcija između profesora i studenta i odgovarajuće laboratorije i oprema za sticanje praktičnih veština.

Za realizaciju elektronskog učenja, projektovani su sistemi za učenje na daljinu (*Distance Learning System – DLS*). Ovi sistemi su kreirani po uzoru na tradicionalnu

nastavu, sa ciljem da omoguće kreiranje virtuelne učionice, gde se organizuju, čuvanju i distribuiraju multimedijalni nastavni materijali, kreirani prema planu i programu kursa, predmeta ili stručnog modula. DLS omogućava formiranje baze podataka polaznika kursa, testiranje i praćenje napredovanja, njihov status, i bazu podataka nastavnih sadržaja.

U razvoju elektronskog učenja značajno mesto imaju i virtuelne laboratorije. One omogućavaju studentima daljinski pristup laboratorijskoj opremi. Ovakve laboratorije povećavaju dostupnost školskih laboratorija i kabineta, čime se smanjuju troškovi školovanja. Razvoj Web baziranih laboratorija omogućava korisnicima pristup skupoj laboratorijskoj opremi, izvođenje i praćenje eksperimenata na daljinu, individualni pristup učenju, korišćenje skupih softverskih paketa za modeliranje i simulaciju, rad na projektima, timski rad i slično.

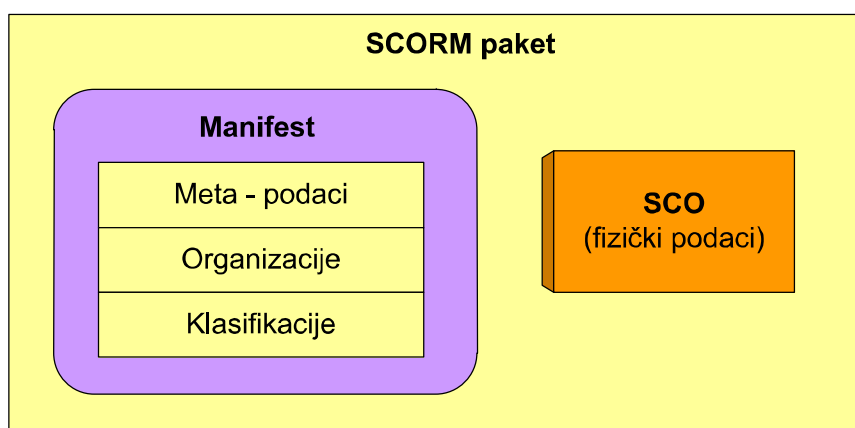
2.5 Standardizacija elektronskog učenja

Za razvoj stimulativnog virtuelnog okruženja za učenje potreban je standardizovan sistem elektronskog učenja, koji će omogućiti distribuciju i korišćenje nastavnih sadržaja na bilo kojoj softverskoj i hardverskoj platformi. Na osnovu ovih zahteva, konzorcijuma IMS, Svetskog društva inženjera elektrotehnike i elektronike IEEE i ministarstva odbrane SAD - a, pokrenuta je inicijativa Advanced Distributed Learning (ADL), koja je definisala standarde elektronskog učenja. Na osnovu ADL inicijative, definisan je standard SCORM (*Shareable Content Object Reference Model*), odnosno objektni referentni model deljenog sadržaja. Naziv referentni model dobio je, zato što SCORM ne definiše svoje nove standarde, već je zasnovan na postojećim preporukama (*npr: IMS CP – za agregaciju sadržaja, IEEE LOM za metapodatke, AICC za komunikaciju*). Pored SCORM modela koriste se i drugi modeli kao što su: Learnativity, Cisco, ALOCOM (*Abstract Learning Object Component Model*) i drugi.

SCORM predstavlja opšteprihvaćen i najčešće korišćen skup standarda i specifikacija za definisanje elektronskog učenja koje je zasnovano na Web platformi [21]. Ovaj standard definiše strukturnu organizaciju „*on-line*“ nastavnih materijala, obezbeđuje mehanizme za komunikaciju između klijenata i servera u realnom vremenu i podršku za LMS. SCORM paket sadrži jedan ili više Web orijentisanih sadržaja. Osnovna jedinica nastavnog materijala, koja predstavlja jednu lekciju, predstavlja SCO (*Shareable Content Object*). Svaki objekt sadrži tekst, slike, video materijale, interaktivne sadržaje, npr. Flash i Java aplikacije. Sadržaji su povezani relativnim hiperlink vezama i nezavisni su od njihove fizičke lokacije. Sadržaj je prilagođen za prikaz u bilo kom Web pretraživaču, svi

linkovi su relativni i svi nastavni materijali su dostupni bez obzira na lokaciju sa koje se pristupa.

SCO se sastoji iz više fajlova, koji su organizovani kao mini Web sajt sa strukturom direktorijuma. Objekti predstavljaju odgovarajuće nastavne jedinice koje su obeležene ključnim rečima i meta podacima i najčešće su strukturirani u XML formatu čime se obezbeđuje njihova nezavisnost. Na slici 2.3 prikazana je struktura SCORM paketa. Kompletan sadržaj opisan je kroz manifest koji opisuje ceo paket pomoću XML (*eXtensible Markup Language*) dokumenta. Na osnovu manifesta, LMS sistem dobija podatke o organizaciji i strukturi i sadržaju paketa.



Slika 2.3: Struktura SCORM paketa

SCORM meta-podaci opisuju različite komponente paketa. Sadržaj SCORM paketa može biti predstavljen u obliku kursa, lekcije modula ili kolekcija povezanih objekata. Organizacije predstavljaju jednu ili više aktivnosti koje opisuju način i redosled prezentovanja nastavnih materijala korisniku. Klasifikacije su atributi pomoću kojih je moguće opisati katalog i globalno pretraživati. Osnovne karakteristike SCORM standarda su:

- Prenosivost – nastavni materijali su prenosivi na različite platforme LMS
- Trajnost – nastavni materijali se mogu koristiti duži vremenski period bez obzira na hardver i softver koji korisnik koristi
- Višestruka upotrebljivost – svaki SCO se može koristiti neograničen broj puta
- Dostupnost – mogućnost pretraživanja po različitim tehnikama i kriterijumima
- Personalizacija – nastavni materijali su prilagođeni korisnicima
- Standardizacija
- Ekonomičnost
- Kvalitet

Prva verzija standarda SCORM V1.0 definisana je januara 2000. godine, a prva opšteprihvaćena verzija SCORM V1.2 oktobra 2001.g. Januara 2004. godine objavljena je prva verzija SCORM 2004, koja je imala četiri izdanja do 2009.godine. Septembra 2011.g. objavljena je nova generacija SCORM standarda pod novim imenom Tin Can Api. Aktualna verzija ovog standarda je objavljena aprila 2013.g., kao verzija Tin Can API V1.0.0, a ime projekta je promenjeno u „Experience API“ ili xAPI i „Next generation SCORM“[22]. Nove verzije standarda omogućili su korišćenje novih Web tehnologija.

2.6 Sistem za upravljanje učenjem

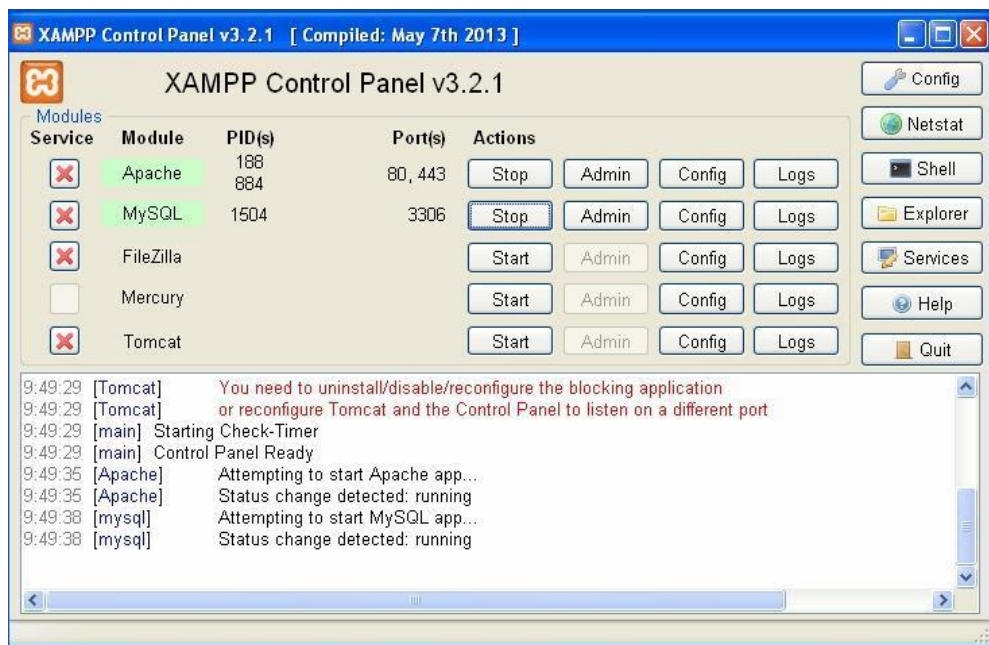
Osnovna uloga sistema za upravljanje učenjem je organizacija procesa učenja na daljinu, koji omogućava pristup lekcijama, praćenje svih oblika nastave, testiranje i praćenje napredovanja učenika. Savremeni sistemi za upravljanje učenjem zasnovani su na Web tehnologijama, imaju mogućnost nadzora i praćenja aktivnosti korisnika, kao i mogućnost testiranja, provere znanja, ocenjivanja, i evaluacije obrazovnog ciklusa. Danas je aktivan veliki broj domenski nezavisnih sistema za upravljanje procesom učenja, a najznačajniji su: Sistem za upravljanje učenjem (*Learning Management System – LMS*), Sistemi za upravljanje sadržajem (*Content Management Systems – CMS*) i Informacioni sistemi za upravljanje (*Information Management Systems– IMS*). Softverski paketi i LMS sistemi za razvoj elektronskog učenja prema vrsti licence mogu biti besplatni i komercijalni. Najpopularniji sistemi za upravljanje učenjem su: Moodle, Edmodo, Blackboard, SumTotal Systems, Skillsoft, Cornerstone, Desire2Learn, Schoology, Netdimensions, Colaborize classroom, Interactyx, Jomla LMS, Docebo. U našem obrazovnom sistemu najčešće korišćeni sistem za upravljanje učenjem je besplatni LMS – Moodle.

2.6.1 LMS Moodle

Moodle (*Modular Object-Oriented Dynamic Learning Environment*) predstavlja softversku platformu otvorenog koda za kreiranje LMS-a [23]. Ovaj softverski paket je objavljen pod licencom GNU Public License, tako da je korisnicima dostupan izvorni kod koji mogu menjati prema svojim potrebama, ukoliko i drugima omoguće korišćenje koda pod istim uslovima, pri čemu ne smeju menjati originalnu licencu i zaštitu. Autor razvojnog sistema Moodle za “*on-line*” učenje je Martin Dougiamas, koji je kreirao ovaj sistem sa ciljem da se omogući kontinualno obrazovanje i međunarodna saradnja nastavnika. Prva verzija Moodle LMS objavljena je 20. avgusta 2002. godine. Moodle sistem je opšteprihvaćen u naučnim krugovima i najčešće se koristi za kreiranje “*on-line*”

kurseva. Početkom 2015. godine Moodle je koristilo 53 337 registrovanih sajtova u 228 zemalja. Na sajtovima je postavljeno 7 529 248 on-line kurseva, koje koristi 69 646 793 korisnika (<https://moodle.org/stats/>). Korišćenje Moodle paketa je besplatno i instalaciona verzija se može preuzeti sa zvaničnog sajta <https://moodle.org>.

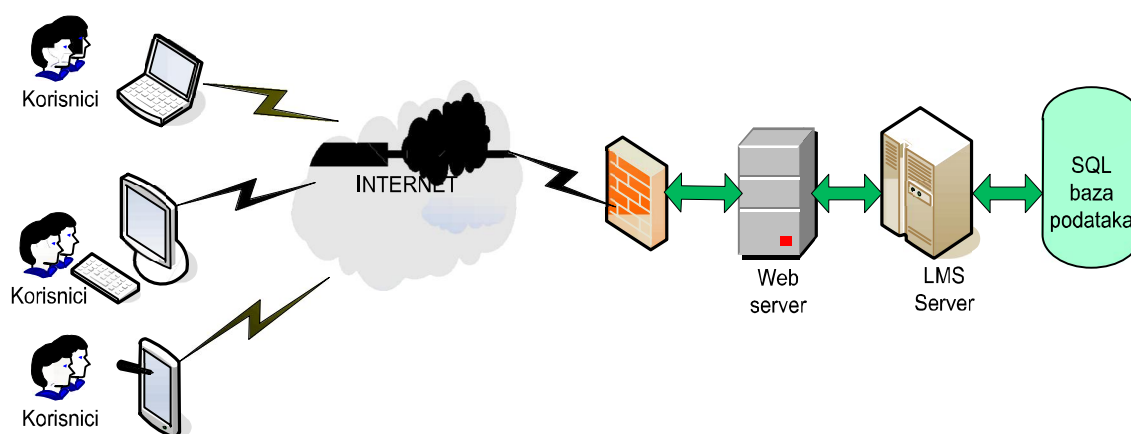
Moodle predstavlja Web orijentisanu platformu, razvijena u PHP-u, koja je sastavljena od blokova na koje se mogu dodavati različiti sadržaji. Za postavljanje Moodle sistema potreban je Web server koji podržava PHP i SQL i baze podataka (MySQL, PostgreSQL). Instalacija Moodla može se izvršiti na računarima pod operativnim sistemom Windows, Unix, Linux ili Mac OS. Na serverskom računaru instalira se programski paket XAMPP, koji u sebi sadrži Apache Web server i bazu podataka MySQL. Nakon pokretanja Web servera i MySQL baze podataka, vrši se instalacija i konfiguracija LMS Moodle (slika 2.4).



Slika 2.4: XAMPP upravljački interfejs

Moodle sistem za upravljanje učenjem je veoma jednostavan za korišćenje, omogućava postavljanje velikog broja “on-line” kurseva na jednoj platformi, definisanje korisničkih naloga, korisničkih grupa, kreiranje vremenskog rasporeda aktivnosti, postavljanje različitih tipova datoteka, praćenje aktivnosti korisnika, proveru znanja i ocenjivanje, upravljanje sistemom, statistiku, zaštitu i pomoć korisnicima. U ovom LMS definisane su četiri osnovne uloge korisnika: administrator, nastavnici, student i gosti. Administrator ima sva upravljačka prava, definiše nove kurseve, administrira postojeće kurseve, vrši registraciju korisnika, prati dinamiku kursa i slično. Nastavnik ima manja prava od administratora, može da uređuje svoje kurseve, dodaje nastavne materijale,

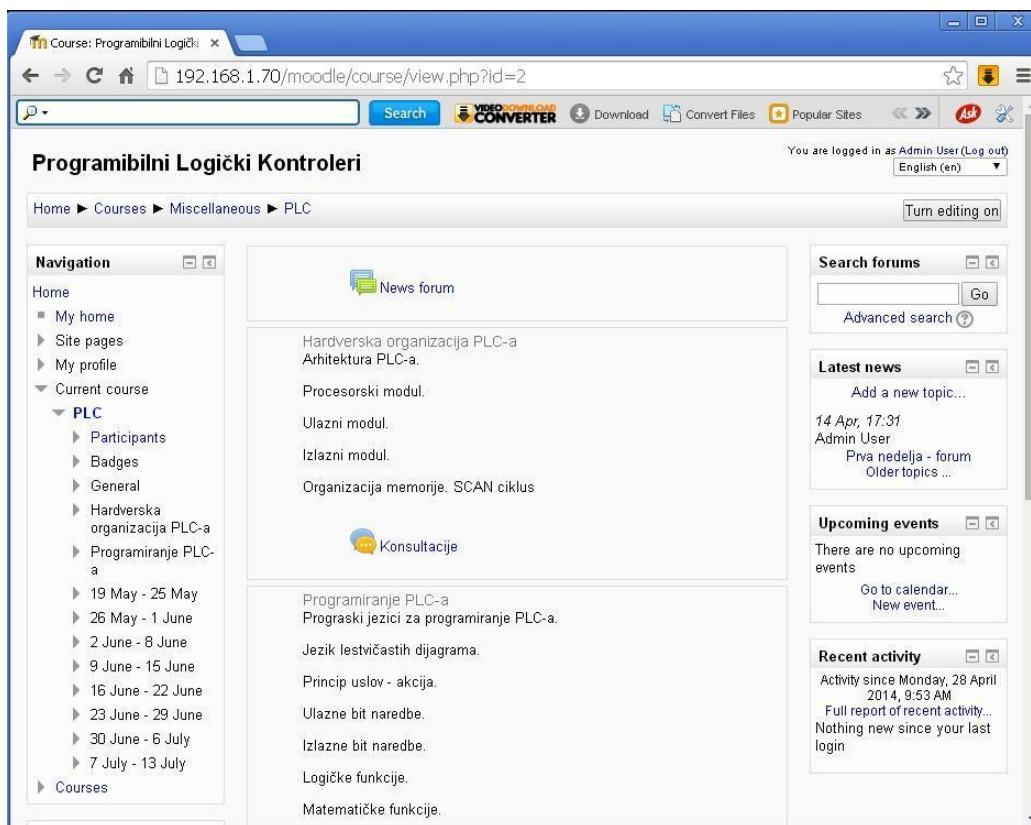
komunicira sa učenicima, prati njihovo napredovanje, ocenjuje učenike i vrši evaluaciju kursa. Studenti mogu da pristupe željenom kursu nakon registracije, izučavaju lekcije, učestvuju u svim aktivnostima, rešavaju testove, diskutuju u grupama, saraduju s nastavnicima. Gosti su korisnici koji nisu prijavljeni na sistem, tako da imaju ograničena prava u praćenju kursa. Pristup sistemu vrši se preko Internet mreže nezavisno od geografske lokacije korisnika, ukoliko korisnik ima definisan korisnički nalog i šifru za pristup resursima LMS-a. Na slici 2.5 prikazana je funkcionalna blok šema za pristup LMS sistemu.



Slika 2.5: Blok šema sistema za daljinsko elektronsko učenje

Na slici 2.6 prikazan je izgled početnog ekrana LMS-a Web laboratorije mehatronike Tehničke škole Trstenik. Na lokalnom serveru instaliran je *Apache* server sa podrškom za PHP i MySQL baza podataka. Glavni ekran Moodle platforme podeljen je na tri dela: centralni, levi i desni. Na centralnom delu se nalazi se sadržaj kursa organizovan po temama. S leve strane se nalaze podaci o korisnicima, njihove aktivnosti, vremeska organizacija kursa, dok se na desnoj stani nalaze: obaveštenja, kalendar aktivnosti najnovije vesti i slično.

Administraciju LMS sistema vrši administrator, koji kreira korisnike sa različitim privilegijama. Kreatori kurseva imaju korisnička prava da postavljaju kurseve i vrše celokupnu administraciju oko realizacije kursa. Za pristup kursu potrebno je izvršiti registraciju, pri čemu se unose osnovni podaci o polazniku, definiše se korisničko ime i šifra za pristup sistemu. Na jednom sistemu mogu se postaviti različiti kursevi sa različitom vremenskom dinamikom i različitim korisnicima.



Slika 2.6: LMS Moodle Web laboratorije mehatronike

Moodle je opšte prihvaćen LMS u obrazovnim i naučnim institucijama na svim nivoima i na različitim jezicima. Svaki od kurseva sadrži multimedijalne lekcije koje su organizovane po didaktičkim i pedagoškim normama i principima. Da bi polaznik kursa bio aktivan učesnik nastavnog procesa, u okviru kurseva se kreiraju različite obavezne aktivnosti: lekcije, forumi, pričaonice, dnevници, rečnici, radionice, upitnici, wiki, zadaci, testovi, kvizovi. U okviru ovih aktivnosti učesnici ostvaruju komunikaciju sa autorima kursa, međusobnu komunikaciju sa polaznicima kursa, postavljaju pitanja i dobijaju odgovore na bilo koje pitanje. Komunikacija može biti sinhrona i asihrona. U ovakvom virtuelnom okruženju svi učesnici su aktivni, razmenjuju znanja i iskustva, softverske alate, delove programa, pomažu novim korisnicima, raspravljaju o novim temama i idejama. Za sistem Moodle karakteristične su tri strukture kurseva:

- Tematski format – nastavni material je raspoređen u obliku tema bez vremenskog ograničenja
- Sedmični format – nastavni material je raspoređen u obliku logičkih celina koji su raspoređeni po sedmicama u kojima se realizuje kurs
- Socijalni format – kurs je organizovan u obliku foruma sa velikim brojem diskusionih grupa

Modularna organizacija sistema Moodle ima veoma značajnu ulogu u organizaciji elektronskog učenja. Kod ovog sistema moduli su svrstani u tri grupe:

- Aktivnosti – aktivnosti korisnika na Moodle portalu (*Forum, Chat, Blog*)
- Blokovi – vidljivi segmenti sa odgovarajućim sadržajem (aktivni korisnici, kalendar, pretraga)
- Filteri – omogućavaju prikaz nastavnog materijala na drugačiji način (pisanje formula)

Svaki modul ima mogućnost uključivanja/isključivanja na glavnom ekranu. Glavnu ulogu u realizaciji elektronskog učenja na daljinu ima moderator kursa - nastavnik. Nastavnici moraju da za svaki elektronski kurs definišu cilj kursa, znanja i veštine koje će polaznici steći posle završetka kursa, teme koje će se obrađivati, vremenski period trajanja kursa, vremensku dinamiku lekcija, način komunikacije, testiranja i ocenjivanja. U zavisnosti od tipa kursa, ciljne grupe i obima gradiva, trajanje kursa može biti različito. Veoma je značajno da učesnici budu aktivni tokom trajanja kursa, da dobijaju povratnu informaciju od nastavnika i vide rezultate svog rada. Ovakav sistem za upravljanje učenjem je pogodan za prenos teorijskih znanja, kao i za sticanje znanja i veština u oblasti softverskog inženjerstva. Pored velikih prednosti kod učenja na daljinu, ovakav pristup učenju ima svoje nedostatke i probleme. Za korišćenje ove platforme nastavnici moraju posedovati napredna informatička znanja, za pripremu kursa je potreban relativno dug vremenski period, a sama realizacija i praćenje kursa zahteva od nastavnika dodatno vreme. Udaljenost nastavnika i studenta veoma često može u negativnom kontekstu da utiče na ozbiljnost kvaliteta kursa. Jedan od glavnih nedostataka ovakvog učenja u inženjerskom obrazovanju je ograničenost u pogledu sticanja praktičnih veština. Kroz video materijale i on-line demonstracije, polaznici mogu da se upoznaju s postupcima rada u različitim oblastima, da vide redosled svih koraka u tehnološkim postupcima, ali nemaju mogućnost da sami steknu praktična iskustva na konkretnim problemima.

Projektom Ministarstva prosvete, nauke i tehnološkog razvoja “*Podrška razvoju ljudskog kapitala i istraživanja – opšte obrazovanje i razvoj ljudskog kapitala*”. (2012.g.-2015.g) definisane su smernice za primenu IKT u nastavi. U okviru projekta izabrana je obrazovna platforma za upravljanje učenjem *Edmodo*. U skladu sa preporukama projekta, od početka školske 2014/2015. godine, učenje na daljinu u Tehničkoj školi Trstenik realizuje se korišćenjem obrazovne društvene mreže *Edmodo* (<https://srb.edmodo.com/home>).

3 MEHATRONSKI SISTEMI

3.1 Uvod

Mehatronika je multidisciplinarna inženjerska oblast, koja predstavlja sinergiju znanja iz mehanike, elektrotehnike, informacionih tehnologija i automatskog upravljanja. Pojam mehatronike prvi je uveo i definisao japanski inženjer Tetsuro Mori 1969. godine u kompaniji Yasakawa Electric Company. Mehatronika je nastala objedinjavanjem delova reči „meha“(mehanizam) i „tronika“(elektronika). Tokom sedamdesetih godina prošlog veka mehatronika se fokusirala na razvoju servo-sistema, njihovoj primeni u industriji i proizvodnji audio i video uređaja. Tokom osamdesetih godina prošlog veka mehatronika se fokusirala na razvoj sigurnosnih sistema u auto-industiji (ABS) i robotici. Svoju pravu ekspanziju mehatronika dobija početkom devedesetih godina XX veka, primenom mikroračunarskih sistema i komunikacionih tehnologija. Danas mehatronika ima primenu u svim oblastima života i rada: automatizacija industrijskih procesa, robotika, biomedicina, prehrambena industrija, auto industrija, elektronika, energetika, avio industrija, satelitske i komunikacione tehnologije.

Zbog svoje multidisciplinarnosti, za razvoj i projektovanje mehatronskih sistema od izuzetnog značaja je primena novih softverskih alata za projektovanje, modeliranje i simulaciju sistema. Mehatronski pristup u projektovanju proizvoda i sistema zasnovan je na primeni CAD/CAM/CAE tehnologija, ima za cilj sintezu različitih naučnih disciplina u cilju optimizacije projektovanog sistema. Kod ovog inovativnog pristupa, projektovanje sistema obuhvata integraciju i optimizaciju mehaničkih sistema, električnih senzora i aktuatora i digitalnih upravljačkih sistema. Razvoj mehatronike baziran je na primeni računara i novih CAD/CAM/CAE tehnologija [24]. Tehnologija CAD (*eng. Computer-Aided Design*) predstavlja projektovanje podržano računarom, koje obuhvata kreiranje modela komponenti sistema, analizu, modifikaciju, optimizaciju i integraciju [25]. Pomoću ovih alata projektant ima mogućnost manipulacije trodimenzionalnim modelom, analize testiranje i simulacije na virtuelnim modelima.

Tehnologija CAM (*eng. Computer-Aided Manufacturing*) predstavlja proizvodnju podržanu računarom, koji se koristi za planiranje, upravljanje i kontrolu proizvodnih operacija u procesu proizvodnje primenom CNC (*eng. Computer Numerical Control*) mašina. Primenom CAM računarskih sistema generise se set instrukcija za numeričke mašine, na osnovu geometrije modelirane u CAD sistemu. Pored toga CAM sistem se

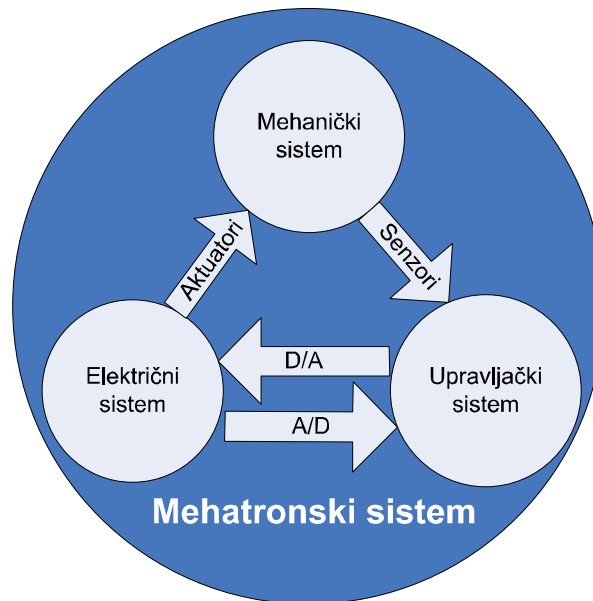
može koristiti za programiranje robota koji mogu operisati u radnom prostoru CNC mašine, za izbor i pozicioniranje alata i radnog komada.

Tehnologija CAM (*eng. Computer-Aided Manufacturing*) predstavlja inženjering podržan računom, u kojoj se računari koriste za analizu CAD modela, trodimenzionalnu simulaciju i analizu. CAE alati omogućavaju širok spektar analiza: kinematska analiza za generisanje putanje, kretanja i brzine elemenata u mehatronskim sistemima. Programi za dinamičku analizu se mogu koristiti za određivanje opterećenja i pomeranja u složenim sistemima.

Savremeni softverski paketi koji se koriste u projektovanju proizvoda u računarskom okruženju, osim samog projektovanja i dizajna proizvoda omogućava inženjerske analize, koje mogu identifikovati potencijalne probleme, kao što su preopterećenje, defleksija ili preklapanje površina komponenti kod montaže i integracije realnih sistema. Pored toga, većina geometrijskih karakteristika modela proizvoda mogu se parametarski opisati, što omogućava jedan veoma fleksibilan pristup u razvoju sistema. Vizuelizacija proizvoda je moguća u svim fazama projektovanja, počev od njegovog modeliranja, konstruisanja, preko provere u sklopu, do finalnih modela. Računarska podrška u procesu projektovanja sastoji se u efikasnijem kreiranju i trajnom smeštanju modela proizvoda koji se izrađuje, i po potrebi ponovnom menjanju parametara modela. Takođe postoji mogućnost izračunavanja željenih parametara projektovanog sistema, kao što su zapremina, masa, površina, moment inercije, težište i slično.

Prvi korak u projektovanju i konstruisanju proizvoda je generisanje ulaznih podataka. To su podaci vezani za karakteristike proizvoda, proizvodnje, materijala, delova, standarda i slično. Promena parametara modela odražava se, ne samo na delu koji se neposredno modelira, već i na funkcionisanje sistema gde se ti delovi ugrađuju. Najčešće korišćeni CAD paketi su: Auto CAD, Pro/ENGINEER, SOLID WORKS, INVENTOR, CATIA. Svi su parametarski orijentisani i sadrže specijalizovane module: modul za crtanje standardnih delova zavrtnja i navrtki, modul za cilindrične zavojne pritisne i zatezne opruge, modul za crtanje vratila, modul sa bazom standardnih kotrljajućih ležaja, modul za proračun geometrije i crtanja zupčanika i slično. Osnovni oblik informacija koje se obrađuju u CAD/CAM sistemima su geometrijske informacije, informacije o alatima, režimima obrade, kao i one informacije koje je moguće matematički formulisati.

Savremeni mehatronski sistem predstavlja fuziju mehaničkih, električnih i elektronskih komponenti u jedinstven funkcionalni automatizovani sistem upravljani računarom. Principijelna blok šema mehatronskog sistema prikazana je na slici 3.1.



Slika 3.1: Blok šema mehatronskog sistema

Funcionalnom vezom mehaničkih, električnih i informacionih podsistema pomoću senzora, aktuatora i upravljačkog računara definisan je savremeni mehatronski sistem. Struktura kompleksnih mehatronskih sistema je složena i može da sadrži sledeće elemente:

- Mehanički sistem za translatorno i rotaciono kretanje
- Termički sistem
- Hidraulički sistem
- Pneumatski sistem
- Senzori
- Aktuatori
- Računarski upravljački sistem
- Sistem za merenje i akviziciju podataka
- Baza podataka

Kod projektovanja savremenih mehatronskih sistema, prvi korak predstavlja modeliranje i simulacija mehatronskog sistema. Drugi korak predstavlja projektovanje upravljačkog sistema, optimizacija i simulacija mehatronskog sistema. Ako su svi zahtevi i kriterijumi ispunjeni, vrši se izrada protoipa sistema, njegova izrada, montaža, povezivanje, programiranje, testiranje i puštanje u rad. Primenom novih tehnologija

smanjuje se vreme projektovanja i izrade novih uređaja i sistema. Mehatronika zahteva primenu znanja i veština iz različitih naučnih oblasti: mehanika, hidraulika, pneumatika, elektronika, električne mašine, sistemi automatskog upravljanja, programibilni logički kontroleri, baze podataka, programiranje i računarske mreže.

3.2 Postupci projektovanja mehatronskih sistema

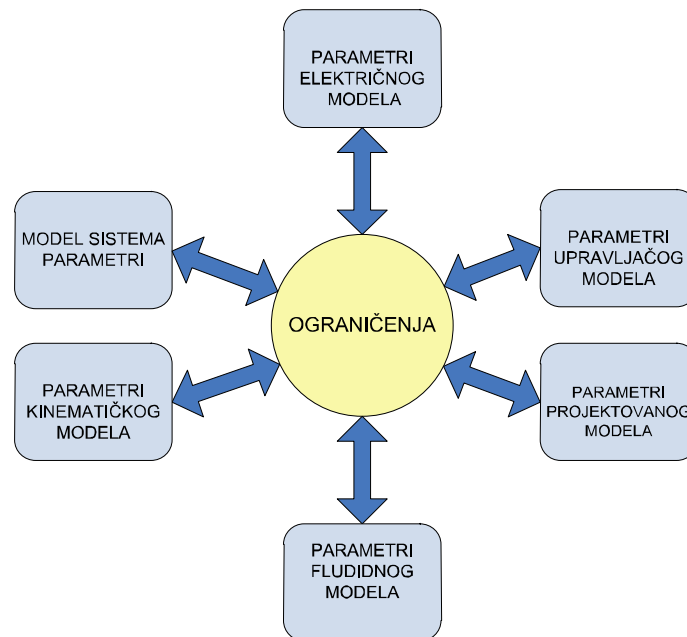
Projektovanje mehatronskih sistema zahteva sistematski pristup u istraživanju, korišćenje savremenih softverskih alata za modeliranje elemenata sistema, integraciju elemenata u jedinstven mehatronski sistem, simulaciju sistema, integraciju modela, testiranje i verifikaciju. Zbog svoje multidisciplinarnosti, razvoj i projektovanje mehatronskih sistema je veoma složen proces. Postoje različiti pristupi u projektovanju mehatronskih sistema. U radu R. Isermanna [26] prikazane su razlike u projektovanju mehatronskih sistema i integracije sistema. Ovaj postupak poznat pod imenom „V“-model. Šema ovog modela raspodelu zadataka između hidrauličkih, pneumatskih, mehaničkih i elektronskih komponenti. Ovaj postupak obuhvata modeliranje i simulaciju komponenti sistema, izradu prototipa sistema, testiranje i podešavanje parametara sistema, analizu signala, kreiranje algoritama, programiranje i testiranje sistema. Za teorijsko i fizičko modeliranje, i simulaciju heterogenih komponenti koriste se različiti softverski alati: DYMOLA, MODELICA, MOBILE, VHDL-AMS, 20 SIM, MATLAB/SIMULINK.

3.2.1. Pristup baziran na modeliranju ograničenja

Mehatronski sistemi predstavljaju integraciju mehaničkih, električnih, elektronskih i softverskih komponenti. Projektovanje mehaničkih komponenti zahteva poznavanje mehanike, mašinskih elemenata, kinematike i dinamike, proračun trenja, određivanje momenta inercije, sile, obrtnog momenta i fluidne tehnike. Elektronika obuhvata merne sisteme, senzore, aktuatore i upravljačke sisteme. Informatika obuhvata primenu softverskih paketa i informaciono-komunikacionih tehnologija za projektovanje i modeliranje i integraciju mehatronskih sistema.

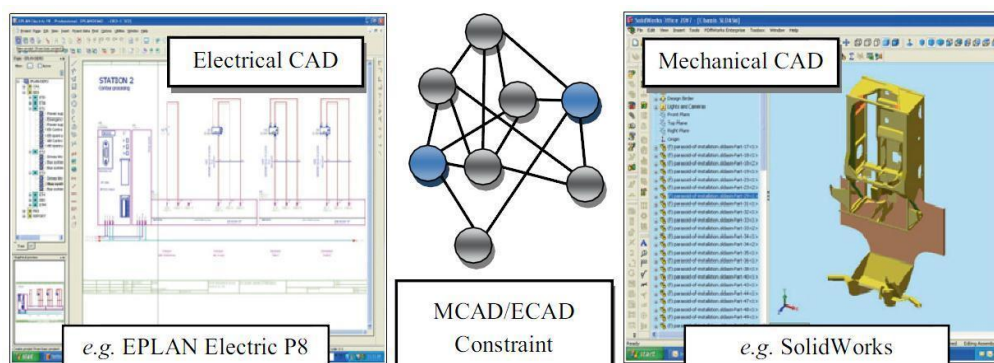
Projektovanje mehatronskih sistema zahteva integraciju mehaničkog i električnog pristupa, tako da se tokom celog procesa projektovanja automatski dobija povratna informacija o realizovanim modifikacijama sa obe strane. Svaka modifikacija mašinskog elementa dovodi do promene u električnom sistemu i obrnuto, tako su kod projektovanja mehatronski sistema prisutna različita ograničenja. Ovakav pristup u projektovanju poznat je kao Pristup baziran na modeliranju ograničenja („*The constraint modelling-based approach*“). Detaljna analiza ovog pristupa prikazana je u radu [27]. Projektovanje

mehatronskog sistema koji je zasnovan na uvažavanju ograničenja veoma je sličan semantičkim mrežama, pri čemu ograničenja predstavljaju čvorove, a veze predstavljaju odnose. Komponente mehatronkog sistema su modelirani kao objekti sa atributima, a međusobna ograničenja su identifikovana i modelirana. Na slici 3.2 prikazan je odnos ograničenja objekata sistema između mašinskih i električnih komponenti na nivou konceptnog projektovanja.



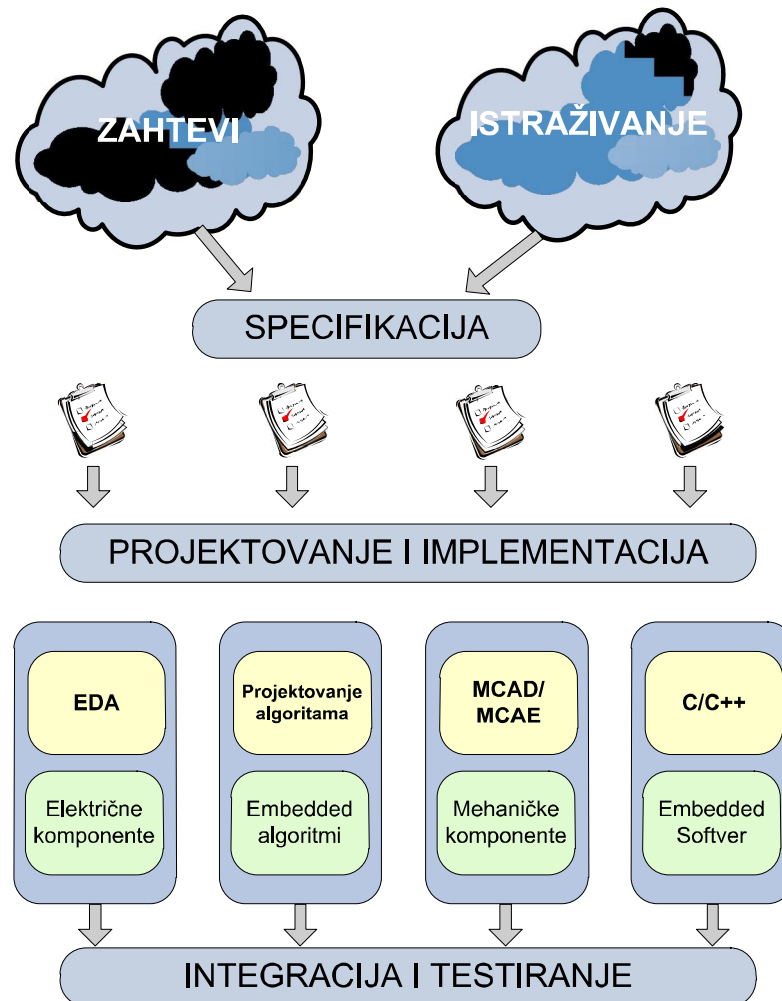
Slika 3.2: Ograničenja između svih domena na nivou konceptualnog projektovanja [27]

Za modeliranje komponenti, simulaciju i testiranje koriste se različiti softverski mehanički i električni CAD alati. Za kreiranje električnih modela veoma često se koristi programski paket *EPLAN Electric*, a za modeliranje mašinskih elemenata koristi *Solid Works*. U procesu modeliranja neophodno je uzeti u obzir MCAD/ECAD ograničenja (slika 3.3).



Slika 3.3: Ograničenja između MCAD i ECAD modela na nivou realizacije [27]

Klasičan pristup projektovanja i razvoja mehatronskih sistema prikazan je na slici 3.4. Prva faza obuhvata analizu tehnoloških zahteva, istraživanje i definisanje neophodnih specifikacija. Projektanti različitih profila nezavisno vrše izbor potrebnih električnih i mehaničkih komponenti, razvoj algoritma i kreiranje programa. Proces istraživanja i definisanja specifikacija je u većoj meri odvojen po oblastima istraživanja. U sledećoj fazi vrši se projektovanje i implementacija definisanog modela mehatronskog sistema. U poslednjoj fazi vrši se integracija i testiranje mehatronskog sistema [28].



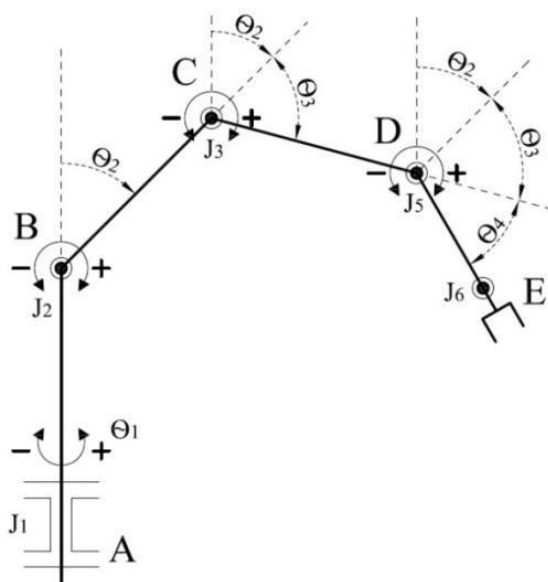
Slika 3.4: Tradicionalni proces projektovanja mehatronskog sistema [28]

Postupak baziran na modeliranju ograničenja sastoji se iz sledećih faza:

1. Kreiranje liste svih elemenata mehatronskog sistema sa njihovim atributima i klasifikacija elemenata u mehanički ili električni domen.
2. Na osnovu atributa komponenti, uspostavljanje međusobnih veza između ograničenja mehatronskih komponenti u okviru domena

3. Uspostavljanje veza ograničenja elemenata između mašinskog i električnog domena
4. Kreiranje tabele ograničenja mehatronskog sistema koja sadrži sve elemente mehatronskog sistema i veze između ograničenja elemenata sistema

Postupak modeliranja ograničenja kreiran je na modelu industrijskog robota Mitsubishi RV2AJ koji je deo laboratorijske opreme kabineta mehatronike Tehničke škole Trstenik. Tip robota je “vertikalni”, sa pet stepeni slobode, maksimalnog opterećenja 2 kg. Radni alat ovog robota predstavlja pneumatska hvataljka. Struktura i opseg kretanja robota prikazani su na slici 3.5.

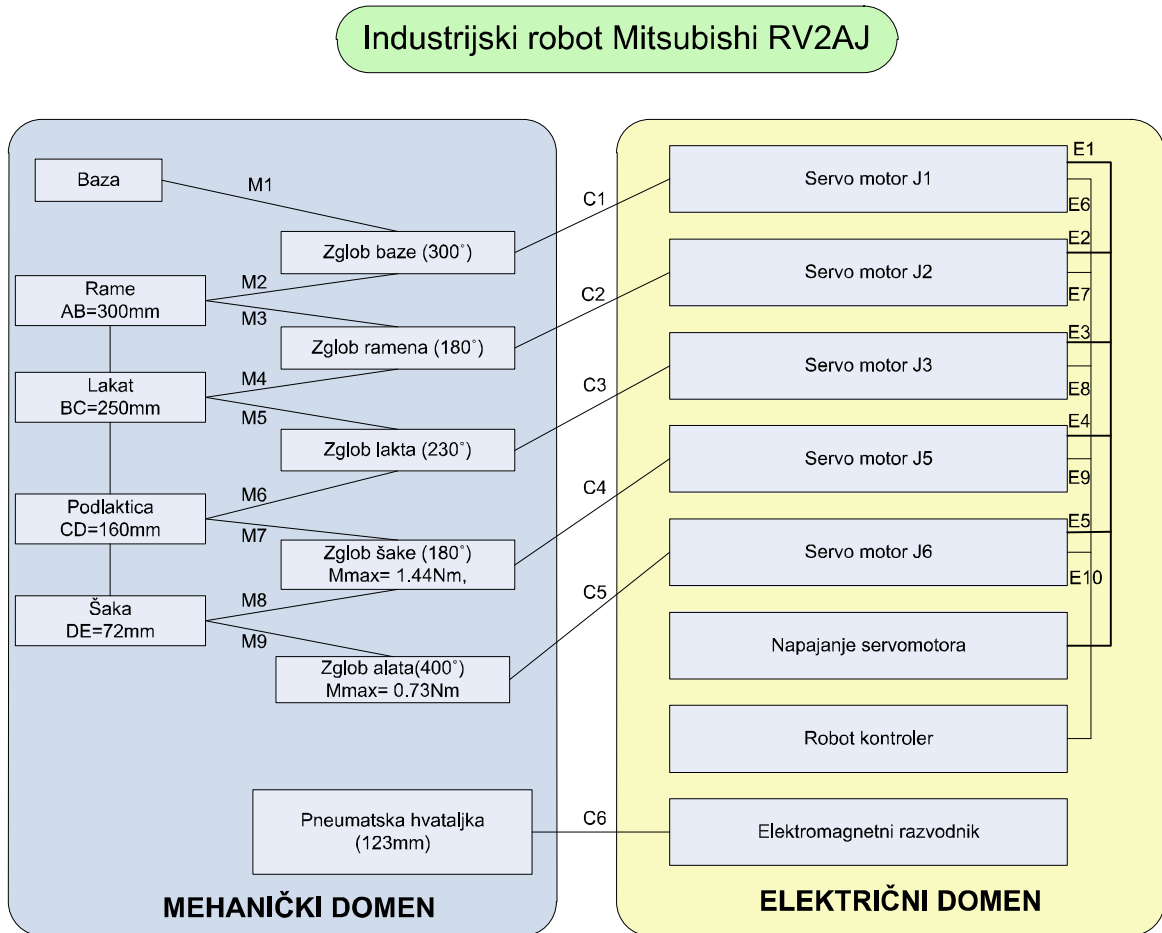


Zglob	Opseg kretanja
J1	od -150° do $+150^\circ$
J2	od -60° do $+120^\circ$
J3	od -110° do $+120^\circ$
J5	od -90° do $+90^\circ$
J6	od -200° do $+200^\circ$

Slika 3.5: Struktura i opseg kretanja robota Mitsubishi RV2AJ

Na slici 3.6 prikazano je modeliranje ograničenja industrijskog robota Mitsubishi RV2AJ. Mehanička ograničenja obeležena su simbolima M1-M9, električna ograničenja obeležena su simbolima E1-E10, dok su međusobna ograničenja obeležena C1-C6. Mehanička ograničenja obuhvataju geometrijske dimenzije elemenata, koordinate baze, referentne koordinate ostalih elemenata, dužine linkova, opseg kretanja linkova, tip i karakteristike materijala, moment inercije, gravitaciono ubrzanje i slično. Ograničenja u električnom domenu obuhvataju tip motora, maksimalnu brzinu kretanja, maksimalni moment opterećenja, rezoluciju enkodera, tip kontrolera, napajanje servomotora i elektromagnetnog razvodnika. Multidisciplinarna ograničenja definišu veze između mehaničkih linkova, zglobova i motora, maksimalni obrtni moment, silu, maksimalno

opterećenje, opseg kretanja, upravljanje alatom robota i slično. Na osnovu definisanih ograničenja vrši se izbor motora, tip, dimenzije, snaga, brzina i način upravljanja.



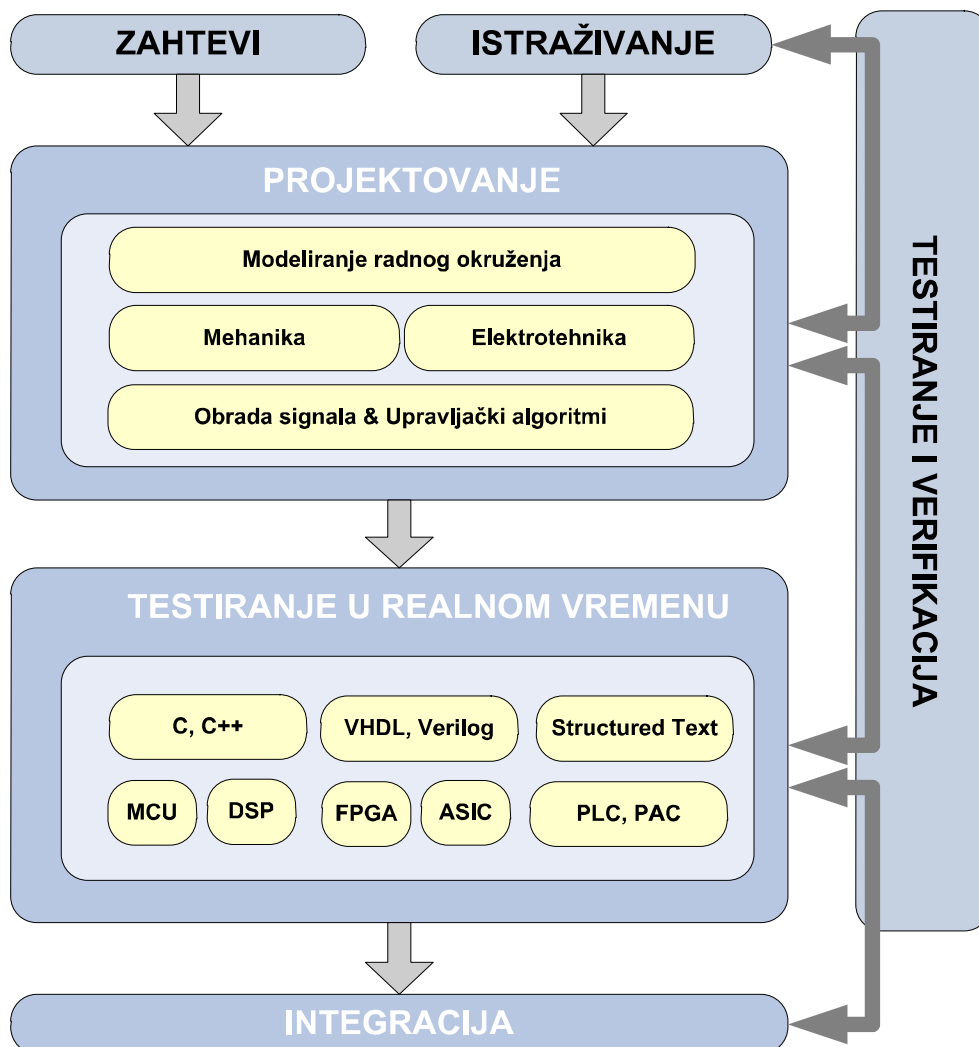
Slika 3.6: Modeliranje ograničenja robota Mitsubishi RV2AJ

Postupak projektovanja u većem delu se odvija zasebno, tako da povratne informacije o promenama komponenti kasne, a testiranje integrisanog sistema se vrši na kraju procesa. Ovakav pristup ima velika ograničenja i ona se ogledaju u sledećem:

- Složena analiza
- Složen postupak izmena
- Pogrešno tumačenje zahteva
- Složen sistem integracije projekta
- Nepotpun i skup sistem
- Ne postoji mogućnost testiranja po nivoima razvoja
- Dugotrajan proces detekcije greške
- Ograničena prenosivost
- Ograničena mogućnost praćenja od projektovanja do integracije

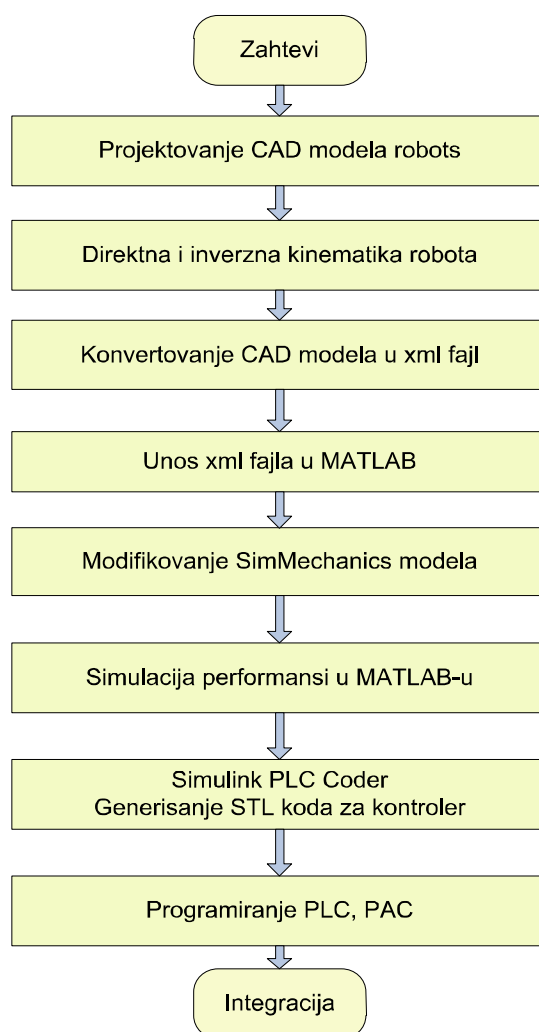
3.2.2 Projektovanje zasnovano na modelu sistema

Savremeni multidisciplinarni pristup projektovanja mehatronskih sistema baziran je na integrisanom razvojnom okruženju koje omogućava kreiranje, modeliranje i testiranje mehatronskog sistema. Današnji trendovi u projektovanju mehatronskih sistema baziraju se na razvoju modela sistema, trodimenzionalnom modeliranju, simulaciji i implementaciji modela na realnim industrijskim sistemima. Kompanija Festo razvila je upravljački sistem na bazi MATLAB-a i Simulika za razvoj „Model-Based Desing“, implementaciju modela na programibilni logički kontroler (PLC) korišćenjem alata Simulink PLC Coder [29]. Primenom ovog pristupa omogućava se simulacija modela, generisanje koda za programiranje PLC-a u istom programskom okruženju. Postupan projektovanja baziran na modelu prikazan je na slici 3.7.



Slika 3.7: Savremeni pristup projektovanja mehatronskog sistema – Projektovanje zasnovano na modelu [28]

Na osnovu definisanih zahteva i ograničenja vrši se istraživanje i projektovanje simulacionog CAD modela robota, koji generiše SimMechanics model (XML file) [30]. U fazi projektovanja integrisano je modeliranje električnih i mehaničkih sklopova, obrada signala i kreiranje upravljačkih algoritama. Nakon kreiranja svih modela vrši se simulacija modela u programskom paketu MathWorks, testiranje modela i generisanje upravljačkog STL koda za odgovarajući PLC pomoću modula Simulink PLC Coder [31]. Tokom celokupnog procesa vrši se testiranje i verifikacija parametara sistema. Bilo kakva promena nekog elementa ili parametra, automatski dovodi do promene drugih parametara sistema, kako bi sistem zadržao projektovane karakteristike. Nakon testiranja i verifikacije vrši se integracija sistema. Ovakav pristup omogućava multidisciplinarnu saradnju duž čitavog postupka projektovanja u realnom vremenu, testiranje, verifikaciju i validizaciju modela u svim fazama projekta, čime se smanjuje vreme i cena razvoja novih sistema, i unapređuje kvalitet proizvoda. Algoritam projektovanja industrijskog robota prikazan je na slici 3.8.



Slika 3.8: Algoritam projektovanja mehatronskog sistema „Model-Based Desing“

3.3 Modeliranje i simulacija industrijskog robota

Veoma dinamičan razvoj računarskih i komunikacionih sistema, omogućava obradu i prenos velike količine podataka u realnom vremenu. Primene ovih tehnologija, omogućavaju visok stepen automatizacije procesa, gde su roboti postali nezamenjiv faktor industrijske proizvodnje. Industrijski roboti se najčešće primenjuju na poslovima prenosa materijala i opsluživanju mašina, procesnim operacijama (zavarivanje, farbanje, sečenje, brušenje, poliranje), montaži i kontroli proizvoda. Robot predstavlja karakterističan mehatronski sistem, koji integriše mehaničke, električne i informacione podsisteme. Najčešći nazivi koji se koristi za industrijske robote su: robotski manipulator i robotska ruka. Osnovni delovi industrijskog robota su:

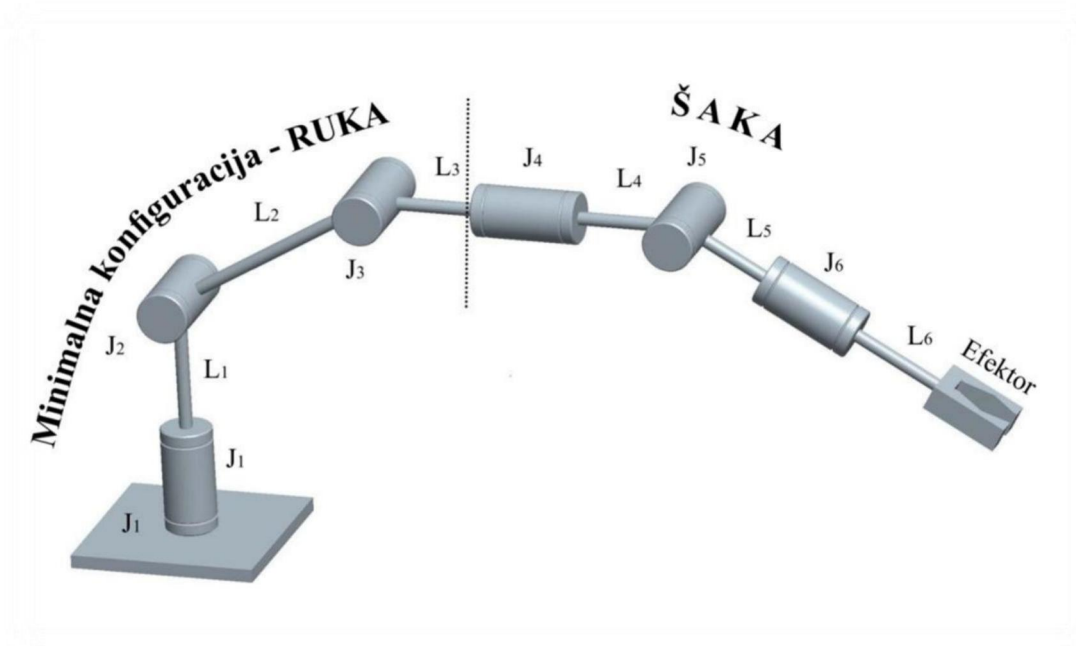
1. Mehanička struktura – niz krutih segmenata (*eng. links*) koji su povezani zglobovima (*eng. joints*)
2. Aktuatori – pogoni koji se nalaze u zglobovima i vrše pomeranje segmenata. Najčešće su električni, hidraulički i pneumatski motori
3. Senzori – detektuju položaj zglobova i radnog okruženja
4. Upravljački računar – vrši upravljanje i nadzor kretanjem manipulatora

Osnovna karakteristika robota je mogućnost obavljanja različitih zadataka u zavisnosti od namene. Za programiranje robota potrebno je poznavanje kinematike i dinamike kretanja robota. Kod upravljanja robotom potrebno je definisati tip koordinatnog sistema u kome se vrši upravljanje. Koordinate robota mogu biti predstavljene u sledećim koordinatnim sistemima:

- Koordinatni sistem osnove (*eng. Base coordinate system*)
- Koordinatni sistem zglobova (*eng. Joint coordinate system*)
- Koordinatni sistem alata (*eng. Tools coordinate system*)

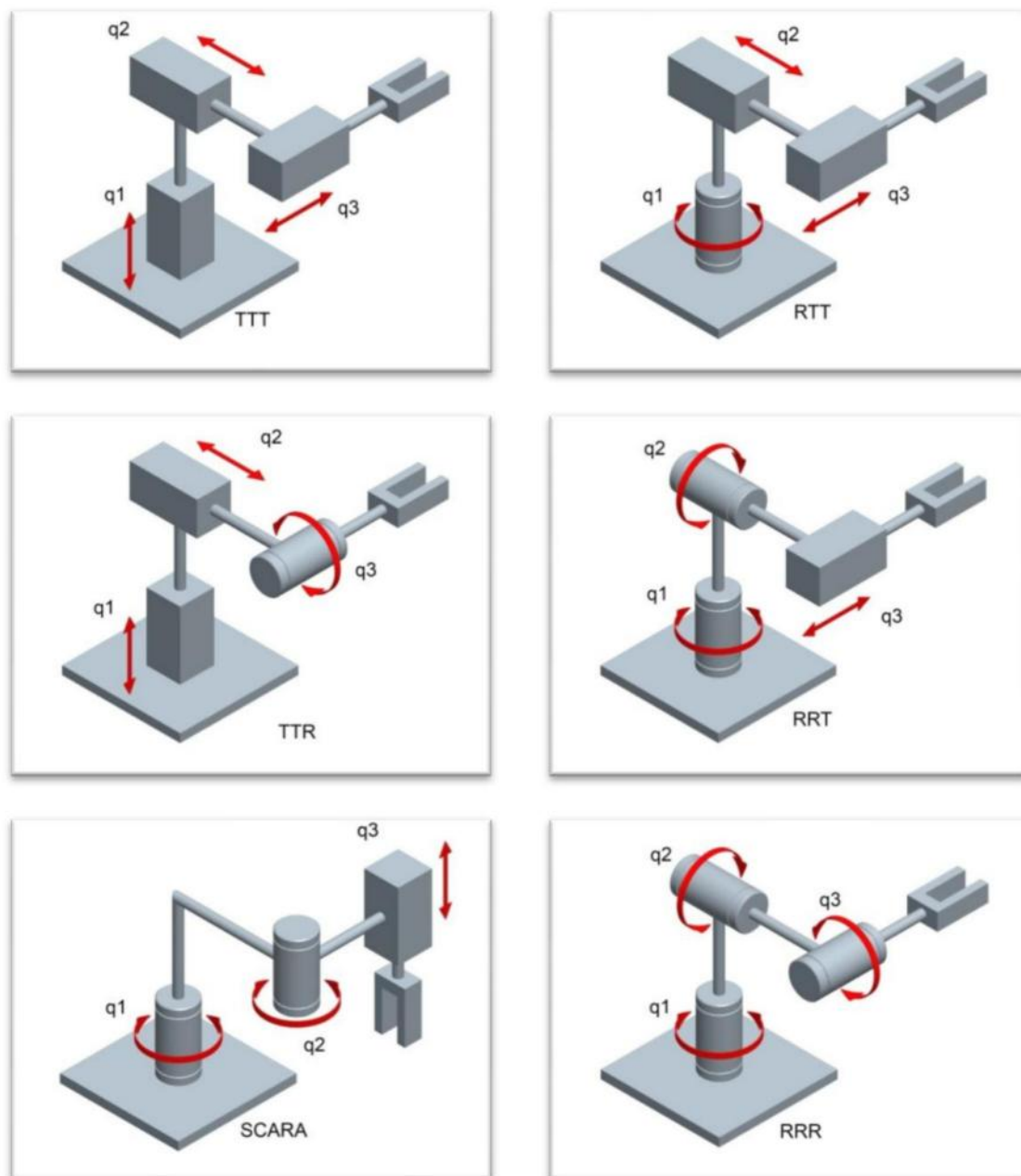
Robotski manipulator sastoji se od: tela, ruke i ručnog zgloba. Robotska ruka sastoji se iz niza krutih segmenata, koji su povezani zglobovima. Kod industrijskih robota koriste dva osnovna tipa zglobova: rotacioni i translatorni. Rotacioni zglob vrši kružno kretanje oko ose rotacije, a translatorni zglob vrši linijsko kretanje po osi translacije. Kretanje robota vrši se u trodimenzionalnom radnom prostoru. Radni prostor robota predstavlja skup tačaka u trodimenzionalnom okruženju, koje se mogu dohvatiti vrhom manipulatora. Mehanička konfiguracija manipulatora sastoji se iz dva dela: “ruka” i “šaka”. Prva tri segmenta, počev od baze određuju poziciju ručnog zgloba i nazivaju se minimalnom konfiguracijom robota, dok sledeća tri segmenta čine zglob hvataljke i

određuju njenu orijentaciju [32]. Osnovna konfiguracija RRR tipa robota prikazana je na slici 3.9.



Slika 3.9: Osnovna konfiguracija robota tipa RRR

Odgovarajućim izborom parametara minimalne konfiguracije robota, hvataljka se pozicionira u željeni položaj, dok zglob hvataljke određuje orijentaciju vrha robotske ruke. Na vrh manipulatora postavlja se radni alat (eng. tool) u zavisnosti od vrste poslova koje obavlja robot. Kod industrijskih robota, manipulatori najčešće imaju od četiri do šest stepeni slobode, pomoću kojih se vrh manipulatora može dovesti u željenu poziciju i orijentaciju. Osnove karakteristike robota su: broj stepeni slobode, maksimalno opterećenje, brzina kretanja, maksimalno ubrzanje, prostorna rezolucija, tačnost, ponovljivost, dohvat, hod i orijentacija alata. U zavisnosti od strukture manipulatora i tipova zglobova, postoje četiri osnovne konfiguracije manipulatora: pravougaoni (TTT), cilindrični (RTT), sferni (RRT) i rotacioni (RRR) [33]. Karakteristični tipovi konfiguracija robota prikazani su na slici 3.10.



Slika 3.10: Osnovne konfiguracije manipulatora

Pravougaona konfiguracija (TTT) sadži tri translatorsna zglova koji se međusobno raspoređeni pod pravim uglom duž x , y , z osa Dekartovog koordinatnog sistema. Radni prostor TTT konfiguracije robota ima oblik prizme. Mehanička struktura je stabilna, robot ima visoku tačnost, ali zbog pravolinijskog kretanja robot ima slabu pokretljivost. Ovakva struktura omogućava postizanje radnog prostora velikih dimenzija i manipulaciju radnim predmetima velike težine. Za pokretanje zglobova robota, uglavnom se koriste električni motori.

Cilindrična konfiguracija robota (RTT) se dobija kada se prvi zglobov pravougaone konfiguracije, zameni rotacionim. Radni prostor je cilindričnog oblika, ima čvrstu

mehaničku konfiguraciju i tačnost se smanjuje povećanjem horizontalnog kretanja robota. Za pokretanje zglobova koriste se električni i hidraulični pogoni, a namenjeni su za manipulaciju većim opterećenjima.

Robot sferne konfiguracije (RRT) ima prva dva rotaciona zgloba, dok je treći zglob translatoran. Radni prostor ima oblik sfere, tačnost se smanjuje povećanjem radijalnog hoda, konstrukcija robota je složenija, tako da je mehanička čvrstoća manja u odnosu na prethodne konfiguracije. Za pokretanje zglobova, uglavnom se koriste električni pogoni. Ovaj tip robota najčešće se koriste u mašinskoj industriji. Veoma česta konfiguracija robota sa dva rotaciona i jednim cilindričnim zglobom je tip robota poznat kao SCARA (*eng. Selective Compliance Assembly Robot Arm*). Kod ovog tipa robota, sve tri ose su vertikalne, karakteriše ga velika čvrstoća za opterećena po vertikalnoj osi i najčešće se koristi u montaži. Tačnost je velika i smanjuje se porastom udaljenosti ručnog zgloba od ose baze robota.

Jedna od najčešće korišćenih konfiguracija je robot antropomorfne konfiguracije. Kod ovog robota prvi zglob je rotacioni i osa zgloba je postavljena pod pravim uglom u odnosu na bazu robota. Rotaciona konfiguracija robota (RRR) ima tri rotaciona zgloba, tako da su ose drugog i trećeg zgloba paralelne i normalne u odnosu na osu prvog zgloba. Ovakva konfiguracija robota poznata je još kao antropomorfna, zglobna ili laktasta. Ukoliko ne postoje ograničenja rotacionih kretanja, radni prostor ima oblik lopte. Uglavnom postoje ograničenja kretanja zglobova, tako da radni prostor ima oblik polumeseca. Za pogon zglobova, koriste se električni motori, imaju visoku tačnost, namenjeni su za manipulaciju manjim opterećenjima i imaju veoma široku primenu.

Kod vertikalnih robota najčešće se z-osa Dekartovog koordinatnog sistema poklapa sa vertikalnom osom baze robota. Baza robota omogućava rotaciju robota oko vertikalne z-ose. Ose drugog i trećeg zgloba su međusobno paralelne i nalaze se pod uglom od 90° u odnosu na osu prvog zgloba. Ovakav položaj drugog i trećeg segmenta obezbeđuje da se vrh minimalne konfiguracije robota može pozicionirati u proizvoljnu tačku vertikalne ravni koja sadrži osu prvog zgloba. Kretanje ovih zglobova nije nezavisno, već kretanje jednog zgloba utiče na intenzitet momenta sile prethodnog zgloba. Ovakav uticaj poznat je pod nazivom "sprezanje". Kod antropomorfne konfiguracije robota karakteristično je veliko sprezanje između zglobova.

3.3.1 Direktna kinematika robota

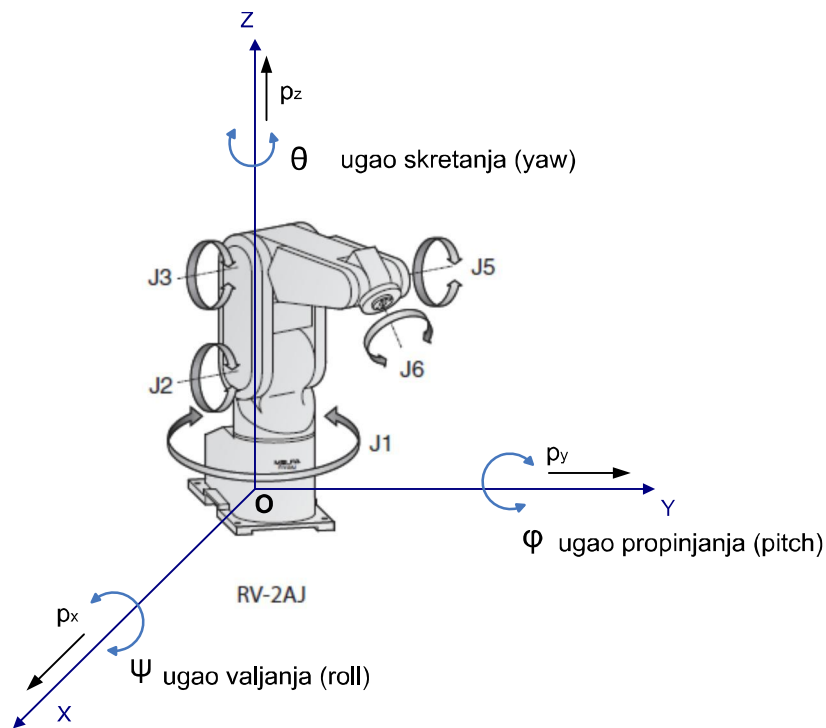
Nezavisno od konstrukcije robota, potreban je univerzalni način koji u potpunosti opisuje položaj robota i trajektoriju po kojoj se kreće. Postoje dva osnovna pristupa u opisivanju kinematike robota:

- Danavit-Hartenbergov analitički postupak
- Numerički postupak na bazi Rodriguesove formule

Prvi pristup se koristi za formiranje kinematičkih jednačina robota, a drugi za formiranje dinamičkih jednačina robota. Za analizu kinematike robota koriste se dva različita koordinatna sistema robota: Dekartov koordinatni sistem koji se postavlja u bazu robota - koordinatni sistem baze (spoljašnji, referentni koordinatni sistem) i koordinatni sistem zglobova (unutrašnji koordinatni sistem). Unutrašnje koordinate robota predstavljaju skalarnе veličine koje opisuju relativni položaj jednog segmenta u odnosu na drugi segment kinematskog para. Unutrašnje koordinate se obeležavaju sa q_i ($i=1, 2, 3, \dots, n$), i čine vektor unutrašnjih koordinata:

$$[q] = [q_1 q_2 q_3 \dots q_n]^T \quad (3.1)$$

Broj unutrašnjih koordinata zavisi od broja stepeni slobode kretanja robota (n). Spoljašnje koordinate robota opisuju položaj radnog alata robota u odnosu na nepokretni koordinatni sistem, koji je fiksiran za osnovu robota. Pozicija vrha robota opisuje se Dekartovim koordinatama (p_x, p_y, p_z), a orijentacija hvataljke robota Ojlerovim (*Euler*) uglovima obrtanja (θ, φ, ψ) u odnosu na ose baznog koordinatnog sistema. Ugao skretanja θ (*eng. yaw*) odgovara rotaciji oko z -ose nepokretnog koordinatnog sistema, ugao propinjanja φ (*eng. pitch*) oko y -ose i ugao valjanja ψ (*eng. roll*) oko x -ose. Na slici 3.11 prikazana je struktura vertikalnog robota sa šest stepeni slobode i obeleženi su karakteristični parametri.



Slika 3.11: Karakteristične veličine industrijskog robota

Zapis vektora spoljnih koordinata $[r]$ je dat jednačinom:

$$[r] = [p_x \ p_y \ p_z \ \theta \ \varphi \ \psi]^T \quad (3.2)$$

Problem određivanja vektora spoljnih koordinata $[r]$ za zadati vektor unutrašnjih koordinata $[q]$ poznat je kao direktan kinematski problem. Pri promeni unutrašnjih koordinata, dolazi do promene spoljnih koordinata. Funkcija koja preslikava unutrašnje koordinate robota u spoljašnje koordinate je nelinearna i neprekidna vektorska funkcija, i može se opisati kao:

$$[r] = f [q] \quad (3.3)$$

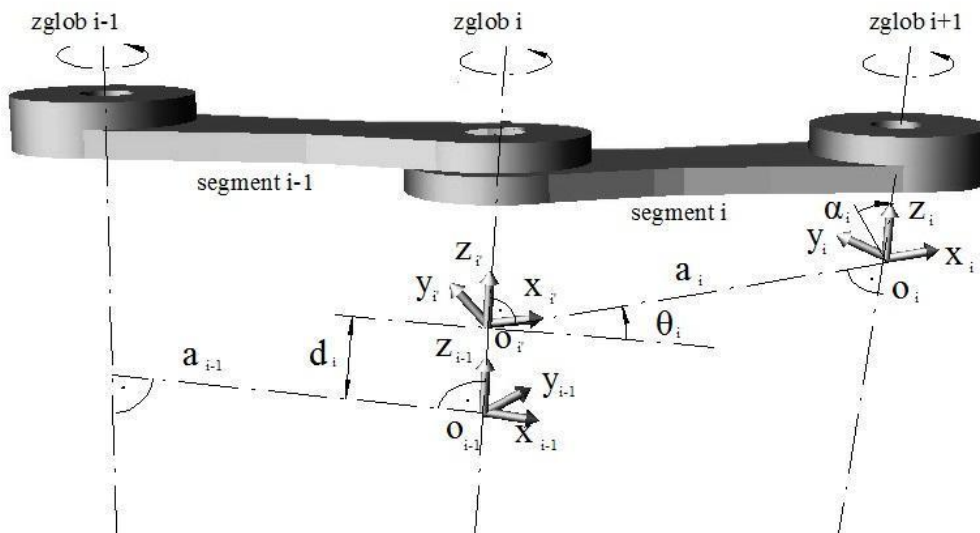
3.3.2 Danavit-Hartenbergov analitički postupak

Za rešavanje direktnog kinematskog problema, prvi korak predstavlja definisanje simboličke šeme robota u odnosu na nepokretni koordinatni sistem i definisanje nultog položaja robota. U nultom položaju robota sve unutrašnje koordinate imaju vrednosti jednake nuli ($q_i=0$). Sledeći korak predstavlja pridruživanje koordinatnih sistema svakom segmentu robota, koji je jednak broju stepeni slobode (n). Pridruživanje se vrši prema metodi Danavit-Hartenberg (DH). Prema DH konvenciji, baza robota predstavlja nulti segment, prvi pokretni segment označava se brojem 1, sve do poslednjeg segmenta robota koji je označen brojem n .

Na slici 3.12 prikazan je kinematski par rotacionih zglobova, gde su obeleženi D-H parametri:

- Parametar a_i - rastojanje između osa z_{i-1} i z_i duž x_i -ose (dužina segmenta)
- Parametar d_i - rastojanje duž ose z_{i-1} od O_{i-1} do preseka osa x_i i z_{i-1} (pomeraj segmenta)
- Parametar α_i - ugao između osa z_{i-1} i z_i meren oko ose x_i (ugao uvijanja segmenta)
- Parametar θ_i - ugao između osa x_i i x_{i-1} meren oko z_{i-1} ose (ugao rotacije segmenta)

Kod rotacionih zglobova parametri a_i , d_i , i α_i su konstantni, dok je promenljiv ugao zakretanja između dva segmenta θ_i .



Slika 3.12: *Danavit-Hartenbergovi parametri kinematskog para rotacionih zglobova*

Za formiranje kinematskog modela potrebno je unapred poznavati broj zglobova, tip i njihov međusobni raspored. Prvi korak predstavlja identifikaciju osa svih zglobova i označavanje osa zglobova od z_0 do z_{n-1} . Na svakom segmentu nalaze se dva koordinatna sistema. Prvi koordinatni sistem sa koordinatnim početkom O_0 , postavlja se u bazu robota, i on predstavlja referentni (nepokretni) koordinatni sistem. Drugi koordinatni sistem postavlja se na drugi kraj prvog segmenta, i njegov položaj se menja sa promenom položaja segmenta. Koordinatni početak i -tog zgloba postavlja se na mestu preseka osa z_{i-1} i z_i , a ukoliko su ose paralelne koordinatni početak se postavlja u zglob z_i . Koordinatna osa x_i postavlja se u pravcu koji je normalan u odnosu na ravan odedenu osama z_{i-1} i z_i , a osa y_i se postavlja tako da se formira desni koordinatni sistem. Na kraju sledi postavljanje koordinatnog sistema završnog alata robota. Na osnovu parametara a_i , d_i , α_i i θ_i , formira se homogena matrica transformacija. Na ovaj način se definišu položaji svih koordinatnih

sistema i formira ukupna matrica transformacije ${}^0_n[T]$, koja povezuje poziciju i orijentaciju koordinatnog sistema alata u odnosu na bazni koordinatni sistem.

Kod rotacionih zglobova, svaki segment se može opisati sa dve veličine i to: dužinom segmenta a_i (najkraće rastojanje između i-tog i (i+1)-vog zgloba), uglom rotacije θ_i između i-tog i (i+1)-vog zgloba. Homogenim matricama transformacije, koordinatni sistemi mogu se prevoditi jedan u drugi, pomoću dve translacije i dve rotacije.

$${}^{i+1}_i[T] = \text{Rot}(z_{i-1}, q_i) \cdot \text{Trans}(0, 0, d_i) \cdot \text{Trans}(a_i, 0, 0) \cdot \text{Rot}(x_{i-1}, \alpha_i) \quad (3.4)$$

Homogena matrica transformacije za rotacioni kinematski par između i-tog i (i-1) –vog koordinatnog sistema je definisana kao:

$${}^{i-1}_i[T] = \begin{bmatrix} \cos\theta_i & -\sin\theta_i \cos\alpha_i & \sin\theta_i \sin\alpha_i & a_i \cos\theta_i \\ \sin\theta_i & \cos\theta_i \cos\alpha_i & -\cos\theta_i \sin\alpha_i & a_i \sin\theta_i \\ 0 & \sin\alpha_i & \cos\alpha_i & d_i \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (3.5)$$

Na osnovu prethodne dve jednačine, vidi se da su homogene matrice transformacije funkcije samo unutrašnjih koordinata. Za određivanje matrice homogenih transformacija između baze robota i krajnjeg segmenta koristi se jednačina:

$${}^0_n[T] = {}^0_1[T] \cdot {}^1_2[T] \cdot {}^2_3[T] \cdots {}^{n-2}_{n-1}[T] \cdot {}^{n-1}_n[T] \quad (3.6)$$

Postupak izračunavanja matrice homogenih transformacija vrši se na sledeći način:

$${}^0_1[T] = \begin{bmatrix} \cos q_1 & 0 & \sin q_1 & 0 \\ \sin q_1 & 0 & -\cos q_1 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (3.7)$$

$${}^1_2[T] = \begin{bmatrix} \cos q_2 & -\sin q_2 & 0 & a_2 \cos q_2 \\ \sin q_2 & \cos q_2 & 0 & a_2 \sin q_2 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (3.8)$$

$${}^2_3[T] = \begin{bmatrix} \cos q_3 & -\sin q_3 & 0 & a_3 \cos q_3 \\ \sin q_3 & \cos q_3 & 0 & a_3 \sin q_3 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (3.9)$$

$${}^3_4[T] = \begin{bmatrix} \cos q_4 & 0 & -\sin q_4 & 0 \\ \sin q_4 & 0 & \cos q_4 & 0 \\ 0 & -1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (3.10)$$

$${}^4_5[T] = \begin{bmatrix} \cos q_5 & 0 & \sin q_5 & 0 \\ \sin q_5 & 0 & -\cos q_5 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (3.11)$$

$${}^6_5[T] = \begin{bmatrix} \cos q_6 & -\sin q_6 & 0 & 0 \\ \sin q_6 & \cos q_6 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & d_6 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (3.12)$$

Množenjem matrica dobija se se matrica koja predstavlja ukupno kretanje robota, odnosno predstavlja odnos između ukupnog kretanja hvataljke i baznog koordinatnog početka:

$${}^0_6[T] = {}^0_1[T] * {}^1_2[T] * {}^2_3[T] * {}^3_4[T] * {}^4_5[T] * {}^5_6[T] \quad (3.13)$$

$${}^0_6[T] = \begin{bmatrix} n_x & o_x & a_x & p_x \\ n_y & o_y & a_y & p_y \\ n_z & o_z & a_z & p_z \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \text{Matrica} & \text{Vektor} \\ \text{orijentacije} & \text{pozicije} \\ 3 \times 3 & 3 \times 1 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (3.14)$$

Prve tri kolone homogene matrice $H = {}^0_6[T]$, predstavljaju matricu rotacije između koordinatnog sistema hvataljke i referentnog koordinatnog sistema baze robota. Četvrta kolona matrice, predstavlja vektor položaja hvataljke u baznom koordinatnom sistemu. Na ovaj način se u potpunosti definiše direktna kinematika, tako da na osnovu određenih vrednosti unutrašnjih koordinata, može se izračunati pozicija i orijentacija hvataljke u baznom koordinatnom sistemu.

3.3.3 Inverzna kinematika robota

Problem inverzne kinematike robota zasniva se na proračunu vektora unutrašnjih koordinata $[q] = [q_1 q_2 \dots q_n]^T$, ako je vektor spoljašnjih koordinata $[r] = [p_x \ p_y \ p_z \ \theta \ \varphi \ \psi]^T$ poznat. Na osnovu poznatog položaja i orijentacije završnog alata robota, vrši se proračun vrednosti uglova položaja segmenata robota. Inverzna kinematika može se predstaviti izrazom:

$$[q] = f^{-1}[r] \quad (3.15)$$

Inverzni kinematski problem svodi se na rešavanje sistema nelinearnih jednačina, koje može biti analitičko i numeričko. Rešenje ovog problema nije jednoznačno određeno, a kod redundantnih manipulatora postoje beskonačno mnogo rešenja. Za definisanje tačnog rešenja inverzne kinematike, potrebno je definisati radni prostor manipulatora i ograničenje zglobova. Za rešenje sistema nelinearnih jednačina primenjuju se numeričke metode (Njutnova metoda, gradijentni postupak, metoda približavanja po pojedinim koordinatama). Ovi postupci ne zavise od strukture robota. Najčešće korišćena metoda rešavanja inverzne kinematike je Njutnova metoda. Kod ove metode potrebno je odrediti Jakobijan matricu $J(q)$ i njenu inverznu matricu. Jakobijan matrica uspostavlja vezu između kretanja u zglobovima manipulatora i kretanja hvataljke, odnosno uspostavlja

relaciju između brzina promene unutrašnjih koordinata $[\dot{q}] = [\dot{q}_1 \dot{q}_2 \dot{q}_3 \dots \dot{q}_n]^T$ i brzine promene spoljašnjih koordinata $[\dot{r}] = [p_x p_y p_z \dot{\theta} \dot{\varphi} \dot{\psi}]^T$, i definisana je izrazom $\dot{r} = J(q) \cdot \dot{q}$. Jakobijan matrica se koristi za izračunavanje dejstva spoljašnjih sila na završni alat robota i momenata koji se prenose na zglobove robota. Vektor spoljašnjih koordinata može se predstaviti jednačinom:

$$[r] = [p_x p_y p_z \theta \varphi \psi]^T = [r_p r_0]^T \quad (3.16)$$

gde je $r_p = [p_x p_y p_z]^T$ vektor pozicija, a $r_0 = [\theta \varphi \psi]^T$ vektor orijentacije hvataljke.

Jakobijan matrica za manipulator sa šest stepeni slobode, definiše se kao:

$$\begin{bmatrix} \dot{x} \\ \dot{y} \\ \dot{z} \\ \dot{\theta} \\ \dot{\varphi} \\ \dot{\psi} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} J_{11} & J_{12} & J_{13} & J_{14} & J_{15} & J_{16} \\ J_{21} & J_{22} & J_{23} & J_{24} & J_{25} & J_{26} \\ J_{31} & J_{32} & J_{33} & J_{34} & J_{35} & J_{36} \\ J_{41} & J_{42} & J_{43} & J_{44} & J_{45} & J_{46} \\ J_{51} & J_{52} & J_{53} & J_{54} & J_{55} & J_{56} \\ J_{61} & J_{62} & J_{63} & J_{64} & J_{65} & J_{66} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{q}_1 \\ \dot{q}_2 \\ \dot{q}_3 \\ \dot{q}_4 \\ \dot{q}_5 \\ \dot{q}_6 \end{bmatrix} \quad (3.17)$$

Na osnovu prethodne jednačine vidi se da su elementi Jakobijana u stvari parcijalni izvodi funkcije kojom se definiše pozicija i orijentacija hvataljke u spoljašnjim koordinatama po unutrašnjim uglovima u zglobovima robota:

$$\dot{r} = J(q) \cdot \dot{q} \quad (3.18)$$

$$J = \frac{\partial r}{\partial q} = \begin{bmatrix} \frac{\partial p_x}{\partial q_1} & \frac{\partial p_x}{\partial q_2} & \frac{\partial p_x}{\partial q_3} & \frac{\partial p_x}{\partial q_4} & \frac{\partial p_x}{\partial q_5} & \frac{\partial p_x}{\partial q_6} \\ \frac{\partial p_y}{\partial q_1} & \frac{\partial p_y}{\partial q_2} & \frac{\partial p_y}{\partial q_3} & \frac{\partial p_y}{\partial q_4} & \frac{\partial p_y}{\partial q_5} & \frac{\partial p_y}{\partial q_6} \\ \frac{\partial p_z}{\partial q_1} & \frac{\partial p_z}{\partial q_2} & \frac{\partial p_z}{\partial q_3} & \frac{\partial p_z}{\partial q_4} & \frac{\partial p_z}{\partial q_5} & \frac{\partial p_z}{\partial q_6} \\ \frac{\partial \theta}{\partial q_1} & \frac{\partial \theta}{\partial q_2} & \frac{\partial \theta}{\partial q_3} & \frac{\partial \theta}{\partial q_4} & \frac{\partial \theta}{\partial q_5} & \frac{\partial \theta}{\partial q_6} \\ \frac{\partial \varphi}{\partial q_1} & \frac{\partial \varphi}{\partial q_2} & \frac{\partial \varphi}{\partial q_3} & \frac{\partial \varphi}{\partial q_4} & \frac{\partial \varphi}{\partial q_5} & \frac{\partial \varphi}{\partial q_6} \\ \frac{\partial \psi}{\partial q_1} & \frac{\partial \psi}{\partial q_2} & \frac{\partial \psi}{\partial q_3} & \frac{\partial \psi}{\partial q_4} & \frac{\partial \psi}{\partial q_5} & \frac{\partial \psi}{\partial q_6} \end{bmatrix} \quad (3.19)$$

Za primena robota u industriji, veoma je značajno poznavati brzinu i ubrzanje robota u prostoru spoljnjih koordinata. Diferencijalna kinematika bavi se utvrđivanjem zavisnosti brzine zgloba od linearne ili kružne brzine vrha manipulatora. Diferenciranjem vektora unutrašnjih brzina po vremenu dobija se vektor unutrašnjih ubrzanja:

$$\ddot{r} = \frac{dJ}{dt} \cdot \dot{q} + J\ddot{q} \quad (3.20)$$

Jakobijan matrica povezuje brzinu vektora unutrašnjih i spoljnjih koordinata, dok se ugaona brzina može predstaviti jednačinom:

$$\omega = J \cdot \dot{q}, \quad (3.21)$$

$$\ddot{r} = \frac{\partial J}{\partial t} q + J \ddot{q} \quad (3.22)$$

Jednačina 3.22 daje vezu između ubrzanja spoljašnjih i unutrašnjih koordinata. Postupak formiranja Jakobijan matrice je veoma složen.

3.4 Upravljanje industrijskim robotom

Prilikom obavljanja bilo koje vrste zadataka, robot vrši neku vrstu kretanja. Dominantni oblici kretanja su: kretanje „od tačke do tačke“ (*eng. Point To Point – PTP*) i „kretanje po kontinualnim putanjama“ (*eng. Continuous Path motion – CP*). Prilikom programiranja robota, kod kretanja PTP dovoljno je zadati početnu i krajnju poziciju vrha robota, brzinu ili vreme za koje je potrebno izvršiti kretanje. Za CP kretanje zadaju se pozicija i orijentacija alata tokom čitave putanje. Rezultat planiranja kretanja mora biti vremenska zavisnost pozicije i orijentacije vrha robota $[r(t)] = [p_x \ p_y \ p_z \ \theta \ \phi \ \psi]^T$, ili vremenska zavisnost pozicija zglobova $[q(t)] = [q_1 q_2 \dots q_n]^T$. Diferenciranjem trajektorije $r(t)$ ili $q(t)$, dobijaju se vektori brzina i ubrzanja hvataljke $\dot{r}(t)$ i $\ddot{r}(t)$, odnosno brzine i ubrzanje zglobova $\dot{q}(t)$ i $\ddot{q}(t)$.

Robot predstavlja karakterističan nelinearni sistem koji se može opisati nelinearnim diferencijalnim jednačinama. Da bi se primenile jednostavnije linearne upravljačke strukture, potrebno je sistem matematički modelirati linearnim diferencijalnim jednačinama. Upravljanje se zasniva na modelu dinamike robota, koji je dat jednačinom:

$$M(q)\ddot{q} + C(q, \dot{q}) + G(q) = \tau \quad (3.23)$$

gde su:

$M(q)$ – matrica inercija

$C(q, \dot{q})$ – vektor centripetalnih/centrifugalnih sila

$G(q)$ – vektor gravitacionih sila

q – vektor koordinata

\dot{q} – vektor brzina

\ddot{q} – vektor ubrzanja

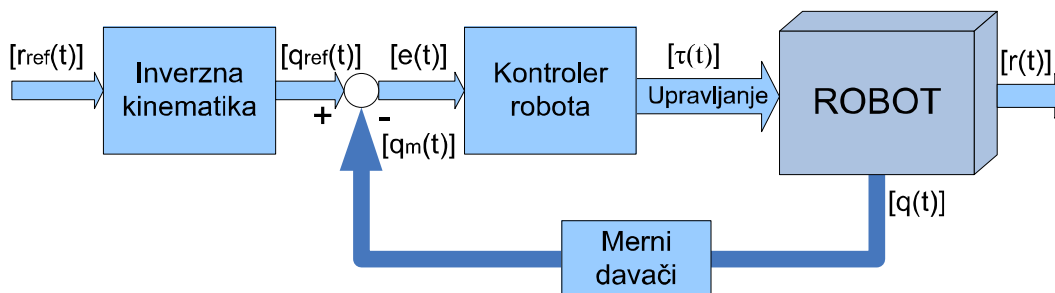
τ – vektor sila/momenata

Kod ovakvog modela objekta upravljački ulaz predstavlja vektor sila τ , pod čijim se dejstvom vrši pomeranje u zglobovima robota, čije pozicije predstavljaju objekat upravljanja sistema. Upravljanje robotom najčešće se vrši u zatvorenoj petlji po poziciji i brzini upravljanih koordinata $q(t)$ na osnovu referentnih pozicija zglobova $q_r(t)$. Razlike između zadatih koordinata i ostvarenih vrednosti predstavljaju greške. Ove greške potrebno je svesti na minimalni prihvatljiv nivo, pri čemu se mora voditi računa o tome da sistem bude uvek stabilan. Upravljanje robotom se može definisati u prostoru zglobova (*eng. joint space control*) i u radnom prostoru (*eng. operation space control*). Svakim zglobovom upravlja se nezavisno od drugih zglobova. Ovaj tip upravljanja je poznat kao upravljanje „jedan ulaz – jedan izlaz“ (*eng. SISO - Single Input – Single Output system*). Kako robot predstavlja multivarijabilni sistem sa n ulaza i n izlaza, koji su međusobno spregnuti, najčešće upravljanje robotom je sistem sa „više ulaza – više izlaza“ (*eng. MIMO - Multi Input – Multi Output*). Kod spregnutih sistema pomeranje bilo kog zgloba utiče na dinamiku ostalih zglobova, pa je problem upravljanja multivarijabilnog nelinearnog spregnutog sistema veoma složen.

Kod programiranja robota, primarni zadatak je pozicioniranje i orijentacija vrha robota, kao i kretanje po zadatoj putanji. Najprirodniji način zadavanja koordinata tačaka kroz koje robot vrši kretanje su spoljašnje koordinate, u radnom opsegu robota. Kako se kretanje odvija u zglobovima robota, za koje su vezane unutrašnje koordinate, najlakše je upravljanje vršiti u prostoru unutrašnjih koordinata. Zbog navedenih specifičnosti upravljanja, karakteristične su dve vrste upravljanja: upravljanje u prostoru unutrašnjih koordinata i upravljanje u prostoru spoljašnjih koordinata.

3.4.1 Upravljanje u prostoru unutrašnjih koordinata

Principijelna blok šema upravljanja robotom u prostoru unutrašnjih koordinata predstavljena je na slici 3.13. Ovaj pristup upravljanja sastoji se iz dva dela: prvi je rešavanje problema inverzne kinematike, a drugi formiranje upravljanja u prostoru zglobova robota. Kretanje robota zadaje se preko referentnog vektora kretanja u spoljašnjim koordinatama $[r_{ref}(t)]$. Ove koordinate se postupkom inverzne kinematike pretvaraju u vektor unutrašnjih koordinata $[q_{ref}(t)]$. Merni davači položaja daju trenutni položaj robota, koordinate se preko povratne sprege porede sa referentnim i formira se vektor signala greške $[e(t)]$. Kontroler robota formira vektor upravljanja $[\tau(t)]$, koji proizvodi kretanje vrha robota po zadatoj trajektoriji ili u zadati položaj.

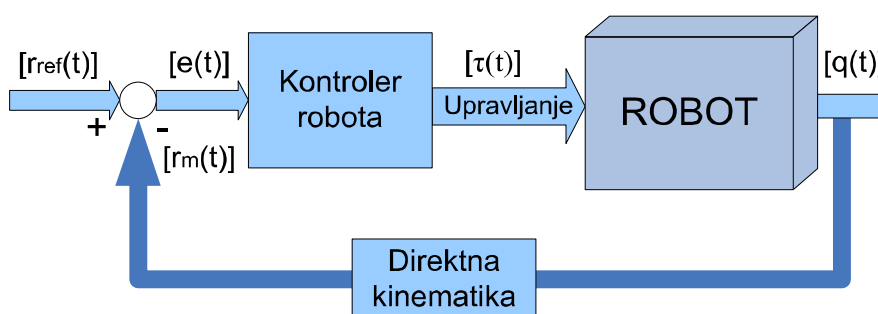


Slika 3.13: Blok šema upravljanja robotom u prostoru unutrašnjih koordinata

Tačnost upravljanja zavisi od tačnosti definisanog modela kinematike. Za precizna izračunavanja potrebno je obuhvatiti uticaj elastičnosti u prenosnim mehanizmima i segmentima robota, zatore u reduktorima i slično.

3.4.2 Upravljanje u prostoru spoljašnjih koordinata

Na slici 3.14 prikazana je blok šema, upravljanja robotskim manipulatorom u prostoru spoljašnjih koordinata. Najpogodniji način za opisivanje kretanja robota je zadavanje vektora koordinata u prostoru spoljašnjih koordinata $[r_{ref}(t)]$. Signal greške $[e(t)]$ formira se na osnovu zadatog referentnog kretanja i izmerenog kretanja vrha robota u spoljašnjim koordinatama. Kontroler robota na osnovu signala greške generiše upravljanje, koje se prenosi na pogone u zglobovima robota, tako da se poništi greške u sistemu.



Slika 3.14: Blok šema upravljanja robotom u spoljašnjim koordinatama

Položaj vrha robota ne meri se direktno, već preko davača položaja u zglobovima robota, koji se direktnom kinematikom prevode u spoljašnje koordinate. Povratna sprega je zatvorena po upravljanim promenljivima i na taj način smanjuje grešku usled netačnosti

kinematičkog modela robota. Kod ove vrste upravljanja potrebna su složena izračunavanja Jakobijan matrice u realnom vremenu, koja nije regularna u singularnim tačkama, pa se mogu javiti greške koje mogu da dovedu do problema sa stabilnošću sistema. Primenom savremenih robot-kontrolera velike procesorske moći, realizuju se složena izračunavanja u realnom vremenu. Primenom adekvatnih algoritama upravljanja, postiže se visoka stabilnost sistema sa minimalnim greškama, prilikom praćenja trajektorije i pozicioniranja vrha manipulatora.

3.4.3 Planiranje trajektorije

Osnovna operacija robota prilikom obavljanja bilo koje aktivnosti, predstavlja kretanje. Cilj planiranja kretanja robota je generisanje trajektorije u radnom prostoru robota, bez opasnosti od sudara na putanji robota. Kod transporta materijala dominantan je oblik kretanja PTP, pri čemu su važni početni i krajnji položaj, a putanja između tačaka nije od naročitog interesa. Složeniji oblik kretanja predstavlja CP kretanje. Kod ovog oblika kretanja vrh robota se od početne do krajnje tačke, kreće po tačno definisanoj putanji. Trajektorija kretanja je funkcija vremena $[q(t)]$, od $q_{\text{init}} = q(t_0)$ iz početne tačke A u početnom trenutku t_0 , do $q_{\text{final}} = q(t_f)$ krajnje tačke B u krajnjem trenutku t_f . Vremenski interval u kome se odvija kretanje je $(t_f - t_0)$. Kako je trajektorija funkcija vremena, lako se izračunavaju brzine i ubrzanja duž trajektorije.

3.4.3.1 Planiranje kretanja robotske ruke "od tačke do tačke"

Kod kretanja „od tačke do tačke“, potrebno je definisati početnu i krajnju tačku putanje. Ove koordinate se mogu zadati u prostoru unutrašnjih ili u prostoru spoljašnjih koordinata. Zadavanje koordinata vrši se tako, što se robot dovede u željenu tačku, podesi se orijentacija vrha robota i memorišu koordinate. Zadavanje koordinata može se vršiti ručno unošenjem spoljašnjih ili unutrašnjih koordinata pomoću računara ili ručnog upravljačkog uređaja. Kod ovog načina definisanja koordinata potrebno je proveriti da li za datu poziciju postoji rešenje inverzne kinematike. Za složenija kretanja, potrebno je trajektoriju podeliti na više segmenata, a između početnog i krajnjeg položaja definisati referentne tačke kroz koje robot prolazi. Na svakom segmentu mogu se definisati različite brzine i ubrzanja kretanja robota. Za postizanje zadatog položaja, kretanje se može vršiti po različitim trajektorijama. U praksi se interpolacija kretanja vrši pomoću polinoma n -tog stepena, a stepen polinoma n zavisi od broja ograničenja koja su zadata. Kod planiranja kretanja najjednostavnija interpolacija je linearna interpolacija. Kod ove vrste interpolacije brzina je konstantna, a ubrzanje je jednako nuli. Najčešće se koriste interpolacije

trajektorije polinomom petog ili trećeg stepena. Kod ovih funkcija ograničenja su početni i krajnji položaji, brzine i ubrzanja. U opštem slučaju, ako se vrši upravljanje u prostoru unutrašnjih koordinata za jedan zglob, potrebno je odrediti funkciju $q(t)$, gde je $q(t)$ skalarna veličina pomeranja zgloba. U slučaju generisanja putanje od početne do krajnje tačke, u početnom trenutku t_0 zadati su početni položaj $q(t_0) = q_0$ i početna brzina $\dot{q}(t_0) = v_0$, a za krajnji položaj u trenutku t_f , krajnji položaj $q(t_f) = q_f$ i brzina na kraju kretanja $\dot{q}(t_f) = v_f$. Pored ovih ograničenja moguće je zadati početno i krajnje ubrzanje [33]. Brzina i ubrzanje robota su ograničeni konstrukcijom robota, pa se umesto zadavanja vremena ubrzanja/usporenja, zadaju vrednosti maksimalnog ubrzanja i željene brzine, pa se na osnovu njih računaju vremenski intervali. U ovom slučaju imamo četiri ograničenja, pa se za aproksimaciju koristi polinom trećeg stepena koji ima četiri nezavisna koeficijenta, koji se mogu odrediti na osnovu ovih ograničenja. Vektor položaja dat je jednačinom:

$$\dot{q}(t) = a_0 + a_1 t + a_2 t^2 + a_3 t^3 \quad (3.24)$$

Željena funkcija brzine može se predstaviti funkcijom:

$$\dot{q}(t) = a_1 + 2a_2 t + 3a_3 t^2 \quad (3.25)$$

Kombinacijom jednačina (4.24) i (4.25) uz data ograničenja formiramo sistem od četiri jednačina:

$$q_0 = a_0 + a_1 t_0 + a_2 t_0^2 + a_3 t_0^3 \quad (3.26)$$

$$v_0 = a_1 + 2a_2 t_0 + 3a_3 t_0^2 \quad (3.27)$$

$$q_f = a_0 + a_1 t_f + a_2 t_f^2 + a_3 t_f^3 \quad (3.28)$$

$$v_f = a_1 + 2a_2 t_f + 3a_3 t_f^2 \quad (3.29)$$

Ovaj sistem jednačina može se predstaviti u matričnom obliku:

$$\begin{bmatrix} 1 & t_0 & t_0^2 & t_0^3 \\ 0 & 1 & 2t_0 & 3t_0^2 \\ 1 & t_f & t_f^2 & t_f^3 \\ 0 & 1 & 2t_f & 3t_f^2 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} a_0 \\ a_1 \\ a_2 \\ a_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} q_0 \\ v_0 \\ q_f \\ v_f \end{bmatrix} \quad (3.30)$$

Jednačina (3.30) uvek ima jedinstveno rešenje. Ako se ova jednačina predstavi u obliku:

$$[M] \cdot [a] = [b] \quad (3.31)$$

gde je M koeficijent matrica, a je vektor koeficijenata kubnog polinoma, i b je vektor početnih uslova. Vrednost koeficijenata računa se prema formuli:

$$[a] = [M]^{-1} \cdot [b] \quad (3.32)$$

3.4.3.2 Planiranje kontinualnog kretanja robota po zadatoj putanji

Kontinualno kretanje robota po zadatoj trajektoriji predstavlja kompleksniji problem u odnosu na kretanja robota od tačke do tačke. Kod ovog načina planiranja trajektorije kretanja, vrh robota se u svakom trenutku nalazi na analitički zadatoj putanji. Najčešće se trajektorija zadatka zadaje u spoljašnjim koordinatama, na osnovu kojih je potrebno inverznom kinematikom odrediti položaje zglobova robota u svakoj tački. Pozicija i orijentacija vrha robota u prostoru spoljašnjih koordinata data je jednačinom (3.16), gde je $r_p = [p_x \ p_y \ p_z]^T$ vektor pozicija, a $r_0 = [\theta \ \varphi \ \psi]^T$ vektor orijentacije hvataljke. Putanja predstavlja kontinualni skup tačaka u prostoru koji odgovaraju proizvoljnoj trodimenzionalnoj krivoj, koja je predstavljena jednačinom:

$$\begin{bmatrix} x \\ y \\ z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} x(\sigma) \\ y(\sigma) \\ z(\sigma) \end{bmatrix} \quad (3.33)$$

gde je σ geometrijski parametar koji opisuje putanju i predstavlja funkciju vremena $\sigma(t)$. Jednačina trajektorije po kojoj se kreće vrh robota zadaje se u parametarskom obliku. Pored tipa trajektorije, potrebno je zadati početni i krajnji položaj, vremenski interval u kome se kretanje odvija, kao i zakon promene brzine i ubrzanja tokom kretanja.

Sve primene robota u industriji zahtevaju orijentaciju alata pod tačno određenim uglom u odnosu na putanju (zavarivanje, sečenje, farbanjem montaža). Za potpunu definiciju kretanja vrha robota, potrebno je zadati orijentaciju vrha robota u prostoru. Vektor $r_0 = [\theta \ \varphi \ \psi]^T$ definiše orijentaciju hvataljke, koji u parametarskom obliku definiše zakon promene uglova u toku vremena. Kretanje industrijskog robota po zadatoj trajektoriji dominantno je kod: zavarivanja, sečenja, farbanja, lepljenja i slično.

3.4.3.3 Algoritmi za izbegavanje prepreka

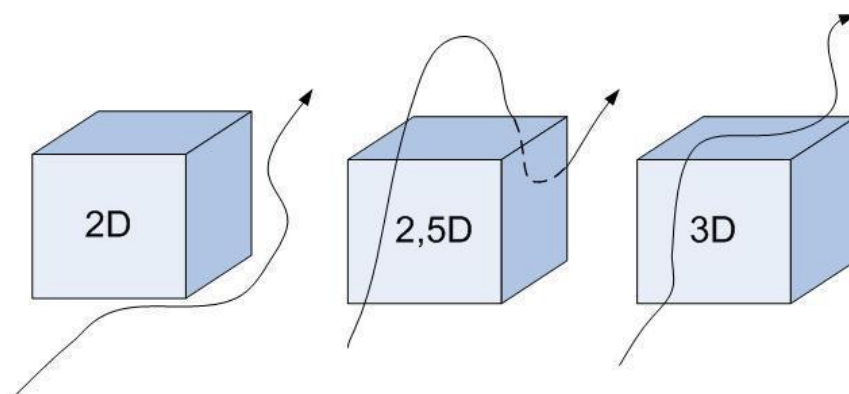
Industrijski roboti moraju imati veliku fleksibilnost kod realizacije različitih zadataka. Kod planiranja kretanja robota između početne i krajnje pozicije, potrebno je izvršiti optimizaciju putanje u cilju smanjenja vremena realizacije zadataka i potrošnje

energije. Kod planiranja putanje od početne pozicije A do određene pozicije B, potrebno je definisati referentne tačke kroz koje prolazi robot, tačke gde se zaustavlja i obavlja radne zadatke, kao i trajektorije po kojima obavlja neprekidno kretanje. Kod planiranja trajektorije kretanja robota posebno je uzeti u obzir sva ograničenja. Ako se na putanji robota nalaze prepreke, kod planiranja kretanja potrebno je definisati algoritme za zaobilazanje prepreka, izbegavanje sudara i havarijskih oštećenja. Osnovno ograničenje kod planiranja putanje predstavlja mehanička konfiguracija robota, tip zglobova, dužina linkova, brzina kretanja robota i tip završnog alata. Ukoliko putanja nije unapred definisana, potrebno je algoritamski rešiti problem da robot pomoću senzora i kamera sam pronađe optimalnu putanju.

U zavisnosti od namene robota, koriste se različite konfiguracije robota, čiji radni prostor ima različite oblike. Kod programiranja putanje robota, potrebno je izvršiti analizu kretanja i položaj prepreka u radnom prostoru. Prepreke se mogu svrstati u tri grupe:

- 2D
- 2,5D
- 3D

Karakteristične prepreke prikazane su na slici 3.15. Kod kretanja robota u ravni, karakterističan je dvodimenzionalni problem, gde robot zaobilazi prepreku pri čemu zadržava dvodimenzionalnu putanju. Problem 2,5D javlja se kada su dimenzije prepreke takve da robot mora da zaobiđe prepreku, tako što trajektoriju putanje podiže iznad prepreke, i nakon prolaska vraća se u dvodimenzionalno kretanje. Kod trodimenzionalnih prepreka, planiranje kretanja i izbegavanje prepreka je najkompleksniji problem [34].



Slika 3.15: Karakteristični slučajevi izbegavanja prepreka

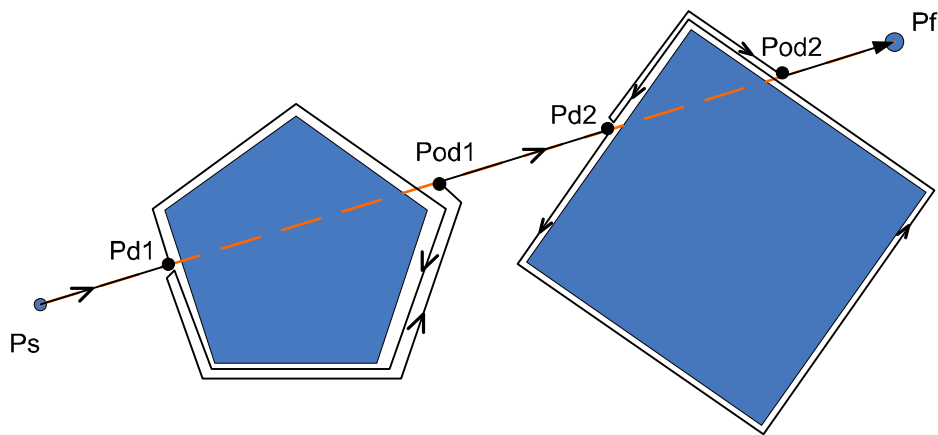
U industrijskoj robotici prepreke na zadatoj trajektoriji su fiksne, poznate su njihove dimenzije i koordinate. Do kolizije uglavnom dolazi kada robot radi u tandemu sa drugim

robotom ili se na zadatoj trajektoriji nepredviđeno pojavi prepreka. Slučajno kretanje prepreka dešava se veoma brzo, tako da se uglavnom robot zaustavlja, kako bi se eliminisala mogućnost povrede operatera ili havarijskog oštećenja sistema. Da bi se slučajne prepreke izbegle, potrebno je da robot ima senzore, koji će omogućiti pravovremenu detekciju prepreka i pronalaženje alternativne putanje za zaobilazanje prepreke. U robotici se kao senzori koriste: video kamere, optički senzori, infracrveni senzori, ultrazvučni senzori i drugi senzori blizine.

Proces kojim se određuje skup slobodnih putanja robota od početnog položaja do željenog cilja naziva se planiranje kretanja. Cilj planiranja kretanja je da robot izvrši bezbedno zadatak u najkraćem vremenskom intervalu, a da se pri tome izbegnu sve prepreke na putu. Zahtevi kod planiranja putanje mogu biti: minimalna dužina putanje, minimalno vreme, minimalan utrošak energije ili izbor putanje uz dodatna ograničenja. Najveći broj istraživanja u oblasti planiranja putanje i izbegavanja prepreka je u mobilnoj robotici, gde se zahteva autonomno kretanje robota bez obzira na prepreke. Najpoznatiji i najčešće korišćeni algoritmi za planiranje putanje su: "Roadmap" algoritmi, dekompozicija prostora, pretraživanje grafova, potencijalna polja i hibridne tehnike ("*Bug*" algoritmi).

Najpoznatiji hibridni algoritam za planiranje kretanja robota je "Bug" algoritam, koji su zasnovani na pretpostavci da je broj prepreka u radnom prostoru konačan. Ovaj algoritam zasniva se na principu praćenja konture svake prepreke koja se nađe na putu kretanja i obilaska oko prepreke. Za korišćenje ovog algoritma potrebno je da robot poseduje senzor za detekciju prepreka. Ovaj algoritam se uglavnom koristi za planiranje putanje od početne do krajnje tačke, kada su koordinate ovih tačaka poznate. Najpoznatiji Bug1 i Bug 2 algoritmi za koje se koriste senzori dodira, Tangencijalni Bug (*TangentBug*) algoritam gde se koriste senzori za merenje udaljenosti od prepreke i Bug algoritam zasnovan na korišćenju video kamera – *VisBug*.

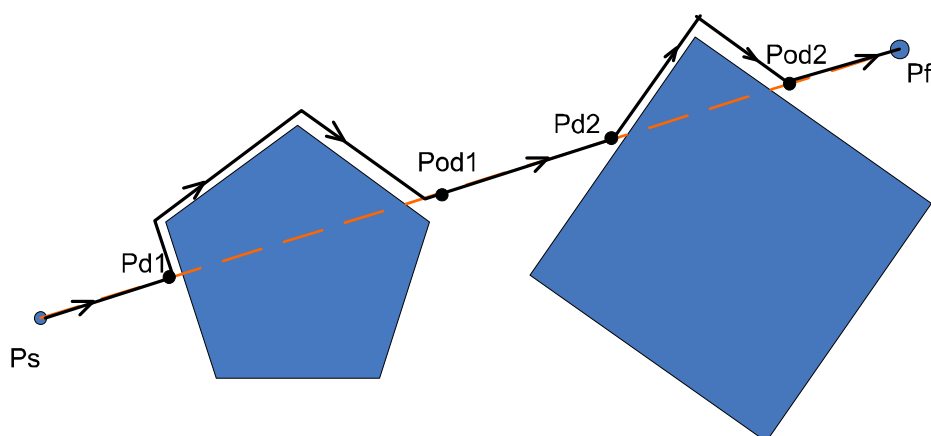
Prema algoritmu Bug 1, kada senzor robota tokom kretanja detektuje prepreku, robot obilazi oko cele prepreke, izračunava udaljenost svih tačaka od ciljne tačke, pronalazi tačku koja je najbliža cilju, dolazi u tačku odvajanja i počinje da se udaljava od prepreke prema definisanoj putanji. Na slici 3.16 prikazan je princip detekcije i obilaženja prepreke prema Bug 1 algoritmu.



Slika 3.16: Izbegavanje prepreka po algoritmu Bug 1

Robot ima zadatak da najkraćim putem stigne iz početne pozicije P_s u ciljnu poziciju P_f . kada senzor detektuje prvu prepreku u tački dodira P_{d1} , robot obilazi celu prepreku po obodu, izračunava najbližu tačku odvajanja od prepreke P_{od1} , vraća se do te tačke i nastavlja pravolinijski prema cilju. Kada detektuje drugu prepreku u tački dodira P_{d2} , prethodni postupak se ponavlja i robot iz tačke P_{od2} , nastavlja prema cilju P_f . Ovaj algoritam nije optimalan, ali omogućava sigurno dostizanje cilja.

Kod algoritma Bug 2, izbegavanje prepreka se realizuje optimalnije u odnosu na algoritam Bug 1. Kada senzor detektuje prepreku, robot započinje obilaženje prepreke, tako da obiđe prepreku s jedne strane i vraća se na putanju koja spaja početnu i krajnju tačku i nastavlja kretanje. Na ovaj način se smanjuje dužina putanje u odnosu na Bug 1 algoritam. Na slici 3.17 prikazan je princip detekcije i izbegavanja prepreke prema Bug 2 algoritmu.



Slika 3.17: Izbegavanje prepreka po algoritmu Bug 2

Kada robot krene iz početne pozicije P_s u ciljnu poziciju P_f , senzor detektuje prvu prepreku u tački dodira P_{d1} , robot obilazi prepreku po obodu sa jedne strane, izračunava najkraću putanju do predviđene trajektorije i odvajanja od prepreke u tački P_{od1} i nastavlja

pravolinijski prema cilju. Kada detektuje drugu prepreku u tački dodira P_{d2} , prethodni postupak se ponavlja i robot iz tačke P_{od2} , nastavlja prema cilju P_f .

Tangencijalni Bug (*TangentBug*) algoritam predstavlja modifikaciju Bug algoritma, zasniva se na merenju udaljenosti od prepreke i poznavanju radnog prostora, poznat je pod imenom lokalni tangencijalni graf (LTG). Detekcija prepreke i merenje rastojanja vrši se pomoću ultrazvučnih i infracrvenih senzora, prati konture prepreka, zaobilazi prepreku po najkraćoj putanji i usmerava kretanje robota prema cilju.

VisBug je algoritam novije generacije, koji za izbegavanje prepreka kao senzor koristi video kameru. Na osnovu generisane slike radnog okruženja, kada se detektuje prepreka, kontroler robota vrši poređenje trenutne slike radnog prostora sa referentnom slikom, na osnovu čega generiše upravljanje za zaobilazanje prepreke po optimalnoj putanji. Kontroler robota kod ovih algoritama mora imati veliki procesorsku snagu, zbog velike količine informacije koje treba da obradi u realnom vremenu, kako bi se izbegli potencijalni sudari i generisala optimalna trajektorija kretanja [35-36].

3.5 Razvoj i verifikacija modela industrijskog robota

Programski paket MATLAB predstavlja softversko okruženje podržano višim programskim jezicima, namenjeno za numerička izračunavanja, kreiranje modela sistema, aplikacija, programiranje, simulaciju, vizuelizaciju i analizu podataka. Naziv ovog programskog paketa potiče od izraza *Matrix Laboratory*, što označava da su matrice osnovni elementi u proračunima. MATLAB ima ugrađen veliki broj matematičkih funkcija, koje omogućavaju brze i efikasne proračune, kao i mogućnost razvoja algoritama i programiranje u programskim jezicima kao što su C/C++ i Java. Softverski paket MATLAB namenjen je za korišćenje u različitim oblastima: upravljanje sistemima, obrada signala i komunikacije, testiranje i merenja, obrada video materijala, tehnologiji, hemiji i biologiji. Pored osnovnih funkcija, MATLAB raspolaže dodatnim paketima alata (toolbox) za rešavanje posebnih klasa problema. Za primenu u oblasti sistema automatskog upravljanja najčešće se koriste sledeći alati: *Control System Toolbox*, *Robotics Toolbox*, *Signal Processing*, *Optimization*, *System Identification*, *Neural Networks* i *Simulink*. Primena softverskih paketa za modeliranje i simulaciju u robotici ima sve veći značaj kod projektovanja robotskih sistema. Jedan od najčešće korišćenih alata za modeliranje i simulaciju u robotici je „*Robotics Toolbox for MATLAB*“. Ovaj softverski alat omogućava rad sa vektorima i matricama, homogene transformacije, modeliranje, rešavanje problema direktne i inverzne kinematike, generisanje trajektorije kretanja i orijentacije robota. Kinematska struktura serijskih robota se najčešće predstavlja generalizovanim modelom - Denavit-Hartenberg (DH) matrice [37-38].

3.5.1 Kreiranje modela industrijskog robota u MATLAB-u

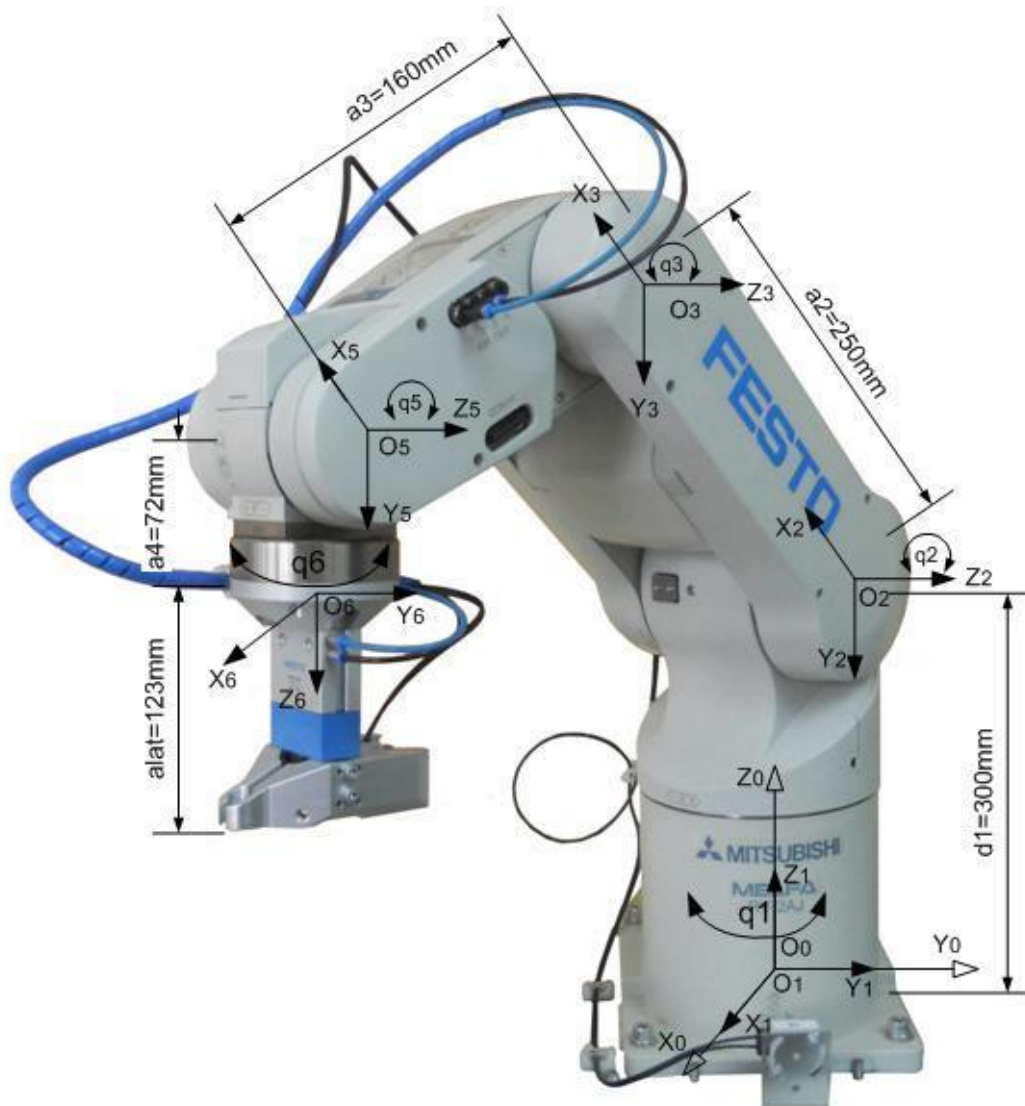
Specijalizovani alat programskog paketa MATLAB za simulaciju kinematike, dinamike i generisanja trajektorije robota je „*Robotics Toolbox*“. On sadrži veliki broj MATLAB funkcija (M- fajlova), koji se koriste za modeliranje, simulaciju i analizu kinematike i dinamike realnih robota. Većina ovih funkcija podržava grafičko okruženje za simulaciju realnih sistema u Simulink Toolbox-u. Projektovanje i analiza modela robota primenom MATLAB-a tema je mnogih naučnih radova. Analiza modela PUMA robota prikazana je u radovima [39-40], modeliranje i simulacija robota Kuka u radovima [41-43], dok je modeliranje i simulacija robota Mitsubishi RV2AJ prikazana u radovima [44-46]. Model serijskog robota opisuje se pomoću parametara DH matrica (Danavit-Hartenberg). Parametre DH matrice unosi korisnik, na osnovu tipa robota, fizičkih dimenzija linkova, broja i tipa zglobova. Kod kinematike robota proučavaju se geometrijske i vremenske promene parametara tokom kretanja robota, pri čemu se ne

uzimaju u razmatranje uzroci kretanja (inercija, sila, gravitacija, moment). Direktnom kinematikom određuju se transformacione matrice koje povezuju apsolutne i relativne koordinate segmenata robota. Na osnovu pozicija zglobova, direktnom kinematikom dobijaju se x , y , z koordinate zglobova. Inverznom kinematikom određuje se parametar položaja zglobova na osnovu pozicije i orijentacije alata robotske ruke. Za kreiranje modela robota potrebno je definisati parametre matrice prema Denavit-Hatenbergovoj notaciji. Korišćenjem alata Robotics Toolbox kinematika robota se predstavlja opštim modelom - DH matricom. Svaki red matrice predstavlja jedan segment robota, a kolone imaju sledeće značenje:

Tabela 3.1: Karakteristični parametri DH matrice

Kolona	Simbol	Opis
1.	α	Ugao zakretanja zgloba (rad)
2.	d	Pomeraj segmenta
3.	θ	Ugao rotacije linka (rad)
4.	a	Dužina linka
5.	σ (R/P)	Tip zgloba; 0 za rotacioni, ne-nula za translatorni

Za formiranje kinematskog modela potrebno je unapred poznavati broj zglobova, tip i njihov međusobni raspored. Prvi korak predstavlja identifikaciju osa svih zglobova i označavanje osa zglobova od z_0 do z_{n-1} . Na svakom segment se nalaze dva koordinatna sistema. Prvi koordinatni sistem sa koordinatnim početkom O_0 postavlja se u bazu robota, i on predstavlja referentni koordinatni sistem. Drugi koordinatni sistem postavlja se na drugi kraj prvog segmenta i njegov položaj se menja sa promenom položaja segmenta. Koordinatni početak i -tog zgloba postavlja se na mestu preseka osa z_{i-1} i z_i , a ukoliko su ose paralelne koordinatni početak se postavlja u zglob z_i . Osa x_i postavlja se u pravcu koji je normalan u odnosu na ravan odedenu osama z_{i-1} i z_i , a osa y_i se postavlja tako da se formira desni koordinatni sistem. Zatim sledi postavljanje koordinatnog sistema završnog alata robota. Na osnovu parametara a_i , d_i , α_i i θ_i , formira se homogena matrica transformacija. Na ovaj način se definišu položaji svih koordinatnih sistema i formira ukupna matrica transformacije ${}^0_n[T]$, koja povezuje poziciju i orijentaciju koordinatnog sistema alata u odnosu na bazni koordinatni sistem.



Slika 3.18: DH partametri industrijskog robota Mitsubishi RV-2AJ

Na slici 3.18 prikazan je industrijski robot Mitsubishi RV2AJ, na kome su označeni karakteristični parametri robota, obeleženi su zglobovi i dužine segmenata. Na osnovu ovih podataka definišu se DH parametri ovog robota, koji su prikazani u tabeli 3.2.

Tabela 3.2: DH parametri industrijskog robota RV2AJ

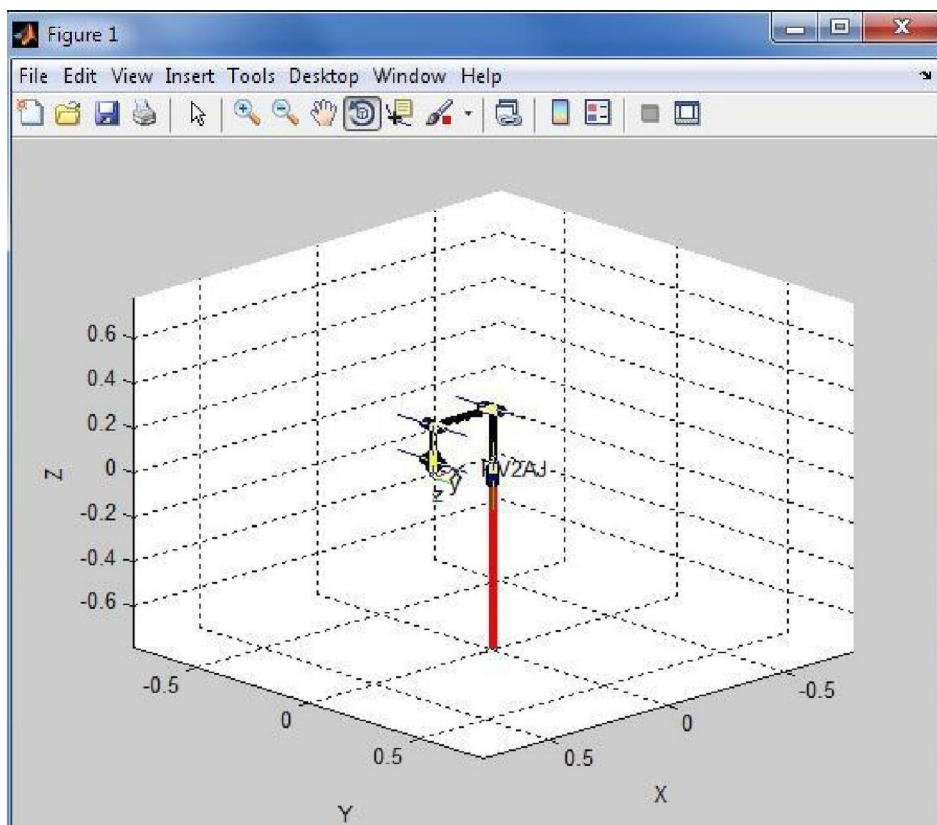
Zglob (i)	q_i	θ_i (rad)	α_i (rad)	a_i (mm)	d_i (mm)
1	q_1	θ_1	-90	300	300
2	q_2	θ_2-90	0	250	0
3	q_3	θ_3	0	160	0
4	q_5	θ_4+90	90	72	0
5	q_6	θ_5	90	0	0
6	alat	0	0	0	123

U okviru laboratorijskih vežbi, pomoću Robotics Toolbox-a razvijen je model robota Mitsubishi RV2AJ sa 5 stepeni slobode. Na osnovu podataka iz tabele 3.2 definiše se homogena matrica u m-fajlu:

```
% Mitsubishi robot RV2AJ
% d1=0.300 m, a2=0.250 m, a3=0.160 m, a4=0.072m, d5=0.012 m
% definicija linkova robota
% alpha a      theta d      R/P
L{1} = link([pi/2  0      0      0.3  0], 'standard');
L{2} = link([0    0.250  0      0      0], 'standard');
L{3} = link([0    0.160  0      0      0], 'standard');
L{4} = link([pi/2  0.072  0      0      0], 'standard');
L{5} = link([0    0      0      0      0], 'standard');

% definicija vektora unutrašnjih koordinata robota
qz = [0  0      0      0      0]; % nulta pozicija svih zglobova
qr = [0  pi/2  -pi/2  0      0]; % početna pozicija
qs = [0  0      -pi/2  0      0]; % željena pozicija
qn = [0  pi/4   pi     pi/4  0]; % željena pozicija
rv2 = robot(L, 'RV2AJ', 'Unimation', 'params of 8/95');
clear L
rv.name = 'RV2AJ';
rv.manuf = 'Unimation';
```

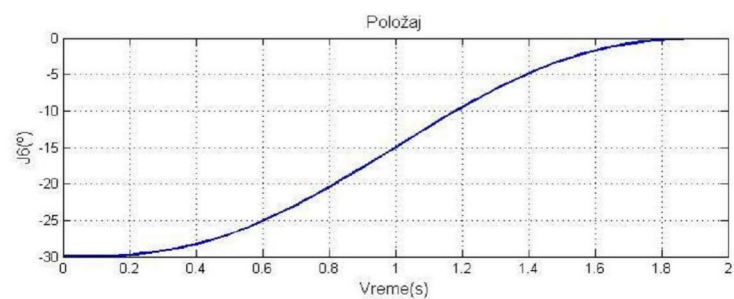
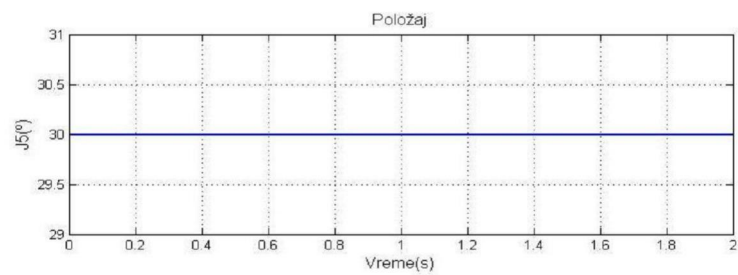
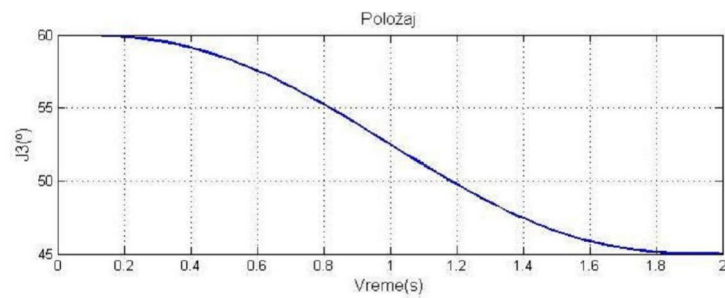
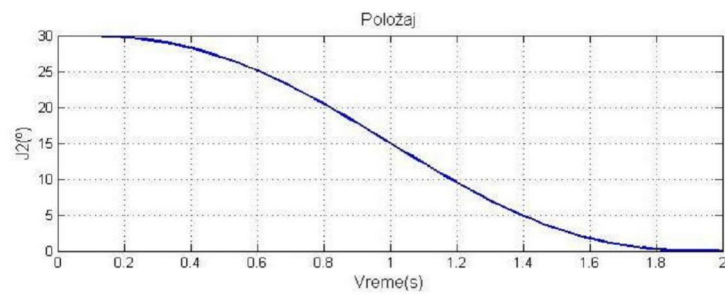
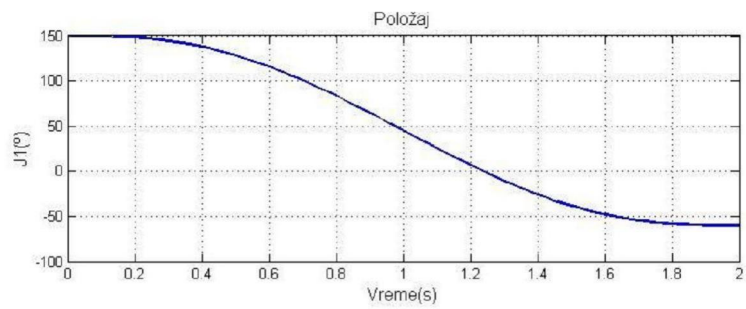
Definisanjem DH matrice razvijen je model robota Mitsubishi RV2AJ, koji omogućava simulaciju kretanja robota po zadatim putanjama i praćenje karakterističnih parametara tokom kretanja. Na slici 3.19 prikazan je model industrijskog robota Mitsubishi RV-2AJ u MATLAB-u.



Slika 3.19: Model industrijskog robota Mitsubishi RV2AJ u MATLAB-u

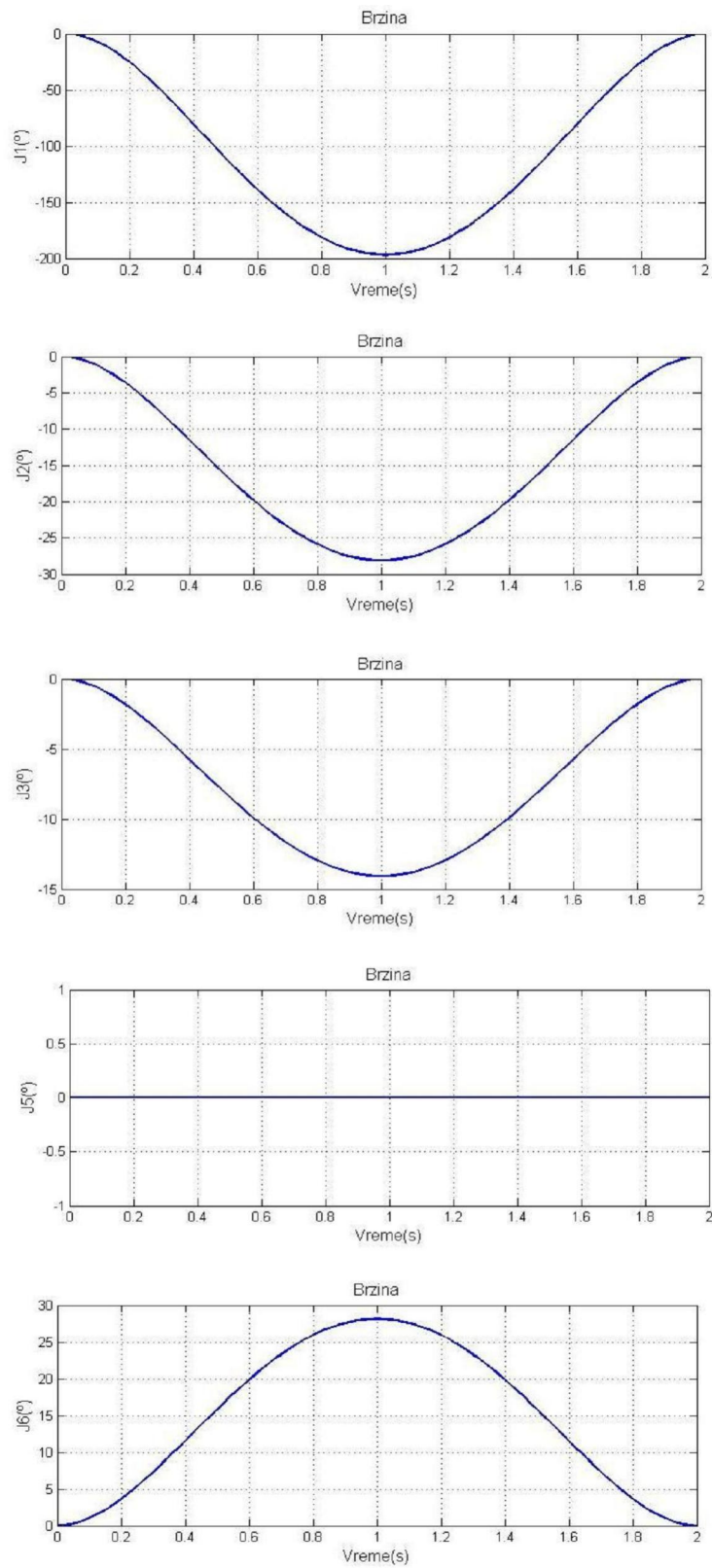
3.5.2 Simulacija industrijskog robota u MATLAB -u

U okviru laboratorijskih vežbi realizovan je veliki broj simulacija i testiranja. Za zadato kretanja industrijskog robota RV2AJ od tačke do tačke, iz tačke A sa koordinatama položaja $q_1=[150\ 30\ 60\ 30\ -30]$, do tačke B, sa koordinatama $q_2=[-60\ 0\ 45\ 30\ 0]$, potrebno je pratiti trajektoriju kretanja i karakteristične parametre. Tokom simulacije praćena je promena položaja, brzine i ubzanja u svim zglobovima. Maksimalne vrednosti brzina robota RV2AJ po zglobovima su: J1 -180 °/s, J2 - 90 °/s, J3 - 135 °/s, J5 - 180 °/s, J6 -210 °/s. Simulacija omogućava praćenje položaja u bilo kom vremenskom trenutku. Simulacija je izvršena u MATLAB-u, u trajanju od $t=2s$, sa korakom simulacije $\Delta t=0.02s$. Vrednosti promene položaja zglobova prikazane su na slici 3.20.



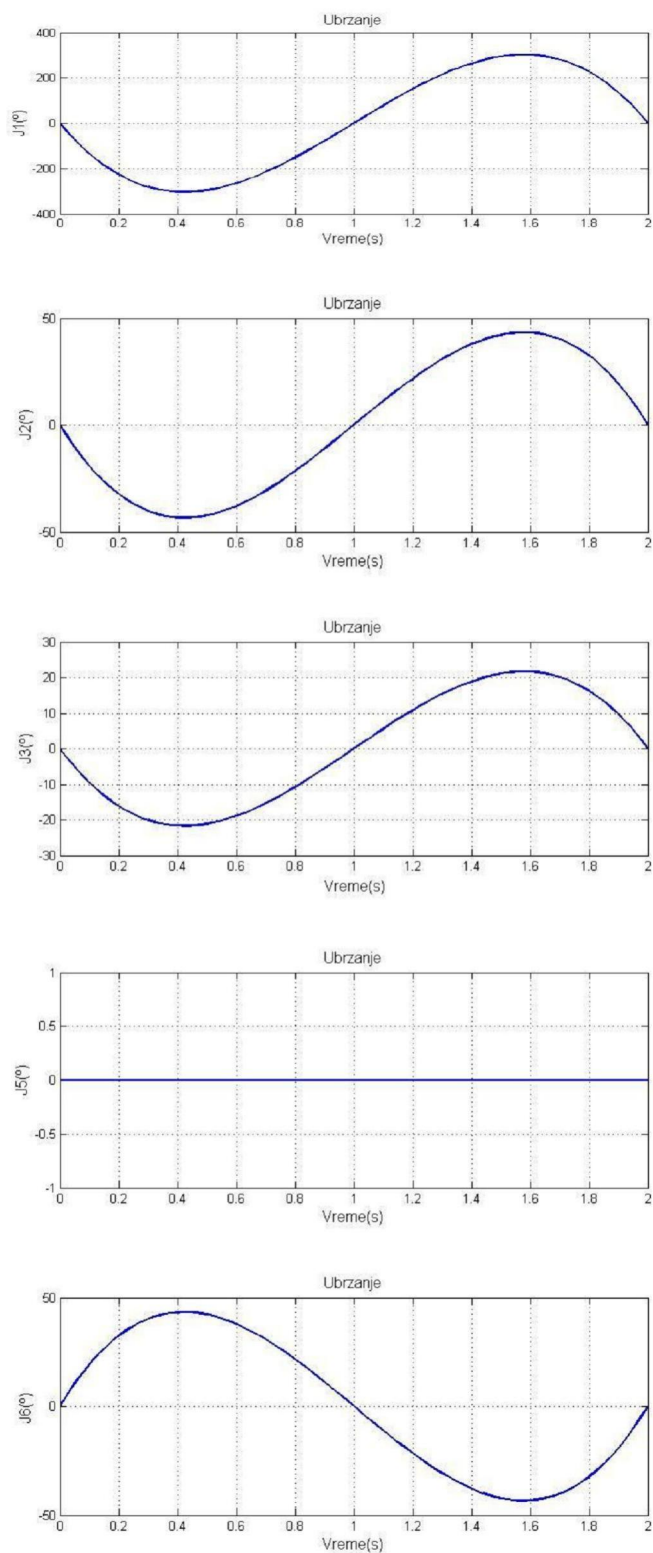
Slika 3.20: Promene vrednosti položaja zglobova

Vrednosti promene brzine u zglobovima prikazane su na slici 3.21.



Slika 3.21: Promene vrednosti brzina zglobova

Vrednosti promene brzine u zglobovima prikazane su na slici 3.22.



Slika 3.22: Promene vrednosti ubrzanja zglobova

Vrednost unutrašnjih koordinata od tačke A do tačke B se smanjuju tokom vremena i to: koordinate zgloba J1 od 150° do -60° , koordinate zgloba J2 od 30° do 0° i koordinate zgloba J3 od 60° do 45° , tako da grafici promene položaja od $t=0s$ do $t=1s$, ima opadajući tok, unutrašnja koordinata zgloba J5 ima konstantnu vrednost u tačkama A i B, pa je grafik promene položaja konstantan u vremenu, dok zglob J6 menja svoju vrednost od -30° do 0° , tako da je grafik promene položaja rastući.

Grafik promene brzine zglobova J1, J2, J3 i J6 prikazuje povećanje brzine zglobova od minimalne vrednosti u $t = 0s$, do maksimalne $t = 1s$, a zatim smanjenje brzine do nule u trenutku $t=2s$. Grafici zglobova J1, J2 i J3 su obrnuti u odnosu na J6, jer se povećanje brzine odnosi na smanjenje vrednosti unutrašnjih koordinata zglobova. Vrednost unutrašnje koordinate J5 se ne menja, pa je brzina u ovom zglobu jednaka nuli.

Grafik promene ubrzanja zglobova J1, J2, J3 i J6 prikazuje povećanje ubrzanja zglobova od minimalne vrednosti u $t = 0s$, do maksimalne $t = 1s$, a zatim smanjenje ubrzanja do nule u trenutku $t=2s$. Grafici zglobova J1, J2 i J3 su obrnuti u odnosu na J6, jer se povećanje ubrzanja odnosi na smanjenje vrednosti unutrašnjih koordinata zglobova. Vrednost unutrašnje koordinate J5 se ne menja, pa je ubrzanje u ovom zglobu jednaka nuli. Simulirane vrednosti daju odlične rezultate, koji se mogu koristiti prilikom programiranja industrijskog robota, a zatim izvršiti poređenje simuliranih i merenih vrednosti.

Tabela 3.3: Uporedni prikaz simuliranih i realnih vrednosti koordinata vrha robota

Položaj robota	Vrednosti unutrašnjih koordinata zglobova robota	Merena vrednost	Simulirana vrednost	Greška (%)	Merena vrednost	Simulirana vrednost	Greška (%)	Merena vrednost	Simulirana vrednost	Greška (%)
		x	x	δx	y	y	δy	z	z	δz
1	J1=0, J2=0, J3=0, J5=0, J6=0	0	0	0	0	0	0	782	782	0
2	J1=0, J2=90, J3=0, J5=0, J6=0	482	482	0	0	0	0	299	300	0.33
3	J1=0, J2=30, J3=90, J5=45, J6=0	282	282	0	0	0	0	367,5	367	0.14
4	J1=60, J2=0, J3=90, J5=0, J6=0	116	116	0	201	201	0	550	550	0
5	J1=0, J2=30, J3=60, J5=30, J6=0	347.4	347	0.15	0	0	0	479	481	0.41
6	J1=90, J2=30, J3=90, J5=60, J6=120	0	0	0	263.58	264	0.16	364.44	365	0.15
7	J1=45, J2=0, J3=30, J5=0, J6=0	82.05	82	0.06	82.05	82	0.06	750.92	751	0.01
8	J1=-90, J2=30, J3=90, J5=60, J6=0	0	0	0	-263.61	-264	0.23	364.47	365	0.14

Za verifikaciju tačnosti definisanog simulacionog modela u MATLAB-u, industrijski robot je pomoću ručnog upravljačkog uređaja doveden u osam različitih položaja, za zadate vrednosti unutrašnjih koordinata date u tabeli. U svakom položaju očitavane su vrednosti spoljašnjih koordinata x , y i z . Ovakav postupak ponovljen je u MATLAB-u. Vrednosti simuliranih i realnih koordinata za iste tačke u radnom prostoru robota

prikazane su u tabeli 3.3. Na osnovu vrednosti koordinata u tabeli je izračunata i prezentovana relativna greška u procentima za svaku spoljašnju koordinatu. Za približno 50% vrednosti koordinata ova greška je nula, a u ostale vrednosti kreće se u opsegu od 0.01% do 0.41% [46]. Važno je napomenuti da su prilikom definisanja simulacionog modela zanemareni uticaj gravitacije i inercije. Imajući u vidu ove činjenice, i zanemarljiva odstupanja realnog industrijskog robota od simulacionog modela, prezentovani simulacioni model u MATLAB-u daje pouzdane podatke prilikom simulacije industrijskog robota. Tačnost razvijenog modela omogućava pouzdanu simulaciju i testiranje modela za različite primene robota.

3.5.3 Edukativne trajektorije

Za obuku učenika u kabinetu mehatronike koristi se industrijski robot sa 5 stepeni slobode koji je namenjen za zadatke i poslove gde se zahteva pozicioniranje i delimična orijentacija: opsluživanje mašina, transfer materijala, sortiranje, tačkasto i kontinualno zavarivanje, farbanje, bušenje, brušenje, sečenje ili vizuelna završna kontrola proizvoda. Programiranje industrijskog robota u realnom vremenu zahteva poznavanje hardverske strukture robota, kinematiku i dinamiku robota. U toku programiranja javljaju se problemi sa definisanjem koordinata tačaka, definisanjem putanje i redosleda definisanja procesnih operacija. Kako bi se izbegla havarijska oštećenja i mogućnost povrede učenika tokom obuke, pre obuke na industrijskom robotu, svi učenici moraju da savladaju veštine programiranja kroz simulacione 3D modele. Za tu namenu definisane su karakteristične edukativne trajektorije kroz set laboratorijskih vežbi koje su date u prilogu.

4 RAZVOJ I IMPLEMENTACIJA HIBRIDNOG MODELA UČENJA U MEHATRONICI

Današnje generacije učenika i studentata odrasle su uz korišćenje savremenih digitalnih uređaja: konzole za video-igrice, računari, mobilni telefoni, tablet računari. Odrastanje kroz interaktivne video igre, Internet i komunikacija preko različitih vrsta društvenih mreža, dovelo je do stvaranja novih generacija učenika koji razmišljaju i obrađuju informacije na sasvim drugačiji način od svojih roditelja. Zbog svog odrastanja i vaspitanja uz digitalnu tehnologiju i Internet, za ove generacije učenika veoma često se koristi naziv “digitalni urođenici”, a za starije generacije “digitalne pridošlice” [47]. Sistem obrazovanja projektovan je prema tradicionalnim metodologijama učenja pre pojave digitalnih uređaja i kao takav je neprihvatljiv novim generacijama učenika. Kako bi sistem obrazovanja bio izazovan i zanimljiv novim generacijama, potrebna je njegova transformacija, koja je zasnovana na primeni novih tehnologija, novih nastavnih metoda i novih modela učenja. Istraživanja u oblasti primene učenja na daljinu u oblasti mehatronike i robotike prikazana su u radovima [48-52].

Jedan od ciljeva doktorske disertacije je razvoj inovativnog hibridnog modela učenja u mehatronici, koje će povećati atraktivnost i efikasnost srednjeg stručnog obrazovanja. Za sticanje trajnih stručnih znanja i praktičnih veština potreban je novi pristup u realizaciji nastavnog procesa, koji je zasnovan na integraciji učenja u školi i učenja na daljinu. Posebna pažnja posvećena je uvođenju eksperimentalnog daljinskog učenja, formiranju i umrežavanju Web laboratorija, deljenju laboratorijskih eksperimenata, razvoju sistema za daljinski pristup i integraciji eksperimentalne nastave na daljinu u jedinstven sistem za upravljanje učenjem.

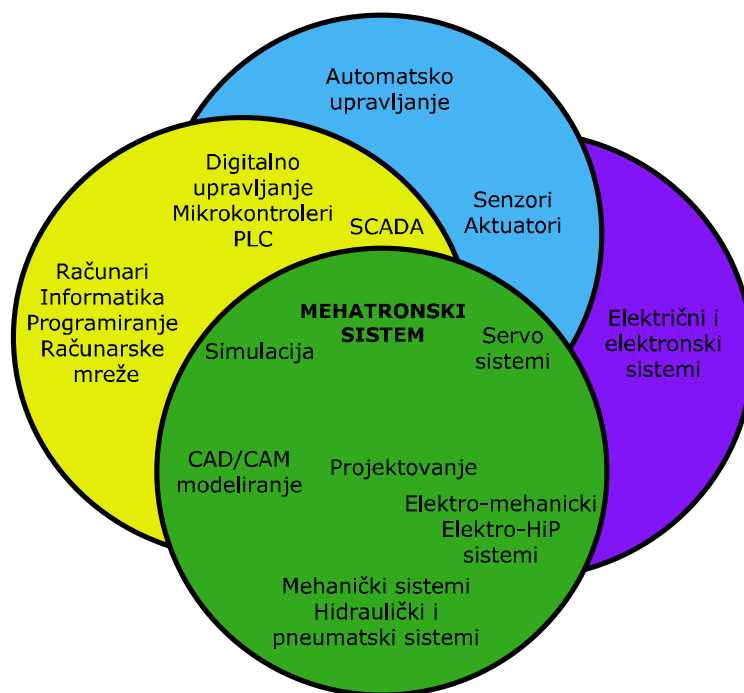
4.1 Karakteristike obrazovanja u mehatronici

Školovanje iz oblasti mehatronike u Republici Srbiji zastupljeno je na svim nivoima obrazovanja, od srednjeg stručnog obrazovanja, obrazovanja na visokim strukovnim školama i fakultetima. Za kvalitetno školovanje stručnih kadrova iz ove oblasti potrebna su savremena nastavna sredstva, kvalitetan nastavni kadar i standardizovani nastavni planovi i programi. Cena laboratorijske opreme potrebne za realizaciju zahtevnih nastavnih planova i programa je veoma visoka, tako da je izuzetno mali broj škola i fakulteta koji poseduju potrebnu didaktičku opremu za istovremenu obuku grupe učenika. Zbog nedostatka finansijskih sredstava, veći deo nastavnog procesa se odvija kroz

teorijsku nastavu, računske vežbe, modeliranje sistema na računaru i simulaciju sistema. Ovakav pristup realizaciji nastave smanjuje motivaciju za učenje i entuzijazam kod učenika, razdvaja teoriju i praksu, i školuje kadrove koji nemaju odgovarajuća praktična znanja i veštine za rad u realnom industrijskom sektoru. Veoma često se u nastavi prenaplašava primena softverskih paketa za simulaciju i modeliranje, pri čemu se zapostavlja izvođenje realnih eksperimenata. Kao rezultat zapostavljanja sticanja praktičkih veština na savremenim didaktičkim sistemima, školuju se kadrovi kojima je posle završenog školovanja potrebna dodatna obuka u radu sa industrijskim sistemima. Da bi nastavni proces bio izazovan, stimulativan i efikasan, neophodno je da se u nastavi koriste inovativne nastavne metode, savremena nastavna sredstva i nove tehnologije.

Razvoj računarske tehnike, mrežne infrastrukture i Interneta doveo je do ekspanzije daljinskog učenja na svim nivoima učenja. Početkom XXI veka veliki broj fakulteta u svetu počeo je sa razvojem Web laboratorija za daljinski pristup. Većina laboratorija razvija svoje Web aplikacije za pristup i upravljanje laboratorijskim sistemima. Za izradu naprednih grafičkih Web aplikacija koriste se savremeni standardi i tehnologije (HTML, XHTML, CSS, JavaScript, Ajax i drugi), programski jezici (C, C#, php, Java), baze podataka (MySQL, SQL) i napredne aplikacije zasnovane na Web interfejsu. Način pristupa Web laboratoriji uglavnom je zasnovan na softverskoj platformi "*Client-Server*". Ovaj način pristupa zahteva Web server i prateću softversku podršku. Za pristup laboratorijskoj opremi koristi se internet pretraživač i internet aplikacije, koje su razvijene za svaki hardverski modul. Nedostaci ovog sistema su: veliki finansijski troškovi za kupovinu servera i prateće softverske podrške, relativno dug periodu izrade Web aplikacija za upravljanje laboratorijskim uređajima i indirektan pristup realnim laboratorijskim sistemima.

Upravljanje mehatronskim sistemima zahteva široki spektar znanja i veština iz oblasti mehanike, hidraulike, pneumatike, elektronike, energetike, mernih davača, mikrokontrolera, PLC-a, informatike i programiranja. Na slici 4.1 prikazana je sinergija različitih naučnih oblasti koje su neophodne za funkcionisanje mehatronskog sistema.



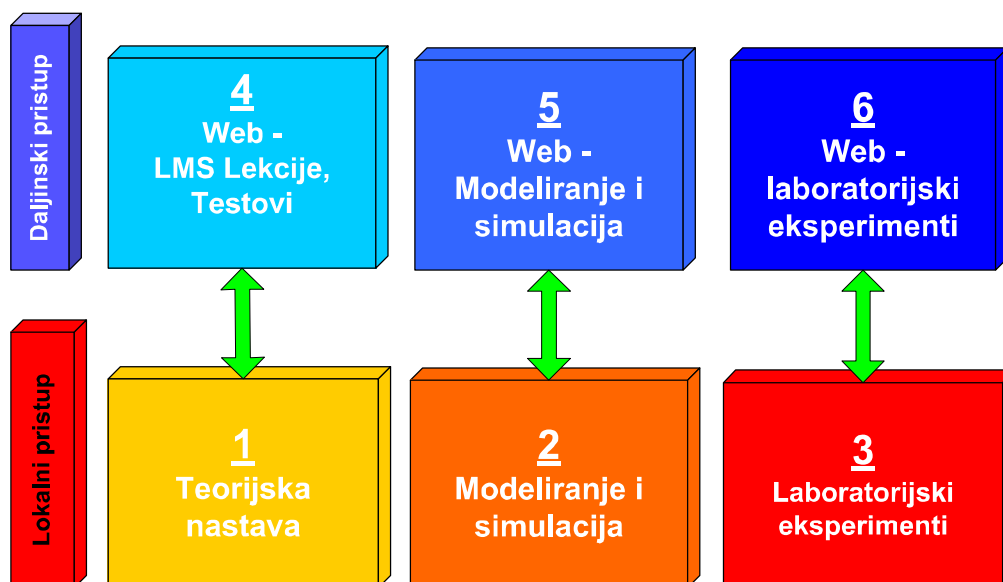
Slika 4.1: *Struktura mehatronskog sistema – sinergija znanja iz različitih oblasti*

Savremeni obrazovni sistem zahteva primenu adekvatnih didaktičkih sistema, koji po svojoj konstrukciji i karakteristikama odgovaraju realnim industrijskim sistemima. Mehatronski didaktički sistemi omogućavaju učenicima da primene usvojena teorijska znanja na realnim sistemima, upoznaju se sa industrijskim pneumatskim, električnim i elektronskim komponentama, hardverskom strukturom i programiranjem PLC-a, praćenjem i podešavanjem parametara sistema, kao i principom rada složenih mehatronskih sistema. Kombinacijom više ovakvih sistema, stvara se karakterističan složen sistem, koji u potpunosti simulira realne industrijske procese. Realni didaktički sistemi omogućavaju hardversku i softversku simulaciju kvara, tako da su pogodni za primenu kod testiranja, dijagnostike i servisiranja mehatronskih sistema. Na jednom didaktičkom sistemu istovremeno se mogu obučavati najviše dva do tri učenika. Ovakvi sistemi za obuku imaju relativno visoku cenu za većinu škola i fakulteta u našem okruženju, pa obrazovne institucije nisu u mogućnosti da poseduju veći broj istih didaktičkih sistema, na kojima bi se istovremeno vršila obuka. Alternativa klasičnom pristupu obuke je korišćenje virtuelnih simulacionih didaktičkih sistema, koji simuliraju rad realnih sistema na računaru. Obuka se vrši na računarima gde su instalirani programi za modeliranje i simulaciju. Na ovaj način se omogućava da učenik samostalno usvaja osnovna znanja, a da se istovremeno mogu obučavati veće grupe učenika.

Pristup školskim i fakultetskim laboratorijama ograničen je radnim vremenom obrazovne institucije i rasporedom realizacije laboratorijskih vežbi. Da bi učenici i

nastavnici mogli da koriste laboratorijsku opremu u bilo koje vreme i sa bilo koje geografske lokacije, rešenje predstavlja razvoj Web laboratorije za daljinski pristup. Pored razvoja Web laboratorije mehatronike, ideja doktorske disertacije je umrežavanje Web laboratorija zajednica srednjih stručnih škola i fakulteta u jedinstven virtuelni centar za obuku, formiranje jedinstvene biblioteke laboratorijskih eksperimenata, koji bi bili dostupni "24/7/365" učenicima, studentima, profesorima i istraživačima. Pored značaja za obrazovanje, ovakav sistem imao bi veliki značaj za zajednička istraživanja i realizaciju projekata naučnika sa različitih Univeziteta iz zemlje i inostranstva.

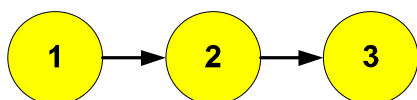
4.2



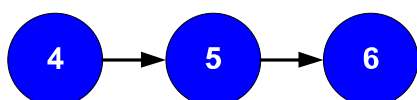
Slika 4.2: Uporedni prikaz lokalnog i daljinskog učenja

Kombinacijom prikazanih modela učenja, mogu se primenjivati sledeći oblici nastave:

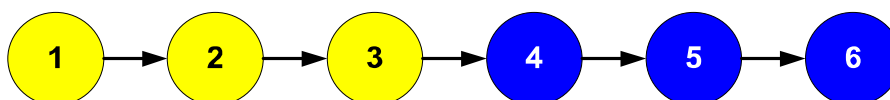
- Tradicionalni model nastave realizuje se isključivo u školi i obuhvata teorijsku nastavu, modeliranje i simulaciju na računarima, i realizaciju laboratorijskih vežbi.



- Učenje na daljinu u potpunosti se realizuje preko Interneta korišćenjem eksperimentalnih resursa škole i obuhvata učenje na daljinu preko LMS sistema, simulaciju i modeliranje daljinskim pristupom školskim računarima i realizaciju laboratorijskih vežbi daljinskim pristupom školskim laboratorijama



- Hibridni model nastave koji kombinuju tradicionalni model i model učenja na daljinu

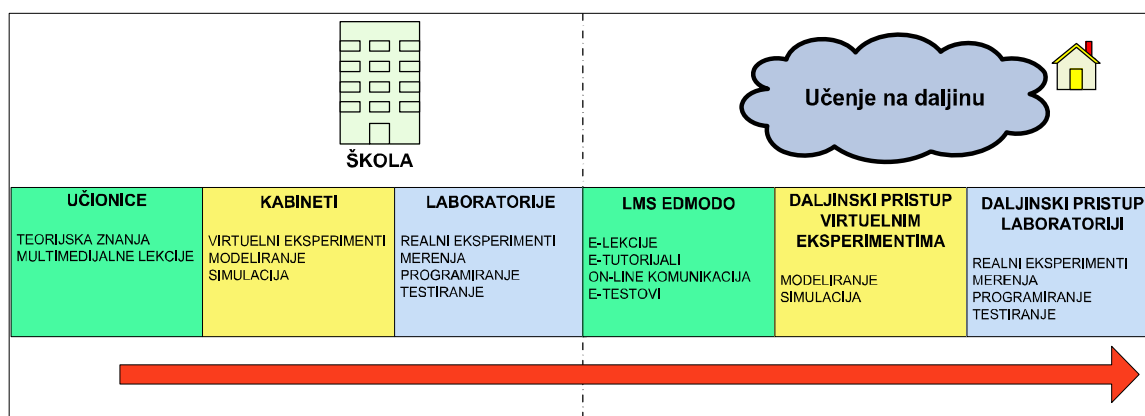


Kod tradicionalnog modela nastave, sve aktivnosti se odvijaju u školi. Nastava se realizuje kroz različite oblike nastave: predavanja, računске vežbe, laboratorijske vežbe i praktična nastava. Primenom softvera za modeliranje i simulaciju, vrši se modeliranje i simulacija realnih fizičkih objekata i sistema. Primenom virtuelnih modela vrši se vizuelizacija fizičkih procesa i povezivanje teorijskih i praktičnih znanja. Sve laboratorijske vežbe realizuju se u laboratorijama, pomoću laboratorijskih modela i

maketa, mernih instrumenata, realnih didaktičkih sistema, hardverskih kartica za akviziciju podataka, mikrokontrolera, PLC-a i računara. Povezivanjem mernih instrumenata i računara vrši se akvizicija podataka, programiranje, upravljanje i nadzor fizičkih procesa.

Učenje na daljinu je novi oblik nastave, koji je baziran na primeni savremenih IKT tehnologija, kako bi obrazovanje moglo da odgovori na zahteve moderne industrije. Obrazovni proces se odvija učenjem na daljinu, sve lekcije su postavljene na školskim serverima, omogućen je daljinski pristup školskim računarima i softverskim paketima koji se koriste u redovnoj nastavi i daljinski pristup školskim laboratorijama za sticanje praktičnih znanja i veština. Kroz LMS vrši se praćenje napredovanja učenika, ocenjivanje i priprema za polaganje završnih ispita u prostorijama škole.

Na osnovu definisanih ciljeva i ishoda učenja, definišu se planovi za postizanje ishoda sa tačno definisanim koracima i preporučenim sadržajima. U toku implementacije kurikuluma obrazovnog profila tehničar mehatronike-ogled, razvijen je i implementiran hibridni model učenja. Ovaj model učenja integriše tradicionalnu nastavu u školi i daljinsko učenje preko Interneta, sa posebnim akcentom na primenu eksperimentlanog učenja na daljinu. Na slici 4.3 prikazan je inovativni hibridni model učenja u mehatronici.



Slika 4.3: Hibridni model učenja u mehatronici

Hibridni model se sastoji iz šest logičkih celina, koje se nadovezuju i preklapaju. Prvi oblik nastave je teorijska nastava koja se realizuje u školskim učionicama, primenom različitih nastavnih metoda i multimedijalnih nastavnih materijala. Drugi oblik nastave u školi je vizuelizacija teorijskih znanja primenom softverskih paketa za modeliranje i simulaciju. Korišćenjem virtuelnih modela, omogućava se vizuelna prezentacija teorijskih modela i principa, dobijanje teorijskih rezultata simulacije i mogućnost poređenja sa eksperimentalnim rezultatima. Treći oblik nastave u školi je realizacija laboratorijskih

vežbi na realnim didaktičkim sistemima, gde se vrši montaža, povezivanje, programiranje i testiranje mehatronskih sistema. Vežbe se realizuju u školskim laboratorijama, u ograničenom vremenskom trajanju, sa ograničenim brojem laboratoriskih eksperimenata. Ovaj oblik rada je pogodan za povezivanje teorijskih i praktičnih znanja, proveru simulacionih modela i sticanje praktičnih znanja i veština za rad sa realnim industrijskim sistemima.

Četvrti oblik nastave predstavlja daljinsko učenje preko Interneta koje je zasnovano na Web platformi Edmodo. Ovaj sistem omogućava razvoj teorijskih kurseva, postavljanje nastavnih materijala, kreiranje upitnika, anketa, zadataka i testova. LMS sistem Edmodo je zatvoreno bezbedno okruženje za učenje, pristup sistemu je zasnovan na jedinstvenim kodovima za svakog učenika i roditelja. Rešavanjem testova, izradom zadataka i učešćem na forumima, učenici razmenjuju iskustva sa vršnjacima i nastavnicima, proveravaju znanja i prate svoje napredovanje. Za razliku od LMS Moodle, Edmodo omogućava roditeljima praćenje svih aktivnosti učenika na mreži i napredovanje tokom školovanja.

Peti oblik nastave predstavlja daljinski pristup virtuelnoj laboratoriji. Sistem za daljinski pristup omogućava korišćenje školskih računara i korišćenje virtuelnih didaktičkih sistema. Korišćenjem softverskog paketa Team Viewer i Internet-a, učenici imaju mogućnost korišćenja svih softverskih paketa za obuku, tutorijale, programske pakete za modeliranje, simulaciju i testiranje u 3D okruženju. Ovo virtuelno okruženje je potpuno isto kao da se učenici nalaze u svojim kabinetima, na svojim računarima. Na ovaj način se omogućava da učenici nastave projekte koji su radili na časovima vežbi u školi, menjaju parametre sistema i kreiraju nove modele.

Šesti oblik nastave u hibridnom modelu predstavlja daljinski pristup laboratorijskim sistemima u školskim laboratorijama. Ovaj oblik učenja je dostupan samo učenicima koji su savladali sva predviđena teorijska znanja i realizovali sve vežbe na virtuelnim simulacionim modelima. Daljinskim pristupom laboratorijskim resursima omogućava se realizacija različitih vrsta merenja, akvizicija podataka na daljinu, snimanja karakteristika sistema, programiranja i testiranja mehatronskih sistema u realnom vremenu, uz audio i video podršku. Sistem za daljinski pristup omogućava realizaciju laboratorijskih eksperimenata uz veliki broj ponavljanja željenom dinamikom i pristup sistemima bez obzira na vreme i mesto.

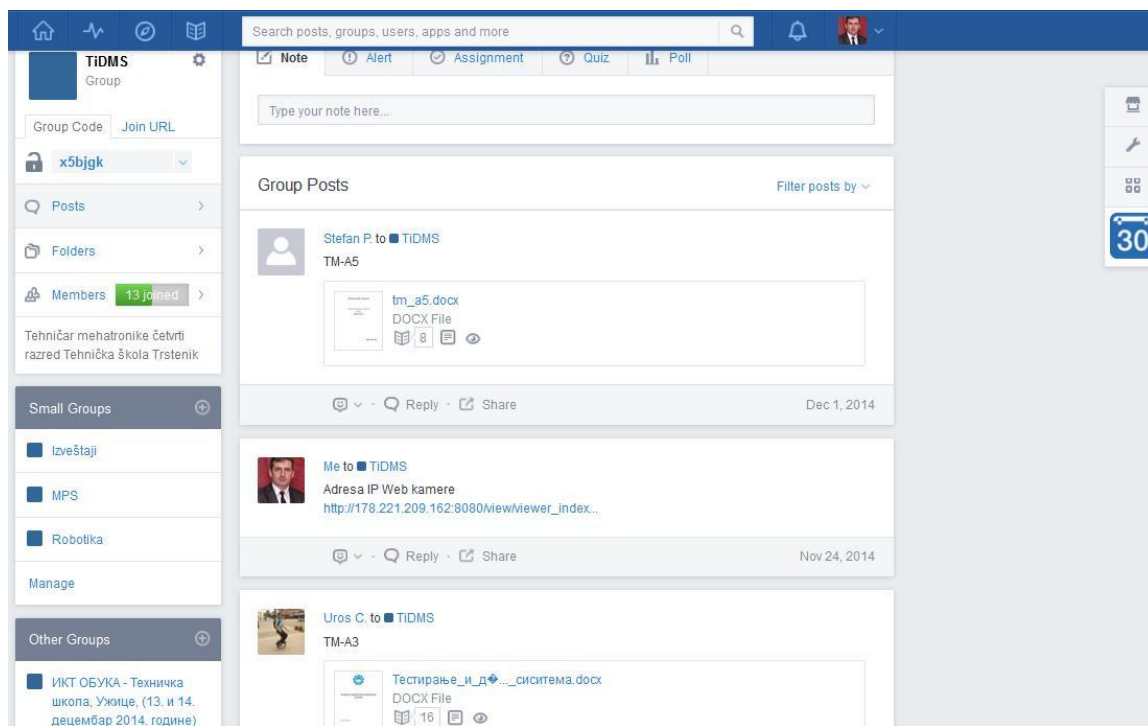
4.3 LMS sistem Edmodo

Internet dobija novu dimenziju sa razvojem društvenih mreža, koje su zasnovane na interaktivnoj komunikaciji i saradnji članova socijalnih mreža. Specijalizovane društvene mreže namenjene su određenim grupacijama koje povezuju ista zanimanja i interesovanja. Društvene mreže namenjene obrazovanju funkcionišu u strogo kontrolisanim uslovima i omogućavaju interakciju i transfer znanja. Platforme za učenje na bazi društvenih mreža omogućavaju komunikaciju nastavnik – nastavnik, nastavnik – učenik i nastavnik-roditelj. Najznačajnije web platforme specijalizovane za edukaciju su: Edmodo (<https://www.edmodo.com>), Engrade (<https://www.engage.com>), Mybigcampus (<http://www.mybigcampus.com>), Twiducate (<http://www.twiducate.com>).

Edmodo je globalna društvena mreža namenjena obrazovnim institucijama. Ova mreža predstavlja sigurnu i bezbednu web platformu za razvoj i realizaciju učenja na daljinu, povezivanje i komunikaciju između nastavnika, učenika i roditelja. Vizuelno okruženje i organizacija Edmoda je veoma slična društvenoj mreži *Facebook*, sa namerom da omogući učenje na savremen i atraktivan način u poznatom radnom okruženju.

Web platforma Edmodo zahteva registraciju korisnika, uređenje profila, mogućnost pristupa postojećim zajednicama, formiranje svojih grupa i pozivanje korisnika. Edmodo funkcioniše na bazi formiranja grupa i malih grupa u okviru grupa. Grupe se formiraju prema predmetu ili modulu, dok se male grupe formiraju za diferenciranu nastavu. Pristup i prava u grupi su strogo kontrolisani pomoću kodova, tako da je ovo web mesto veoma bezbedno za učenike. Komunikacija između učenika nije moguća, a učenje je kontrolisano i usmereno na sticanje definisanih znanja. Edmodo funkcioniše uz pomoć kodova prema hijerarhijskom principu: Edmodo tim vrši upravljanje domenima i poddomenima, administratori poddomena oblasti upravljaju i šalju kodove školama, administratori u školama upravljaju školskim nalogima, nastavnici upravljaju učeničkim i roditeljskim nalogima. Ovaj servis omogućava roditeljima da preko roditeljskog koda prate napredovanje svog deteta i komuniciraju sa nastavnicima. Na slici 4.4. prikazano je Edmodo okruženje za učenje na daljinu u modulu Testiranje i dijagnostika mehatronskih sistema, Tehničke škole Trstenik. Formiranjem malih grupa u okviru grupe TiDMS omogućava se diferencirana nastava, u zavisnosti od interesovanja i potreba učenika. Postavljanjem postova na grupni “zid”, članovi grupe dobijaju sva potrebna obaveštenja, linkove

prema kvizovima, anketama, link prema IP adresi Web kamere za praćenje eksperimentalne nastave u realnom vremenu i druge informacije. Kreiranjem kalendara vrši se rezervisanje termina za izvođenje eksperimenata na daljinu u Web laboratoriji mehatronike.



Slika 4.4: Primena LMS sistema na Edmodo platformi

Web platforma Edmodo omogućava postavljanje lekcija, tutorijala, prezentacija i drugih nastavnih materijala u okviru formiranih grupa. Edmodo omogućava brzo kreiranje anketa, kvizova, testova, postavljanje zadataka sa definisanim vremenskim rokovima i automatsko ocenjivanje. Ovaj sistem učenja na daljinu omogućava praćenje i ocenjivanje učenika kroz sumativno i formativno vrednovanje, praćenje učenja i ponašanja u grupi, samovrednovanje i trenutni uvid učenika u svoje rezultate. Ocenjivanje testova vrši se automatski i rezultati se organizuju tabelarno za svaku grupu. Na slici 4.5 prikazan je radno okruženje sistema za ocenjivanje i praćenje napredovanja učenika na web platformi Edmodo.

Student	Total	3D kretanje robota	Dvodimenzionalno kretanje	Stanica za Distribuciju	Programiranje Robota 3	Programiranje robota Z2.	Programiranje Robota	Zadatak 1
Aleksandar Biserc...	80%	4/5	5/5	84/100	18/26	4/5	18/26	4/5
Uros Cajetinac	93%	5/5	5/5	95/100	24/26	5/5	20.66/26	5/5
Bosko Curakovic	73%	3/5	4/5	75/100	17/26	4/5	17.66/26	5/5
Dusan Dubravac	82%	4/5	5/5	81/100	21/26	5/5	17.66	4/5
Stefan Ilic	88%	5/5	5/5	80/100	26/26	5/5	26/26	4/5
Andrija Jovanovic	74%	3/5	4/5	70/100	19/26	4/5	23/26	5/5
Ranko Jovanovic	67%	2/5	3/5	60/100	16/26	3/5	26/26	5/5
Djordje Krnjinc	84%	3/5	4/5	84/100	18/26	4/5	26/26	5/5
dragan milovanovi...	81%	5/5	5/5	78/100	22/26	5/5	19.66/26	4/5
Stefan Panic	58%	3/5	3/5	55/100	16/26	3/5	16/26	4/5
Nemanja Rakovac	63%	3/5	4/5	70/100	18/26	4/5	4.66/26	4/5
Nikola Vidokovic	95%	5/5	5/5	95/100	22/26	5/5	26/26	5/5

Slika 4.5: Ocenjivanje i praćenje pomoću LMS-a Edmodo

LMS sistem Edmodo je dostupan na mobilnim uređajima sa operativnim sistemima Android, iOS i Windos, tako da se sve aktivnosti mogu realizovati i van prostorija škole u bilo kom vremenskom trenutku.

4.4. Razvoj Web laboratorije mehatronike

Razvoj Web laboratorija i integracija eksperimentalnog učenja na daljinu tema su mnogih istraživanja. Daljinski pristup Web laboratorijima u realnom vremenu zasnovani su na primeni virtuelnih i realnih modela prikazani su u radovima [56-60]. Lokalna laboratorija mehatronike Tehničke škole Trstenik koristi se u redovnoj nastavi i opremljena je savremenim didaktičkim mehatronskim sistememima, mernom opremom, sensorima i aktuatorima, kao i softverskim paketima za modeliranje, simulaciju i programiranje. Virtuelni modeli osavremenjavaju i ubrzavaju process učenja, ali za sticanje praktičnih znanja i veština neophodno je koristiti fizičke modele sistema, eksperimentalna merenja i kontrolu fizičkih procesa u realnim uslovima. Za obrazovanje u oblasti tehničkih nauka, neizostavni oblik nastave je eksperimentalni rad učenika sa realnim komponentama i sistemima. Za opremanje savremenih laboratorija potrebna su

znatna finansijska sredstva, pa je mali broj škola koji poseduje savremenu laboratorijsku opremu. U tabeli 4.1 prikazani su mehatronski sistemi koji se koriste u laboratoriji.

Tabela 4.1: Realni didaktički sistemi u laboratoriji mehatronike

Br.	Realni didaktički sistemi	Namena
1	Festo MPS – Robotska stanica Mitsubishi RV2AJ	Identifikacija komponenti, montaža, demontaža, algoritam rada, funkcijski dijagrami, programiranje robota, testiranje i dijagnostika mehatronskog sistema
2	Festo MPS – Stanica za distribuciju (PLC FC 640)	Opis sistema, montaža, praćenje algoritma rada, funkcijski dijagrami, pneumatske i električne instalacije, programiranje PLC-a, testiranje i dijagnostika mehatronskog sistema
3	Festo MPS – Stanica za sortiranje (PLC FC 640)	Opis sistema, montaža, praćenje algoritma rada, funkcijski dijagrami, pneumatske i električne instalacije, programiranje PLC-a, testiranje i dijagnostika mehatronskog sistema
4	Modularni elektropneumatski sistem upravljani PLC-om (FC 34)	Montaža pneumatskih komponenti, pneumatske instalacije, električne instalacije, senzori, programiranje PLC-a, testiranje i dijagnostika
5	Modularni elektropneumatski sistem – relejno upravljanje	Montaža pneumatskih komponenti, pneumatske instalacije, električne instalacije, relejno upravljanje
6	CNC glodalica	Programiranje CNC mašina, testiranje i dijagnostika mehatronskih sistema
7	Sistem za upravljanje radom asinhronog motora	Elektromotorni pogoni, frekventni regulatori, električne instalacije, senzori, PLC
8	Sistem za upravljanje radom jednosmenog motora	Elektromotorni pogoni, električne instalacije, programiranje PLC-a
9	Mikrokontrolerski razvojni sistem	Programiranje mikrokontrolera, testiranje i dijagnostika

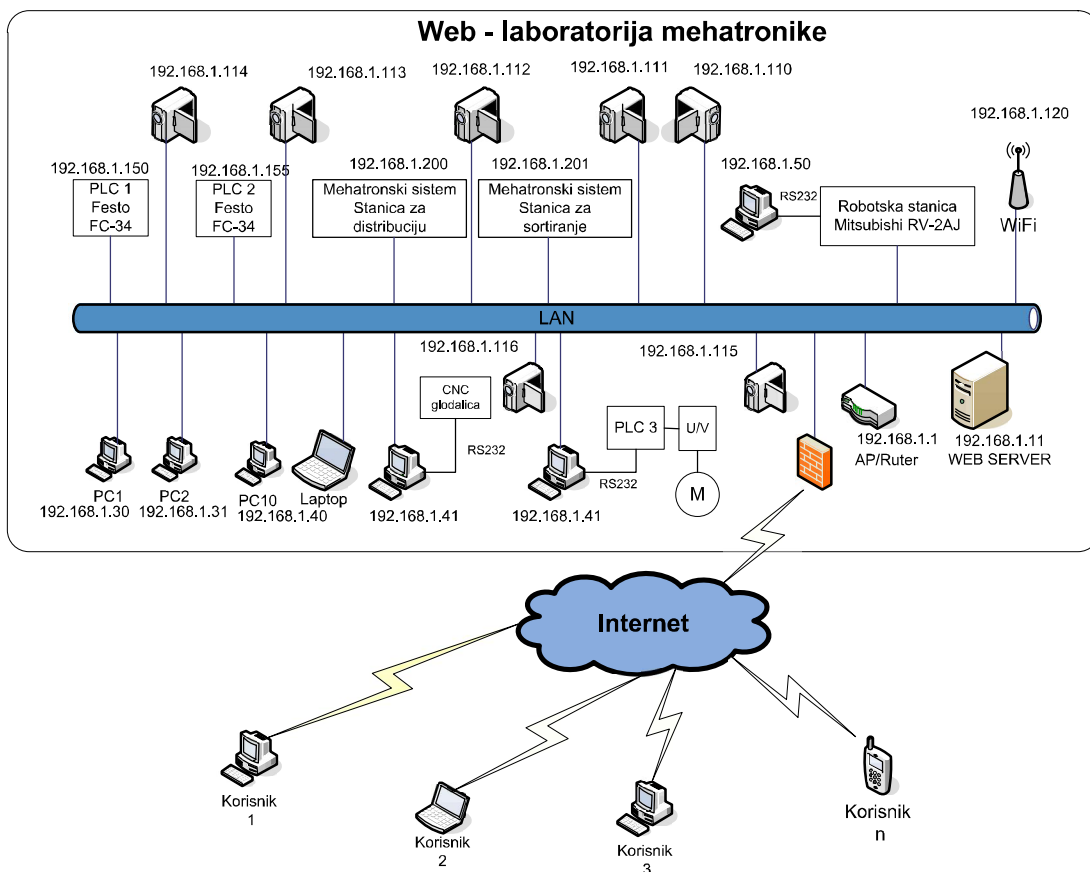
Da bi laboratorijska oprema bila dostupna učenicima za usvajanje teorijskih i praktičnih znanja van redovne nastave, potrebno je razviti Web laboratoriju za daljinski pristup i vizuelno praćenje eksperimenata u realnom vremenu. Umrežavanjem računara i upravljačkih PLC-a u LAN mrežu, korišćenjem IP Web kamera i brzog Interneta, formirana je Web laboratorija mehatronike. Izvođenje laboratorijskih vežbi dostupno je svim učenicima, bez obzira da li se oni nalaze u školi ili u svojim domovima. Pored korišćenja eksperimentalne opreme, učenici imaju mogućnost da koriste instalirane softverske pakete na školskim računarima, čime je stvoreno virtuelno realno okruženje koje omogućava sticanje praktičnih znanja i van obrazovnih ustanova. Pristup LMS sistemu omogućava učenicima korišćenje nastavnih materijala, video tutorijala, uputstva za laboratorijske vežbe, rešavanje zadataka i testova, konsultacije sa nastavnicima i vršnjačko učenje.

U tabeli 4.2 prikazani su virtuelni softverski paketi koji se koriste u laboratoriji mehatronike.

Tabela 4.2: *Softverski paketi u laboratoriji mehatronike*

Br.	Softverski paketi	Namena
1	COSIMIR ROBOTICS	Softver za 3D simulaciju robota, programiranje, testiranje i dijagnostiku
2	COSIMIR PLC	Softver za 3D simulaciju mehatronskih sistema, testiranje i dijagnostiku
3	Robot Explorer	Softver za programiranje industrijskog robota
4	Festo FST 4.10	Softver za programiranje Festo PLC-a
5	Festo Easy OPC Server	Softver za daljinski pristup mehatronskim sistemima
6	FluidSim4 - Pneumatics	Softver za izradu elektropneumatskih šema, testiranje i simulaciju
7	FluidSim4 - Hidraulics	Softver za izradu elektrohidrauličkih šema, testiranje i simulaciju
8	WBT Electro-Pneumatics	Softver za obuku - elektropneumatika
9	WBT Electro-Hidraulics	Softver za obuku - elektrohidraulika
10	WBT Sensor Technology	Softver za obuku – senzori i primena
11	WBT Pneumatics	Softver za obuku – osnovi pneumatike
12	WBT Hidraulics	Softver za obuku – osnovi hidraulike
13	Micro Basic	Programiranje mikrokontrolera

Na slici 4.6 prikazana je hardverska organizacija Web laboratorije mehatronike Tehničke škole Trstenik . Svi računaru, Web kamere i didaktički mehatronski sistemi povezani su u LAN mrežu, a pristup sistemima omogućen je preko rutera i serverskog računara. Brzina Internet veze u laboratoriji je 16Mb/s i omogućava komforan rad korisnika prilikom pristupa Web laboratoriji. Rad svakog didaktičkog sistema prati IP Web video kamera, koja imaju jedinstvenu IP adresu u lokalnoj računarskoj mreži, tako da im se može pristupiti u bilo kom trenutku preko web pretraživača. Korišćeni Festo PLC-ovi imaju podršku za TCP/IP, svoje jedinstvene IP adrese i ugrađen Web server (*eng. Embedded Web Server*), tako da se omogućava direktan pristup bilo kom sistemu kroz lokalnu računarsku mrežu ili preko Internet pretraživača sa bilo koje geografske lokacije u bilo kom vremenskom trenutku [61-62]. Pored primene u obrazovanju, primena Interneta u upravljanju sistemima na daljinu je od izuzetnog značaja [63].



Slika 4.6: Organizacija Web laboratorije mehatronike Tehničke škole u Trsteniku

Najznačajnije karakteristike Web laboratorije mehatronike za daljinski pristup su:

- Direktan daljinski pristup računarima u laboratoriji, čime se omogućava korišćenje svih softverskih paketa za modeliranje, simulaciju i programiranje
- Direktan daljinski pristup upravljačkim PLC-ovima mehatronskih sistema
- Direktan daljinski pristup kontroleru industrijskog robota
- Programiranje, reprogramiranje i testiranje mehatronskih sistema
- Dijagnostika hardverskih sistema, otklanjanje greški, praćenje parametara sistema u realnom vremenu
- Praćenje rada mehatronskih sistema u realnom vremenu pomoću Web kamera
- Merenje i akvizicija karakterističnih veličina na mehatronskim sistemima
- Dostupnost Web laboratorije 365/24/7

Lokalna laboratorija mehatronike omogućava realizaciju velikog broja laboratorijskih vežbi na različitim virtuelnim i realnim didaktičkim sistemima [64]. Za daljinski pristup i realizaciju laboratorijskih vežbi, formirane su biblioteke virtuelnih i realnih laboratorijskih eksperimenata:

4.4.1 Biblioteka virtuelnih laboratorijskih eksperimenata:

1. Upravljanje mehatronskim sistemom za distribuciju u 3D okruženju *COSIMIR PLC*
2. Upravljanje mehatronskim sistemom za sortiranje u 3D okruženju *COSIMIR PLC*
3. Simulacija industrijskog robota u 3D okruženju *COSIMIR Robotics*
4. Programiranje industrijskog robota Mitsubishi RV2AJ – offline (*Cosimir Robotics*)
5. Testiranje i dijagnostika mehatronskih sistema u programskom paketu *COSIMIR PLC*
6. Kreiranje i testiranje elektropneumatskih sistema u programskom paketu *FluidSim4 – Pneumatics*
7. Kreiranje i testiranje elektropneumatskih sistema u programskom paketu *FluidSim4 – Hidraulics*
8. Multimedijalni didaktički sistem za obuku - *WBT Sensor Technology*
9. Multimedijalni didaktički sistem za obuku - *WBT Pneumatics*
10. Multimedijalni didaktički sistem za obuku - *WBT Hidraulics*

4.4.2 Biblioteka realnih laboratorijskih eksperimenata:

1. Upravljanje mehatronskim sistemom za distribuciju (*Festo MPS Distributing station*)
2. Upravljanje mehatronskim sistemom za sortiranje (*Festo MPS Sorting station*)
3. Upravljanje industrijskim robotom (*Festo MPS Robot station -Mitsubishi RV2AJ*)
4. Upravljanje asihronim motorom pomoću PLC-a i frekventnog regulatora
5. Upravljanje elektropneumatskim sistemima pomoću PLC-a
6. Programiranje industrijskog robota Mitsubishi RV2AJ – online (*Robot explorer*)
7. Upravljanje industrijskim robotom Mitsubishi RV2AJ
8. Programiranje industrijskog robota od tačke do tačke
9. Programiranje industrijskog robota po dvodimenzionalnim trajektorijama
10. Programiranje industrijskog robota po trodimenzionalnim trajektorijama
11. Primena robota u sortiranju i prenošenju delova
12. Primena industrijskog robota u pakovanju (paletizacija)
13. Programiranje PLC-a – osnovni nivo
14. Programiranje PLC-a – napredni nivo

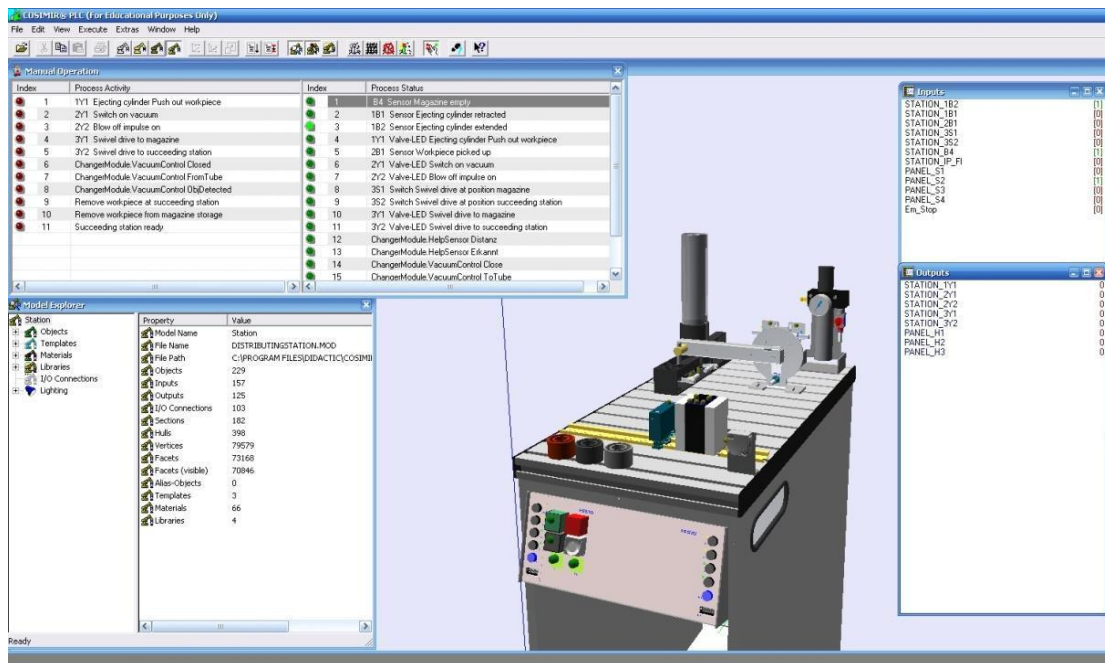
4. 5 Virtuelno okruženje za učenje

Virtuelno okruženje za učenje (*eng. Virtual Learning Environment – VLS*) predstavlja softversko trodimenzionalno okruženje bazirano na grafičkim modelima i interfejsima, koje je namenjeno za modeliranje i simulaciju komponenti, vizuelizaciju i testiranje sistema. Virtuelni didaktički simulacioni softverski paketi predstavljaju integrisano modularno softversko okruženje, koje podstiče kreativnost i povećava motivaciju za učenje kod učenika i studenata. Savremene virtuelne didaktičke softverske pakete prate didaktički multimedijalni nastavni materijali prilagođeni za samostalno učenje, video tutorijali, šeme vezivanja, tehnički podaci i katalozi s korišćenim komponentama. Virtuelni softverski paketi pogodni su za korišćenje u početnoj fazi učenja. Primena virtuelnih i realnih modela u simulaciji i programiranju robota tema je mnogih istraživanja i prikazano je u radovima [72-75].

4.5.1 Softver za trodimenzionalnu simulaciju mehatronskih sistema- COSIMIR PLC

U nastavnom procesu tehničara mehatronike koristi se softverski paket za trodimenzionalnu simulaciju, programiranje, testiranje i dijagnostiku mehatronskih sistema u virtuelnom okruženju - Festo COSIMIR PLC. Programski paket COSIMIR (*Cell Orientedd Simulation of Industrial Robots – Čelijsko orijentisana simulacija industrijskih robota*) omogućava kreiranje virtuelnog trodimenzionalnog (3D) okruženja za simulaciju rada realnih mehatronskih sistema. Ovaj virtuelni model za simulaciju realnih sistema, sadrži biblioteku modela industrijskih komponenti, pomoću kojih se mogu formirati željeni funkcionalni mehatronski sistemi. Simulacioni modeli omogućavaju virtuelnu simulaciju dinamike mehatronskih sistema, kojim se simuliraju struktura sistema i princip rada. Cosimir PLC predstavlja virtuelno 3D okruženje za edukaciju iz oblasti mehatronike i upravljanja sistemima, koje omogućava individualno grafičko radno okruženje za svakog učenika. Ovim softverskim alatom stvara se inspirativno i stimulatивно radno okruženje za usvajanje novih tehnologija. Osnovna karakteristika ovog 3D softverskog simulacionog sistema je što on poseduje biblioteku sa gotovim modelima, koji su identični fizičkim didaktičkim sistemima Festo MPS serije. Postupci uključivanja stanice, resetovanje i zaustavljanje identični su sa realnim sistemima. Cosimir PLC ne zahteva posebne hardverske resurse, tako da se modu koristiti svi računari generacije Pentium IV. Nova verzija ovog softvera nosi naziv *Ciros Automation Suite*.

Virtuelna trodimenzionalna simulacija verno predstavlja realni sistem, upravljačku konzolu, radno okruženje i sve komponente sistema, koje odgovaraju realnim sistemima. Jedina razlika kod simulacije mehatronskih sistema, je što se upravljanje vrši pritiskom tastera miša na model, umesto na taster na kontrolnom panelu relanog sistema. Na slici 4.7 prikazano je radno okruženje Cosimir PLC-a, sa modelom stanice za distribuciju.



Slika 4.7: Virtuelni trodimenzionalni model stanice za distribuciju

Nakon startovanja programa COSIMIR PLC, vrši se izbor željenog modela iz biblioteke mehatronskih sistema i izbor moda rada. Istovremeno sa učitavanjem trodimenzionalnog modela mehatronskog sistema, učitava se i odgovarajući program PLC-a koji upravlja radom odabranog mehatronskog sistema. Na radnoj površini monitora prikazan je 3D modela sistema, moduli sistema, senzori i aktuatori, i vrednosti ulaza i izlaza upravljačkog PLC-a. Pokretanjem simulacije stanja ulaza i izlaza se menjaju prema algoritmu rada, i sve promene prikazuju se u prozorima *Inputs* i *Outputs*. Linija programskog koda koja se realizuje na procesu je markirana, što omogućava vizuelno praćenje efekta svake komande.

Praćenje stanja senzora i aktuatora u bilo kom trenutku vrši se tako što se aktivira specijalni mod ovog softvera “*Korak po korak*”. Praćenje i analiza sistema moguća je samo ako se sistem podeli na module, na osnovu upravljačke strukture, mehaničke konfiguracije, elektromotornih pogona, električnih i elektronskih komponenti, generatora signala i protoka energije. U Tabeli 4.3 predstavljeni su funkcijski moduli koji čine strukturu didaktičkih sistema sa njihovim karakteristikama i namenom.

Tabela 4.3: Funkcijski moduli i karakteristike realnih didaktičkih sistema

r.b.	Funkcijski moduli	Komponente, delovi, program, funkcije
1	Struktura sistema i upravljačka struktura	Dijagram toka programa, grafički dijagrami, funkcijski dijagrami i opis sistema
2	Mehanička konfiguracija	Montaža i podešavanje mehaničkih delova, funkcijskih mehaničkih modula
3	Pogoni	Električni, pneumatski, hidraulički, mehanički
4	Upravljački elementi	Električni, pneumatski, hidraulički, mehanički
5	Upravljački sistem	Električni releji, PLC, CNC, pneumatika, robot kontroleri
6	Generatori signala	Binarni senzori, analogni senzori, digitalni senzori
7	Napajanje energijom	Električna, pneumatska, hidraulička

Jedna od najznačajnijih mogućnosti ovog softverskog paketa je mogućnost simulacije kvara na sistemu. Proces simulacije kvara vrši pozivom "Teacher mode" i za pristup ovoj funkciji potrebna je administratorska lozinka. Nastavnik bira jedan ili više kvarova iz opsega mogućih kvarova na sistemu, kao što su: prekid napajanja, kvar na senzoru, kvar na aktuatorima, nedostatak neke komponente, kvar na pneumatskoj instalaciji, kvar na električnoj instalaciji i slično. Sem izbora kvara moguće je definisati trajanje kvara, kao i vreme njegovog aktiviranja na sistemu. Posle zadavanja kvara, napušta se okruženje *Teacher mode* da bi se aktivirao simulirani kvar. Za testiranje i dijagnostiku kvara, postoji poseban deo programa za detekciju kvara – *Fault Localisation*. Ovom komandom vrši se aktiviranje modula za pronalaženje kvara, njegovo otklanjanje i izlazak iz ovog dela programa. Kvarovi koji se otklone markiraju se zelenom bojom, a greške koje su još uvek aktivne označene su crvenom bojom. Svi kvarovi na mehatronskom sistemu, sa tipom greške i vremenom nastanka, arhiviraju se u posebnom fajlu greške (*Fault log*). Ovi podaci mogu se posle simulacije pregledati i analizirati. Nakon otklanjanja kvara vrši se testiranje mehatronskog sistema. Postupak simulacije kvara na realnim didaktičkim sistemima je identičan, adrese ulaznih i izlaznih promenljivih su iste, označavanje, izgled i položaj komponenti na sistemu je odgovarajući. Pre startovanja realnih ili virtuelnih modela, potrebno je izvršiti resetovanje sistema, odnosno postavljanje početnih uslova. Za startovanje određenog aktuatora, potrebno je da odgovarajući senzori budu aktivni, a njegovim aktiviranjem menjaju se stanja svih senzora koji su relevantni za taj aktuator. Ovaj deo programa omogućava praćenje aktivnosti procesa i stanja svih senzora i aktuatora (slika 4.8). Zadavanje greške vrši se grafičkim čekiranjem željenog signala. Kada je setovana neka greška, sistem ispituje početne uslove, i ne dozvoljava 3D

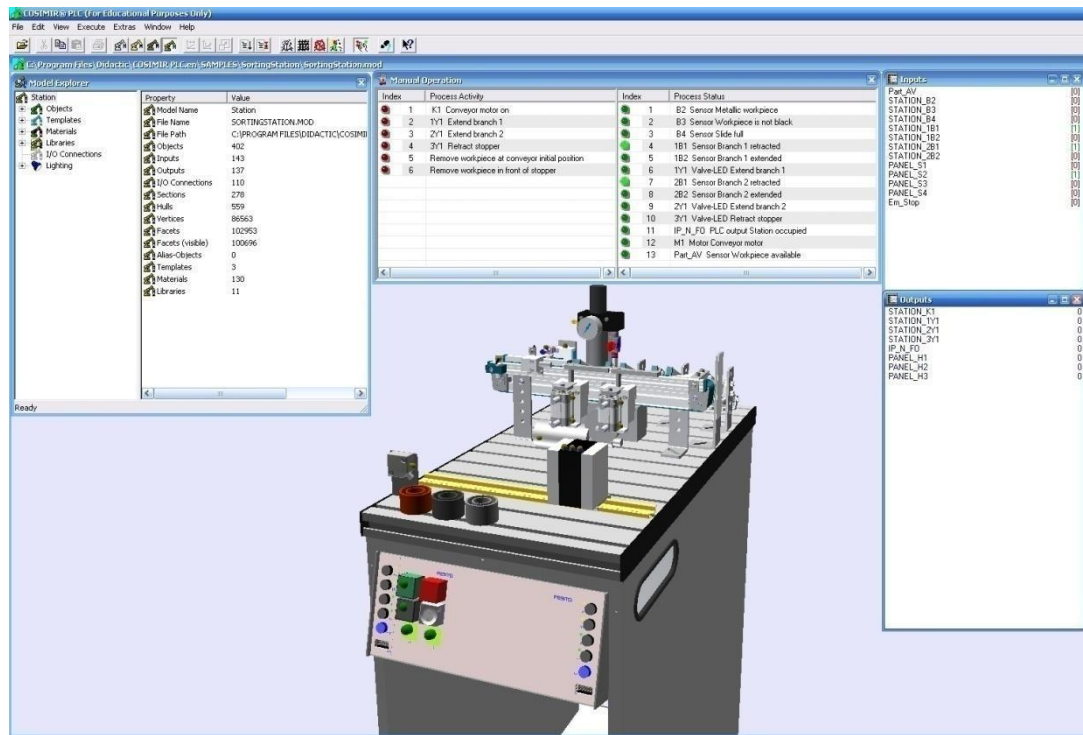
simulaciju sistema. Nakon detekcije i otklanjanja uzroka greške, startuje se simulacija mehatronskog sistema.

Index	Process Activity	Value	Index	Process Status	Value
1	1Y1 Ejecting cylinder Push out workpi...	[0]	1	B4 Sensor Magazine empty	0
2	2Y1 Switch on vacuum	[1]	2	1B1 Sensor Ejecting cylinder retracted	0
3	2Y2 Blow off impulse on	[0]	3	1B2 Sensor Ejecting cylinder extended	0
4	3Y1 Swivel drive to magazine	[1]	4	1Y1 Valve-LED Ejecting cylinder Push out ...	0
5	3Y2 Swivel drive to succeeding station	[0]	5	2B1 Sensor Workpiece picked up	1
6	Remove workpiece at succeeding stati...	[0]	6	2Y1 Valve-LED Switch on vacuum	1
7	Remove workpiece from magazine stor...	0	7	2Y2 Valve-LED Blow off impulse on	0
8	Succeeding station ready	[1]	8	3S1 Switch Swivel drive at position magazine	1
			9	3S2 Switch Swivel drive at position succee...	0
			10	3Y1 Valve-LED Swivel drive to magazine	1
			11	3Y2 Valve-LED Swivel drive to succeeding...	0
			12	IP_FI Sensor Succeeding station ready	1
			13	Vacuum switched on	1

Slika 4.8: Simulacija rada i stanja promenljivih stanice za distribuciju

Aktiviranjem komande *Manual operation* ovaj softver omogućava testiranje svakog modula pojedinačno, pri čemu se prate stanja ulaznih senzora i izlaznih aktuatora. Aktivni modul obeležen je crvenom lampicom, a aktivne ulazne i izlazne promenjive selektovane su zelenom bojom.

Na slici 4.9 prikazano je radno okruženje Cosimir PLC-a, sa modelom stanice za sortiranje delova. Postoji mogućnost da se svaki aktuator aktivira posebno i na taj način prate stanja signala koje on aktivira ili deaktivira. Da bi se startovala ova opcija, potrebno je da se simulacija sistema zaustavi. Na ovaj način sistem se može pratiti korak po korak, što olakšava proces edukacije. Ovakav način rada odgovara manuelnom načinu rada realnog sistema, kada se program PLC-a izvršava korak po korak. Na ovaj način omogućava se upoznavanje osnovnih komponenti mehatronskih sistema, praćenje algoritma rada sistema, programiranje i testiranje PLC-a, simulacija kvara na sistemima, detekcija i otklanjanje kvara.



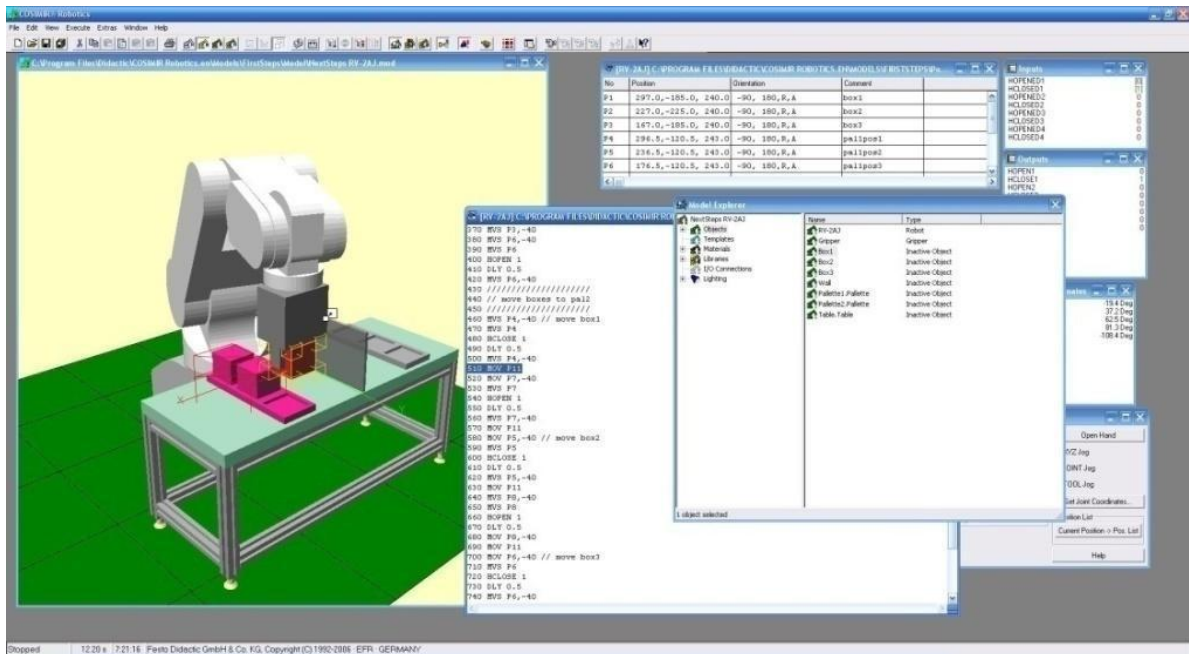
Slika 4.9: Virtuelni trodimenzionalni model stanice za sortiranje

Korišćenjem simulacionih softvera, učenici brže usvajaju princip rada mehatronskog sistema, način funkcionisanja, kao i praćenje parametara sistema, stanja ulaznih i izlaznih veličina na mehatronskom sistemu [69]. Veoma je važno naglasiti, da softverski paketi za 3D simulaciju i modeliranje ne mogu zameniti realne didaktičke sisteme, ali u velikoj meri olakšavaju i ubrzavaju sticanje praktičnih znanja i veština.

4.5.2 Softver za trodimenzionalnu simulaciju robota - COSIMIR ROBOTICS

Virtuelni softverski paketi na zanimljiv način uvode učenike u svet robotike, omogućavaju korišćenje gotovih modela robota, kreiranje sopstvenih modela, programiranje robota i 3D simulaciju. Programski paket COSIMIR Robotics omogućava kreiranje virtuelnog okruženja sa modelima različitih industrijskih robota, kreiranje željenog radnog okruženja, izbor radnih alata, radnih delova, programiranje robota i simulaciju rada u trodimenzionalnom okruženju. COSIMIR Robotics poseduje biblioteku sa velikim brojem modela industrijskih robota različitih proizvođača. Kreiranje virtuelnog okruženja vrši se izborom već definisanih biblioteka komponenti, kao što su roboti, alati, magacini, radni delovi i druge komponente. Pored definisanih biblioteka moguće je kreirati sopstvene 3D modele u nekom od CAD softvera za 3D modeliranje. Mrežna verzija softvera *Cosimir Robotics - Education*, omogućava istovremeni samostalni rad

učenika, omogućava pisanje, kompajliranje i simulaciju rada robota u trodimenzionalnom okruženju. Ograničenje ove verzije je u tome da se napisani programi ne mogu direktno preneti u kontroler robota i uporediti softverski i hardverski model robota. Ovu mogućnost pruža softverski paket *Cosimir Robotics – Profesional*, čija je cena veoma visoka. Na slici 4.10 prikazano je radno okruženje softverskog paketa Cosimir Robotics.



Slika 4.10: Virtuelno 3D okruženje softverskog paketa Cosimir Robotics

Virtuelni sistem namenjen je za kreiranje 3D modela robotskih i fleksibilnih proizvodnih sistema, njihovo programiranje i simulaciju rada u realnom vremenu. Na ovaj način olakšava se planiranje, programiranje i testiranje robota 3D virtuelnom okruženju. Ovim sistemom simuliraju se sve sekvence pomeranja, hvatanja i prenošenja, vrši se optimizacija putanje, optimizacija vremenskog ciklusa i eliminacija sudara.

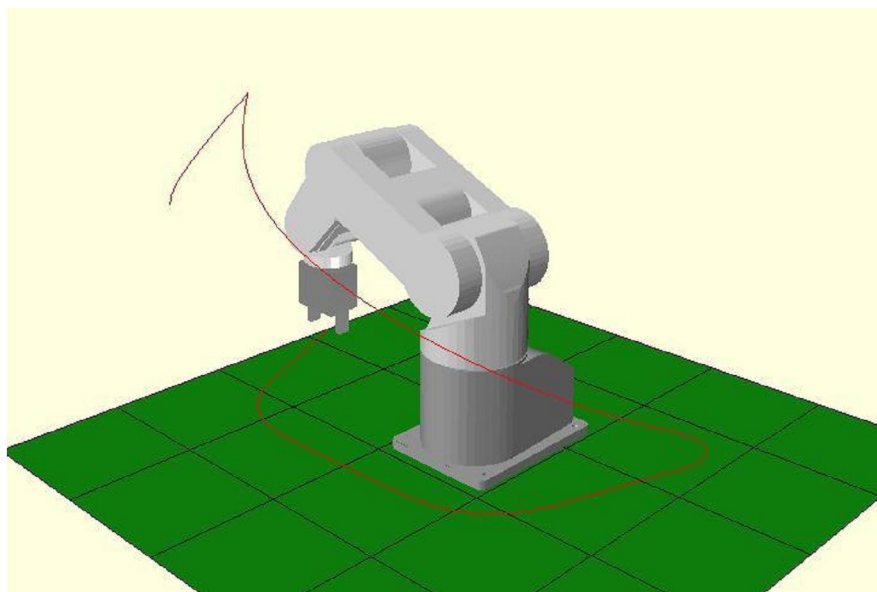
Cosimir Robotics je softverski paket baziran na principu otvorenog pristupa učenju, koga karakteriše konstruktivan pristup učenju, svi modeli i alati su dostupni, mogu se kombinovati i koristiti prema sopstvenim potrebama u skladu sa ciljevima učenja. Ovaj softver je podržan sa multimedijalnim sistemom pružanja pomoći „Robotics Assistant“, koji obuhvata tekstualni opis robotskog sistema, model robota, gotov program sa definisanim pozicijama, grafički trodimenzionalni prikaz robota, video materijale i animacije. Veoma značajna karakteristika ovog sistema je što trodimenzionalni virtuelni robot svojom konstrukcijom, komponentama i načinom rada u potpunosti odgovara realnom industrijskom robotu. Virtuelno radno okruženje Cosimir Robotics omogućava praćenje koordinata alata, izbor koordinatnih sistema, programiranje i testiranje rada

programa i simulaciju rada robota u 3D okruženju. Virtuelno radno okruženje robota kreira se izborom objekta iz biblioteke modela u Model Exploreru. Dostupni su sledeće biblioteke modela: ABB roboti, Fanuc roboti, KUKA roboti, Mitsubishi roboti, Reis roboti, Stäubli roboti, Siemens S5/S7 SPC, različiti alati za hvatanje, različite 3D oblici objekta, izbor različitih materijala i tekstura, mehanizmi, senzori i kontroleri. Za svaki od modela definišu se oblik, boja i dimenzije, kao i koordinate gde se objekat postavlja. Dodavanjem senzora onemogućavaju se situacije kada može doći do sudara i havarijskog oštećenja sistema. Uz pomoć senzora robot izbegava prepreke koje se mogu naći u njegovom radnom prostoru.

Prvi korak kod programiranja robota je izbor modela robota iz postojeće biblioteke (ABB, Fanuc, KUKA, Mitsubishi, Reisi, Stäubli). Zatim sledi izbor programskog jezika (MRL - Movemaster Comand (MRL), MELFA Basic IV, V+, IRL). Cosimir Robotics omogućava dodavanje različitih objekata, alata, transportera i drugih uređaja koji kreiraju virtuelno okruženje koje odgovara realnom industrijskom procesu. Za svaki od objekata definišu se dimenzije, tip materijala kao i koordinate koje definišu apsolutni položaj objekta. Pored objekata, robotskim sistemima se mogu dodati senzori, graničnici i aktuatori, čiji se ulazi i izlazi mogu definisati i pratiti prilikom rada. Nakon toga se definišu pozicije tačaka kroz koje robot prolazi prilikom obavljanja manipulativnih poslova. Svaku poziciju karakterišu koordinate x , y i z u koordinatnom sistemu baze, i orijentaciju alata koje karakterišu Ojlerovi uglovi rotacije θ , φ i ψ , u odnosu na ose osnovnog koordinatnog sistema. Ugao skretanja θ (eng. *yaw*) odgovara rotaciji oko z -ose nepokretnog koordinatnog sistema, ugao propinjanja φ (eng. *pitch*) odgovara rotaciji oko y -ose i ugao valjanja ψ (eng. *roll*) oko x -ose. Pozicije robota čuvaju se u posebnom fajlu sa ekstenzijom *.pos. Pisanje programskog koda vrši se u programskom editoru, a ekstenzija ovog fajla za programski jezik MELFA Basic IV je *.MB4. Sledeći koraci su linkovanje, kompajliranje i simulacija robota. Cosimir omogućava definisanje sistema za izbegavanje sudara. Testiranje programa vrši se u virtuelnom 3D okruženju, čime se omogućava praćenje kretanje alata robota prema programu po principu “*korak-po-korak*”. Na ovaj način se vide efekti svake naredbe i lako detektuju greške u programu. U slučaju postojanja neke greške, kompajler obaveštava programera, koji vrši korekciju grešaka i ponavlja postupak kompajliranja i linkovanja. Kada simulacija odgovara željenom načinu rada robota, program se prenosi u kontroler robota. Mogućnost programiranja robota omogućava samo verzija programa *Cosimir Robotics-Profesional*. Cena ove verzije je suviše visoka za škole i fakultete, pa se laboratorijskim uslovima koristi jeftinija verzija

namenjena obrazovanju “*Cosimir Robotics-Educational*”, koja nema mogućnost čuvanja programa i direktnog programiranja industrijskih robota. Za programiranje robota koristi se besplatni softverski paket Robot Explorer V1.1.2. Ovaj program omogućava praćenje unutrašnjih i spoljnjih koordinata robota prilikom kretanja završnog uređaja robota. Veoma važna osobina programa je provera da li se zadata tačka nalazi u radnom prostoru robota, čime se smanjuje vreme programiranja realnog industrijskog robota i mogućnost havarijskog oštećenja robota.

Korišćenjem virtuelnih modela stiču se osnovna znanja i veštine za rad sa realnim modelima, promovišu se metode istraživanja, otkrivanja i projektovanja. Učenici se susreću sa problemima kada projektovani sistem ne radi, omogućava se samostalno otkrivanje greške, mogućnost poboljšanja efikasnosti rada sistema i kreiranje složenih sistema na osnovu početnog osnovnog modela. Programiranje i upravljanje industrijskim robotom RV2AJ je mnogo lakše, brže i bezbednije, kada učenici steknu osnovna znanja i veštine primenom simulacionog modela. Za kretanje robota po složenim putanjama, ovaj softver omogućava praćenje trajektorije robota, eliminaciju neželjenih greški i utvrđivanje položaja koji su van radnog opsega robota. Na slici 4.11 prikazan je 3D model robota RV2AJ, koordinate tačaka i program za kretanje robotske ruke po složenoj trajektoriji.



Slika 4.11: *Trodimenzionalna simulacija kretanja robota po složenoj trajektoriji*

Prednosti softvera za 3D simulaciju u odnosu na realan robotski sistem su:

- Usvajaju znanja željenom dinamikom
- Uvod u svet robotike na moderan i popularan način
- Veliki broj gotovih modela robota različitih tipova i proizvođača

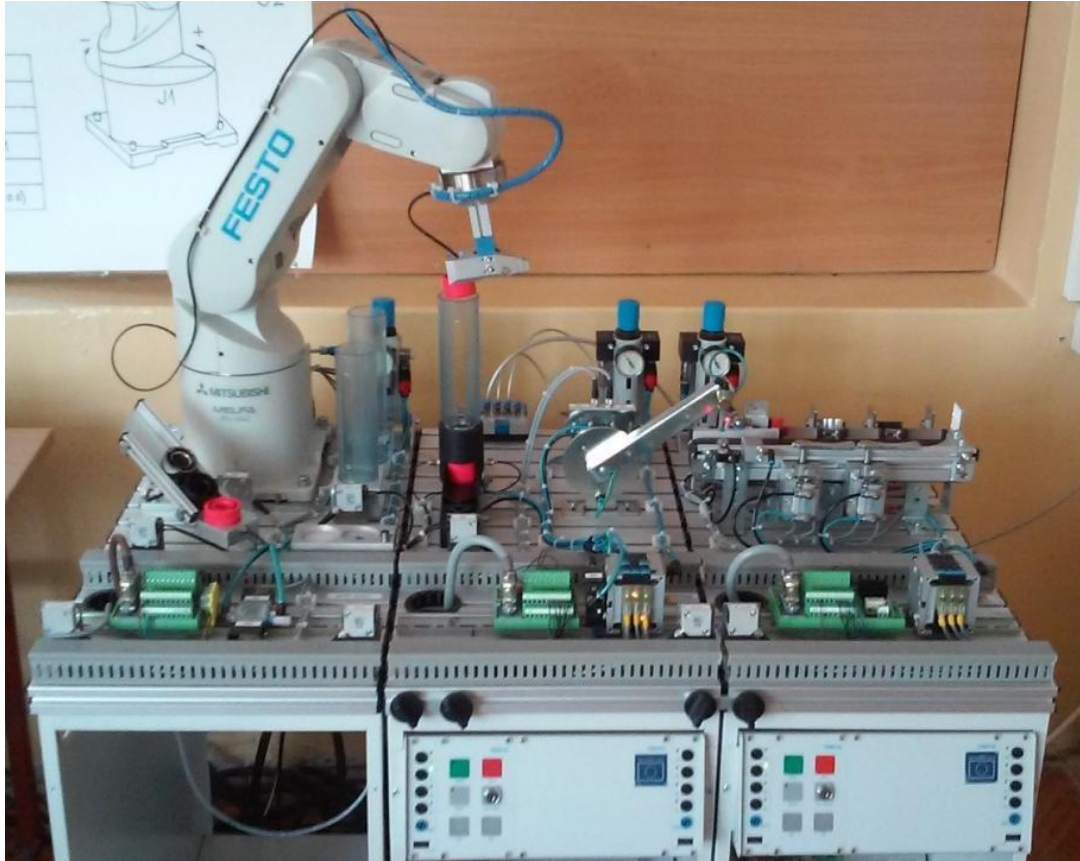
- Praćenje programa korak po korak
- Praćenje stanja ulaza i izlaza robota u svakom trenutku
- Ne postoji mogućnost havarijskog kvara robota, čime se smanjuje strah kod učenika
- Ne postoji mogućnost povređivanja učenika
- Višestruko niža cena od industrijskog robota

Virtuelni softverski modeli osavremenjavaju način programiranja industrijskih robota, ali za sticanje praktičnih znanja u radu s industrijskim robotom, neophodno je pored virtuelnih modela koristiti i realne didaktičke sisteme. Primena virtuelnih i realnih modela mora biti zasnovana na pedagoškim principima i normama [70].

4.6 Realni didaktički mehatronski sistemi

Razvoj savremenih sistema za upravljanje industrijskim procesima zahteva savremena didaktička sredstva, koja po svojoj konstrukciji i karakteristikama odgovaraju realnim industrijskim sistemima. Savremeni didaktički mehatronski sistemi pogodni su za upoznavanje hardverske strukture sistema, algoritma rada sistema, praćenje i podešavanje parametara sistema, programiranje PLC-a, simulaciju i otklanjanje realnih kvarova na sistemima. Sistemi su opremljeni mrežnim modulima, tako da se umrežavanjem više različitih didaktičkih sistema, stvaraju složeni sistemi automatskog upravljanja, koji u potpunosti simulira rad realnih industrijskih sistema.

U kabinetu mehatronike Tehničke škole Trstenik koriste se didaktički sistemi Festo MPS (*Modular Production System*). Ovi sofisticirani proizvodni sistemi integrišu različite tehnologije u jedinstven mehatronski sistem: mehanika, pneumatika, automatika, elektronika, PLC, elektromotorni pogoni i informacione tehnologije. Modularni mehatronski sistemi su realizovani industrijskim komponentama, industrijskim kontrolerima, podržani su softverskim paketom Cosimir PLC koji omogućava programiranje i trodimenzionalnu simulaciju rada realnih sistema. Glavne karakteristike savremenih didaktičkih sistema su: modularnost, fleksibilnost, reprogramibilnost, kao i softverska podrška za modeliranje, simulaciju i umrežavanje. Kabinet Tehničke škole opremljen je sa tri različita mehatronska sistema: robotska stanica, stanica za distribuciju i stanica za sortiranje (slika 4.12). Ovi sistemi su podržani softverom za programiranje PLC-a, softverom za programiranje robota, softverom za komunikaciju i softverom za 3D modeliranje i simulaciju.



Slika 4.12: Didaktički mehatronski sistemi Festo MPS – robotska stanica, stanica za distribuciju i stanica za sortiranje

Stanice za sortiranje i distribuciju, predstavljaju elektropneumatske mehatronske sisteme namenjeni za sticanje znanja i veština iz oblasti mehatronike. Glavna karakteristika Festo MPS sistema je njihova modularnost, koja omogućava montažu i demontažu sklopova, servisiranje, zamenu, testiranje, proširenje sistema dodavanjem novih komponenti i promenu algoritma rada. Upravljanje mehatronskim sistemima vrši industrijski PLC, koji ima slobodne ulaze/izlaze, što omogućava povezivanje dodatnih senzora i aktuatora. Svaki od sistema ima fotoelektrične senzore koji služe za sinhronizaciju rada sa susednim mehatronskim sistemima. Ukoliko dođe do zastoja ili kvara na nekom od sistema, dolazi do automatskog prekida rada prethodnih proizvodnih sistema. Promenom hardverskih komponenti, može se modifikovati ili napisati novi program, a zatim izvršiti reprogramiranje PLC-a. Ovi sistemi imaju široku oblast primene, što je prikazano u tabeli 4.4.

Tabela 4.4: Oblasti primene didaktičkih sistema

Oblast primene	Znanja i veštine
Mehanika	Identifikacija mehaničkih komponenti Montaža i demontaža mehaničkih komponenti Projektovanje i modeliranje mehaničkih komponenti
Pneumatika	Identifikacija, montaža i demontaža pneumatskih komponenti i uređaja Projektovanje, simulacija, povezivanje i pneumatske instalacije Testiranje, detektovanje i otklanjanje greškaka na pneumatskim sistemima
Senzori	Identifikacija, montaža i demontaža senzora Povezivanje i testiranje senzora
PLC	Montaža i povezivanje modula PLC-a Povezivanje senzora i aktuatora na PLC Programiranje i testiranje PLC-a Umrežavanje PLC-a i konfigurisanje parametara
Robotika i automatika	Programiranje i testiranje robota Automatizacija sistema upravljanja Simulacija i detekcija greški na sistemima Sinhronizacija rada sistema upravljanja
Elektrotehnika	Prepoznavanje i korišćenje električnih simbola Projektovanje i povezivanje električne instalacije Detekcija i zamena neispravnih električnih komponenti i instalacija Montaža, povezivanje i puštanje u rad električnih pogona
Internet tehnologije	Povezivanje mehatronskih sistema u računarske mreže Daljinski pristup mehatronskim sistemima preko Interneta

4.6.1 FESTO MPS - Robotska stanica

Klasičan pristup nastavi programiranja podrazumeva algoritamsko rešavanje problema, razvoj grafičke aplikacije, povezivanje baze podataka i pisanje programskog koda. Celokupni proces odvija se na računaru, gde je instalirano razvojno programsko okruženje, i ne zahteva specifična znanja iz različitih oblasti. Za razliku od razvoja raznih uslužnih aplikacija, programiranje robota zahteva pored znanja programiranja, širok spektar znanja iz mašinstva, elektrotehnike i informatike.

Didaktički mehatronski sistem – Robotska stanica Mitsubishi Melfa Basic RV-2AJ predstavlja industrijski robot sa 5 stepeni slobode. Zglobove robota pokreću naizmenični servomotori sa enkoderima, a završni alat je pneumatska hvataljka, opremljena optičkim sensorima. Povezivanje robot kontrolera sa PC računarom vrši se seriskom vezom RS232. Zadavanje željenih pozicija robota i njegovo programiranje vrši se u programskom paketu Robot explorer. Namena ovog didaktičkog sistema je da polaznici steknu znanja i veštine

iz oblasti robotike, ovladaju programiranjem robota, dijagnostikom i testiranjem robotskih sistema, servisiranjem industrijskih robota. Za daljinsko upravljanje robotskog sistema u realnom vremenu, potrebno je postaviti parametre za daljinski pristup računaru na kome je povezan robot i instaliran odgovarajući softver. Za daljinski pristup koristi se programski paket Team Viewer.

Robot se nalazi na modularnoj platformi, gde su postavljeni: kosi transporter, dva magacina za smeštanje radnih delova, optički senzori boja, montažne platforme, priprema grupa za vazduh, pneumatska i električna instalacija. Na završnom segmentu robotske ruke, montirana je pneumatska hvataljka, koja služi za manipulaciju radnim delovima. Upravljanje robotom vrši robot kontroler CR1-571, sa savremenim 64-bitni RISC/DSP procesorom, koji omogućava istovremeno upravljanje sa maksimalno 6 osa. Memorija robot kontrolera ima kapacitet za čuvanje 2500 pozicija robota, 5000 linija programa i 88 različitih programa robota. Robot kontroler se serijskom vezom RS232c povezuje sa računarom. Osnovne funkcije kontrolera su: indirektna i direktna interpolacija, 3D interpolacija, paletizacija, ispitivanje uslova, opsluživanje prekida, pozivanje potprograma, optimalno podešavanje brzine, ubrzanja i putanje robota.

Zglobovi robota označeni su simbolima od J1 do J6, s tim da kod ovog tipa robota zglob J4 ne postoji (broj stepeni slobode $n=5$). Na slici 4.13 prikazan je šematski prikaz vertikalnog robota sa pet stepeni slobode i opseg kretanja zglobova industrijskog robota Mitsubishi RV2AJ. Na svakoj osovinu servomotora nalazi se apsolutni enkoder, koji daje informaciju o trenutnom položaju svakog zgloba. Servomotori u zglobovima J1, J2, J3 i J5 imaju elektromagnetne kočnice, koje se aktiviraju uvek kada motori nisu u pokretu. Robot je realizovan u obliku robotske ruke sa završnim alatom na kraju kinematskog lanca.

4.6.2 Programiranje industrijskog robota

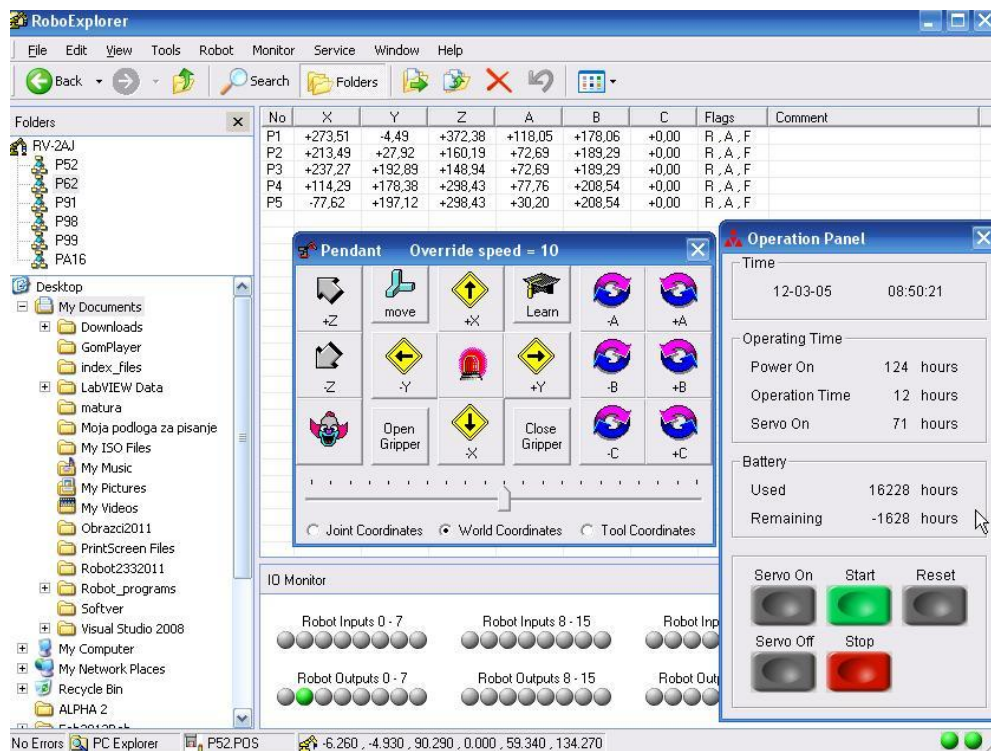
Radni prostor robota ograničava dinamiku robota. Što je broj stepena slobode robota manji ($n < 6$) ograničenja su sve veća. Kretanje robota vrši se prema linearnoj ili kružnoj aproksimaciji. Za svaku vrstu kretanja postoje definisane programske naredbe (MOV, MVR, MVS,...), koje imaju svoje parametre (broj tačaka potrebnih za definisanje željenog kretanja). Neke od naredbi se mogu primenjivati samo na kraćim distancama, zbog mogućih grešaka koje mogu nastati prilikom interpolacije. Programiranje industrijskog robota Mitsubishi RV2AJ vrši se programskim jezicima Melfa Basic IV i Move Master. Robot ima tri moda rada:

- Ručno upravljanje i programiranje - ručna komanda R28TB (*teach pendant*)

- Upravljanje i programiranje pomoću računara
- Automatski način rada

Izbor načina rada vrši se pomoću hardverskog ključa koji se nalazi na kontroleru robota. Pozicioniranje robota vrši se promenom položaja u zglobovima J1, J2, J3, dok se orijentacija hvataljke se vrši promenom ugla zglobova J5 i J6. Programiranje robota vrši se pomoću komercijalnog softverskog paketa Cosimir Robotics - Profesional, ili pomoću besplatnog softverskog paketa za programiranje robota Robot Explorer. Za programiranje ovog robota koristi se programski jezik Melfa Basic IV. Pored ovog programskog jezika veoma često se koristi univerzalni jezik za programiranje robota IRL (Industrial Robot Language), kao i MRL – Movemaster Comand. Zbog specifičnosti kod upravljanja i programiranja robota, za ovaj sistem koristi se virtuelno softversko okruženje za programiranje i simulaciju robota - Cosimir Robotics.

Besplatni programski paket Robot Explorer omogućava zadavanje koordinata tačaka kroz koje prolazi alat robotske ruke, pomeranje robota u željenom pravcu, praćenje trenutnih spoljašnjih i unutrašnjih koordinata robota, kreiranje fajlova za čuvanje pozicija, pisanje programa, kompajliranje i prenošenje programa u kontroler robota. Na slici 4.14 prikazano je radno okruženje programskog paketa Robot explorer.



Slika 4.14: Programsko okruženje Robot Explorer

Izborom komande Pendant, iz menija Tools, aktivira se upravljački interfejs robota. Ovaj interfejs omogućava izbor kordinatnog sistema u kome se robot pomera, podešavanje brzine pomeranja, kao i otvaranje i zatvaranje pneumatske hvataljke. Prilikom pomeranja robota u kordinatnom sistemu zglobova, pomeranje se vrši za svaki zglob nezavisno, pri čemu se mora voditi računa o graničnim položajima robota. Ukoliko robot dostigne graničnu vrednost, kontroler aktivira alarm. Kod pomeranja robota u osnovnom koordinatnom sistemu, pomeranje se vrši po x , y ili z osi, ali tako što su svi motori robota istovremeno aktivni. U ovom modu rada, teže je kontrolisati granične vrednosti svih motora, pa se greške često javljaju. Softverski paket Robot Explorer omogućava pretvaranje koordinata iz jednog u drugi koordinatni sistem, kao i istovremeno praćenje koordinata u oba sistema prilikom definisanja pozicija robota. Praćenjem vrednosti ovih koordinata, smanjuje se verovatnoća nastanka težih grešaka i eventualnih havarija. Željena trajektorija zadaje se nizom tačaka (P_1, P_2, \dots, P_n), koje se karakterišu svojim koordinatama. Postupak zadavanja koordinata alata robotske ruke je sledeći: robot se postavi u početni položaj koji definiše početnu tačku P_1 ; koordinate te tačke se memorišu u *Teach Point* editor-u; postupak ponavlja za sve tačke kroz koje prolazi robot. Sve pozicije se čuvaju u fajlu sa ekstenzijom *.pos. Nakon definisanja pozicija, vrši se pisanje programa prema zadatom algoritmu rada. Za programiranje se koristi programski jezik visokog nivoa Melfa Basic IV, a programi se čuvaju u fajlu sa istim imenom kao fajl koji čuva pozicije, ali je ekstenzija fajla je *.mb4. Sledeći korak je prenošenje programa u robot kontroler, a zatim prenošenje pozicija u program robota. Posle programiranja, vrši se izbor moda rada, izbor programa, podešavanje brzine robota, uključenje servo motora i startovanje programa. Prilikom definisanja tačaka kroz koje robot prolazi, potrebno je voditi računa da putanja robota ostane u radnom prostoru robota. Ukoliko se dogodi da putanja robota nije u radnom prostoru, prilikom unošenja fajla sa pozicijama robota u program robota, javlja se greška i upozorenje zvučnim signalom. Svaka greška je definisana karakterističnom šifrom, tako da programer brzo utvdi i otkloni uzrok greške. Robot je opremljen optičkim sensorima za detekciju radnih predmeta, a svakom senzoru je dodeljena odgovarajuća memorijska promenljiva, npr. $M_IN(10)=1 (0)$. Ove promenjive se koriste u programu prilikom ispitivanja ispunjenosti uslova i donošenja odluka. Podatke o poziciji robota u bilo kom trenutku daju apsolutni enkoderi, koji se nalazi na svakom od servo motora.

Realizacija nastave na savremenim industrijskim robotima je izuzetno izazovna i stimulatívna za učenike. Laboratorijske vežbe se realizuju sa grupom od 12 učenika. Pisanje programa učenici vrše samostalno na računarima koji su povezani u lokalnu

računarsku mrežu. Zbog visoke cene industrijskih robota, najčešće je na raspolaganju jedan robotski sistem, koji je serijskom RS232 vezom povezan na jedan računar u laboratoriji. Obuka sa realnim robotskim sistemom može se vršiti maksimalno sa dva učenika. Programiranje i testiranje programa robota vršimo na nekoliko načina:

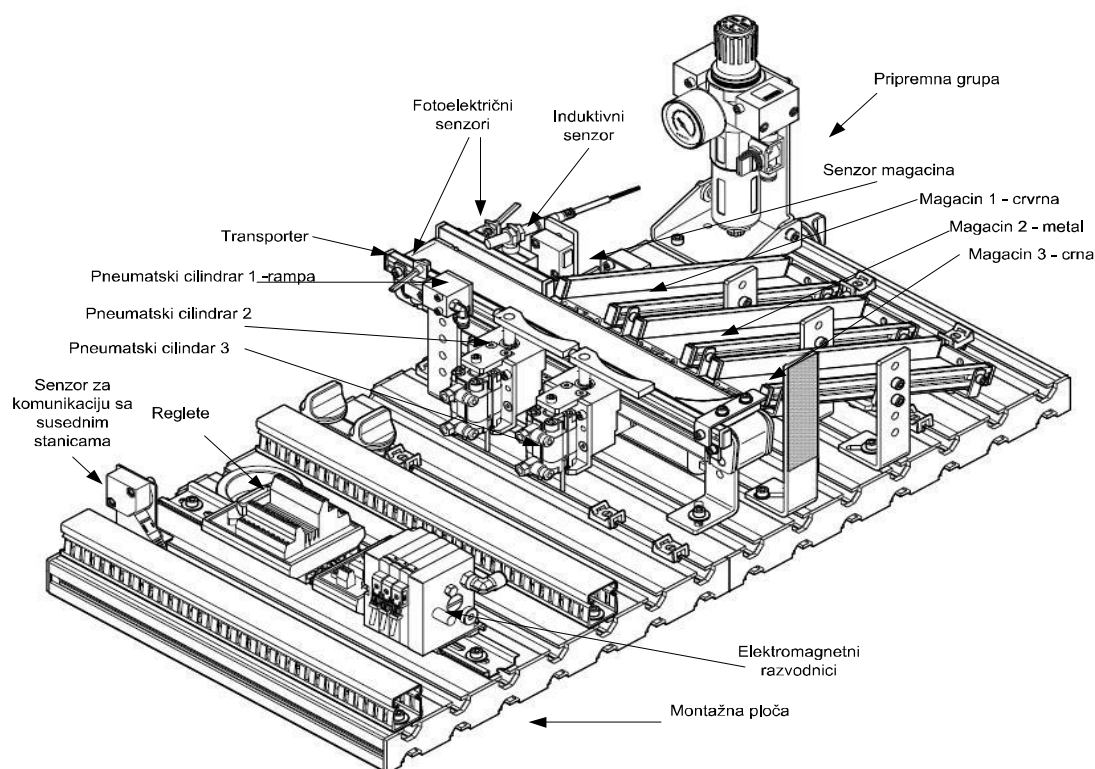
- Preuzimanjem fajlova sa lokalnih računara na server i direktno programiranje robota preko RS232 kabla
- Daljinsko upravljanje računarom na koji je vezan robot kroz LAN ili WAN mrežu (korišćenje specijalizovanih softvera Team Viewer, Remote desktop,...)
- Direktnim pristupom kroz LAN mrežu korišćenjem protokola TCP/IP, kada robot ima instaliranu mrežnu karticu sa definisanom jedinstvenom IP adresom

Za lakše usvajanje osnovnih znanja, rad sa više različitih robotskih sistema, napredovanje u učenju željenom dinamikom, pre direktnog programiranja robota, vrši se obuka učenika u virtuelnom okruženju Cosimir Robotics Education. Za sticanje veština kod učenika potreban je rad sa industrijskim komponentama, rad za mernom opremom, rad sa industrijskim kontrolerima i robotima. Tokom rada sa industrijskim robotom javljaju se tipične greške. Svaka greška je definisana svojom šifrom. Prilikom detekcije greške, kontroler robota zaustavlja robot, na displeju ispisuje šifru greške i aktivira alarm. Rad sa robotom može se nastaviti tek nakon otklanjanja uzroka greške i restartovanja sistema. Tipične greške su: pogrešan izbor moda rada, loše podešeni komunikacioni protokoli, greška u kodu programa, pozicija koja je van radnog opsega robota, hardverska greška i slično. Rad sa realnim industrijskim robotima, omogućavaju sticanje praktičnih veština i dragocenih iskustva, koja su primenjiva u industrijskom okruženju. Najbolje rezultate prilikom realizacije nastave daje primena različitih nastavnih metoda učenja, savremenih realnih didaktičkih sistema, softverskih paketa za simulaciju i modeliranje.

4.6.3 FESTO MPS - Mehatronski sistem za sortiranje

Osnovna funkcija stanice za sortiranje je razvrstavanje materijala prema boji i vrsti materijala. Ovaj sistem je postavljen na tipskom kućištu, u kome je smešten upravljački PLC. Na prednjoj strani nalazi se operacioni panel sa tasterima za startovanje, zaustavljanje i resetovanje stanice za sortiranje, kao i signalne diode koje daju informaciju o stanju sistema. Na panelu se nalaze još i informacioni indikatori koji se aktiviraju u slučaju detekcije greške na sistemu. Radom celog sistema upravlja PLC Festo FC640. Na gornjoj strani kućišta je postavljena modularna montažna ploča sa komponentama stanice

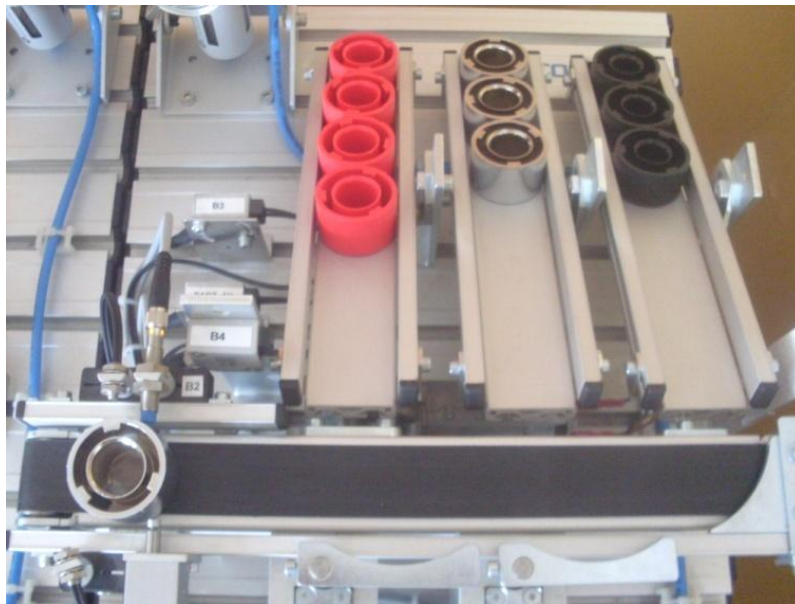
za sortiranje (slika 4.15). Ovaj modul se sastoji od transportne trake koju pokreće jednosmerni motor, tri senzora za detekciju predmeta na ulaznom delu transportera, tri pneumatska cilindra sa graničnim davačima položaja. Pneumatskim aktuatorima upravlja PLC preko elektromagnetnih razvodnika. Magacinski deo sastoji se od tri posebne fiksne paralelne staze, koje se nalaze pod određenim nagibom, gde se smeštaju sortirani delovi. U prvoj stazi se smeštaju nemetalni delovi crvene boje, u drugoj se smeštaju metalni delovi, a u trećoj nemetalni delovi crne boje. Na vrhu magacina nalazi se refleksni fotoelektrični senzor, koji daje informaciju kada je neki od magacina pun. U tom trenutku, stanica za sortiranje prestaje sa radom i uključuje svetlosni alarm na operacionom panelu. Za rad stanice za sortiranje potrebno je obezbediti električno napajanje 24V DC, 5A, i napajanje komprimovanim vazduhom od 6 bara. Sistem ima ručni i automatski režim rada, što se definiše preklopnikom na operacionom panelu.



Slika 4.15: Modularni prikaz stanice za sortiranje

Glavni deo stanice za sortiranje čini transporter, na kome su postavljeni senzori za detekciju delova i pneumatski cilindri sa zaustavljanje i sortiranje delova. Pokretanje transportne trake vrši jednosmerni motor. Sortiraju se predmeti cilindričnog oblika crne, crvene i sive boje. Crni i crveni delovi su izrađeni od plastične mase, dok je sivi delovi izrađeni od metala. Na ulazni deo transportera nalazi se difuzioni fotoelektrični senzor koji detektuje radni deo. Kada PLC dobije signal sa ovog senzora, uključuje se motor

transportne trake i aktivira prvi pneumatski cilindar – rampa, koji zaustavlja radni deo za sortiranje, radi njegove detekcije. Detekciju vrše dva senzora: induktivni senzor koji detektuje metalne delove i fotoelektrični senzor koji detektuje boju (slika 4.16). Senzor boje ima mogućnost podešavanja, i kalibrisan je tako da detektuje samo delove crvene boje. U slučaju kada se detektuje crveni deo, aktivira se pneumatski cilindar 2, koji sa transportne trake usmerava crvene delove u magacin 1 - za crvene delove, a pneumatski cilindar – rampa se uvlači.

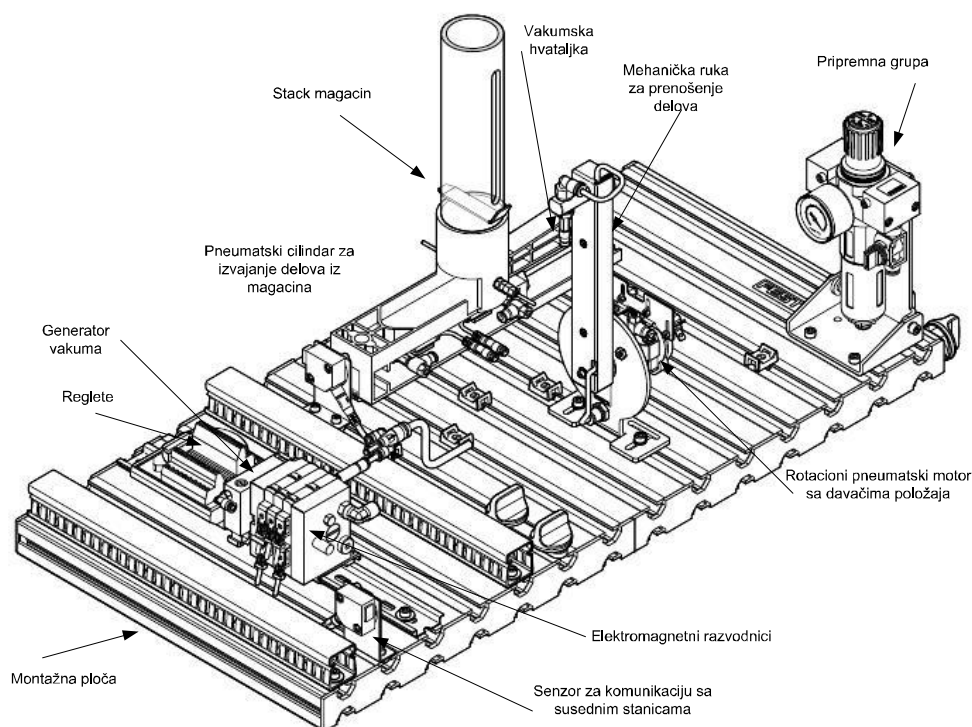


Slika 4.16: Prikaz mehatronskog sistema za sortiranje

Kada senzor detektuje metalni deo, aktivira se treći cilindar koji usmerava delove u magacin 2 - za metalne delove. Ukoliko ni jedan od ova dva senzora nije aktivan, crni delovi se transportuju do kraja transportera gde se automatski smeštaju u magacin 3 - za crne delove. Sva tri magacina se nalaze paralelno jedan drugom pod određenim nagibom, koji obezbeđuje da delovi klize na dno magacina. Na vrhu magacina postavljena je refleksna fotočelija koja detektuje kada je neki od magacina pun. Ovaj senzor zaustavlja rad stanice za sortiranje, ukoliko je bar jedan od magacina pun. Na displeju se aktivira signalna lampica koja ukazuje operateru da je došlo do greške. Upravljanje stanicom za sortiranje vrši PLC Festo FC 640, a njegovo programiranje vrši se korišćenjem softvera Festo FST V4.02.

4.6.4 FESTO MPS - Mehatronski sistem za distribuciju

Osnovna funkcija stanice za distribuciju je izdvajanje materijala iz magacina i prenošenje do sledeće stanice, u ovom slučaju do ulaznog dela transportera stanice za sortiranje. Ovaj sistem je postavljen na tipskom kućištu, u kome je smešten upravljački PLC. Na prednjoj strani nalazi se operacioni panel sa tasterima za startovanje, zaustavljanje i resetovanje stanice za distribuciju, kao i signalne diode koje daju informaciju o stanju sistema. Na panelu se nalaze još i informacioni indikatori koji se aktiviraju u slučaju detekcije greške na sistemu. Radom celog sistema upravlja PLC Festo FC640. Na gornjoj strani kućišta je postavljena modularna montažna ploča sa komponentama stanice za distribuciju (slika 4.17). Stanica za distribuciju sastoji se iz sledećih modula: vertikalni stek magacina delova sa difuznim senzorom koji detektuje kada je magacin prazan, linearnog pneumatskog cilindra dvosmernog dejstava sa senzorima u krajnjim položajima, rotacionog pneumatskog cilindra sa graničnim mikroprekidačima kao davačima položaja, mehaničke ruke sa vakumskom hvataljkom za prenošenje delova, vakum generatora i elektromagnetnih razvodnika. Pneumatskim aktuatorima upravlja PLC preko elektromagnetnih razvodnika. Za rad stanice za distribuciju potrebno je obezbediti električno napajanje 24V DC, 5A, i napajanje komprimovanim vazduhom od 6 bara. Sistem ima ručni i automatski režim rada, što se bira preklopnikom na operacionom panelu.

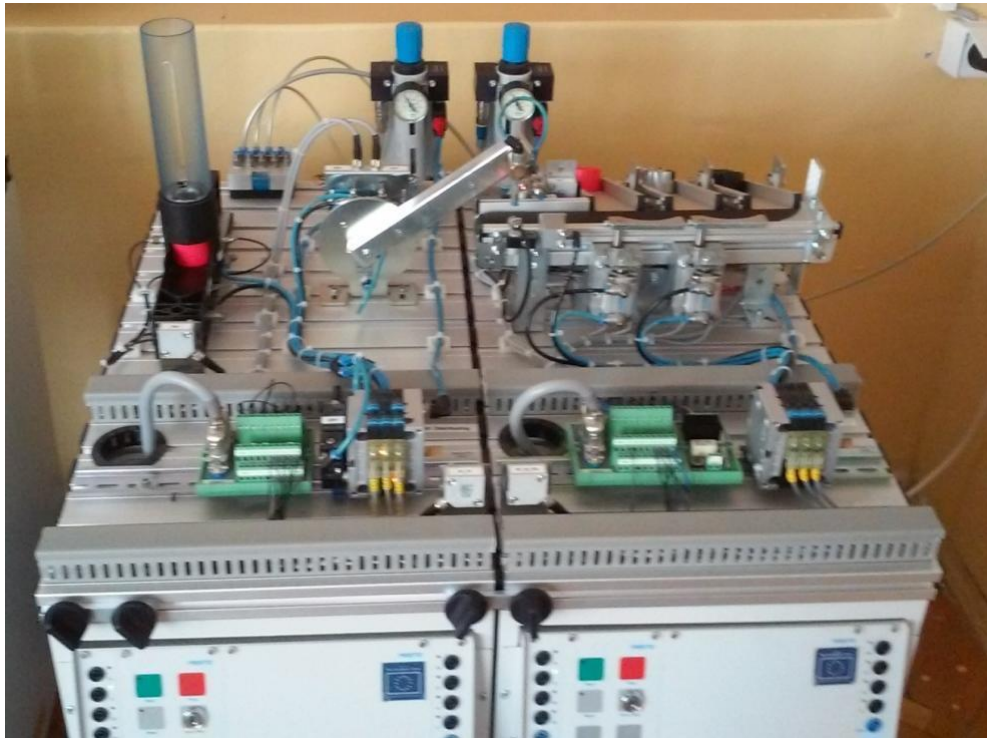


Slika 4.17: Modularni prikaz stanice za distribuciju

Stanica za distribuciju predstavlja deo proizvodnog sistema. Iz stanice koja se nalazi ispred stanice za distribucije, vrši se punjenje vertikalnog stek magacina. U ovom slučaju robot vrši punjenje magacina. Delove iz magacina izdvaja dvosmerni linearni pneumatski cilindar, koji na krajnjim položajima ima *reed* senzore. Kada cilindar potisne deo iz magacina, aktivira se mehanička ruka sa vakumskom hvataljkom, koja se postavlja iznad dela za prenošenje. Signali sa senzora položaja oba cilindra, daju dozvola za aktiviranje vakuma, hvatanja predmeta i prenošenje u poziciji za odlaganje. Mehanička ruku pokreće kružni pneumatski motor, čiji je opseg kretanja od 0 do 180°. Opseg kretanja vrši se podešavanjem položaja mikroprekidača na kružnom cilindru. Kada se aktivira mikroprekidač na strani za prenošenje, generator vakuma se isključuje, predmet odlaže, a mehanička ruka vraća u položaj magacina. Kada je magacin delova prazan, dođe do prekida napajanja ili neke druge greške, PLC prekida rad stanice za distribuciju i na displeju se aktivira svetlosni alarm. Upravljanje stanicom za sortiranje vrši PLC Festo FC 640, a njegovo programiranje vrši se korišćenjem softvera Festo FST V4.02.

Mehatronske sistemi iz familije Festo MPS imaju mogućnost povezivanja u proizvodnu liniju. Na slici 4.18 prikazani su sinronizovani realni modeli mehatronskih sistema stanice za distribuciju i sortiranje. Sinhronizacija se vrši preko optičkih senzora koji se nalaze na ivici svakog sistema. Svaki od modularnih sistema ima svoj upravljački PLC, podršku za TCP/IP protokol i integrisan WEB server. Podrška za Ethernet mrežu

omogućava definisanje statičke IP adrese PLC-a, povezivanje u LAN mrežu, pristup sistemu kroz lokalnu mrežu ili preko Web pretraživača sa bilo koje geografske lokacije.



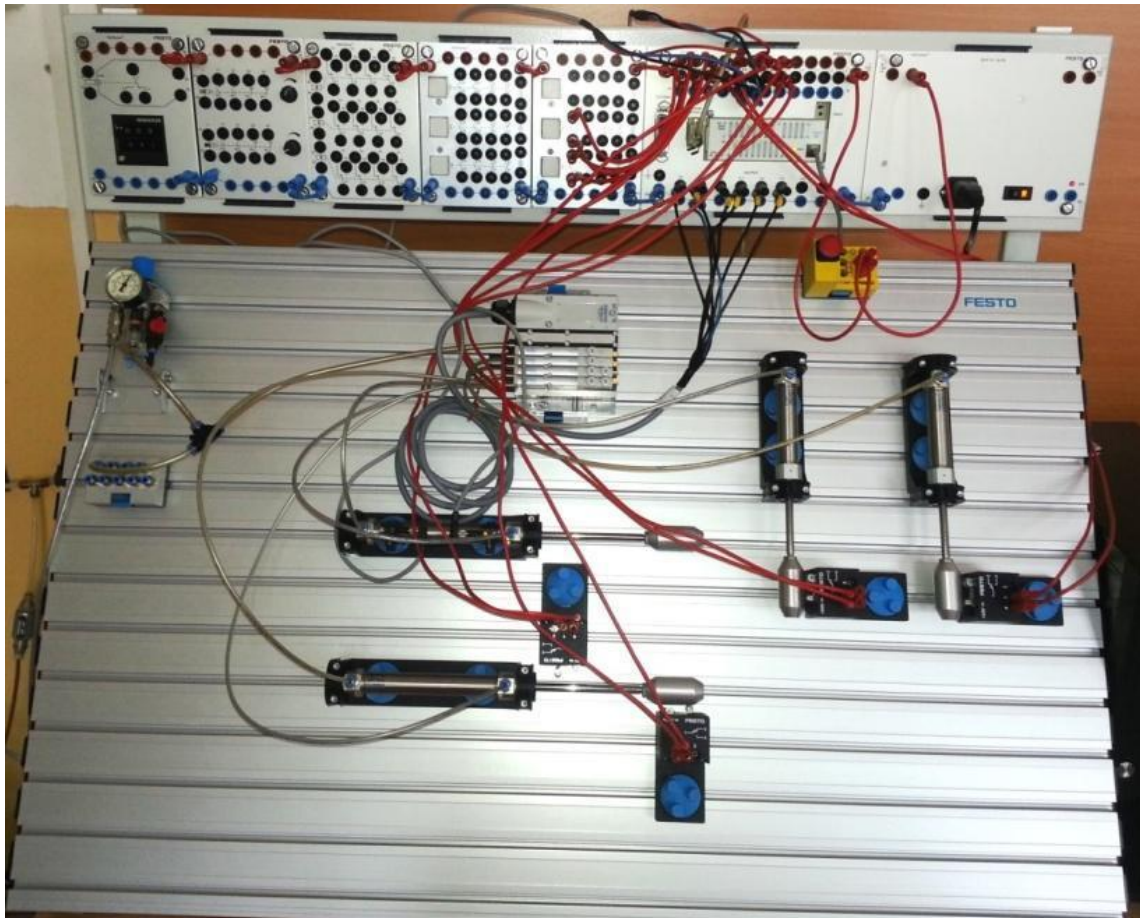
Slika 4.18: Stanica za distribuciju i stanica za sortiranje

Programiranje PLC-a vrši se korišćenjem jezika lestvičastih dijagrama (LADDER diagram) i Statement List Language (STL). Ovaj softver omogućava pisanje programa, kompajliranje, pronalaženje grešaka i programiranje PLC-a. Softver omogućava komunikaciju sa PLC-om u realnom vremenu, praćenje stanja ulaznih i izlaznih promenljivih, stanja brojača i tajmera, kao i stanja specijalnih memoriskih promenljivih. Dodavanjem drajvera TCP/IP i Web server, omogućava se povezivanje PLC-a u Ethernet mrežu, čime se omogućava praćenje parametara sistema sa bilo kog računara u mreži, kao i daljinsko upravljanje sistemom. Za korišćenje mrežnih resursa PLC-a koriste se namenski softveri Festo IPC server čime se omogućava bezbedan daljinski pristup sistemima i podška za Windows aplikacije.

4.6.5 FESTO – Modularni mehatronski sistem

Modularni elektropneumatski sistemi upravljani su Festo PLC FC34 i namenjeni su za montažu i povezivanje mehatronskih sistema, programiranje PLC-a, testiranje i dijagnostiku mehatronskih sistema. Na modularnoj platformi povezan je elektropneumatski sistem upravljan PLC-om. Na slici 4.19 prikazan je modularni mehatronski sistem koji se sastoji iz dva dvosmerna pneumatska cilinda i dva jednosmerna

pneumatska cilinda. Na krajnjim položajima cilindara nalaze se granični senzori i mikroprekidači. U zavisnosti od stanja na ulazima PLC-a, algoritma programa, vrši se upravljanje pneumatskim aktuatorima preko elektromagnetnih razvodnika.



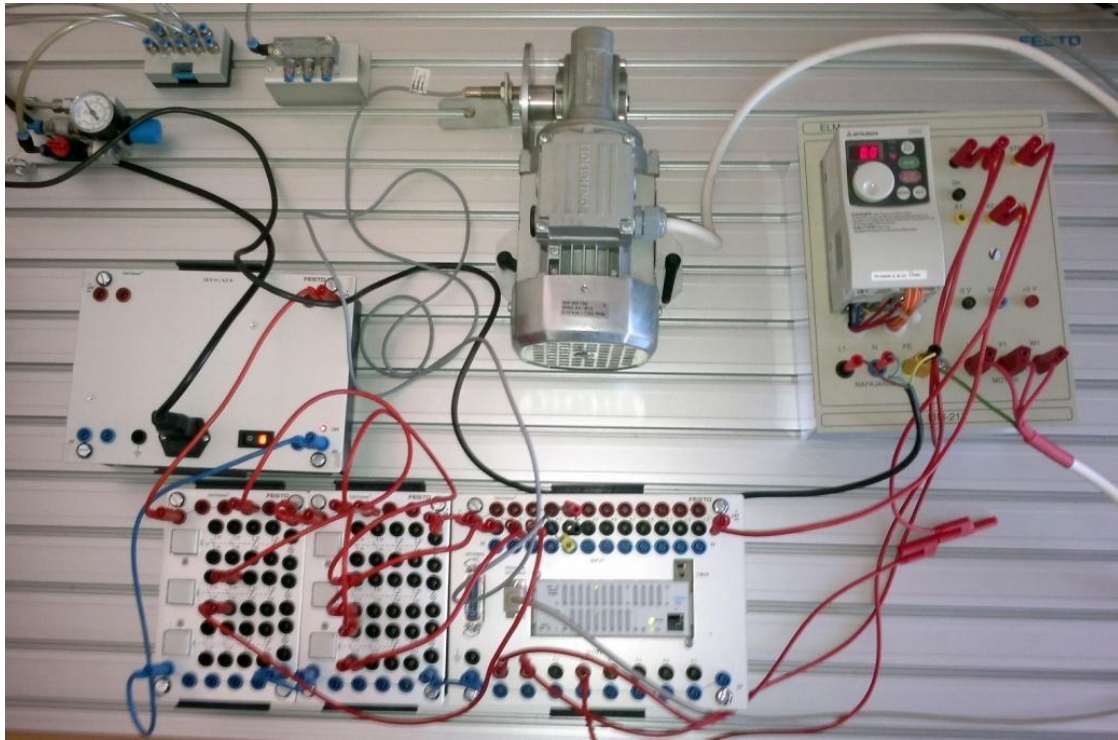
Slika 4.19: Modularni elektropneumatski sistem upravljan PLC-om

Programiranje PLC-a vrši se pomoću softverskog paketa Festo Software Tools V4.10.50. Upravljački PLC ima ugrađen mikro Web server i jedinstvenu IP adresu. Pristup sistemu vrši se kroz LAN i WAN mrežu. Sistem omogućava lokalno i daljinsko programiranje PLC-a, testiranje programa, reprogramiranje PLC-a, testiranje i praćenje algoritma rada. Modularni sistem je realizovan industrijskim komponentama i uređajima, omogućava kreiranje različitih mehatronskih sistema, testiranje sistema u ručnom i automatskom načinu rada.

4.6.6 Sistem za daljinsko upravljanje radom asinhronog motora

Sistem za upravljanje radom asinhronog motora prikazan je na slici 4.20. Namenjen je za sticanje znanja i praktičnih veština iz elektromotornih pogona, PLC-a i sistema automatskog upravljanja. Sistem čine asihroni motor, frekventni regulator, PLC, senzori, napajanje i moduli sa tasterima. Sistem je modularan, omogućava realizaciju velikog broja

laboratorijskih vežbi: regulacija brzine, promena smeru obrtanja asihronog motora, pozicioniranje i slično.



Slika 4.20: Upravljanje asihronim motorom pomoću PLC-a i frekventnog regulatora

Za kreiranje složenih mehatronskih sistema, na modularnoj platformi mogu se dodavati elektropneumatske komponente i senzori. Ovaj sistem ima mogućnost umrežavanja i daljinskog pristupa kroz LAN i WAN, pogodan je za daljinsko programiranje PLC-a, testiranje i dijagnostiku elektromotornih pogona.

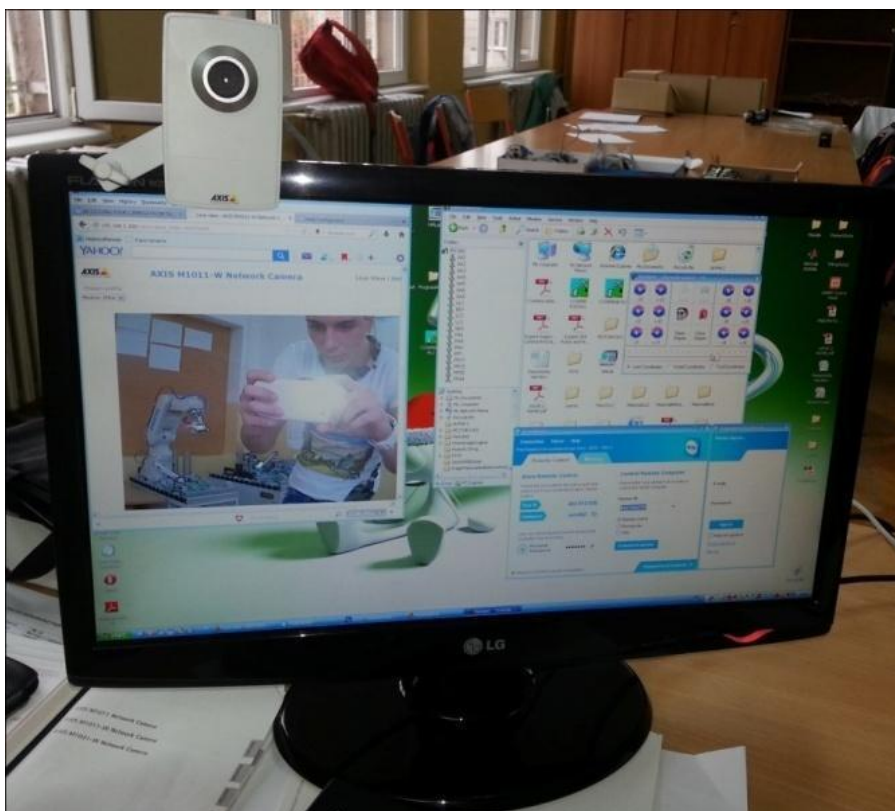
4.7 Razvoj sistema za daljinski pristup laboratoriji mehatronike

Realizacija sistema za daljinski pristup Web laboratoriji podrazumeva postojanje Web domena sa statičkom IP adresom, serverom, mrežnom opremom i potrebnim softverom. Cena ovakvih sistema je dosta visoka za škole i fakultete u našem okruženju. U ovom radu predstavljeno je rešenje za daljinski pristup Web laboratoriji za mehatroniku, koje se zasniva na besplatnim softverskim paketima i servisima.

Većina Internet provajdera dodeljuju korisnicima dinamičke IP adrese, koje se menjaju prema određenim pravilima. Ovakvo IP adresiranje naziva se dinamičko adresiranje. Za daljinski pristup željenom računaru potrebno je poznavati novu IP adresu. Ovaj problem rešavamo korišćenjem specijalizovanog Internet servisa, koji posle registracije i aktivacije domena, automatski ažurira IP adresu definisanog hosta ili domena. Ovi servisi omogućavaju pristup računarima u LAN mreži preko registrovnog

domena bez potrebe promene IP adrese. Najčešće korišćeni sevisi predstavljeni su na sajtovima: <http://www.no-ip.com>, <http://www.dyndns.com>, <http://www.dns2go.com> i <http://www.dynu.com>.

Za praćenje izvođenja eksperimenata na daljinu, koriste se mrežne IP Web kamere AXIS model M1011W. Ovo su digitalne kamere koje imaju mogućnost povezivanja u LAN mrežu, podršku za TCP/IP, mogućnost bežičnog povezivanja i direktnog pristupa preko Interneta sa bilo koje geografske pozicije. Ove kamere karakteriše visoka cena, koriste se za potrebe video konferencija, video nadzora, osmatranja i praćenja. Za razliku od analognih kamera, ove kamere poseduju interni upravljački hardver, memoriju i softver, koji omogućava konfigurisanje parametara za daljinski pristup, HTTP server, detekciju pokreta, noćno osmatranje, kontrolu pristupa i zaštitu podataka. IP Web kamera AXIS M1011W ima rezoluciju senzora od 640x480 piksela, 30 fps, ethernet priključak i integrisani bežični adapter, koji podržava 802.11b/g/n standarde. Kamera ima mogućnost dodele statičke IP adresa ili dinamičke adrese preko DHCP servisa. Napajanje kamere vrši se direktno ili mrežnim kablom metodom PoE (*Power over Ethernet*). Fabrički postavljena IP adresa kamere je 192.168.1.90, a za pristup kameri korisničko ime je "root", kao i korisnička lozinka "root". Poželjno je da administrator definiše korisnička imena i lozinke. Kamera ima mogućnost kontrole pristupa i podešavanja bezbednosti. HTTPS protokol omogućava bolju zaštitu, kao i onemogućavanje pristup bilo kojom metodom koja ne kriptuje korisničko ime i šifru. Enkripcija sadržaja vrši se nekom od metoda WEP, WPA, AES. Pored toga, kamera ima mogućnost komunikacije sa različitim tipovima servera, tako da može da detektuje i šalje alarme i druge sadržaje. Svim podešavanjima, kao i trenutnom *streamu*, moguće je pristupiti preko internet pretraživača. Pristupa se unošenjem internet adrese na kojoj se nalazi kamera, odnosno na standardnom portu za HTTP komunikaciju 8080 (npr:192.168.1.110:8080). Prilikom pristupanja potrebno je autentifikovati se korisničkim imenom i šifrom. Na slici 4.21 prikazana je IP web kamera i korisnički interfejs za daljinsko upravljanje robotske stanice.



Slika 4.21: IP Web kamera u kabinetu mehatronike

Internet konekcija Tehničkoj školi Trstenik ostvaruje se preko Internet provajdera Telekom Srbija. Veza se uspostavlja preko modema sa integrisanim ruterom Huawei HG530, koji predstavlja mrežni prolaz za školsku mrežu. Ruter od provajdera dobija promenjivu IP adresu, dok je mrežna adresa rutera u LAN mreži statička i ima vrednost 192.168.1.1. Svi računari u školskoj mreži imaju jedinstvene fiksne IP adrese iz opsega javnih adresa od 192.168.1.2 do 192.168.1.255. Internet provajder dodeljuje školskom ruteru dinamičku IP adresu, koja je promenjiva, najčešće jedanput dnevno. Kako bi se omogućio pristup IP Web kamerama ili računarima u lokalnoj mreži, na ruteru je potrebno izvršiti dodeljivanje portova (*eng. Port Forwarding*) odgovarajućoj IP adresi u lokalnoj mreži. U tabeli 4.5 su predstavljene najčešće korišćene aplikacije i odgovarajući portovi.

Tabela 4.5: Karakteristični Web servisi i odgovarajući portovi

Aplikacija	Port
FTP	21
Http	80
Ethernet/IP	4481 (TCP), 2222 (UDP)
Remote Desktop	3389
Modbus	502
CoDeSys(IPC)	1200
CoDeSys(750-84x)	2455

Na slici 4.22 je prikazana je lista definisanih portova i IP adresa, tako da portovi predstavljaju identifikatore koji usmeravaju internet saobraćaj prema korisnicima.

Port Forwarding Listing							
Rule	Application	Protocol	Start Port	End Port	Local IP Address	Start Port(Local)	End Port(Local)
1	Meha	ALL	8081	8085	192.168.1.50	8081	8085
2	HTTP_Server	ALL	8086	8090	192.168.1.70	8086	8090
3	VIDEO	ALL	8080	8080	192.168.1.110	8080	8080
4	PLC	ALL	991	991	192.168.1.150	991	991
5	PLC2	ALL	44818	44818	192.168.1.155	44818	44818
6	Distribucija	ALL	2222	2222	192.168.1.200	2222	2222
7	Sortiranje	ALL	631	631	192.168.1.201	631	631

Slika 4.22: Definisane portove rutera

Dodeljivanje portova na ruteru celokupan internet sadržaj se prenosi preko iste IP adrese, tako što različite aplikacije koriste različite TCP/UDP portove. Za praćenje i ažuriranje javne IP adrese na ruteru mogu se koristiti neki od poznatijih web servisa za dinamički DNS kao što su <http://www.no-ip.com>, <http://www.dyndns.com>, <http://www.dns2go.com> ili <http://www.dynu.com>. Za njihovo korišćenje potrebno je izvršiti registraciju korisnika, definisati željeni host, korisnike i preuzeti program za dinamičko ažuriranje adresa. U kabinetu mehatronike koristimo besplatni DNS NO-IP (www.noip.com). Definisan je internet domen www.mecha.no-ip.biz preko koga se može pristupiti lokalnom Web serveru. Prvi korak predstavlja registracija željenog jedinstvenog domena, npr. www.mecha.no-ip.biz, preko koga će student pristupiti Web laboratoriji. Kod prijavljivanja na dinamički DNS servis, dodeljuje se jedinstveni URL za lokalnu računarsku mrežu. Unošenjem web adrese kontaktira se server dinamičkog DNS koji usmerava internet saobraćaj na trenutno aktivnu adresu. Za dinamičko ažuriranje IP adrese host računara koristi se program Dynamic Update Client (DUC). Na slici 4.23 je prikazano programsko okruženje ovog programa. Ovo omogućava da korisnici pristupaju Web laboratoriji preko poznate internet adrese, bez obzira na trenutnu IP adresu. Ovim servisom definiše se korišćenje video kamera, mail servera, FTP servera, Remote Access i open source Apache Web servera. Kontrolu pristupa WEB laboratoriji vrši računar - server na kome je instaliran WAMP (Windows Apache MySQL and PHP) i na njemu postavljen pristupni Web sajt. Ovaj server predstavlja sistem otvorenog koda velikih mogućnosti. Adresa lokalnog WEB servera je 192.168.1.11. Na sistemu se definišu IP adresa gateway-a, odgovarajući portovi na ruteru i opseg IP adresa sa kojih je dozvoljen daljinski pristup. Korišćenjem mrežnog servisa rutera Dynamic Domain Name System (DDNS),

omogućava se dodeljivanje dinamičke IP adrese fiksnom hostu ili domenu. Podešavanjem dinamičkog DNS na ruteru i forward portova za web, celokupan saobraćaj sa interneta koji dolazi na port 80, prosleđuje se lokalnom Web serveru. Na ovaj način je omogućen pristup Web serveru podignutom na lokalnom računaru korišćenjem Interneta, unošenjem adrese koja je registrovana na www.mecha.no-ip.biz.



Slika 4.23: Program DUC za dinamičko ažuriranje IP adresa

Svi računari i IP Web kamere u LAN mreži imaju dodeljene lokalne IP adrese kao 192.168.1.x, a ruter ima eksternu IP adresu 109.92.39.79. Većina rutera ima mogućnost “port Forwarding” preko koje se specificira broj porta rutera koji se pridružuje željenoj IP adresi računara u LAN mreži. Konfiguracija parametara je prikazana na primeru:

109.92.39.79: 5278 → 192.168.1.44 : 5278

109.92.39.79: 5277 → 192.168.1.48 : 5277

109.92.39.79: 5276 → 192.168.1.52 : 5276

Pristup didaktičkim sistemima vrši se preko standardnih web pretraživača, a praćenje njihovog rada u realnom vremenu preko Web IP kamera. Ovaj sistem je dostupan i kroz lokalnu računarsku mrežu. Ograničeni vremenski pristup u realnim laboratorijama, ne pruža dovoljno vremena da studenti u potpunosti ovladaju potrebnim znanjima i veštinama. Sistemom za daljinski pristup omogućava se studentima da pristupe realnim didaktičkim sistemima u željeno vreme, usvajaju i proveraju svoja teorijska znanja i praktične veštine željenom dinamikom. Postupak izvođenja jedne vežbe moguće je ponavljati sve dok se u potpunosti ne ovlada željenim ishodom. Ovim pristupom izvođenja laboratorijskih vežbi, studenti se motivišu za samostalan rad na savremenim mehatronskim sistemima, povećavaju svoje samopouzdanje i razvijaju kreativnost. Sistem pruža mogućnosti za individualni pristup učenju, praćenje napredovanje studenata, razmenu iskustava preko foruma i chat servisa, grupni rad i druge oblike rada. Pri realizaciji ovog sistema potrebno je definisati sve potrebne mrežne zaštite od neovlašćenog pristupa. Uslov za “on-lin” pristup laboratoriji je da studenti savladaju postavljene lekcije za određeni didaktički sistem i uspešno polože on-line testove znanja. Administrator sistema šalje e-

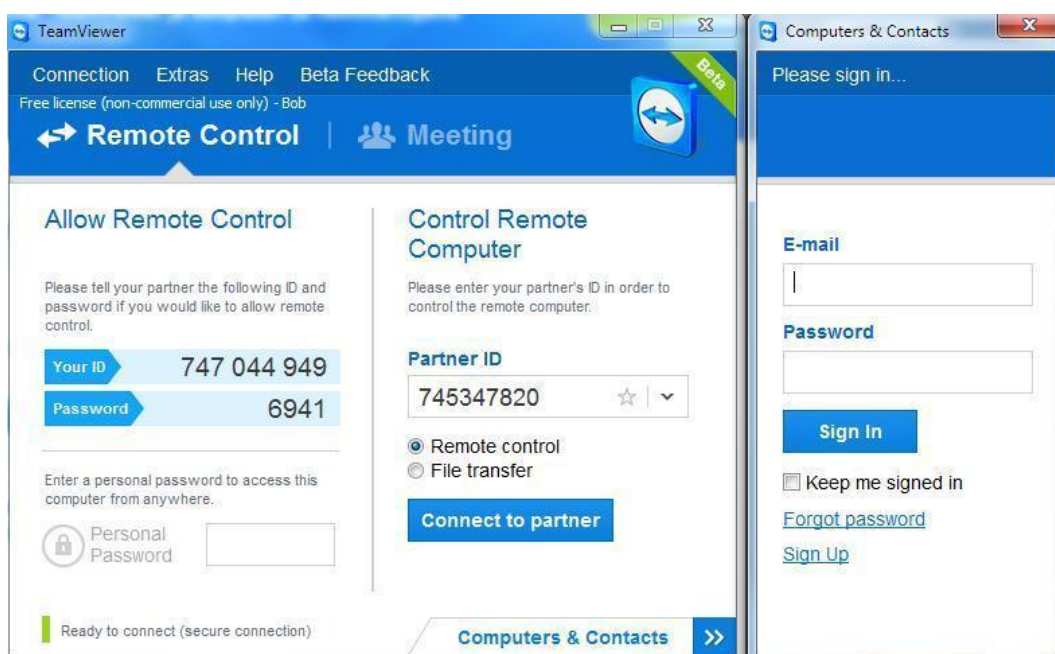
mail poruku studentima koji su položili testove sa korisničkim imenom, šifrom i definisanim vremenom kada mogu pristupiti laboratoriji.

Za daljinski pristup i korišćenje postojećih laboratorija, potrebna je brza Internet veza sa velikim dolaznim i odlaznim protokom, fiksne ili pokretne IP Web kamere velike rezolucije, mrežni uređaji, serverska platforma i prateći softver. Poželjno je razviti grafičko okruženje za jednostavno korišćenje didaktičkih sistema. Ograničenja kod korišćenja ovih sistema je da se jedan didaktički sistem može upravljati u isto vreme samo od jednog korisnika, ali postoji mogućnost multi-user praćenja rada sistema preko IP kamere. Definisanjem korisničkih naloga, sistemom za rezervaciju vežbi i vremenskim ograničenjima za pristup Web laboratoriji, rešava se problem istovremenog zahteva za pristup jednom sistemu. Kod korisnika koji imaju male brzine pristupa Internetu karakteristično je kašnjenje video signala, što otežava process e-učenja. Povratnu informaciju studenti dobijaju preko IP video kamere, Internet pretraživača ili korišćenjem specijalizovaoog softvera CoDeSys, koji ima podršku za HMI (Human-Machine-Interface. Internet vreme kašnjenja u najvećoj meri ne utiče na process edukacije. Vreme kašnjenja ima značajnu ulogu kod upravljanja realnim mehatronskim sistemima preko Interneta.

4.7.1 Daljinski pristup na bazi programskog paketa Team Viewer

Brzi razvoj računarskih i informacionih tehnologija omogućava realizaciju distribuiranog računarskog upravljanja u realnom vremenu. Za daljinski pristup Web laboratoriji mehatronike koristi se programski paket Team Viewer (<http://www.teamviewer.com>). Za kućnu i nekomercijalnu upotrebu ovaj softver je besplatan, i omogućava podršku kod učenja na daljinu. Osnovne karakteristike Team Viewer-a su: pristup i upravljanje udaljenim računarima i serverima, deljenje radne površine udaljenih računara, prezentacija na daljinu, deljenje fajlova, razmena poruka, organizacija sastanaka na daljinu, prenos audio i video signala, kreiranje VPN (Virtual Private Network) konekcija, timski rad i saradnja. Ovaj programski paket ima mogućnost instalacije na personalnim računarima i mobilnim uređajima pod operativnim sistemima Windows, iOS i Android. Veoma je lak za korišćenje, ne zahteva promene na sistemu i promeni podešavanja zaštitnog zida računarske mreže. Mogućnosti primene Team Viewera u obrazovanju su velike: vizuelno praćenje i snimanje rada učenika u laboratoriji, prezentacija lekcija, demonstracija rada sistema, pružanje tehničke podrške učenicima, istovremeni pristup većeg broja korisnika jednom računaru, deljenje dokumenata i radne površine računara, timski rad i daljinsko elektronsko učenje. Instalacija programskog

paketa Team Viewer je veoma jednostavna, nakon čega se vrši prijava i registracija na sistem. Za svaki računar generiše se jedinstven ID broj i šifra, koji je povezan sa jedinstvenom MAC adresom mrežne kartice računara, tako da se generisani ID može koristiti samo sa korisničkog računara. Šifra se menja prilikom svakog prijavljivanja, ali postoji mogućnost definisanja stalne šifre. Kod korišćenja ove vrste softvera, veoma važan parametar je bezbednost računara i opreme. Team Viewer omogućava dvostruku zaštitu, gde se pored šifre generiše i zaštitni kod. Team Viewer je bezbednosne zaštite kreirao u skladu sa Standardom za upravljanje kvalitetom DIN EN ISO 9001. Bezbednosni sistemi su na nivou elektronskog bankarstva bazirani na tehnologijama SSL, RSA razmeni ključeva i AES 256-bitno kodiranje ključeva. Softver omogućava definisanje liste korisnika koji mogu daljinski pristupiti, definisanje zabranjenih pristupa, daljinsko automatsko zaključavanje servera kod odjave sa sistema, pojedinačni izbor dostupnih aplikacija na daljinu. Na slici 4.24. prikazano je radno okruženje Team Viewera, koje omogućava pristup udaljenom računaru i upravljanje instaliranim programima i virtuelnim modelima [71-72].



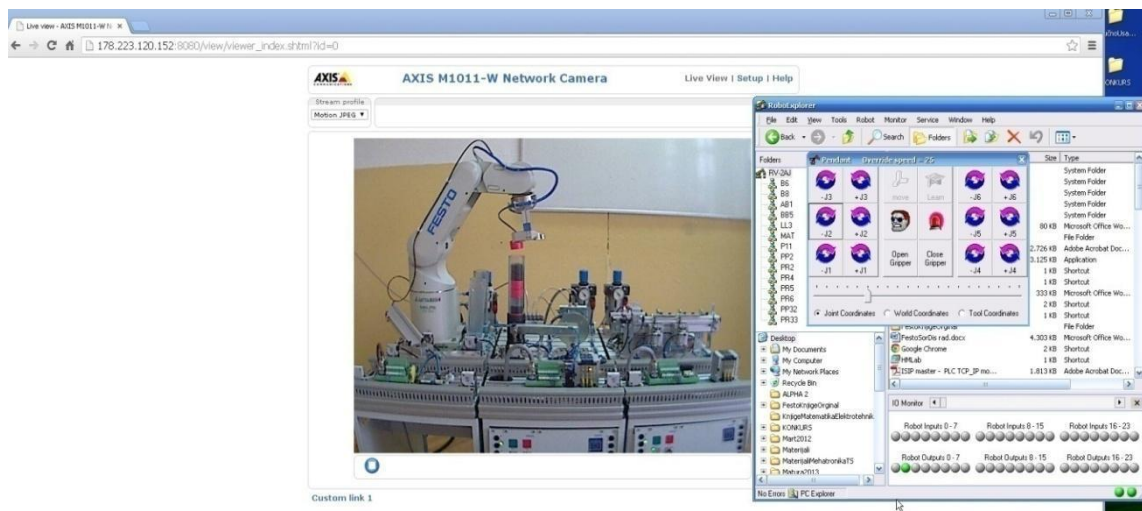
Slika 4.24: Daljinski pristup računaru pomoću Team Viewer-a

Kod sistema za daljinski pristup laboratorijama baziranim na strukturi Klijent-Server, zahteva se kreiranje posebnog radnog okruženja, sa virtuelnim tasterima, diodama i drugih simulacija. Na ovakav način virtuelni pristup laboratorijskoj opremi ne odgovara u potpunosti realnim laboratorijskim sistemima. Glavna prednost primene Team Viewera je što on omogućava potpunu kontrolu računara u laboratoriji na kome se učenici

obučavaju u redovnoj nastavi, poznato softversko okruženje, korišćenje skupih licencnih programa, programiranje PLC-a, programiranje robota i testiranje programa u realnom vremenu. Uz pomoć IP Web kamera omogućava se u realnom vremenu praćenje rada mehatronskog sistema. Na ovaj način omogućava se testiranje i dijagnostika mehatronskih sistema u realnom vremenu, pronalaženje već postavljenih kvarova, otklanjanje softverskih greški, puštanje sistema u rad. Broj ponavljanja i dinamika rada zavisi od potrebe studenata, tako da svi studenti mogu da usvoje definisana znanja i veštine.

4.7.2 Sistem za programiranje robota na daljinu

Daljinski pristup sistemu za programiranje industrijskog robota vrši se pomoću Team Viewer-a i IP Web kamere. Na slici 4.25 prikazano je korisničko okruženje za eksperimentalno učenje na daljinu u robotici. Ovaj sistem omogućava sticanje praktičnih veština na daljinu, samostalan rad, veliki broj ponavljanja različitih eksperimenata, pisanje i testiranje korisničkih programa u realnom vremenu kao i praćenje parametara sistema [73-74]. Parametre za pristup sistemu i vreme pristupa učenici dobijaju preko LMS Edmodo.



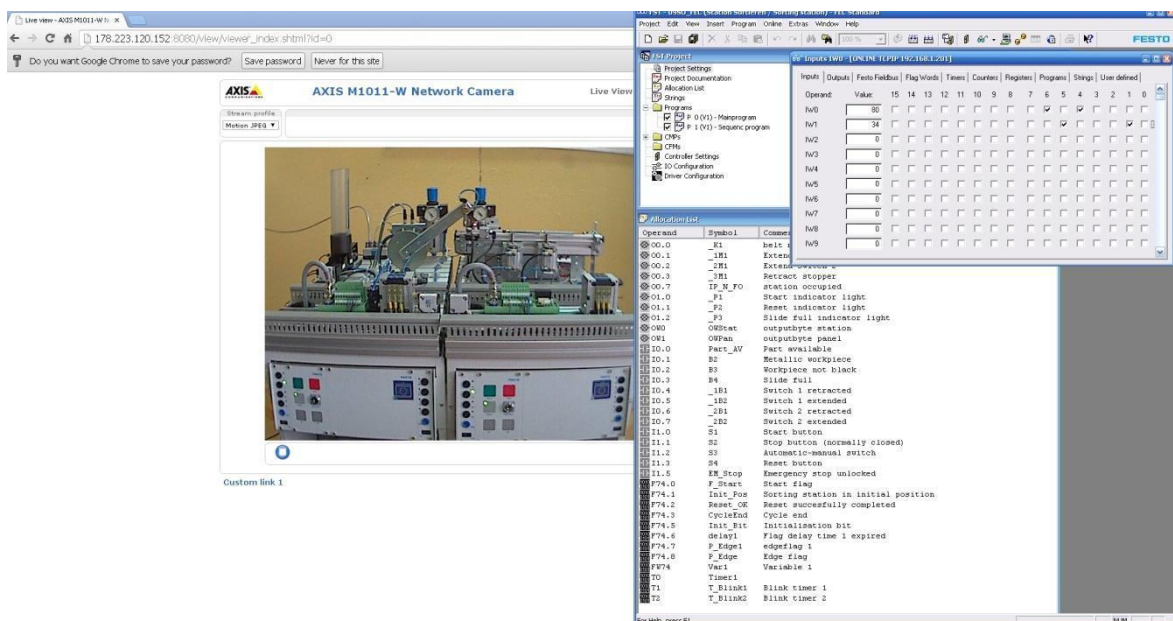
Slika 4.25: Praćenje i upravljanje robotom na daljinu pomoću Team Viewer-a i IP Web kamere

Korišćenjem ovog sistema za eksperimentalno učenje na daljinu učenicima se omogućava da u realnom vremenu vrše izbor koordinatnog sistema robota, podešavaju brzinu kretanja zglobova, vrše pomeranje robota po zglobovima, zadaju pozicije kroz koje robot izvršava zadati algoritam, pišu programe, upravljaju završnim uređajem robota, vrše programiranje robota, startovanje i praćenje svojih programa, praćenje stanja eksternih ulaza i izlaza robota, sinhronizaciju rada robota sa drugim mehatronskim sistemima,

startovanje i praćenje programa iz memorije robota (ogledni primeri) i slično. Za daljinski pristup industrijskom robotu potrebna su teorijska predznanja i praktična obuka za rad u lokalnoj laboratoriji, kako bi se izbeglo nestručno rukovanje robotom i havarijska oštećenja sistema. Testiranje teorijskih znanja vrši se preko LMS Edmodo, dok se osnovne veštine proveravaju u lokalnoj laboratoriji. Prilikom daljinskog pristupa robotskom sistemu posebnu pažnju treba posvetiti da se pomeranje zglobova vrši u dozvoljenim granicama, kako nebi došlo do zaustavljanja sistema. Poželjno je da se kod pisanja programa koriste unapred definisane koordinate kroz koje robot prolazi prilikom obavljanja definisanih zadataka.

4.7.3 Sistemi za upravljanje mehatronskih sistema na daljinu

Daljinski pristup mehatronskim sistemima za distribuciju i sortiranje vrši se pomoću Team Viewea i IP Web kamere. Parametre za pristup sistemu i vreme pristupa učenici dobijaju preko sistema za upravljanje učenjem Edmodo. Na slici 4.26 prikazano je korisničko okruženje za eksperimentalni pristup mehatronskim sistemima. Korisničko okruženje je potpuno isto kao da učenik radi u realnom laboratorijskom okruženju. Vizuelnim praćenjem preko Web kamere omogućava se praćenje stanja svih parametara, senzora i odziva aktuatora u realnom vremenu. Daljinskim pristupom omogućava se izbor automatskog ili ručnog načina rada, restartovanje sistema, startovanje sistema, privremeno zaustavljanje sistema i ponovno startovanje, zaustavljanje sistema i sinhronizaciju rada.

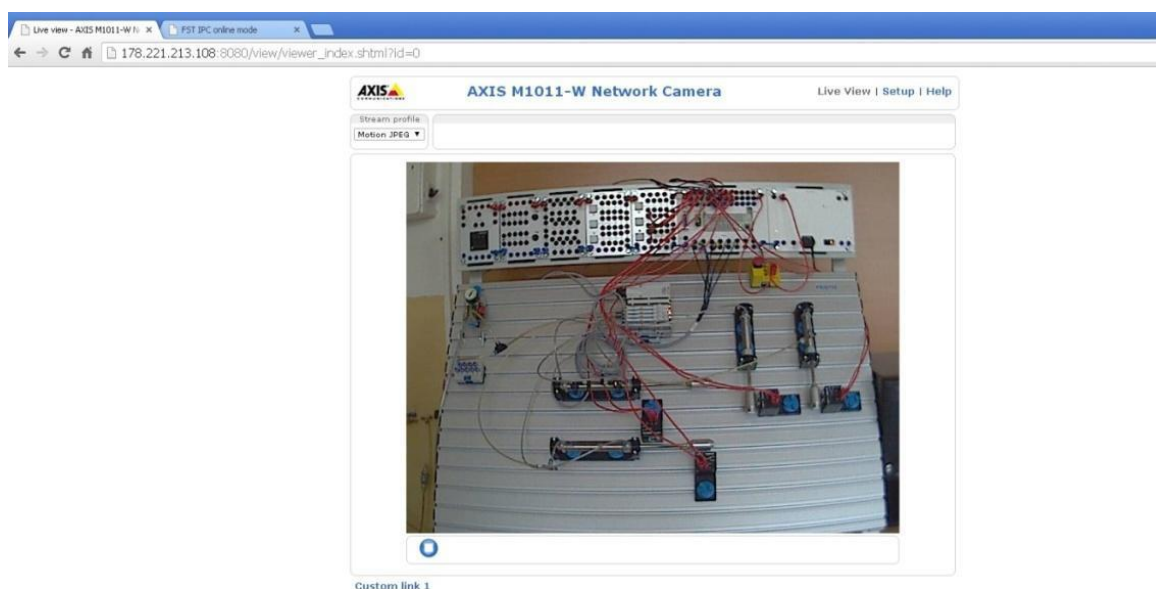


Slika 4.26: Praćenje i upravljanje didaktičkim sistemima pomoću Team Viewer-a i IP Web kamere

Programsko okruženje omogućava praćenje stanja ulaza i izlaza sistema u realnom vremenu. Pre puštanja sistema u rad, neophodno je restarovati sistem, kako bi svi aktuatori bili u početnom položaju. Praćenjem algoritma rada sistema, omogućen je rad sistema “*korak po korak*”. Na ovaj način mogu se aktivirati aktuatori i pratiti vrednosti svih parametara, stanja senzora, vrednosti internih brojača i tajmera. Sistem omogućava neograničen broj ponavljanja, samostalan rad i učenje po meri učenika.

4.7.4 Sistem za upravljanje elektropneumatskim sistemom na daljinu

Daljinski pristup modularnim sistemima vrši se pomoću Team Viewea i IP Web kamere. Parametre za pristup sistemu i vreme pristupa učenici dobijaju preko LMS Edmodo. Na slici 4.27 prikazano je korisničko okruženje za eksperimentalni pristup elektropneumatskim sistemima. Korisničko okruženje je potpuno isto kao da učenik radi u realnom laboratorijskom okruženju. Vizuelnim praćenjem preko web kamere omogućava se praćenje stanja svih parametara, senzora i odziva aktuatora u realnom vremenu.



Slika 4.27: Eksperimentalno učenje na daljinu na modularnom sistemu

Modularni sistem omogućava povezivanje različitih elektropneumatskih sistema, prema zadatim električnim i pneumatskim šemama. Svi senzori, mikroprekidači, elektromagnetni razvodnici, kontaktori, releji, frekventni regulatori i motori su vezani na ulaze/izlaze PLC-a Festo FC34. Sistem je serijskom vezom povezan na računar, a mrežnim kablom na lokalnu mrežu. Sistem je namenjen za obuku u laboratoriji i za daljinski eksperimentalni pristup. Kod daljinskog pristupa korisnik pomoću korisničkog imena i šifre pristupa sistemu, podešava parametre sistema, kreira nove programe, programira PLC i testira programe. Sistem omogućava vizuelno praćenje rada sistema “*korak po korak*”, praćenje vrednosti parametara, internih brojača i tajmera, stanje ulaznih senzora i aktuatora.

5 ORGANIZACIJA I REZULTATI ISTRAŽIVANJA

Praćenje efekta uvođenja i primene novih nastavnih metoda i savremenih tehnologija u obrazovni sistem je sporadična, tako da predloženi novi modeli učenja veoma često zbog svoje složenosti ne odgovaraju uzrastu učenika, nisu primenjivi na svim nivoima školovanja i ne dovode do unapređenja kvaliteta nastavnog procesa. U savremenom obrazovanju učenik se nalazi u centru obrazovnog procesa, i sve aktivnosti učenja usmerenu su na postizanje definisanih ishoda obrazovanja. U procesu praćenja primene novih tehnologija od neprocenjivog značaja je povratna informacija od učenika o kvalitetu nastavnog procesa, o efektima primene novih didaktičkih metoda, didaktičkih sistema i softverskih paketa. Dugoročnim praćenjem i analizom rezultata istraživanja, mogu se definisati odgovarajući modeli učenja koji povećavaju efikasnost sticanja znanja i praktičnih veština u formalnom i neformalnom obrazovanju.

U cilju potvrde i provere definisanih hipoteza doktorske disertacije, realizovana su istraživanja u pet srednjih stručnih škola Republike Srbije, počev od školske 2010/2011. godine. U doktorskoj disertaciji prikazana su tri istraživanja, sa različitim grupama u različitim vremenskim intervalima. Analiza postignutih rezultata realizovana u tri faze:

1. Analiza primene virtuelnih i realnih didaktičkih sistema u mehatronici u više škola tokom dve školske godine
2. Analiza primene daljinskog eksperimentalnog učenja u mehatronici
3. Analiza primene virtuelnih didaktičkih sistema i LMS u programiranju industrijskog robota

Osnovna ideja istraživanja je da se na osnovu efekata primene hibridnog modela učenja, utvrdi da li je povećana uspešnost učenika u odnosu na referentnu grupu, kod kojih je nastava realizovana na tradicionalan način. U istraživanjima su korišćeni sledeći statistički instrumenti: test procene znanja, test procene veština, upitnici za ispitivanje stavova učenika prema novom pristupu nastavi. Za statističku obradu i analizu podataka korišćena je "Bootstrap" metoda i programski paket Matlab.

5.1 Bootstrap metoda

Statistika je matematička disciplina koja se bavi prikupljanjem i analizom podataka u cilju donošenja odgovarajućih zaključaka i odluka. Za analizu rezultata istraživanja u različitim oblastima koriste se različite statističke metode, u zavisnosti od veličine populacije. U ovom radu korišćena je Bootstrap metoda, koja je pogodna za analizu kod manjih populacija. Ovu metodu je predložio 1979. godine američki statističar Bradley Efron.

Metoda Bootstrap na osnovu raspoloživih podataka iz nekog uzorka populacije, generiše veliki broj novih uzoraka, istog obima kao originalni uzorak, slučajnim izborom iz skupa podataka sa vraćanjem uzorka u skup. Za svaki od novih uzoraka izračunavaju se željeni statistički parametri i formira uzoračka raspodela. Za dobijanje uzoračke raspodele statistike koristi se Monte Karlo metoda. U ovoj metodi iz uzorka obima n , vrši se veliki broj slučajnih izvlačenja (B) i računaju potrebni statistički parametri. Funkcija raspodele F se određuje empirijski na osnovu velikog broja bootstrap generisanih uzoraka (B). Za bootstrap metodu karakteristične su dve verzije: parametarski bootstrap i neparametarski bootstrap. Kod parametarske bootstrap analize potrebno je određivanje vrednosti nepoznatih parametara raspodele unapred na osnovu raspoloživih podataka, a nakon toga generisanje novih bootstrap uzoraka iz date raspodele. U neparametarskoj bootstrap analizi, bootstrap uzorci se dobijaju metodom „izvlačenja sa vraćanjem“ iz originalne populacije, vrši se generisanje novih bootstrap uzoraka i određuju novi statistički parametri i raspodela. U ovom radu korišćena je neparametarska bootstrap metoda [82-83].

Ako se iz populacije slučajnim izborom formira podskup $\mathbf{x} = (x_1, x_2, \dots, x_n)$ – uzorak obima n , za neko obeležje populacije $\mathbf{X} = (X_1, X_2, \dots, X_n)$ sa raspedelom F . Kod statističke analize za sve elemente osnovnog skupa, koriste se različite transformacije slučajnog uzorka $Y = f(\mathbf{X}) = f(X_1, X_2, \dots, X_n)$. Cilj analize je određivanje njene funkcije raspodele G , na osnovu populacije \mathbf{X} .

Kod neparametarske bootstrap metode, funkcija F je nepoznata. Na osnovu uzorka $\mathbf{x} = (x_1, x_2, \dots, x_n)$, raspodela G ocenjivača $\hat{\theta} = \hat{\theta}(\mathbf{X})$ njenog nepoznatog parametra $\theta = \theta(F)$, određuje na osnovu empirijske formule raspodele:

$$F_n(\mathbf{x}|\mathbf{x}) = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n I(\{X_i < x\}), x \in \mathbf{R} \quad (5.1)$$

Za podskup $\mathbf{x} = (x_1, x_2, \dots, x_n)$, izvlačenjem sa vraćanjem dobija se B bootstap uzoraka $\mathbf{x}_j^* = (x_{1j}^*, x_{2j}^*, \dots, x_{nj}^*)$, $j=1, 2, \dots, B$. Za svaki bootstrap uzorak \mathbf{x}_j^* , izračunava se ocena

$\hat{\theta}^* = \hat{\theta}(\mathbf{x}_j^*)$, a zatim generiše funkcija raspodele $G_B(\hat{\theta}^*)$. Ovaj postupak može se predstaviti algoritmom:

```

 $\mathbf{x} = (x_1, x_2, \dots, x_n)$ 
kreiraj  $F_n(\cdot | \mathbf{x})$ 
for  $j=1:B$ 
  for  $i=1:n$ 
    izaberi  $x_{ij}^*$  iz  $F_n(\cdot | \mathbf{x})$ 
     $i++$ 
   $\mathbf{x}_j^* = (x_{1j}^*, x_{2j}^*, \dots, x_{nj}^*)$ 
   $\hat{\theta}_j^* = \hat{\theta}(\mathbf{x}_j^*)$ 
   $j++$ 
 $\hat{\theta}^* = (\hat{\theta}_1^*, \hat{\theta}_2^*, \dots, \hat{\theta}_B^*)$ 
kreirati  $G_B(\cdot | \hat{\theta}^*)$ 

```

Najznačajniji parametri su raspodela G , sredina $E(\hat{\theta})$ i varijansa $Var(\hat{\theta})$ ocenjivača $\hat{\theta} = \hat{\theta}(X)$ proizvoljnog parametra $\theta = \hat{\theta}(F)$ funkcije raspodle F . Podrazumeva se da se $E(\hat{\theta})$ i $Var(\hat{\theta})$ određuju u odnosu na originalnu raspodelu obeležja $X, F = F(\theta)$. Nepoznati parametar μ ocenjuje se sredinom uzorka:

$$\mu = \bar{X} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n X_i \quad (5.2)$$

dok se ocenjivač za σ^2 varijansa uzorka:

$$\sigma^2 = \bar{S}_n^2 = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (X_i^2 - \bar{X}_n^2) \quad (5.3)$$

Generisanje bootstrap ocena sredine i varijanse ocenjivača $\hat{\theta}$ proizvoljnog parametra θ , podrazumeva određivanje sredine i varijanse bootstrap uzorka $\hat{\theta}^* = (\hat{\theta}(\mathbf{x}_1^*), \hat{\theta}(\mathbf{x}_2^*), \dots, \hat{\theta}(\mathbf{x}_B^*))$:

$$\bar{\theta}^* = \frac{1}{B} \sum_{i=1}^B \hat{\theta}_i^* \quad (5.4)$$

$$\hat{\sigma}^{2*} = \frac{1}{B-1} \sum_{j=1}^B (\hat{\theta}_j^* - \bar{\theta}^*)^2 \quad (5.5)$$

Za veliki broj bootstrap uzoraka B , sredina i varijansa idealne bootstrap analize dobijaju oblik $\bar{\theta}^* \rightarrow E_x(\hat{\theta}^*)$ i $\hat{\sigma}^{2*} \rightarrow Var_x(\hat{\theta}^*)$, respektivno i određuju se na osnovu bootstrap raspodele formirane na skupu \mathbf{X} [75-76].

Veoma popularna metoda za dokazivanje teorema u matematici je „*deductio ad absurdum*“, koja se zasniva na postavljanju hipoteze i opovrgavanju postavljene hipoteze. U statistici se vrši testiranje hipoteza na osnovu parametara statističkih testova. Za

dokazivanje nekog tvrđenja postavljanja se nulta hipoteza H_0 , dok se suprotno tvrđenje definiše alternativnom hipotezom H_1 . Cilj testiranja je da se na osnovu rezultata eksperimenata ispita tačnost hipoteze H_0 . Za statistički test definiše se statistika S i skup vrednosti S za koje se odbacuje hipoteza H_0 , a prihvata alternativna hipoteza H_1 . Ako su vrednosti S van opsega odbacivanja, nulta hipoteza H_0 je tačna. Kod testiranja hipoteza moguće su dve vrste grešaka:

1. Greška prve vrste nastaje kada se istinita nulta hipoteza H_0 odbaci
2. Greška druge vrste nastaje kada se istinita nulta hipoteza H_0 odbaci

Verovatnoća greške prve vrste označava se $\alpha(\theta)$, verovatnoća greške druge vrste sa $\beta(\theta)$, gde je θ parametar ocenjivača. Maksimalna vrednost greške prve vrste je nivo značajnosti testa i obeležava se sa α , do j je c kritična vrednost testa. Kritična vrednost testa bira se tako da nivo značajnosti testa bude ispod određene vrednosti. Najčešće se biraju standardne vrednosti $\alpha=0.01$ (za nivo značajnosti testa od 1%) ili $\alpha=0.05$ (za nivo značajnosti testa od 5%). Za isti obim uzorka i istu statistiku testa, što je manji nivo značajnosti testa, to je teže odbaciti nultu hipotezu [77-78]. Vrednosti kritičnih vrednosti c date su u tabeli 5.1 za odabrane vrednosti nivoa značajnosti testa:

Tabela 5.1: Vrednosti kritičnih vrednosti statistike

<i>Nivo značajnosti testa</i>	<i>Kritična vrednost</i>
α	c
0.01	2.576
0.02	2.326
0.05	1.960
0.1	1.645
0.2	1.282

Testiranje hipoteza o matematičkom očekivanju normalne raspodele kada su nepoznati parametri μ i σ^2 vrši se sledećim postupkom:

Za dato μ_0 potrebno je testirati nultu hipotezu sa izabranim nivoom značajnosti testa α :

$$H_0 : \mu = \mu_0, \text{ protiv } H_1 : \mu \neq \mu_0$$

Vrši se izračunavanje srednje vrednosti i standardne devijacije uzorka. Zatim se vrši proračun statistike z prema formuli

$$z = \frac{\hat{\mu} - \mu_0}{s} \sqrt{n} \quad (5.6)$$

Za vrednost $|z| \geq c$, hipoteza H_0 se odbacuje, a alternativna hipoteza H_1 se prihvata. Ako je $-c \leq z \leq c$, nulta hipoteza H_0 se prihvata kao tačna.

5.2 Analiza primene virtuelnih i realnih didaktičkih sistema u mehatronici

Cilj prvog istraživanja usmeren je na proveru hipoteze o značaju primene realnih i virtuelnih didaktičkih sistema u nastavnom procesu srednjih stručnih škola obrazovnog profila Tehničar mehatronike. Istraživanje je vršeno uz pomoć profesora katedre za Automatiku, Elektronskog fakulteta iz Niša. Cilj ove saradnje je uspostavljanje kontinualnog procesa obrazovanja u oblasti elektrotehnike, razvoj savremenih nastavnih planova i programa, razvoj zajedničkih laboratorijskih vežbi uz primenu novih tehnologija u nastavi. Specifičnost i glavna prednost ovog istraživanja je to što su u anketi učestvovali učenici završne godine prve i druge generacije tehničara mehatronike iz različitih škola. U ovim školama postoji potpuno identična didaktička oprema, tako da su uslovi za sticanje znanja i veština u svim školama isti. Učenici su posle završetka modula, na osnovu svojih iskustava u radu sa realnim i virtuelnim sistemima, dali ocenu o efikasnosti primene definisanog hibridnog modela učenja.

Veoma često se u nastavi potencira primena softverskih paketa za simulaciju i modeliranje, pri čemu se zapostavlja korišćenje realnih didaktičkih sistema. Kao rezultat zapostavljanja sticanja praktičkih veština, školuju se kadrovi kojima je posle završenog školovanja potrebna dodatna obuka u radu sa industrijskim sistemima. Sa druge strane, korišćenje samo realnih didaktičkih sistema ograničen je malim brojem učenika i studenata koji se mogu istovremeno obučavati, kao i visokom cenom laboratorijske opreme. Razvojem Web laboratorija za daljinski pristup, stvaraju se uslovi za optimalno korišćenje skupe laboratorijske opreme, čime se cena obrazovanja smanjuje, povećava se broj polaznika u grupi koji se obučava istovremeno i omogućava se različita dinamika usvajanja znanja i veština, u zavisnosti od mogućnosti i želje učenika.

5.2.1 Organizacija istraživanja

Jedan od najznačajnijih stručnih modula na četvrtoj godini obrazovnog profila Tehničar mehatronike je Testiranje i dijagnostika mehatronskih sistema. Kurikulum ovog modula je veoma kompleksan i realizuje se kroz 155 časova vežbi i 30 časova praktične nastave. Za sticanje praktičnih znanja i veština predviđenih nastavnim planom i programom, potrebna su predznanja iz različitih naučnih disciplina: mehanika,

pneumatika, sistemi upravljanja, merni pretvarači, elektromotorni pogoni, mikrokontroleri, programibilni logički kontroleri i programiranje [79]. Realizacija ovog modula vrši se grupom od 12 učenika. U svakoj grupi formiraju se četiri tima, a svaki tim ima tri člana. Modul je podeljen u tri logičke celine. Za prvi deo modula planirano je 60 časova. U uvodnom delu vrši se upoznavanje učenika sa realnim mehatronskim sistemima u kabinetu mehatronike. Prvi mehatronski sistem na kome se vrši obuka je modularna stanica za distribuciju. Učenicima se demonstrira postupak povezivanja mehatronskog sistema sa računarom, instalacija potrebnog softvera i programiranje PLC-a stanice za distribuciju. Sledeći korak je puštanje sistema u rad i praćenje algoritama rada mehatronskog sistema. Posle demonstracije svaki od timova ponavlja postupak instalacije i puštanja sistema u rad. Svaki član tima samostalno realizuje predviđeni postupak rada. U kabinetu mehatronike nalazi se samo jedna stanica za distribuciju na kojoj je angažovan jedan tim učenika, dok se drugi timovi upoznaju sa električnim i pneumatskim šemama, karakteristikama senzora, aktuatora i upravljačkog PLC-a. Za ovu vežbu (V1) predviđeno je 5 školskih časova. Druga vežba (V2) je upoznavanje sa softverom za 3D modeliranje i simulaciju - Cosimir PLC. Ovaj program omogućava individualni rad učenika, upoznavanje karakteristika komponenti sistema, simulaciju rada mehatronskog sistema i praćenje stanja senzora i aktuatora na virtuelnom modelu. Korišćenjem virtuelnih modela omogućava se da svaki polaznik samostalno željenom dinamikom na računaru usvaja predviđena znanja i veštine. U trećoj vežbi profesor simulira različite kvarove na virtuelnom modelu stanice za distribuciju, a učenici vrše testiranje virtuelnih modela, detektuju kvarove i otklanjaju uzroke kvarova. Kada polaznik u potpunosti ovlada softverskim paketima za simulaciju, spreman je da bezbedno koristi realne mehatronske sisteme. Za svaku od vežbi predviđeno je 5 školskih časova. Četvrta vežba predviđa rad na realnom sistemu za distribuciju, detekciju električnih, mehaničkih i pneumatskih komponenti, montažu i demontažu, povezivanje električne i pneumatske instalacije. Peta vežba predviđa detekciju i otklanjanje mehaničkih kvarova i kvarova na pneumatskoj instalaciji i komponentama. Šesta vežba predviđa detekciju i otklanjanje kvarova na električnim i elektronskim komponentama. Za svaku od vežbi učenici pripremaju izveštaje u elektronskom obliku. Za mehatronski sistem MPS Stanica za sortiranje obuka se realizuje na isti način kao kod stanicu za distribuciju (Vežba 7 - Vežba 12).

Druga logička celina modula predstavlja kurs programiranja i testiranja industrijskog robota na MPS robotskoj stanici. Za ovaj deo planirano je 60 časova (V13-V24). U prvim vežbama vrši se upoznavanje osnovnih karakteristika industrijskog robota

Mitsubishi RV2AJ i vrši se demonstracija načina upravljanja. Zatim sledi obuka za programiranja robota u programskom jeziku Melfa Basic IV, upoznavanje sa softverom za 3D modeliranje i simulaciju - Cosimir Robotics, pisanje i testiranje programa u virtuelnom okruženju i na kraju simulacija i detekcija greške u 3D okruženju (V14-V17). U vežbama V18-V22 vrši se programiranje i testiranje programa u programskom okruženju Robot Explorer, prenošenje programa u kontroler robota i praćenje rada industrijskog robota. U vežbama V23 i V24 vrši se simulacija kvarova na industrijskom robotu, detekcija i otklanjanje kvarova.

U trećoj logičkoj celini (35 časova) vrši se sinhronizacija rada robotske stanice, stanice za distribuciju i stanice za sortiranje (V25), simulacija i detekcija kvarova na formiranom tehnološkom procesu (V26-V27), umrežavanje mehatronskih sistema u LAN (V28), praćenje parametara sistema i upravljanje mehatronskim sistemima kroz LAN i WAN mrežu (V29) i kreiranje SCADA sistema (V30 i V31).

U cilju verifikacije predložene metode nastave, sprovedena je dobrovoljna anonimna anketa u pet stručnih škola, koje imaju potpuno identične uslove za realizaciju nastavnog procesa u obrazovnom profilu tehničar mehatronike. Ciljna grupa su učenici četvrtog razreda, prve i druge generacije obrazovnog profila tehničar mehatronike-ogled. U školskoj 2010/2011 godini, u istraživanje je uključeno 84 učenika (grupa A), dok je u školskoj 2011/2012 godini uključeno 102 učenika (grupa B). Svaka škola u kabinetima mehatronike poseduje realne i virtuelne didaktičke sisteme, softverske pakete za modeliranje i trodimenzionalnu simulaciju mehatronskih sistema. Cilj ovog istraživanja je dobijanje relevantnih podatke iz ugla učenika, o efikasnosti primene virtuelnih i realnih didaktičkih sistema u nastavi mehatronike u srednjem stručnom obrazovanju. Ocenjivanje je vršeno prema skali koja je prikazana u tabeli 5.2.

Tabela 5.2: Skala ocenjivanja ankete

	Ocena
Ne slažem se u potpunosti	1
Ne slažem se	2
Delimično se slažem	3
Slažem se	4
Slažem se u potpunosti	5

5.2.2 Analiza rezultata istraživanja

Za istraživanje stavova učenika korišćen je upitnik koji sadrži 10 izjava o značaju primene virtuelnih i realnih didaktičkih sistema. Upitnik i uporedni prikaz srednje ocene u školskim godinama 2010/2011. i 2011/2012. prikazan je u tabeli 5.3.

Tabela 5.3: Uporedni prikaz srednje ocene upitnika u školskim 2010/2011. i 2011/2012. godinama

	Izjava	Srednja ocena	
		2010/ 2011	2011/ 2012
C1	Korišćenje softvera za modeliranje i simulaciju potrebno je za uspešno usvajanje znanja i veština	3.52	3.93
C2	Softver za simulaciju Cosimir PLC i Cosimir Robotics su interesantni i izazovni za učenike	3.31	4.22
C3	Softver za simulaciju Cosimir PLC i Cosimir Robotics su pogodni za prikaz principa rada realnih mehatronskih sistema	3.62	4.17
C4	Softver za simulaciju Cosimir PLC i Cosimir Robotics su pogodni za simulaciju i detekciju kvara na mehatronskim sistemima	3.24	3.19
C5	Softver za simulaciju Cosimir PLC i Cosimir Robotics ne mogu u potpunosti da zamene realne didaktičke sisteme	3.58	3.54
C6	Softver za simulaciju Cosimir PLC i Cosimir Robotics u kombinaciji sa realnim didaktičkim sistemima predstavljaju najbolji pristup u procesu učenja	3.51	3.96
C7	Softver za simulaciju Cosimir PLC i Cosimir Robotics su laki za učenje	3.27	3.95
C8	Obuka na realnim sistemima je lakša, ako je pre toga korišćen softver za 3D modeliranje	3.20	3.96
C9	Softver za simulaciju smanjuje mogućnost oštećenja realnih mehatronskih sistema	3.46	3.54
C10	Softver za simulaciju smanjuje strah kod učenika od složenih realnih mehatronskih sistema	3.08	3.44

Rezultati ankete u školskoj 2010/2011. godini prikazani su tabeli 5.4, a rezultati za školsku 2011/2012 prikazani su u tabeli 5.5.

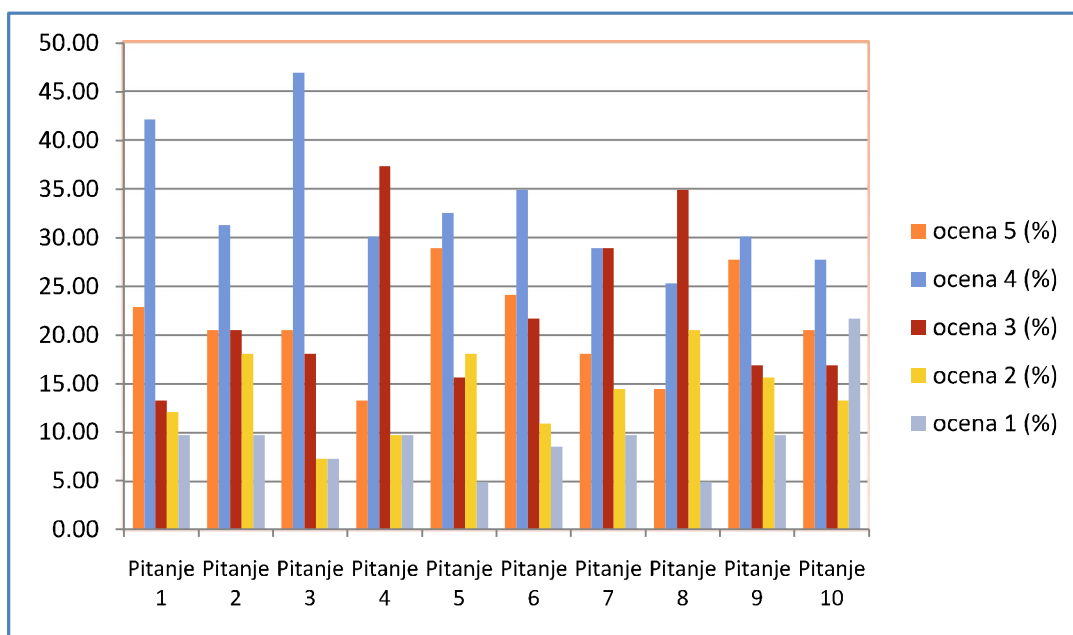
Tabela 5.4: Raspodela rezultata istraživanja u školskoj 2010/2011 godini

Broj pitanja	Ocena 5	Procenat 5(%)	Ocena 4	Procenat 4(%)	Ocena 3	Procenat 3(%)	Ocena 2	Procenat 2(%)	Ocena 1	Procenat 1(%)
C1	19	22.89	35	42.17	11	13.25	10	12.05	8	9.64
C2	17	20.48	26	31.33	17	20.48	15	18.07	8	9.64
C3	17	20.48	39	46.99	15	18.07	6	7.23	6	7.23
C4	11	13.25	25	30.12	31	37.35	8	9.64	8	9.64
C5	24	28.92	27	32.53	13	15.66	15	18.07	4	4.82
C6	20	24.10	29	34.94	18	21.69	9	10.84	7	8.43
C7	15	18.07	24	28.92	24	28.92	12	14.46	8	9.64
C8	12	14.46	21	25.30	29	34.94	17	20.48	4	4.82
C9	23	27.71	25	30.12	14	16.87	13	15.66	8	9.64
C10	17	20.48	23	27.71	14	16.87	11	13.25	18	21.69

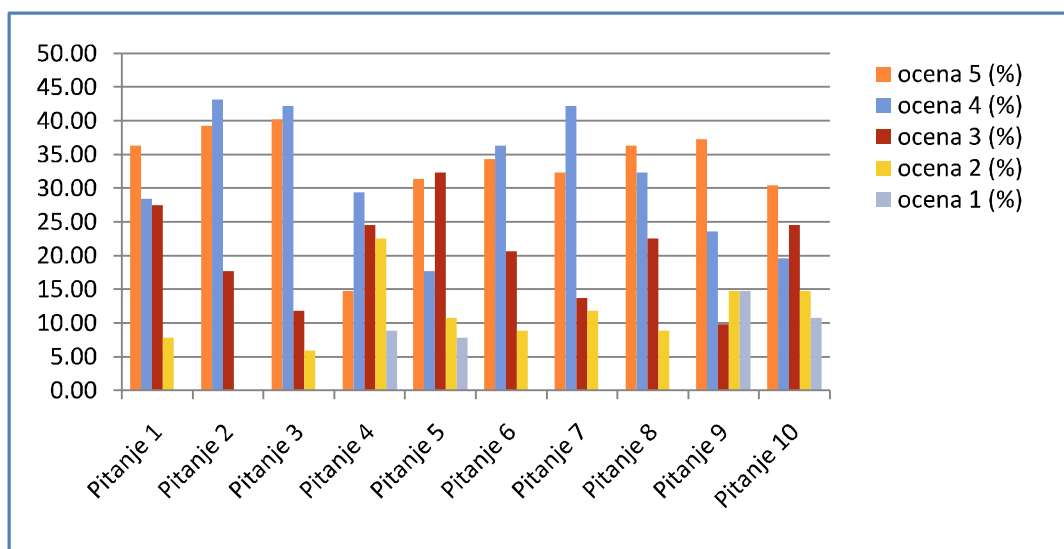
Tabela 5.5: Raspodela rezultata istraživanja u školskoj 2011/2012 godini

Broj pitanja	Ocena	Procenat	Ocena	Procenat	Ocena	Procenat	Ocena	Procenat	Ocena	Procenat
	5	5(%)	4	4(%)	3	3(%)	2	2(%)	1	1(%)
C1	37	36.27	29	28.43	28	27.45	8	7.84	0	0.00
C2	40	39.22	44	43.14	18	17.65	0	0.00	0	0.00
C3	41	40.20	43	42.16	12	11.76	6	5.88	0	0.00
C4	15	14.71	30	29.41	25	24.51	23	22.55	9	8.82
C5	32	31.37	18	17.65	33	32.35	11	10.78	8	7.84
C6	35	34.31	37	36.27	21	20.59	9	8.82	0	0.00
C7	33	32.35	43	42.16	14	13.73	12	11.76	0	0.00
C8	37	36.27	33	32.35	23	22.55	9	8.82	0	0.00
C9	38	37.25	24	23.53	10	9.80	15	14.71	15	14.71
C10	31	30.39	20	19.61	25	24.51	15	14.71	11	10.78

Grafička raspodela ocena ankete u školskoj 2010/2011. godini prikazana je na slici 5.1, dok je grafička raspodela ocena ankete u školskoj 2011/2012. godini prikazana na slici 5.2.



Slika 5.1: Procentualni prikaz raspodele ocena u školskoj 2010/2011 godini



Slika 5.2: Procentualni prikaz raspodele ocena u školskoj 2011/2012 godini

Za analizu podataka istraživanja korišćena je “bootstrap” statistička metoda. Na osnovu originalnog uzorka $n_1=84$ za školsku 2010/2011.g., i $n_2=102$ za školsku 2011/2012.g, primenom bootstrap metode u programskom paketu Matlab generisano 1000 bootstrap uzoraka ($B=1000$). Za originalni skup i generisani bootstrap uzorak, izračunate su karakteristične vrednosti statističke funkcije raspodele: aritmetička sredina, varijansa i standardna devijacija. Vrednosti ovih parametara prikazane su u tabelama 5.6 i 5.7. za školske 2010/2011.g. i 2011/2012.g., respektivno [80].

Tabela 5.6: Bootstrap ocene sredine, varijansei standardne deviacije ocenjivača 2010/2011

Pitanje	\bar{X}	$\hat{\theta}^*$	$Var(\bar{X})$	$Var(\hat{\theta})$	$\sqrt{\sigma^2}$	$\sqrt{\hat{s}_n^2}$	z
C1	3.5529	3.5519	1.5178	1.5011	1.2320	1.2224	2.7359
C2	3.3412	3.3398	1.5660	1.5451	1.2514	1.2411	3.9161
C3	3.6706	3.6655	1.1856	1.1652	1.0889	1.0754	2.6311
C4	3.6706	3.6701	1.1856	1.1694	1.0889	1.0774	2.5856
C5	3.6000	3.5928	1.4635	1.4444	1.2098	1.1998	2.5838
C6	3.5529	3.5528	1.4237	1.4089	1.1932	1.1891	2.9091
C7	3.5529	3.5519	1.5178	1.5011	1.2320	1.2224	2.7359
C8	3.2000	3.1962	1.1718	1.1510	1.0825	1.0706	6.4005
C9	3.5176	3.5129	1.6615	1.6349	1.2890	1.2763	2.7307
C10	3.1059	3.1058	2.0947	2.0637	1.4473	1.4351	3.9713

Tabela 5.7: Bootstrap ocene sredine, varijanse standardne deviacije ocenjivača 2011/2012

Pitanje	\bar{X}	$\hat{\theta}^*$	$Var(\bar{X})$	$Var(\hat{\theta})$	$\sqrt{\sigma^2}$	$\sqrt{\bar{s}_n^2}$	z
C1	3.9314	3.9301	0.9463	0.9358	0.9728	0.9662	0.6846
C2	4.2157	4.2149	0.5221	0.5169	0.7226	0.7189	3.8104
C3	4.1667	4.1612	0.7271	0.7217	0.8527	0.8493	2.0471
C4	3.1863	3.1881	1.4261	1.3972	1.1942	1.1820	5.3258
C5	3.5329	3.5374	1.5622	1.5472	1.2499	1.2439	2.7403
C6	3.9608	3.9633	0.9004	0.8866	0.9489	0.9416	0.3794
C7	3.9510	3.9510	0.9290	0.9155	0.9638	0.9568	0.4905
C8	3.9608	3.9599	0.9396	0.9238	0.9693	0.9611	0.3978
C9	3.5392	3.5494	2.1700	2.1348	1.4731	1.1611	1.9345
C10	3.4412	3.4422	1.7956	1.7618	1.3400	1.3273	2.9018

Na osnovu upitnika definišu se dve glavne hipoteze. Prva hipoteza H_{01} definiše se na osnovu pitanja C6:

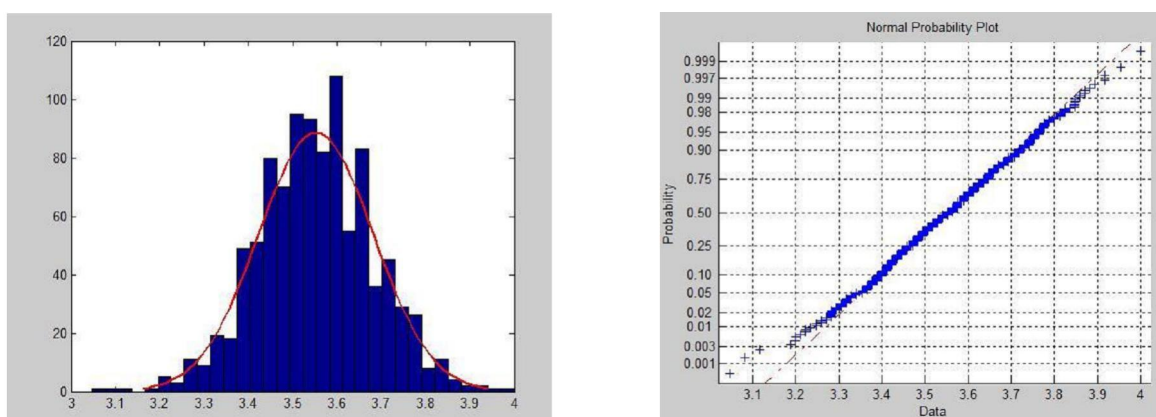
H_{01} : Softver za simulaciju Cosimir PLC i Cosimir Robotics u kombinaciji sa realnim didaktičkim sistemima predstavljaju najbolji pristup u procesu učenja.

Alternativna hipoteza je H_{11} : Softver za simulaciju Cosimir PLC i Cosimir Robotics u kombinaciji sa realnim didaktičkim sistemima ne predstavljaju najbolji pristup u procesu učenja.

Za nivo značajnosti testa $\alpha = 0.05$ i $\mu_0 = 4$, vrednost parametra iz tabele 5.7, $z = 0.3794$ nalazi se u opsegu $[-1.96, 1.96]$, tako da se prihvata prva hipoteza:

H_{01} : Softver za simulaciju Cosimir PLC i Cosimir Robotics u kombinaciji sa realnim didaktičkim sistemima predstavljaju najbolji pristup u procesu učenja.

Na osnovu dobijenih vrednosti generisanog skupa, kreiran je histogram raspodele verovatnoće i normalizovani oblik raspodele hipoteze H_{01} i prikazan je na slici 5.3.



Slika 5.3: Histogram hipoteze H_{01} bootstrap ocena nepoznatog parametra θ i provera normalnosti skupa

Druga hipoteza H_{02} definiše se na osnovu pitanja C8:

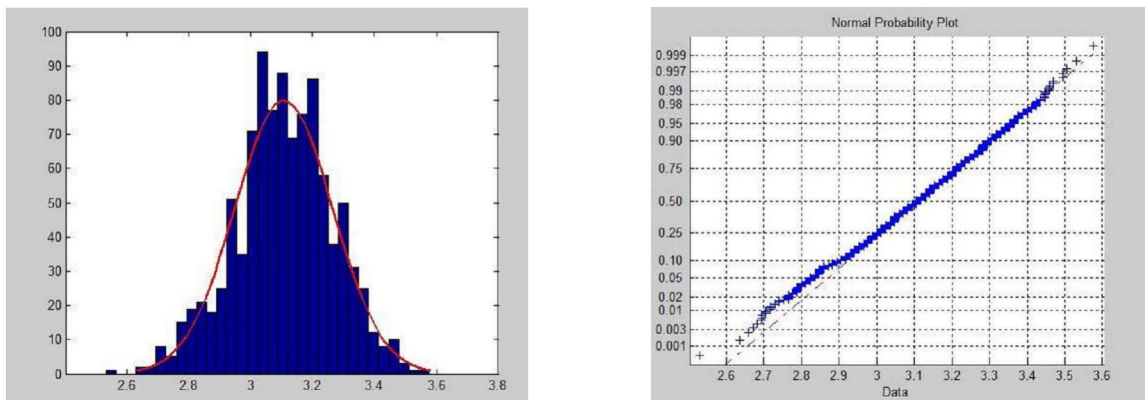
H_{02} : Obuka na realnim sistemima je lakša, ako je pre toga korišćen softver za 3D modeliranje i simulaciju.

Alternativna hipoteza je H_{12} : Obuka na realnim sistemima nije lakša, ako je pre toga korišćen softver za 3D modeliranje i simulaciju.

Za nivo značajnosti testa $\alpha = 0.05$ i $\mu_0 = 4$, vrednost parametra iz tabele 5.7, $z = 0.3978$ nalazi se u opsegu $[-1.96, 1.96]$, tako da se prihvata prva hipoteza:

H_{02} : Obuka na realnim sistemima je lakša, ako je pre toga korišćen softver za 3D modeliranje i simulaciju.

Na osnovu dobijenih vrednosti generisanog skupa, kreiran je histogram raspodele verovatnoće i normalizovani oblik raspodele hipoteze H_{02} i prikazan je na slici 5.4.



Slika 5.4: Histogram hipoteza H_{02} bootstrap ocena nepoznatog parametra θ i provera normalnosti skupa

Histogrami i grafički testovi normalnosti raspodele jasno ukazuju na saglasnost podataka sa funkcijom gustine normalne raspodele, pri čemu su bootstrap ocene njenih parametara i ovde bliže uzoračkim sredinama i uzoračkim varijansama. Na osnovu rezultata u tabeli i prikazanih histograma, definišu se sledeći zaključci:

- Histogram prikazuje raspodelu verovatnoće generisanih bootstrap replikacija, koji je normalnog oblika, simetrično raspodeljen oko srednje vrednosti
- Vrednosti varijansi su približno jednaki vrednosti varijanse normalne raspodele $\bar{s}_n^2 = 1$
- Bootstrap ocene sredine $\hat{\theta}$ se koncentrišu oko odgovarajućih vrednosti originalnog uzorka \bar{X}

Za potpunu analizu istraživanja, neophodno je uzeti u obzir uspeh učenika tokom školovanja. Na maturskom ispitu učenici polažu Test provere stručno teotrijskih znanja i

Praktičan maturalni rad. Test provere teorijskih znanja sadrži pitanja i zadatke iz pet različitih modula: *Hidrauličke i pneumatske komponente, Mašinski elementi, Električni pogon i oprema u mehatronici, Sistemi upravljanja u mehatronici i Programibilni logički kontroleri* [81]. Testiranje učenika u okviru ispita za proveru stručno-teorijskih znanja obavlja se istovremeno u svim školama, u kojima se realizuje maturalni ispit za ovaj obrazovni profil. Prosečna ocena na testu znanja u školskoj 2010/2011.godini je 3.28. Maturalni praktičan rad sastoji se iz dva posebna radna zadatka, koji imaju za cilj proveru definisanih stručnih kompetencija. Prvi radni zadatak proverava prvu stručnu kompetenciju tehničara mehatronike: „Montaža mehatronskog sistema, postavljanje parametara, testiranje rada i praćenje radnog ciklusa mehatronskog sistema“. Drugi radni zadatak proverava drugu stručnu kompetenciju tehničara mehatronike: „Dijagnostika i otklanjanje kvara na mehatronskom sistemu“.

Ocenjivanje na praktičnom delu maturalnog ispita vrši stručna komisija na osnovu definisanih kompetencija [82]. U svom sastavu komisija ima dva nastavnika stručnih modula i jednog eksternog člana iz redova poslodavaca – ekspert iz oblasti mehatronike, koga imenuje Unija poslodavaca Srbije. Prosečna ocena na praktičnom delu ispita, u školskoj 2010/2011.godini je 4.60, dok je prosečna ocena na teorijskom i praktičnom ispitu je 3.62. Na osnovu iskustva prilikom realizacije nastave, u većini slučajeva učenici sa boljim uspehom imaju širi spektar interesovanja, odlična znanja iz računarstva i programiranja i veoma lako usvajaju i primenjuju nove metode i nova nastavna sredstva. Učenici koji imaju niži nivo znanja, uglavnom se fokusiraju na rad sa realnim industrijskim sistemima i sa poteškoćama prihvataju virtuelne simulacione modele.

Na osnovu dobijenih podataka može se izvršiti uporedna analizu grupe A (2011) i grupe B (2012). Na osnovu analize podataka mogu se dati zaključci:

1. Učenici obe grupe (65%) ističu da korišćenje simulacionih modela u nastavnom procesu ima veoma važnu ulogu. Samo manji broj učenika iz grupe B (8%) ne prihvataju korišćenje virtuelnih modela, što je mnogo manje u odnosu na prethodnu generaciju (grupa A - 22%). Ovakav rezultat ukazuje na to učenici mlađe grupe (B) poseduju mnogo veća znanja iz informacionih tehnologija, i oni sa zadovoljstvom koriste virtuelne didaktičke sisteme.
2. U grupi B, 82% učenika smatra da korišćenje virtuelnih simulacionih modela povećava motivaciju za učenje. Ovako visok procenat, u odnosu na prvu grupu (A), može se objasniti činjenicom da na ovaj način učenici mogu samostalno da

stiču znanja i veštine željenom dinamikom. Ovde treba uzeti u obzir i činjenicu da je nastavni proces sa drugom grupom na višem nivou, jer nastavnici primenjuju pozitivna iskustva iz prethodne godine.

3. Pored toga, obe grupe učenika smatraju da je korišćenje virtuelnih modela u testiranju i dijagnostici mehatronskih sistema neophodno (44%). Ovaj relativno mali procenat ukazuje na to da su simulacioni modeli složeni, te zahtevaju veći broj časova vežbi, na kojima bi upoznati sa svim mogućnostima primene.
4. Učenici iz grupe B u znatno većem procentu u odnosu na grupu A (75% : 47%) tvrde da je primenom virtuelnih modela proces učenja lakši i brži, pa je njihova aktivnost u nastavnom procesu mnogo veća (69% : 40%), što ukazuje da druga generacija učenika mnogo lakše prihvata nove softverske alate i da su spremni za korišćenje novih tehnologija u procesu sticanja novih znanja.
5. Visok procenat učenika iz grupe A (61%) smatra da virtuelni modeli ne mogu da zamene realne didaktičke sisteme u nastavnom procesu, dok je ovaj procenat kod grupe B značajno manji (49%). Ovakv odnos prema primeni virtuelnih modela nam daje povratnu informaciju od učenika, da je primena ovih modela u nastavnom procesu značajna u hibridnom modelu učenja, ali da virtuelni modeli ne mogu da potisnu korišćenje realnih didaktičkih sistema.

Potvrdu dobrog pristupa nastavi predloženog hibridnog modela učenja daje visoki procenat učenika obe grupe (60% -70%) koji smatraju da je neophodno zajedničko korišćenje virtuelnih i realnih didaktičkih sistema. Ovaj procenat je 10% veći u grupi B, što potvrđuje da je za novije generacije učenika najprihvatljiviji model učenja za sticanje znanja i veština hibridni model učenja. On vrši sintezu teorijskih znanja sa virtuelnim simulacionim modelima i proverava teorijskih znanja na realnim didaktičkim sistemima.

1. U realizaciji nastave u početnoj fazi učenici su koristili virtuelne simulacione modele. Za 40% učenika usvajanje znanja i veština na industrijskim sistemima je mnogo lakša, 55% učenika prihvata ovo trvđenje sa rezervom, dok samo 5% učenika smatra da korišćenje virtuelnih modela nije potrebno.
2. Cena realnih didaktičkih sistema je dosta visoka, pa bi oštećenje sistema dovelo do velikih finansijskih troškova i zastoja u nastavnom procesu. Korišćenjem virtuelnih modela smanjuje se mogućnost od izazivanja kvarova na sistemima. Ovakav stav ima 57,83% učenika, dok 9,62% smatra da tvrdnja nije tačna.
3. Imajući u vidu da su učenici u toku školovanja u većoj meri koristili realne industrijske komponente i sisteme, oni su stekli određena znanja i veštine, tako da

kod malog broja učenika postoji strah prilikom rada sa industrijskim sistemima. Približno polovina učenika smatra da korišćenje virtuelnih modela smanjuje strah kod učenika, dok 21% se apsolutno protivi ovoj konstataciji.

4. Mora se naglasiti da mnogi drugi faktori utiču na rezultate istraživanja, koji nisu bili uključeni u process istraživanja. Ovi faktori se odnose na individualne sposobnosti učenika kao što su inteligencija, psihološke sposobnosti učenja, stepen razumevanja, uticaj sredine i slično.

Jedan od parametara koji ukazuje na efikasnost i značaj primene hibridnog modela učenja u mehatronici je analiza uspeha učenika na maturalnom ispitu. Tokom četvorogodišnjeg školovanja, učenici u svih šest škola su imali skoro identične materijalne uslove za obrazovanje. Od ukupno 140 učenika, uslov za polaganje maturalnog ispita steklo je 129 učenika. Polaganju maturalnog ispita pristupilo je 128 učenika, od kojih je 125 uspešno položilo maturalni ispit. Test za proveru stručno-teorijskih znanja nije položio jedan učenik, a praktički deo maturalnog ispita nisu položila dva učenika. U tabeli 5.8 prikazan je uspeh učenika na maturalnom ispitu u praćenim školama.

Tabela 5.8: Prosečna ocena na maturalnom ispitu 2010/2011 po školama

Maturalni ispit /Škole	Zaječar	Niš	Pančevo	Pirot	Rakovica	Trstenik
<i>Srpski jezik i književnost</i>	4.90	3.38	3.09	3.92	3.60	4.06
<i>Test za proveru stručno-teorijskih znanja</i>	2.90	4.67	3.05	3.17	3.65	4.00
<i>Praktički deo maturalnog ispita</i>	4.62	4.88	4.85	4.29	3.40	4.65
<i>Prosečna oceana na maturalnom ispitu</i>	4.14	4.31	3.66	3.79	3.55	4.24

Za ovo istraživanje najznačajniji su rezultati iz stručnog teorijskog i praktičnog dela maturalnog ispita. Prosečna ocena na maturalnom jeziku iz Srpskog jezika i književnosti je 3.82, na testu za proveru stručno teorijskih znanja je 3.57, dok je prosečna ocena na praktičnom delu maturalnog ispita 4.44. Evidentna je velika razlika u prosečnim ocenama provere praktičnih veština i teorijskih znanja. Ovaj rezultat ukazuje na veliki značaj primene virtuelnih i realnih didaktičkih sistema u procesu sticanja praktičnih znanja i veština. Inovativni pristup u nastavi, koji pre obuke na realnim modelima koristi odgovarajuće virtuelne modele daje izuzetne rezultate u primeni na nivou srednjeg stručnog obrazovanja. Ovaj model uz odgovarajuće dopune pogodan je za primenu i na višim nivoima stručnog obrazovanja. U tabeli 5.9. prikazane su srednje vrednosti ocenjivača i standardne devijacije tokom dve školske godine.

Tabela 5.9: Uporedni prikaz sredine i standardne devijacije školske 2010/2011 i 2011/2012

Pitanje	C1	C2	C3	C4	C5	C6	C7	C8	C9	C10
\bar{X} 2011	3.55	3.34	3.67	3.67	3.60	3.55	3.55	3.20	3.51	3.10
\bar{X} 2012	3.93	4.22	4.17	3.19	3.53	3.96	3.95	3.96	3.54	3.44
$\sqrt{\sigma^2}$ 2011	1.23	1.25	1.09	1.09	1.21	1.19	1.23	1.08	1.29	1.45
$\sqrt{\sigma^2}$ 2012	0.97	0.72	0.85	1.19	1.25	0.95	0.96	0.97	1.47	1.34

Poređenjem srednje ocene, evidentno je da novije generacije lakše prihvataju uvođenje novih softverskih modela u nastavi, u većoj meri koriste virtuelene modele za modeliranje, simulaciju i programiranje mehatronskih sistema. Standardna devijacija kod druge generacije učenika je znatno manja, što ukazuje na to da je sve manji broj učenika koji ne prihvata primenu virtuelnih modela za simulaciju u nastavnom procesu. Imajući u vidu rezultate istraživanja može se reći da ogromna većina učenika koristi virtuelne modele u kombinaciji sa realnim didaktičkim sistemima. Primena simulacionih modela ima poseban značaj u hibridnom modelu učenja, odnosno u kombinaciji sa obukom na realnim didaktičkim sistema i industrijskim sistemima. Značaj primene virtuelnog softvera za simulaciju i modeliranje mehatronskih sistema je u tome što:

- Omogućava usvajanje znanja i veština na moderan i zanimljiv način
- Omogućava samostalno učenje željenom dinamikom
- Omogućava veliki broj ponavljanja istih postupaka
- Povećava motivaciju učenika i ubrzava transfer znanja i veština
- Smanjuje cenu obrazovanja
- Priprema učenike za rad sa realnim komponentama i sistemima
- Smanjuje strah od korišćenja realnih komponenti i sistema
- Omogućava rad sa velikim brojem različitih virtuelnih didaktičkih sistema

Softver za virtuelno učenje i pored svojih odličnih karakteristika, ne predstavlja zamenu za realne didaktičke sisteme, već predstavlja snažnu softversku platformu, koja olakšava i ubrzava proces usvajanja znanja i veština. Fuzija teorijskih znanja, praktičnih veština i virtuelnih 3D modela, predstavlja model za obrazovanje u oblasti mehatronike koji je dao odlične rezultate u oglednom profilu tehničar mehatronike.

Veliki problem kod realizacije praktičnih vežbi iz stručnih modula predstavlja odsustvovanje učenika sa nastave. Prosečan broj izostanaka u završnim razredima je oko 15% od ukupnog broja časova. Kod velikog broja učenika procenat opravdanog izostajanja sa nastave je veći i od 30%. Razlozi izostajanja su različiti: bolest učenika, takmičenja, kulturno-umetničke aktivnosti, sportske aktivnosti i slično. Da bi ovi učenici stekli uslov za polaganje ispita iz stručnih modula, u obavezi su da realizuju laboratorijske vežbe u dodatnim terminima. Kako su kabineti u toku radnog vremena zauzeti, veoma je teško obezbediti veći broj termina za nadoknadu. Jedno od rešenja predstavlja formiranje Web laboratorije za elektronsko učenje na daljinu i praktičnu realizaciju laboratorijskih vežbi preko Interneta. Pristup laboratoriskim uređajima i sistemima je definisan u terminima posle redovne nastave i vikendom.

Stvarni i virtuelni svet mehatronike mogu se kombinovati i prilagođavati zahtevima procesa obrazovanja. Simulacije procesa mogu da se koriste da bi upoznale učenike i studente na zanimljiv i moderan način sa svim komponentama i uređajima savremenih mehatronskih sistema. Pored ove uloge značajnu funkciju imaju kod modeliranja i testiranja sistema, gde je rad na realnim sistemima opasan ili veoma skup. Na ovaj način obuka je moguća bez posedovanja skupih didaktičkih sistema koristeći virtuelno okruženje za modeliranje i testiranje realnih sistema. Učenici na računarima mogu samostalno da kreiraju i testiraju željene modele, a da pri tome samostalno analiziraju rezultate svog rada. Rezultati programiranja, testiranja i dijagnostike učenika su odmah vidljivi, što daje veliku stimulaciju za dalje učenje i istraživanje. Opasnost od povrede učenika i oštećenja sistema u virtuelnom okruženju ne postoji, mogu se simulirati, testirati i dijagnostikovati različiti modeli realnih sistema. Presentovani model predstavlja otvoren sistem, koji se može proširiti novim softverskim alatima i realnim didaktičkim sistemima.

5.3 Analiza primene eksperimentalnog učenja na daljinu u mehatronici

Druga faza u istraživanju predstavlja analiza primene elektronskog učenja i eksperimentalnog učenja na daljinu u srednjem stručnom obrazovanju. Tokom školske 2013/2014. godine učenici trećeg i četvrtog razreda obrazovnih profila tehničar mehatronike i elektrotehničar računara, realizovali su set laboratorijskih vežbi u Web laboratoriji mehatronike Tehničke škole Trstenik. Daljinski pristup laboratoriji ostvaren je kroz LAN i WAN mrežu, a praćenje rada sistema omogućeno preko IP Web kamera. Po

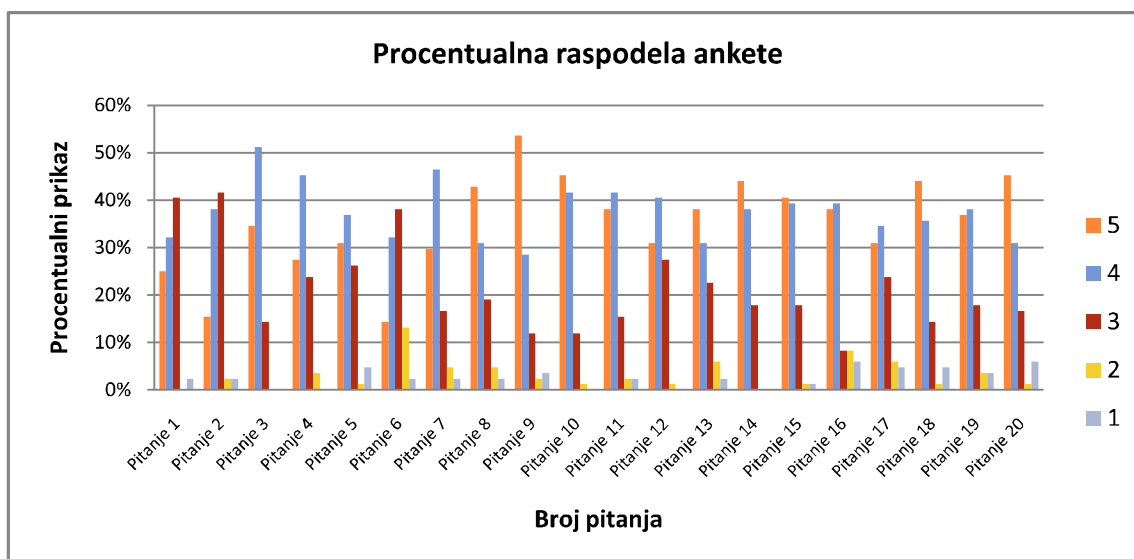
završetku vežbi za daljinsko upravljanje mehatronskim sistema, realizovano je istraživanje koje je obuhvatilo 84 učenika.

Istraživanje stavova učenika realizovano je kroz dve anonimne ankete sa učenicima koji su deo laboratorijskih vežbi realizovali daljinskim pristupom Web laboratoriji. Cilj istraživanja je ispitivanje stavova učenika o značaju primene daljinskog eksperimentalnog učenja [83]. U tabeli 5.10 prikazan upitnik istraživanja o značaju primene Web laboratorije i raspodela ocena po pitanjima. Ocenjivanje je vršeno po sledećoj skali: 5 - *U potpunosti se slažem*, 4 - *Slažem se*, 3 - *Nisam siguran*, 2 - *Ne slažem se*, 1 - *Ne slažem se u potpunosti*.

Tabela 5.10: Upitnik i raspodela ocena istraživanja o značaju primene Web laboratorije

	Izjava	Prikaz ocena (%)				
		5	4	3	2	1
1	Daljinski pristup Web laboratoriji je lak	25	32	40	0	2
2	Pristup softveru za programiranje laboratorijskih mehatronskih sistema je jednostavan	15	38	42	2	2
3	Pristup IP Web kameri je jednostavan i ona omogućava praćenje rada mehatronskih sistema u realnom vremenu	35	51	14	0	0
4	Lako se mogu izabrati i aktivirati postojeći programi na mehatronskim sistemima	27	45	24	4	0
5	Lako se mogu aktivirati željeni ulazi sistema i pratiti odziv sistema	31	37	26	1	5
6	Programiranje mehatronskih sistema u Web laboratoriji isto je kao u školskoj laboratoriji	14	32	38	13	2
7	U Web laboratoriji mogu se realizovati različite laboratorijske vežbe tokom jednog pristupa	30	46	17	5	2
8	Realizacija vežbi u Web laboratoriji smanjuju tremu i strah kod učenika	43	31	19	5	2
9	Realizacija laboratorijskih vežbi u Web laboratoriji je veoma zanimljiva i atraktivna	54	29	12	2	4
10	Korišćenje Web laboratorije omogućava samostalan rad sa mogućnošću velikog broja ponavljanja	45	42	12	1	0
11	Korišćenje Web laboratorije omogućava učeniku da željenom dinamikom usvaja praktična znanja i veštine	38	42	15	2	2
12	Korišćenje Web laboratorije omogućava povezivanje teorijskih znanja i praktičnih veština	31	40	27	1	0
13	Web laboratorije ne mogu u potpunosti da zamene rad u školskim laboratorijama	38	31	23	6	2
14	Obuka u školskim laboratorijama i korišćenje Web laboratorije stvaraju uslove za sticanje savremenih praktičnih znanja i veština	44	38	18	0	0
15	Web laboratorije omogućava istovremenu obuku većeg broja polaznika na različitim laboratorijskim sistemima	40	39	18	1	1
16	Web laboratorije i učenje na daljinu povećavaju motivaciju za učenje	38	39	8	8	6
17	Daljinski pristup laboratorijskim sistemima ima praktičnu primenu u domaćinstvima i industriji	31	35	24	6	5
18	Elektronska komunikacija sa nastavnikom je veoma važna u daljinskom pristupu Web laboratoriji	44	36	14	1	5
19	Vršnjačko učenje i komunikacija na forumima ima značajnu ulogu u realizaciji vežbi u Web laboratoriji	37	38	18	4	4
20	Primena mobilnih telefona je pogodna za elektronsko učenje na daljinu	45	31	17	1	6

Grafički prikaz ocena po pitanjima iz tabele 5.10. prikazana je procentualna raspodela na slici 5.5.



Slika 5.5: Procentualna raspodela ocena anketnog upitnika

Na osnovu analize dobijenih rezultata, za 57% učenika pristup Web laboratoriji je lak, a pristup laboratorijskim sistemima jednostavan, dok za 40% učenika ovaj postupak je umerene težine.

Praćenje eksperimentalnog rada pomoću IP Web kamere, pristup mehatronskim sistemima i izbor željene laboratorijske vežbe je jednostavan za 70% učenika. Aktiviranje postojećih programa i praćenje ulaza/izlaza mehatronskih sistema za više od 72% učenika je atraktivno i izazovno.

Realizacija laboratorijskih vežbi u Web laboratoriji omogućava realizaciju velikog broja laboratorijskih vežbi željenom dinamikom, čime se smanjuje strah kod učenika, povećava motivacija i samopouzdanje za rad sa realnim uređajima i sistemima (46%).

Više od 80% učenika se slaže s konstatacijom da Web laboratorija omogućava sticanje znanja prema mogućnostima i željama učenika, uz neograničen broj ponavljanja eksperimenata.

Za 70% učenika korišćenje Web laboratorije omogućava povezivanje teorijskih i praktičnih znanja, a 80% učenika smatra da korišćenje resursa Web laboratorije povećava motivaciju za rad, ima veoma važnu ulogu u sticanju praktičnih veština i primenu novih tehnologija.

Primena Web laboratorije i elektronskog učenja za 75% učenika ima veoma važnu ulogu kod vršnjačkog učenja, a 76% učenika želi da koriste mobilne uređaje u procesu elektronskog učenja.

Značaj elektronske komunikacija sa nastavnikom, za 67% učenika je veoma važna u daljinskom pristupu Web laboratoriji i elektronskom učenju. Asihrona i sinhrona komunikacija učenika i nastavnika, kao i vršnjačka komunikacija omogućavaju usvajanje znanja i veština na nov način, omogućava se povratna informacija o napredovanju učenika, povećava se motivacija i podiže kvalitet nastavnog procesa.

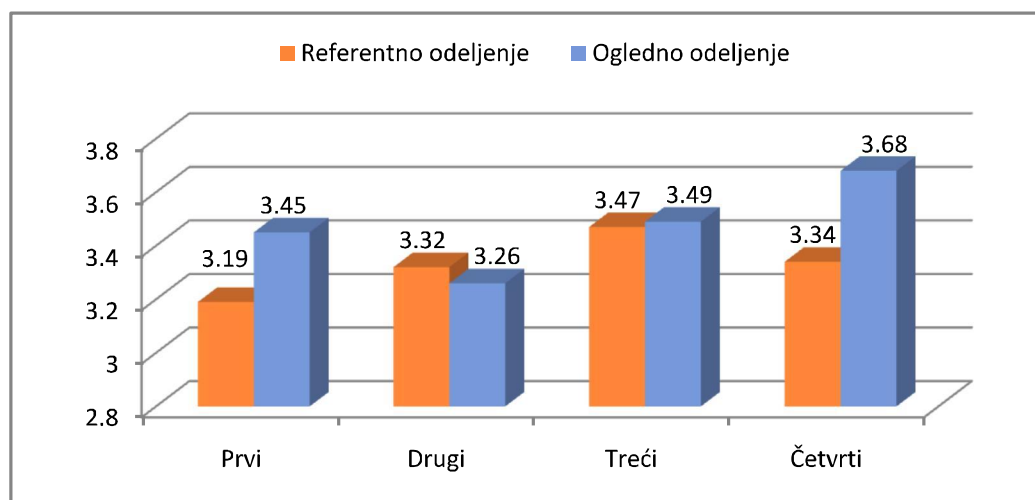
I pored evidentnog značaja daljinskog pristupa Web laboratoriji, veliki broj učenika (69%) smatra da Web laboratorija ne može u potpunosti da zameni klasičnu školsku laboratoriju. Ovaj podatak daje jasan signal da kod srednjoškolskog uzrasta, gde je akcenat stavljen na sticanje praktičnih znanja i veština, Web laboratorija ne može zameniti klasičnu školsku laboratoriju, ali može osavremeniti nastavni proces i povećati dostupnost laboratorijskih eksperimenata.

Kod realizacije laboratorijskih vežbi u Web laboratoriji, najsloženiji radni zadaci su vezani za programiranje i testiranje mehatronskih sistema. Samo 46% učenika smatra da je programiranje mehatronskih sistema isto kao u školskoj laboratoriji, dok ostali učenici sa poteškoćama realizuju složenije laboratorijske zahteve.

U cilju verifikacije značaja primene savremenih virtuelnih i realnih didaktičkih sistema i primene Web laboratorije, tokom četiri školske godine praćen je uspeh dva odeljenja, koja po svojoj strukturi imaju učenike sa približno sličnim rezultatima prilikom upisa u srednju školu. Referentno odeljenje je zanimanje mašinski tehničar za kompjutersko konstruisanje, a ogledno odeljenje je tehničar mehatronike. Ova dva odeljenja su upisana u prvi razred školske 2010/2011.g., a završila četvorogodišnje školovanje školske 2013/2014.g. Uspeh odeljenja na kraju svake školske godine, od prvog do četvrtog razreda dat je u tabeli 5.11, a grafički prikaz na slici 5.6.

Tabela 5.11: *Uporedni prikaz uspeha referentnog i oglednog odeljenja*

Razred	Referentno odeljenje	Ogledno odeljenje
Prvi	3.19	3.45
Drugi	3.32	3.26
Treći	3.47	3.49
Četvrti	3.34	3.68



Slika 5.6: Uporedni grafički prikaz uspeha referentnog i oglednog odeljenja

Ulazni parametar analize predstavlja prosečna ocena na kraju trećeg razreda referentnog i oglednog odeljenja. Tokom prve tri školske godine uspeh oba odeljenja je približno isti. U četvrtom razredu oglednog odeljenja u stručnim modulima Testiranje i dijagnostika mehatronskih sistema i Programibilni logički kontroleri korišćeni su virtuelni i realni didaktički sistemi, a deo laboratorijskih vežbi realizovan je daljinskim pristupom Web laboratoriji mehatronike. U nastavi referentnog odeljenja korišćeni su softverski alati za projektovanje i modeliranje mašinskih elemenata i sistema, ali nije primenjivan model daljinskog pristupa školskim laboratorijama. Na kraju drugog polugodišta četvrtog razreda, prosečna ocena u oglednom odeljenju je vrlo dobra (3.68), dok je prosečna ocena u referentnom odeljenju dobra (3.34). Uspeh referentnog odeljenja u četvrtoj godini je 3,75% manji u odnosu na treći razred, dok je kod oglednog odeljenja uspeh za 5,44% veći u odnosu na prethodnu godinu. U oglednom odeljenju postignut je značajno veći uspeh, pa je srednja ocena za 0,34 veća u odnosu na referentno odeljenje, nakon primene hibridnog modela učenja. Veliki je broj činilaca koji utiču na uspeh, a kao jedan od najznačajnijih su: nastava usmerena na postizanje definisanih ishoda, primena savremenih didaktičkih sistema u nastavi, primena hibridnog modela učenja, sticanje praktičnih veština uz korišćenje realne laboratorije i Web laboratorije za daljinski pristup. Primenom savremenih tehnologija povećana je motivacija za učenje kod učenika, razvijen je hibridni model učenja, koji je kroz vršnjačko učenje i problemski orijentisanu nastavu doprineo boljem uspehu oglednog odeljenja na kraju školovanja. Na osnovu rezultata istraživanja, evidentno je da primena eksperimentalnog elektronskog učenja na daljinu korišćenjem Web laboratorija ima veliki potencijal za primenu u redovnoj nastavi u srednjem stručnom obrazovanju [83].

Za statističku analizu dobijenih rezultata korišćena je bootstrap metoda i programski paket MATLAB. Na osnovu orginalne populacije od 99 uzoraka, generisano 1000 bootstrap uzoraka, na osnovu čega su dobijeni statistički parametri i grafički prikaz raspodele ocenjivača. Bootstrap ocene sredine, varijanse i standardne devijacije ocenjivača prikazani su u tabeli 5.12.

Tabela 5.12: Bootstrap ocene sredine, varijanse i standardne devijacije ocenjivača

Pitanje	Xsrednje \bar{X}	Ysrednje $\hat{\theta}^*$	Xvarijansa $Var(\bar{X})$	Yvarijansa $Var(\hat{\theta})$	Xstanddev $\sqrt{\sigma^2}$	Ystanddev $\sqrt{s_n^2}$	z
H1(6)	3.4343	3.4341	0.9124	0.8998	0.9552	0.9468	5.89
H2 (8)	4.0808	4.0833	1,0036	0.9923	1,0018	0.9931	0.80
H3 (11)	4.1313	4.1311	0.7807	0.7753	0.8836	0.8765	1.48
H4 (12)	4.0202	4.0235	0.6259	0.6209	0.7911	0.788	0.25
H5 (13)	3.9899	3.9912	0.9999	0.9879	0.9999	0.9912	0.10
H6 (16)	3.9596	3.9559	1.3317	1.3073	1.1540	1.1396	0.35

U ovom istraživanju definisano je više hipoteza, za koje su izračunati statistički parametri i ispitana njihova tačnost.

Prva hipoteza je **H₀₁**: Programiranje mehatronskih sistema u Web laboratoriji isto je kao u školskoj laboratoriji. Za ovu hipotezu definisana je alternativna hipoteza **H₁₁**: *Programiranje mehatronskih sistema u Web laboratoriji nije isto je kao u školskoj laboratoriji.*

Za nivo značajnosti testa $\alpha = 0.05$, vrednost parametra $z = 5.89$ nalazi se van osega [-1.96, 1.96], tako da se prva hipoteza ne prihvata, već se prihvata njena alternativna hipoteza: **H₁₁**: Programiranje mehatronskih sistema u Web laboratoriji nije isto je kao u školskoj laboratoriji!

Druga hipoteza je **H₀₂**: Realizacija vežbi u Web laboratoriji smanjuju tremu i strah kod učenika. Njena alternativna hipoteza je **H₁₂**: *Realizacija vežbi u Web laboratoriji ne smanjuju tremu i strah kod učenika.*

Za nivo značajnosti testa $\alpha = 0.05$, vrednost parametra $z = 0.80$ nalazi se u osegu [-1.96, 1.96], tako da se nulta hipoteza potvrđuje kao tačna:

H₀₂: Realizacija vežbi u Web laboratoriji smanjuju tremu i strah kod učenika.

Treća hipoteza je **H₀₃**: Korišćenje Web laboratorije omogućava učeniku da željenom dinamikom usvaja praktična znanja i veštine. Alternativna hipoteza je **H₁₃**: *Korišćenje Web laboratorije ne omogućava učeniku da željenom dinamikom usvaja praktična znanja i veštine.*

Za nivo značajnosti testa $\alpha = 0.05$, vrednost parametra $z = 1.48$ nalazi se u osegu $[-1.96, 1.96]$, tako da se nulta hipoteza potvrđuje kao tačna:

H₀₃: Korišćenje Web laboratorije omogućava učeniku da željenom dinamikom usvaja praktična znanja i veštine.

Četvrta hipoteza je **H₀₄:** Korišćenje Web laboratorije omogućava povezivanje teorijskih znanja i praktičnih veština. Alternativna hipoteza je **H₁₄:** *Korišćenje Web laboratorije ne omogućava povezivanje teorijskih znanja i praktičnih veština.*

Za nivo značajnosti testa $\alpha = 0.05$, vrednost parametra $z = 0.25$ nalazi se u osegu $[-1.96, 1.96]$, tako da se nulta hipoteza potvrđuje kao tačna:

H₀₄: Korišćenje Web laboratorije omogućava povezivanje teorijskih znanja i praktičnih veština.

Peta hipoteza je **H₀₅:** Web laboratorije ne mogu u potpunosti da zamene rad u školskim laboratorijama. Alternativna hipoteza je **H₁₅:** *Web laboratorije mogu u potpunosti da zamene rad u školskim laboratorijama.*

Za nivo značajnosti testa $\alpha = 0.05$, vrednost parametra $z = 0.10$ nalazi se u osegu $[-1.96, 1.96]$, tako da se nulta hipoteza potvrđuje kao tačna:

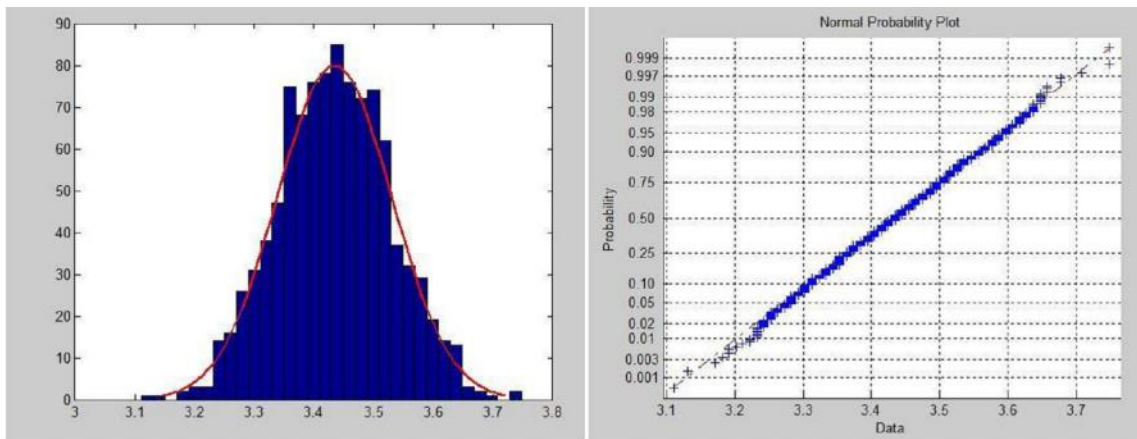
H₀₅: Web laboratorije ne mogu u potpunosti da zamene rad u školskim laboratorijama.

Šesta hipoteza je **H₀₆:** Web laboratorije i učenje na daljinu povećavaju motivaciju za učenje. Alternativna hipoteza je **H₁₆:** *Web laboratorije i učenje na daljinu ne povećavaju motivaciju za učenje.*

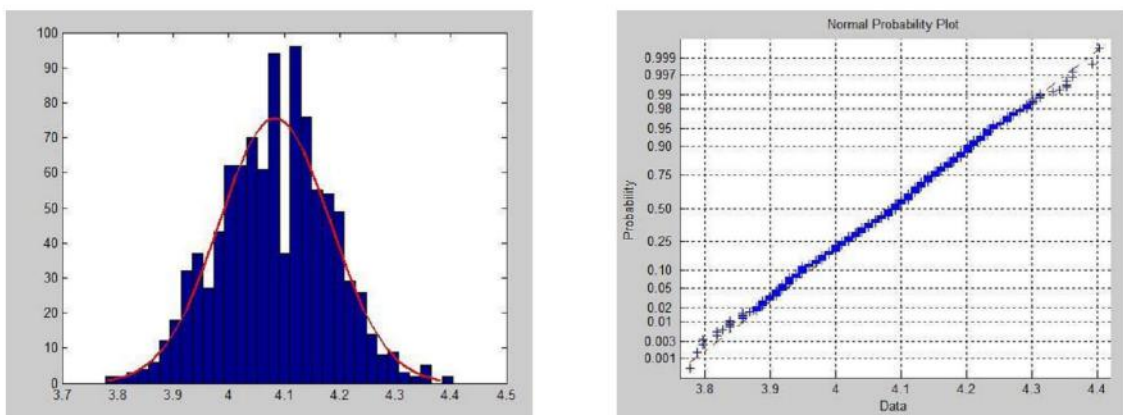
Za nivo značajnosti testa $\alpha = 0.05$, vrednost parametra $z = 0.35$ nalazi se u osegu $[-1.96, 1.96]$, tako da se nulta hipoteza potvrđuje kao tačna:

H₀₆: Web laboratorije i učenje na daljinu povećavaju motivaciju za učenje.

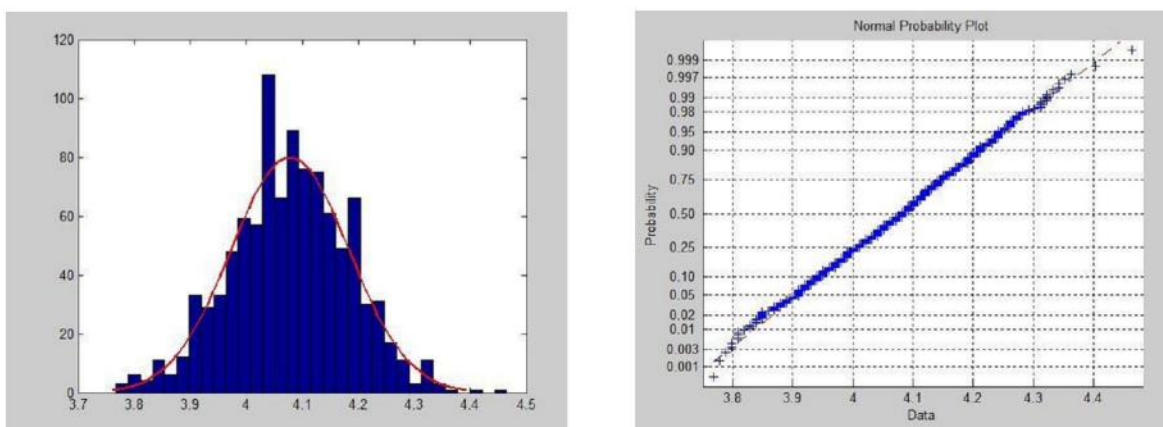
Za svaku od hipoteza prikazana je histogram bootstrap replikacija ocenjivača i provera normalnosti skupa replikacije ocenjivača.



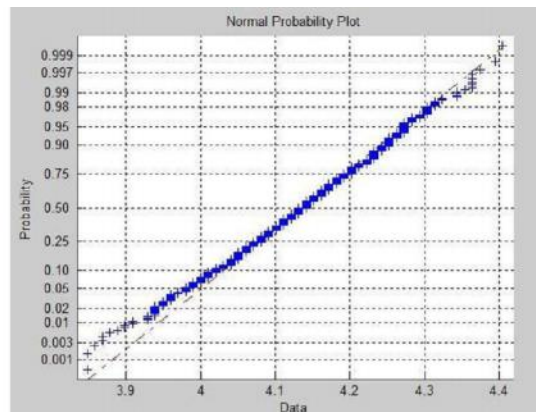
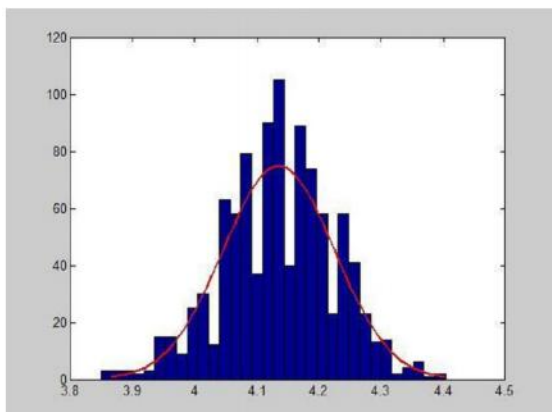
Slika 5.7: Histogram hipoteze H_{01} bootstrap ocena nepoznatog parametra θ i provera normalnosti skupa



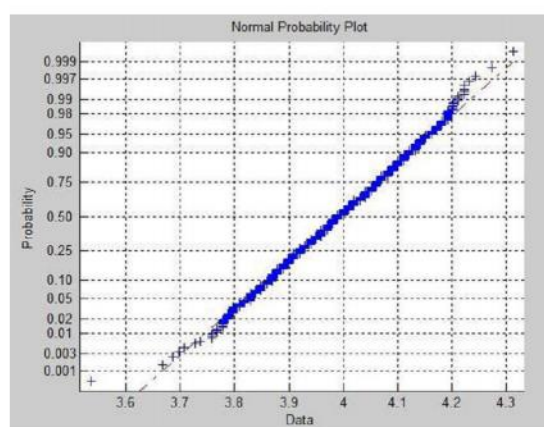
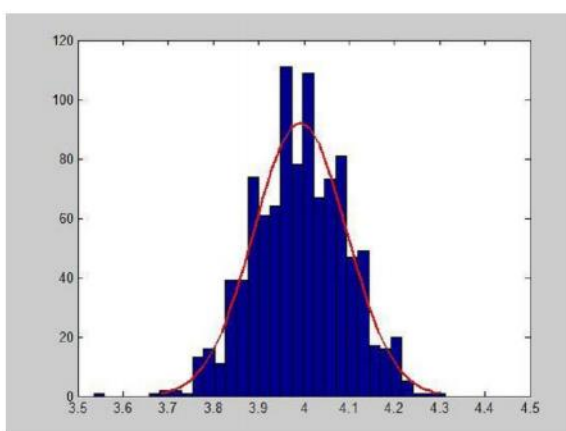
Slika 5.8: Histogram hipoteze H_{02} bootstrap ocena nepoznatog parametra θ i provera normalnosti skupa



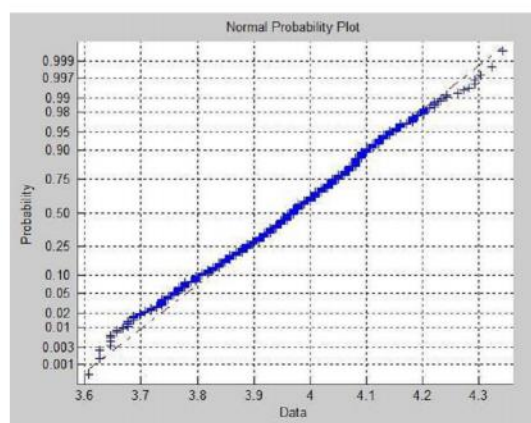
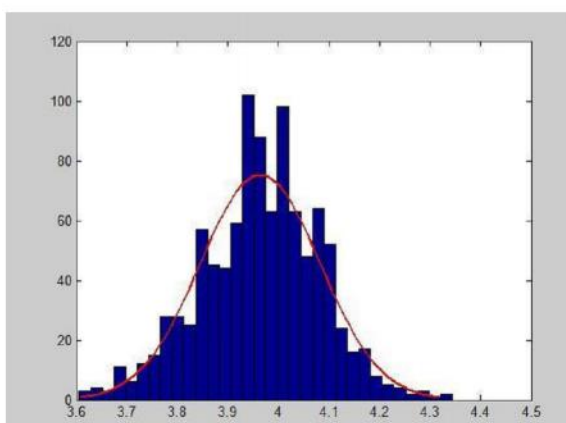
Slika 5.9 Histogram hipoteze H_{03} bootstrap ocena nepoznatog parametra θ i provera normalnosti skupa



Slika 5.10: Histogram hipoteze H_{04} bootstrap ocena nepoznatog parametra θ i provera normalnosti skupa



Slika 5.11: Histogram hipoteze H_{05} bootstrap ocena nepoznatog parametra θ i provera normalnosti skupa



Slika 5.12: Histogram hipoteze H_{06} bootstrap ocena nepoznatog parametra θ i provera normalnosti skupa

Histogrami i grafički testovi normalnosti raspodele jasno ukazuju na saglasnost podataka sa funkcijom gustine normalne raspodele, pri čemu su bootstrap ocene njenih parametara i ovde bliže uzoračkim sredinama i uzoračkim varijansama. Na osnovu rezultata u tabeli i prikazanih histograma, definišu se sledeći zaključci:

- Histogram prikazuje raspodelu verovatnoće generisanih bootstrap replikacija, koji je normalnog oblika, simetrično raspodeljen oko srednje vrednosti
- Vrednosti varijansi su približno jednaki vrednosti varijanse normalne raspodele $\bar{s}_n^2 = 1$
- Bootstrap ocene sredine $\hat{\theta}$ se koncentrišu oko odgovarajućih vrednosti originalnog uzorka \bar{X}

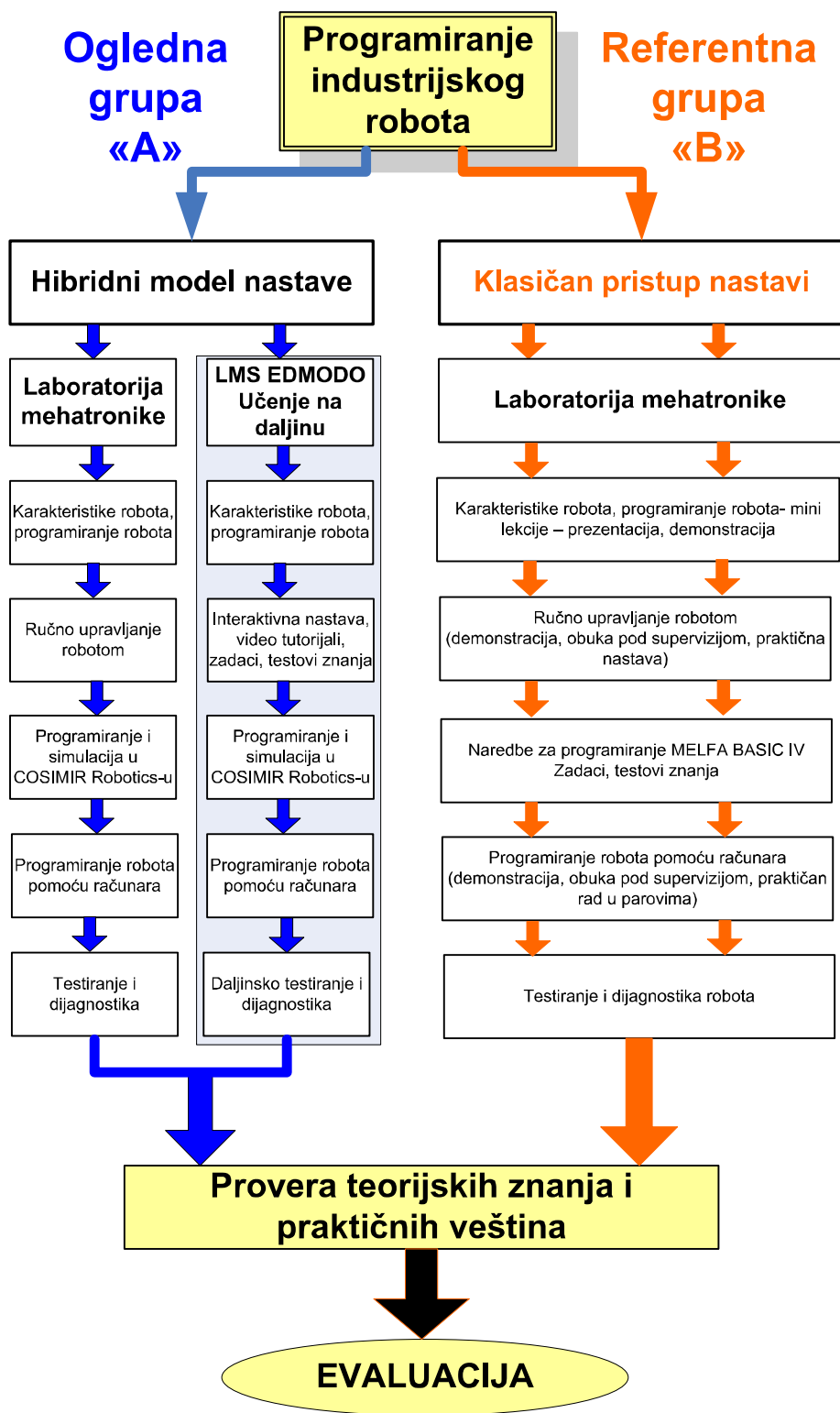
Primena novih tehnologija u svim segmentima društva zahteva modernizaciju obrazovnog sistema. Razvoj elektronskog i eksperimentalnog učenja na daljinu imaće sve veći značaj u svim segmentima društva, a posebno u obrazovanju. Primenom savremenih didaktičkih sistema, novih nastavnih metoda i savremenih Web laboratorijama, nastavni proces dobija novu dimenziju. Značajna je primena Web laboratorija u modernizaciji nastavnog procesa, povećanja dostupnosti novih tehnologija, smanjenja nedeljnog opterećenje učenika u školi i na fakultetima, umrežavanju škola, standardizaciji nastave, jačanju naučne saradnje i povećanju mobilnosti učenika i nastavnika.

5.4 Analiza primene hibridnog modela eksperimentalnog učenja na daljinu

Istraživanje je realizovano tokom prvog polugodišta školske 2014/2015. godine u obrazovnom profilu tehničar mehatronike, u Tehničkoj školi Trstenik Odeljenje je podeljeno u dve grupe koje su ekvivalentne po veličini i slične po nivou znanja učenika. Ogledna grupa *A* ima 13 učenika, dok je u referentnoj grupi *B* - 12 učenika. Modul programiranja industrijskog robota u okviru predmeta Testiranje i dijagnostika mehatronskih sistema realizuje se kroz 60 časova laboratorijskih vežbi. Cilj modula je osposobljavanje učenika za samostalno programiranje i testiranje industrijskog robota. Na slici 5.13 prikazani su modeli organizacija nastave u oglednoj i referentnoj grupi.

Na početku istraživanja realizovani su testovi provere stručnih teorijskih znanja i praktičnih veština iz oblasti mehatronike. Rezultati testiranja prikazani su u tabeli 5.13. Ogledna grupa "A" na ulaznom testu znanja ima prosečnu ocenu **3.46**, dok je na ulaznom testu veština prosečna ocena **3.54**. Referentna grupa "B" ulaznom testu znanja ima prosečnu ocenu **3.08**, dok je na ulaznom testu veština prosečna ocena **3.17**.

Realizacija nastave u referentnoj grupi *B* odvija se na tradicionalan način kroz sledeće oblike nastave: mini lekcije, prezentacije, demonstracija rada industrijskog robota, obuka pod supervizijom, programiranje industrijskog robota u parovima i individualno. Realizacija nastave u oglednoj grupi *A* odvija se na primenom hibridnog modela nastave: mini lekcija, prezentacija, primena virtuelnog simulacionog modela za programiranje robota COSIMIR Robotics, primena elektronskog učenja na daljinu preko web platforme Edmodo, "on-line" praćenje napredovanja učenika, obuka pod supervizijom, programiranje industrijskog robota u parovima i individualno, daljinski pristup Web laboratoriji, daljinski pristup robotu preko Interneta, IP Web kamere i programskog paketa Team Viewer.



Slika 5.13: Modeli učenja ogledne i referentne grupe

Obuka u oglednoj grupi vrši se korišćenjem softverskog paketa za programiranje i simulaciju robota. Svaki učenik samostalno na računaru programira, simulira i testira svoje programe, ima mogućnost testiranja programa “korak po korak” i praćenje putanje robota u virtuelnom 3D prostoru. Na ovaj način eliminišu se mogućnosti od povrede i havarijskog

oštećenja robota. Kada program u virtuelnom okruženju nema logičkih i sintasnih grešaka, učenici prenose program i pozicije u kontroler robota, i testiraju programe u realnim uslovima. Na ovaj način je proces obuke programiranja robota bezbedan, atraktivan i efikasan. Sve lekcije, tutorijali i uputstva postavljeni su u okviru grupe TIDMS, na LMS sistemu Edmodo. Učenici imaju mogućnost daljinskog pristupa LMS sistemu preko kućnih računara, prenosnih računara, “tablet” uređaja i “smart” telefona. Daljinskim pristupom Web laboratoriji učenici imaju mogućnost testiranja svojih programa na industrijskom robotu i praćenja u realnom vremenu.

Test provere praktičnih veština vrši se kroz realizaciju sledećih laboratorijskih vežbi:

1. Kretanje robota po linearnim putanjama “od tačke do tačke”
2. Kretanje robota po složenim putanjama
3. Prenos i pakovanje proizvoda
4. Sortiranje prema boji i materijalu
5. Izbegavanje prepreka korišćenjem senzora

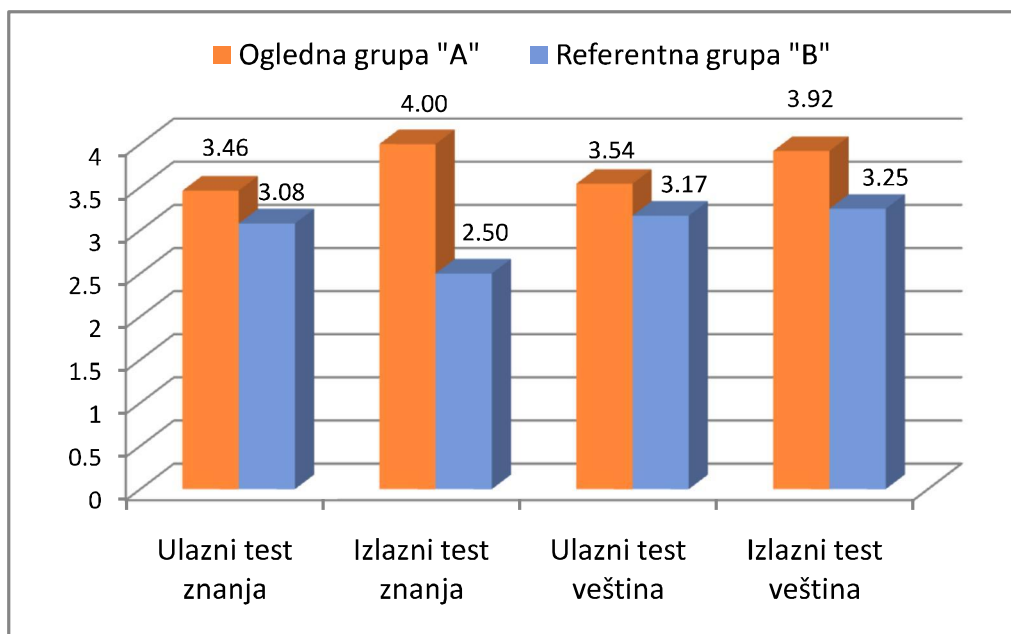
Postupak realizacije laboratorijskih vežbi odvija se prema sledećem algoritmu:

1. Povezivanje kontrolera robota i računara, podešavanje parametara komunikacije
2. Izbor koordinatnog sistema u programskom paketu Robo Explorer
3. Pozicioniranje robota u željene pozicije, kreiranje fajla pozicija
4. Pisanje programa robota prema zadatom algoritmu, prenos fajlova programa i pozicija u kontroler robota
5. Testiranje programa pomoću računara – 1 ciklus
6. Eliminacija eventualnih greški u poziciji ili programu
7. Izbor automatskog moda rada i testiranje programa u 10 ciklusa

Na kraju realizovanog modula, realizovani su testovi provere teorijskih znanja i praktičnih veština za oglednu i referentnu grupu. Usporedni prikaz prosečnih ocena ogledne i referentne grupe prikazani su u tabeli 5.13 i na slici 5.14.

Tabela 5.13: Uporedni prikaz prosečnih ocena ogledne i referentne grupe

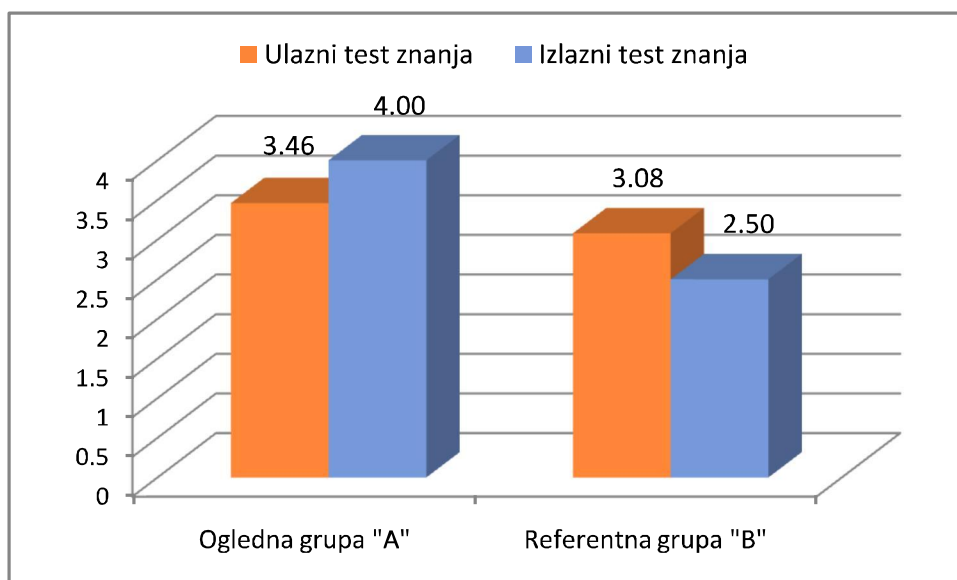
	Ulazni test znanja	Izlazni test znanja	Ulazni test veština	Izlazni test veština	Zaključna ocena
Ogledna grupa	3.46	4.00	3.54	3.92	4.00
Referentna grupa	3.08	2.50	3.17	3.25	3.17



Slika 5.14: Uporedni grafički prikaz uspeha ogledne i referentne grupe

Na slici 5.15 je grafički prikaz teorijskih znanja ogledne i referentne grupe pre i posle realizovanog modula. Prosečna ocena referentne grupe na početku eksperimenta za teorijska znanja bio je 3.08. Tokom realizacije modula primenjivane su klasične nastavne metode, teorijska i praktična nastava realizovana je u školskim laboratorijama. Na kraju realizovanog modula, prosečna ocena kod testiranja teorijskih znanja bila je značajno manja i iznosila je 2.50.

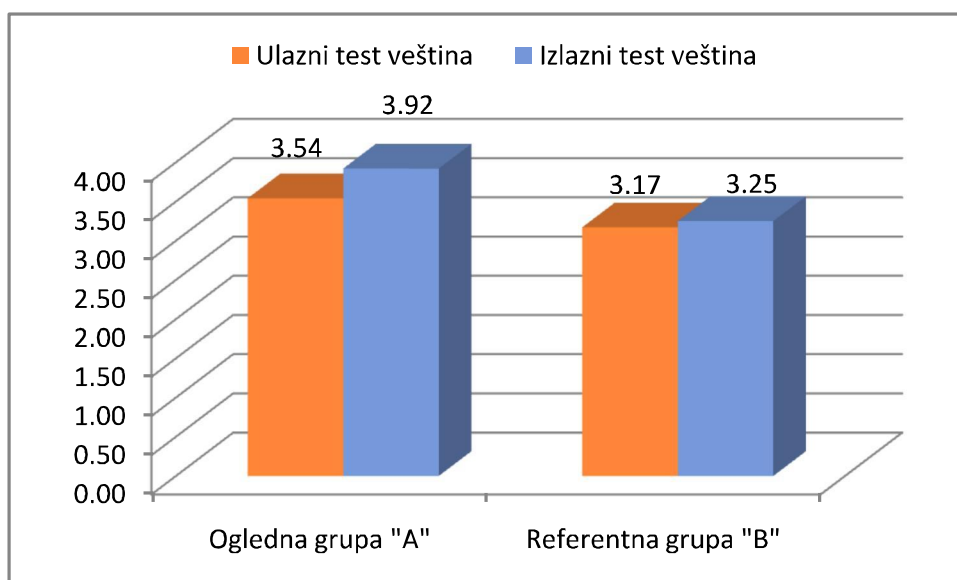
Prosečna ocena ogledne grupe na početku eksperimenta za teorijska znanja bio je 3.46. Tokom realizacije modula primenjivan je hibridni model učenja: obuka u školskim laboratorijama, učenje na daljinu primenom Edmodo platforme i eksperimentalno učenje na daljinu. Na kraju realizovanog modula, prosečna ocena kod testiranja teorijskih znanja bila je mnogo veća nego pre realizacije modula i iznosi 4.00.



Slika 5.15: Uporedni grafički prikaz teorijskih znanja ogledne i referentne grupe

Na slici 5.16 je grafički prikaz praktičnih vještina ogledne i referentne grupe pre i posle realizovanog modula. Prosečna ocena referentne grupe na početku eksperimenta za praktične veštine je 3.17, dok je prosečna ocena posle realizacije modula neznatno veća i iznosi 3.25.

Prosečna ocena ogledne grupe na početku eksperimenta za praktične veštine je 3.54, dok je prosečna ocena posle realizacije modula znatno veća i iznosi 3.92.



Slika 5.16: Uporedni grafički prikaz praktičnih vještina ogledne i referentne grupe

Analizom podataka referentne grupe pre realizacije obuke primenom klasične nastave u školi i na kraju modula, dobijamo sledeće podatke:

- Nivo teorijskih znanja posle realizovane obuke manji je za **18%**
- Nivo praktičnih veština posle realizovane obuke je veći za **2%**

Analizom podataka ogledne grupe pre realizacije obuke primenom daljinskog eksperimentalnog učenja, i na kraju modula, dobijamo sledeće podatke:

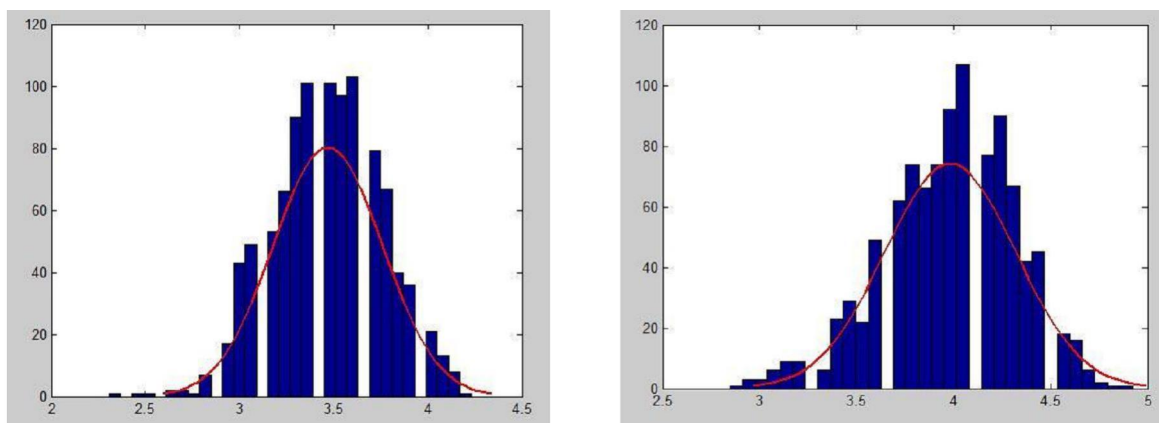
- Nivo teorijskih znanja posle realizovane obuke veći je za **14 %**
- Nivo praktičnih veština posle realizovane obuke veći je za **12%**

Na osnovu ovih podataka, evidentan je značaj primene hibridnog modela u procesu sticanja teorijskih i praktičnih znanja. Za statističku analizu dobijenih rezultata korišćena je bootstrap metoda i programski paket MATLAB. Na osnovu orginalne populacije, generisano 1000 bootstrap uzoraka, na osnovu kojih su dobijeni statistički parametri i grafički prikaz raspodele ocenjivača, bootstrap ocene sredine, varijanse i standardne deviacije ocenjivača. Ovi parametri prikazani su u tabeli 5.14.

Tabela 5.14: Bootstrap ocene sredine, varijanse i standardne deviacije ocenjivača

Pitanje	$X_{srednje}$ \bar{X}	$Y_{srednje}$ $\hat{\theta}^*$	$X_{varijansa}$ $Var(\bar{X})$	$Y_{varijansa}$ $Var(\hat{\theta})$	$X_{standdev}$ $\sqrt{\sigma^2}$	$Y_{standdev}$ $\sqrt{s_n^2}$	z
H₀₁	4.0000	3.9830	1.5385	1.3600	1.2403	1.1619	0.04
H₁₁	3.1667	3.1544	0.9722	0.8399	0.9860	0.9165	2.96
H₀₂	3.9231	3.9115	1.1479	1.0559	1.0714	1.0260	0.24
H₁₂	3.2500	3.2497	1.3542	1.1981	1.1637	1.0945	2.16

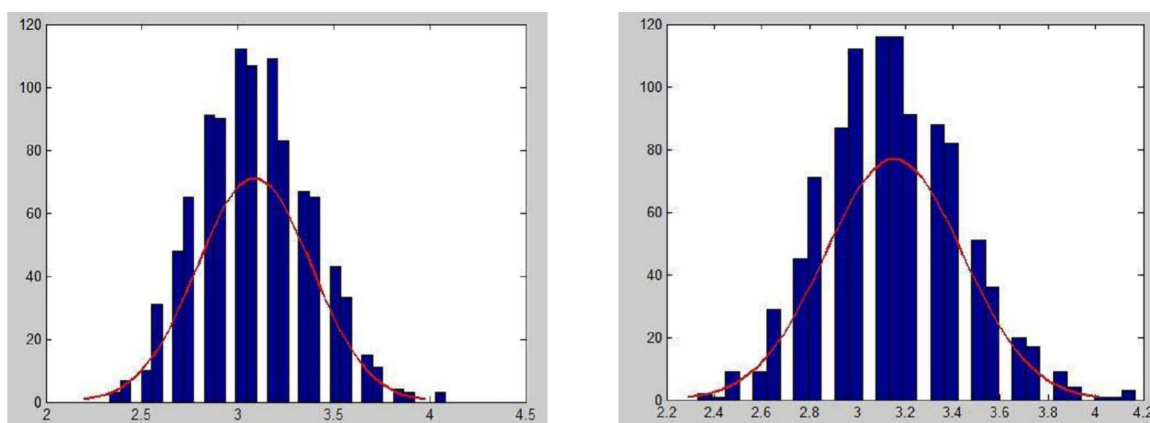
Histogrami ulaznog i izlatnog testa teorijskih znanja ogledna grupe A prikazan je na slici 5.17.



Slika 5.17: Uporedni prikaz histograma ulaznog i izlatnog testa teorijskih znanja ogledne grupe A

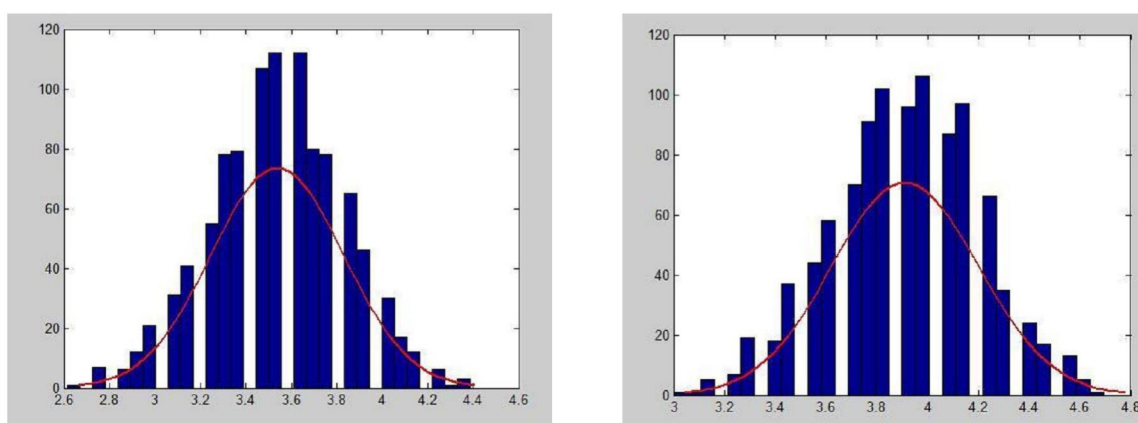
Na osnovu histograma teorijskih znanja evidentno je pomeranje vrha histograma prema većoj prosečnoj oceni, povećanje srednje ocene sa 3.50 na 4.00 posle realizacije nastavnog procesa ogledne grupe.

Na slici 5.18 prikazan uporedni histogrami ulaznog i izlatnog testa teorijskih znanja referentne grupe B.



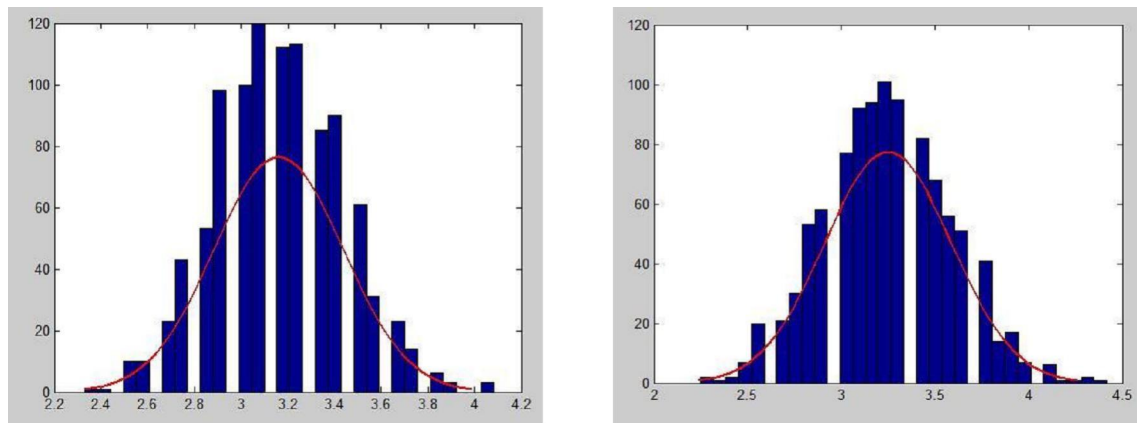
Slika 5.18: Uporedni prikaz histograma ulaznog i izlatnog testa teorijskih znanja referentne grupe B

Histogrami ulaznog i izlatnog testa praktičnih veština ogledna grupe A prikazan je na slici 5.19, dok je na slici 5.20 prikazan uporedni histogrami ulaznog i izlatnog testa praktičnih veština referentne grupe B.



Slika 5.19: Uporedni prikaz histograma ulaznog i izlatnog testa praktičnih veštine ogledne grupe A

Na osnovu histograma praktičnih veština evidentno je pomeranje vrha histograma prema većoj prosečnoj oceni, povećanje srednje ocene sa 3.50 na 4.00 posle realizacije nastavnog procesa ogledne grupe.



Slika 5.20: Usporedni prikaz histograma ulaznog i izlaznog testa praktičnih vještine referentne grupe B

Histogrami i grafički testovi normalnosti raspodele jasno ukazuju na saglasnost podataka sa funkcijom gustine normalne raspodele, pri čemu su bootstrap ocene njenih parametara i ovde bliže uzoračkim sredinama i uzoračkim varijansama. Na osnovu rezultata u tabeli i prikazanih histograma, definišu se sledeći zaključci:

- Histogram prikazuje raspodelu verovatnoće generisanih bootstrap replikacija, koji je normalnog oblika, simetrično raspodeljen oko srednje vrednosti
- Vrednosti varijansi su približno jednaki vrednosti varijanse normalne raspodele $\bar{s}_n^2 = 1$
- Bootstrap ocene sredine $\hat{\theta}$ se koncentrišu oko odgovarajućih vrednosti originalnog uzorka \bar{X}

U ovom istraživanju definisano je više hipoteza, za koje su izračunati statistički parametri i ispitana njihova tačnost. Na osnovu rezultata istraživanja, postavicećemo hipotezu H_{01} , njenu alternativnu hipotezu H_{11} i ispitati istinitost postavljene hipoteze.

Prva hipoteza je H_{01} : *Primenom elektronskog učenja na daljinu povećava se nivo teorijskih znanja u procesu učenja.* Za ovu hipotezu definisana je alternativna hipoteza H_{11} : *Primena elektronskog učenja na daljinu nema uticaj na nivo teorijskih znanja u procesu učenja.*

Za nivo značajnosti testa $\alpha = 0.05$, izračunata vrednost parametra $z = 0.04$ nalazi se u osegu $[-1.96, 1.96]$, što potvrđuje istinitost nulte hipoteze H_{01} , tako da je hipoteza H_{01} istinita: H_{01} : *Primenom elektronskog učenja na daljinu povećava se nivo teorijskih znanja u procesu učenja.*

Druga hipoteza je H_{02} : *Primenom eksperimentalnog učenja na daljinu povećava se nivo praktičnih vještina u procesu učenja.* Njena alternativna hipoteza je H_{12} : *Primena*

eksperimentalnog učenja na daljinu ne utiče na nivo praktičnih veština u procesu učenja
Za nivo značajnosti testa $\alpha = 0.05$, vrednost parametra $z = 0.24$ nalazi se u osegu $[-1.96, 1.96]$, tako da se nulta hipoteza potvrđuje kao tačna:

H₀₂: Primenom eksperimentalnog učenja na daljinu povećava se nivo praktičnih veština u procesu učenja.

Razvijeni model učenja će omogućiti integraciju eksperimentalnog pristupa nastavi u postojeći sistem za upravljanje učenjem, a pogodan je za primenu u stručnom obrazovanju učenika, studenata i nastavnika. Sistem će pružiti velike mogućnosti u celoživotnom učenju kroz formalne i neformalne oblike nastave. Dokazane hipoteze u disertaciji predstavljaju smernice za implementaciju elektronskog učenja na daljinu na svim nivoima obrazovanja. Elektronsko učenje na daljinu u skorijoj budućnosti biće obavezni integralni deo savremenog obrazovnog sistema na svim nivoima školovanja. Relevantni pokazatelji i analize efikasnosti implementiranog modela eksperimentalnog učenja na daljinu i stepenu uticaja na unapređenje obrazovanja daju smernice za dalja istraživanja u implementaciji daljinskog učenja u redovan sistem školovanja.

6 ZAKLJUČAK

Primena novih tehnologija u svim segmentima savremenog društva zahteva transformaciju obrazovnog sistema iz tradicionalnog u interaktivan sistem zasnovan na primeni informacionih tehnologija. Današnje generacije učenika i studentata odrasle su uz video igre, Internet i društvene mreže, tako da je percepcija informacija i logika razmišljanja sasvim drugačija u odnosu na prethodne generacije. Postojeći sistem obrazovanja nije prilagođen novim generacijama, tako da se stvara veliki jaz između formalnog obrazovanja i potreba učenika. Kako bi sistem obrazovanja bio efikasan, izazovan i zanimljiv novim generacijama, potrebna je njegova transformacija, koja je zasnovana na primeni novih tehnologija, novih nastavnih metoda i novih modela učenja.

Jedan od ciljeva doktorske disertacije je razvoj inovativnog hibridnog modela učenja u mehatronici, koje će biti zasnovan na digitalnim veštinama novih generacija učenika i primeni novih tehnologija, mobilnih uređaja, Interneta i učenja na daljinu. Razvijeni model zasniva se na primeni virtuelnih modela u nastavi i integraciji daljinskog učenja u redovan sistem obrazovanja. Posebna pažnja posvećena je uvođenju eksperimentalnog učenja na daljinu, formiranju i umrežavanju Web laboratorija, deljenju laboratorijskih eksperimenata, razvoju sistema za daljinski pristup i integraciji eksperimentalne nastave na daljinu u jedinstven sistem za upravljanje učenjem. Specifičnosti eksperimentalnog učenja na daljinu su analizirane sa aspekta pripreme nastavnih materijala, definisanja laboratorijskih vežbi, definisanja grupa u LMS sistemu *Edmodo*, kolaboraciji i komunikaciji u procesu učenja na daljinu, ocenjivanju i evaluaciji. Posebna pažnja posvećena je definisanju strukture Web laboratorije, razvoju sistema za daljinski pristup u realnom vremenu, i razvoju biblioteke edukativnih laboratorijskih vežbi. Prikazani su realni didaktički mehatronski sistemi, virtuelni didaktički sistemi i softverski paketi koji se koriste u Web laboratoriji mehatronike.

Realizovana su istraživanja, merenjem i analizom efekata primene hibridnog modela učenja u mehatronici. Predstavljena je savremena naučna metoda za analizu rezultata merenja i detaljna statistička analiza dobijenih rezultata. Rezultati su predstavljeni u formi uporedne analize oglednih i referentnih grupa. Primenom Bootstrap metode izračunate su karakteristične vrednosti statističke funkcije raspodele: aritmetičke sredine, varijanse i standardne devijacije. Na osnovu dobijenih vrednosti generisanog skupa, kreiran je histogram raspodele verovatnoće i normalizovani oblik raspodele hipoteze. Na osnovu rezultata istraživanja potvrđene su glavne hipoteze doktorske disertacije: 1) Primena virtuelnih i realnih didaktičkih modela pozitivno utiče na

postignuća učenika; 2) Integracijom učenja na daljinu u redovan sistem postižu se bolji rezultati u odnosu na tradicionalni sistem obrazovanja; 3) Daljinsko eksperimentalno učenje u Web laboratorijama omogućava sticanje znanja i veština kao u lokalnim laboratorijama; 4) Stečena znanja primenom novih tehnologija primenjiva su u praksi; 5) Primenom predloženog hibridnog modela jača motivacija kod učenika i dolazi do povećanja efikasnosti učenja; 6) Integracija daljinskog učenja u postojeći obrazovni sistem povećava dostupnost novim tehnologijama i unapređuje komunikaciju i saradnju među svim učesnicima obrazovnog procesa.

U eksperimentalnom delu doktorske disertacije je kreirana Web laboratorija za daljinski pristup, LMS za praćenje napredovanja učenika, u okviru koga je izvršeno testiranje i merenje relevantnih parametara od uticaja na efikasnost ovog modela učenja. Merenje relevantnih parametara i analiza dobijenih rezultata je obavljeno pomoću standardnih statističkih metoda. Najznačajniji rezultati istraživanja u okviru doktorske disertacije su razvoj, implementacija i evaluacija hibridnog modela učenja u oblasti mehatronke, sa posebnim akcentom na značaj eksperimentlnog učenja na daljinu. Razvijni model ima upotrebnu vrednost i predstavlja značajan naučni rezultat, primenjiv je u srednjim stručnim školama, visokim školama i fakultetima u redovnom školovanju, u stručnom usavršavanju nastavnika, jačanju naučne saradnje i u okviru programa celoživotnog učenja. S obzirom na aktuelnost teme i strategiju implementacije elektronskog učenja na daljinu na svim nivoima obrazovanja, primena rezultata istraživanja su od izuzetnog značaja. Primena rezultata doktorske disertacije imaće velike doprinose u sledećim oblastima: unapređivanje procesa programiranja industrijskog robota, implementacija hibridnog modela učenja primenom inovativnih nastavnih metoda i web tehnologija, razvoju Web laboratorija, integracija elektronskog učenja i daljinskog eksperimentalnog učenja u jedinstven sistem za upravljanje učenjem, jačanje naučne saradnje i povećanje dostupnosti savremenih tehnologija i brzom transferu znanja.

Za modernizaciju obrazovnog sistema neophodna je primena inovativnih metoda, savremenih virtuelnih i realnih didaktičkih sistema, učenje na daljinu i upravljanje učenjem pomoću LMS sistema. Značajna je primena Web laboratorija u modernizaciji nastavnog procesa, naučnoj saradnji, umrežavanju škola, standardizaciji nastave, povećanju mobilnosti učenika i nastavnika. Na osnovu realizovanih istraživanja i dobijenih rezultata, potrebno je integrisati elektronsko učenje na daljinu u nastavne planove i programe na svim nivoima školovanja. Pozitivna iskustva u realizaciji hibridnog modela učenja u mehatronici i rezultati istraživanja ove doktorske disertacije daju

smernice za razvoj metodologije realizacije nastave u stručnom obrazovanju. Doktorska disertacija otvara mogućnosti za dalja istraživanja koja se odnose na primenu predloženog modela učenja u različitim oblastima.

Primena rezultata doktorske disertacije mogla bi da se verifikuje kroz razvoju Web laboratorija na nivou Zajednica srednjih stručnih škola i njihovo umrežavanje u Virtuelni laboratorijski centar za stručno obrazovanje (VLCSO). Razvijeni VLCSO bio bi umrežen sa srodnim fakultetima u zemlji i inostranstvu, u cilju stručnog usavršavanja nastavnika, istraživanja, realizaciji međunarodnih projekata i povećanja mobilnosti nastavnika i učenika. Sledeće što bi proisteklo iz ove doktorske disertacije, je integracija daljinskog učenja u nastavne planove i programe svih obrazovnih profila, tako da se deo nastavnog programa (10% - 20%) realizuje primenom učenja na daljinu. Primenom LMS sistema biće unapređen kvalitet nastave, a nedeljno opterećenje učenika može biti smanjeno sa sadašnjih 30 na 24 časa.

Rezultati istraživanja realizovanih u okviru ove doktorske disertacije objavljeni su u okviru više radova u međunarodnim naučnim i stručnim časopisima časopisima i saopšteni na naučnim skupovima.

LITERATURA

- [1] Nacionalni prosvetni savet Republike Srbije: *Smernice za unapređivanje uloge primene informaciono-komunikacionih tehnologija u obrazovanju*, Beograd, 2013.
- [2] Jurić S, Marković S, Lulić J, Aleksić DM, Mijatović G: *Primena informaciono-komunikacionih tehnologija u nastavi*, Zavod za unapređivanje obrazovanja i vaspitanja, Beograd, 2014.
- [3] Müller D, Ferreira JM: *MARVEL: A Mixed Reality Learning Environment for Vocational Training in Mechatronics*, T.E.L. 2003, Proceeding: International Conference of Technology enhanced Learning, Milano, Italy, November, 2003.
http://www.arteclab.uni-bremen.de/publications/artec-05-mueller-bruns_EDEN05.pdf
- [4] Bruns FW, Erbe HH, Faust M: *Engineering Future Laboratories“, MARVEL–Mechatronics Training in Real and Virtual Environments Concepts, Practices, and Recommendations*, MARVEL - A Leonardo da Vinci Pilot Project Project no. PP-112615, Edited by Dieter Müller, Bremen 2005.
http://www.arteclab.uni-bremen.de/publications/artec-05-mueller-Marvel-impuls_18-web.pdf
- [5] Müller D: *Designing Learning Spaces for Mechatronics*, MARVEL - A Leonardo da Vinci Pilot Project Project no. PP-112615, Bremen 2005.
http://www.arteclab.uni-bremen.de/publications/artec-05-mueller-Marvel-impuls_18-web.pdf
- [6] Müller D: *Mechatronics in Vocational Training*, MARVEL – Mechatronics Training in Real and Virtual Environments Concepts, Practices and Recommendations“, MARVEL - A Leonardo da Vinci Pilot Project Project no. PP-112615, Bremen 2005.
- [7] Rojko A, Pester A: *Further Development of Specifications/Methodology for e-Learning of Technical Subjects in Industry*, E-PRAGMATIC project deliverable D8.6, University of Maribor, Carinthia University of Applied Sciences, 2012.
http://www.ro.feri.unimb.si/~andreja/EPRAGMATIC/FR/WP8/D8_6,%20Future%20development%20of%20specifications.pdf
- [8] Gomes L: *Current trends in remote laboratories*, IEEE Transactions on industrial electronics; Vol.56, No.12, December, 2009.

[9] Stefanović M, Matijević M, Cvetković V: *Web Laboratorije i Inženjerska Edukacija*, Festival kvaliteta 2006, 33. Nacionalna konferencija o kvalitetu, Kragujevac, 10-12.Maj, 2006.

<http://www.cqm.rs/fq2006/pdf/A/23%20%20Stefanovic%20M,%20Matijevic%20M.,%20Cvetkovic%20V.pdf>

[10] Stefanović M, Matijević M, Ravlić M, Cvjetković V: *Laboratorijska merenja i upravljanje eksperimentima putem Interneta*, Mašinski fakultet u Kragujevcu, Septembar, 2007.

<http://weblab.fink.rs/vezbe/Laboratorijska%20merenja%20i%20upravljanje%20eksperimentima%20putem%20%20Interneta.pdf>

[11] Matijević M, Cvjetković V, Ranković V, Stefanović M: *Upravljanje laboratorijskim procesima posredstvom Interneta*, Mašinski fakultet u Kragujevcu, ISBN 978-86-86663-12-2, Septembar, 2007.

<http://weblab.fink.rs/vezbe/Upravljanje%20laboratorijskim%20procesima%20posredstvom%20%20Interneta.pdf>

[12] Bjekić D: *Psihologija učenja i nastave u elektronskom obrazovanju*, Fakultet tehničkih nauka u Čačku, Univerzitet u Kragujevcu, 2013.

[13] Petrović M: *Elektronsko učenje podržano Internet tehnologijama*, Norma – časopis za teoriju i praksu vaspitanja i obrazovanja, br.3, Sombor 2011, mart, pp.263-279. UDK:37.018.43:004.738.5.

http://www.pef.uns.ac.rs/index.php?option=com_phocadownload&view=category&download=1089%3Anorma-3-2009&id=84%3A2009&lang=sr

[14] Reimann R, Prinzellner Y, Michalek CR, et al : *E-Learning:Didactical Recommendations and Quality Assurance An Overview*, Euroleague for Life Sciences, 2012.

http://www.boku.ac.at/fileadmin/data/H05000/H11000/H11050/H11910/downloads/Publicationen/2012-05-22_ELLS_E-Learning_Didactical_Recommendations_and_Quality_Assurance_-_An_Overview.pdf

[15] Glušac D: *Elektronsko učenje*, Univerzitet u Novom Sadu, Tehnički fakultet „Mihajlo Pupin“, Zrenjanin, 2012.

<http://www.tfzr.uns.ac.rs/Content/files/0/Knjiga%20Elektronsko%20ucenje.pdf>

- [16] Krneta R, Šćepanović D: *Preporuke za razvoj i realizaciju studijskih programa na daljinu*, Tempus projekat “Enhancing the quality of distance learning at Western Balkan higher education institutions” – DL@Web, Univerzitet u Kragujevcu, 2013.
<http://www.dlweb.kg.ac.rs/files/Preporuke-Web.pdf>
- [17] Turapova D, Turapov G: *Didactical Issues of E-learning – Problems and Future Trendes*, International Conference on Computer Systems and Technologies – CompSysTech'2005, IV.12-1/IV/12-5, 2005.
- [18] Radosavljević V, Vugdelija N: *Društvene mreže kao Web 2.0 alat u nastavnom procesu*, INFOTEH-Jahorina Vol.12. Mart 2013.
<http://infoteh.etf.unssa.rs.ba/zbornik/2013/radovi/RSS-5/RSS-5-8.pdf>
- [19] Rubens N, Kaplan D, Okamoto T: *E-Learnig 3.0: anyone, anywhere, anytime, and AI*, International Workshop on Social and Personal Computing for Web- Supported Learning Communities (SPeL 2011), Dec 2011.
- [20] Stanković Ž: *Razvoj tehnologije učenja na daljinu*, *Nastava i vaspitanje*, br.2, 2006. , pp. 169-181, <http://www.pedagog.rs/nastava%20i%20vaspitanje/niv%2002-06.pdf>
<http://ecet.ecs.uni-ruse.bg/cst05/Docs/cp/sIV/IV.12.pdf>
- [21] Sharable Content Object Reference Model (SCORM®) 2004, Overview, 2nd Edition, Advanced Distributed Learning (ADL), <http://www.adlnet.org/>
- [22] SCORM 2004 Handbook, Version 1.04 , The e-Learning Consortium, Japan, March 2006. <http://203.183.1.152/aen/content/act2005eg/data/txt1.pdf>
- [23] http://docs.moodle.org/25/en/About_Moodle
- [24] http://en.wikipedia.org/wiki/Computer-aided_design
- [25] Drapić S: *Konstruisanje*, Zavod za udžbenike i nastavna sredstva, Beograd, 2002.
- [26] Isermann, R. *Mechatronic systems: Innovative products with embedded control*, *Control Engineering Practice* (2007), doi:10.1016/j.conengprac.2007.03.010
- [27] Kenway Chen, Jonathan Bankston, Jitesh H. Panchal, Dirk Schaefer: *A Framework for Integrated Design of Mechatronic Systems*, *Collaborative Design and Planning for Digital Manufacturing*, pp 37-70, Springerlink, 2009.
http://link.springer.com/chapter/10.1007%2F978-1-84882-287-0_2

- [28] Jack Little: *The Impact of Model-Based Design on Controls Today and in the Future*, MathWorks, 2014. <http://www.ifac2014.org/assets/pdf/plenary/Little.pdf>
- [29] Rüdiger Neumann: *Festo Develops Innovative Robotic Arm Using Model-Based Design*, Festo, 2014.
http://www.mathworks.com/company/user_stories/festo-develops-innovative-robotic-arm-using-model-based-design.html
- [30] <http://www.mathworks.com/help/phymod/smlink/ug/translating-a-cad-robot-arm.html>
- [31] <http://www.mathworks.com/products/datasheets/pdf/simulink-plc-coder.pdf>
- [32] Doleček V, Karabegović I: *Robotika*, Univerzitetska knjiga, Tehnički fakultet Bihać, 2002.
- [33] Borovac B, Đorđević G, Rašić M, Andrić D: *Zbirka zadataka iz robotike*, Novi Sad, Niš, 2002.
- [34] LaValle SM: *Planning Algorithms*, University of Illinois, Published by Cambridge University Press, 2006. <http://planning.cs.uiuc.edu/book4.pdf>
- [35] Shkel AM, Lumelsky VJ: *Incorporating Body Dynamics Into Sensor-Based Motion Planning: The Maximum Turn Strategy*, University of Wisconsin-Madison, Madison, Wisconsin, USA, 1995.
- [36] Carlson D: *Enhancement of a Simulated Robotic Navigation Algorithm*, Illinois Wesleyan University,
<http://digitalcommons.iwu.edu/cgi/viewcontent.cgi?article=2621&context=jwprc>
- [37] Corke PI: *Robotic Toolbox for MATLAB – release 9*, 2013.
<http://www.petercorke.com>
- [38] Nagchaudhuri A: “Experience with Introducing Robotic Toolbox for MATLAB in a Senior Level Undergraduate Course”, ASME International Mechanical Engineering Congress and Exposition, November 13-19, Lake Buena Vista, Florida, USA, 2009.
- [39] Milićević I, Slavković R, Golubović D: “Industrial Robot Models Designing and Analysis with Application of MATLAB Software”, Machine Design, pp. 71-78, Faculty of technical sciences, Novi Sad, 2007. http://www.mdesign.ftn.uns.ac.rs/pdf/2007/12-68_milicevic_slavkovic_golubovic_for_web.pdf

[40] Carlos C.A. Eguti, Da Silva CEO, Nakao EY, Villani E, Trabasso LG: *An educational framework for remote control of PUMA robot*, ABCM Symposium Series in Mechatronics–Vol4. pp.355-363, 2010.

http://www.abcm.org.br/pt/wp-content/symposium-series/SSM_Vol4/Section_IV_INDUSTRIAL_INFORMATICS_DISCRETE_AND_HYBRID_SYSTEMS/SSM4_IV_03.pdf

[41] Stefanović S, Mikić D, Golubović D, Ilić D: *Modeling and Simulation of Robot KR 80 Series Based on Matlab Software Program*, Annals of Faculty Engineering Hunedoara – Romania, International Journal of Engineering, Tome XI – Fascicule 3, 2013. pp.161-168.

<http://annals.fih.upt.ro/pdf-full/2013/ANNALS-2013-3-26.pdf>

[42] Chinello F, Scheggi S, Morbidi F, Prattichizzo D: *KUKA Control Toolbox. Motion control of robot manipulators with MATLAB*, Robotics Automation Magazine, IEEE, 18(4): 69-79, December 2011.

http://www.iaeng.org/publication/WCECS2010/WCECS2010_pp307-310.pdf

[43] Chinello F, Scheggi S, Morbidi F, Prattichizzo D: *KCT: a MATLAB toolbox for motion control of KUKA robot manipulators*, In Proc. IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation, pp. 4603-4608, Anchorage, Alaska, 2010.

http://home.mis.u-picardie.fr/~fabio/Eng/documenti/articoli/ChScMoPr_ICRA10.pdf

[44] Coman M, Stan S, Manić M, Balan R: *Design, Simulation and Control in Virtual Reality of a RV-2AJ robot*, 35th Annual Conference of IEEE Industrial Electronics, IECON '09, 2009. , pp.2040-2045, 10.1109/IECON.2009.5415456

[45] Arshad H, Jamal J, Sahran S: *Teaching Robot Kinematic in a Virtual Environment*, Proceedings of the World Congress on Engineering and Computer Science 2010 Vol I, WCECS 2010, October 20-22, 2010, San Francisco, USA.

http://www.iaeng.org/publication/WCECS2010/WCECS2010_pp307-310.pdf

[46] Aleksandrov S, Jovanović Z, Nikolić S, Perić S: *Modeliranje, simulacija i verifikacija modela industrijskog robota*, TEHNIKA-Elektrotehnika, Savez inženjera i tehničara, Vol., no. 1, pp. 96-103, februar 2014, Print ISSN:0040-2176, UDC:004.896, Savez inženjera i tehničara Srbije, Beograd.

- [47] Prensky M: *Digitalni urođenici, digitalne pridošlice: Razmišljaju li zaista drugačije?*, On the Horizon, NBC University Press, 9. br. 5, 2001.
<http://edupoint.carnet.hr/casopis/40/clanci/3.html>
- [48] Gomes, Zubia JG: *Advances on remote laboratories and e-learning experiences*, University of Deusto, Bilbao, ISBN: 978-84-9830-662-0, 2007.
https://www.weblab.deusto.es/Advances_on_remote_labs.pdf
- [49] Swider J: *Research projects and university education in mechatronics and robotics*, Journal of Achievements in Materials and Manufacturing Engineering; Volume 24, Issue 1, September, 2007. Pp.466-475.
http://www.journalamme.org/papers_vol24_1/24160.pdf
- [50] Schaf FM, Müller D, Bruns, FW, Pereira CE, Erbe HH: *Collaborative Learning and Engineering Workspaces Annual Reviews in Control*, Volume 33, Issue 2, December 2009, Pages 246–252.
- [51] Tutunji TA, Saleem A, Rabbo SA: *An Undergraduate Mechatronics Project Class at Philadelphia University, Jordan: Methodology and Experience*, IEEE Transactions on education, Vol.52, No.3, august 2009, pp.365-374.
- [52] Milovanović K: *Elektronsko učenje*, E-kurs, Elektronski časopis za nastavnike, Microsoft partner u učenju, 2007. <http://lekcijepil.elfak.ni.ac.rs/Eln/1/index.html>
- [53] Berecki E, Hunja M: *Vodič za nastavnike o uspešnom korišćenju informacionih i komunikacionih tehnologija*, Program “Partner u učenju”, Ministarstvo prosvete, nauke i tehnološkog razvoja & Microsoft, Škola budućnosti, Beograd, 2012.
- [54] Joutsenvirta T, Myyry L: *Blended Learning in Finland*, Faculty of Social Sciences at the University of Helsinki, 2010.
http://www.helsinki.fi/valtiotieteellinen/julkaisut/blended_learning_Finland.html
- [55] Power M: *The Emergence of a Blended Online Learning Environment*, MERLOT Journal of Online Learning and Teaching Vol. 4, No. 4, December 2008.
<http://anitacrawley.net/Articles/Power2008.pdf>
- [56] Chaabene M, Mkaour K, Ouali M: *A Web-based Interactive Real Laboratory for Process Engineering Education*, Journal of Computer Science 3 (7):540-545,2007.
<http://thescipub.com/PDF/jcssp.2007.540.545.pdf>

- [57] Vargas H, Sanchez J, Jara CA, Candelas FA, Torres F, Dormido S: *A Network of Automatic Control Web-based Laboratories*, IEEE Transaction on Learning Technology, Vol.4, No.3, pp.197-208., July-September, 2011.
- [58] Aydogmus Z, Aydogmus O: *A Web-based Remote Access Laboratory Using SCADA*, IEEE Transactions on education, Vol.52, february 2009, No.1, pp.125-132.
- [59] Pereira CE, Paladini S, Schaf FM: *Control and Automation Engineering Education: combining physical, remote and virtual labs*, 9th International Multi-Conference on Systems, Signals and Devices, 2012, 978-1-4673-1591-3. <http://coral.ufsm.br/eduworlds/public/papers/ssd2012.pdf>
- [60] Simon CF, Balada LM, Bellmunt OG: *A Remote Laboratory Platform for Electrical Drive Control Using Programmable Logic Controllers*, IEEE Transactions on education, Vol.52, No.3, august 2009, pp.425-435.
- [61] Aleksandrov S, Jovanović Z, Čajetinac S, Mijatović M: *Real-time Web access to the mechatronics laboratory in the process of e-learning*, FACTA UNIVERSITATIS, Series: Automatic Control and Robotics, Vol. 11, N^o 1, 2012, pp. 45-56, ISSN 1820 -6417.
- [62] Aleksandrov S, Jovanović Z, Antić D, Perić S, Nikolić S, Mitić D: *Web Access to the Real Mechatronics Laboratory*, XI International SAUM Conference on Systems, Automatic Control and Measurements, 14-16 Novembar 2012, Niš, Srbija, pp. 431-434.
- [63] Yang SH: *Design Issues and implementation of Internet-based process control systems*, Control Engineering Practice, Vol. 11, pp. 709-720, 2003.
- [64] Aleksandrov S, Aleksandrov R, Simić P: *Primena savremenih didaktičkih sistema u obrazovanju iz oblasti mehatronike*, Tehnologija, Informatika i Obrazovanje za društvo učenja i znanja, 6. Međunarodni Simpozijum, Tehnički fakultet Čačak, 3-5. jun 2011
- [65] Stelian P, Adrian N, Mario I, Nicoleta P: *Virtual user interface for industrial robots off-line programming & simulation and video cam on-line remote operation*, Recent Advances in Robotics, Aeronautical and Mechanical Engineering, ISBN: 978-1-61804-185-2, pp. 100-106, 2013.
- [66] Chang GA, Stone WL: *An Effective Learning Approach for Industrial Robot Programming*, 120th ASEE Annual Conference&Exposition, Atlanta, 2013.
- [67] Chiou R, Kwon Y, Rauniar S, Sosa H: *Internet-Based Robotics and Mechatronics Experiments for Remote Laboratory Development*, ASEE Southeastern Section 2007 Annual Meeting Conference Program Advancing Scholarship in Engineering Education:

Lessons Learned from a Year of Dialog, The University of Louisville
Louisville, Kentucky, AC 2007-1363, 2007.

[68] Müür M: *Implementation of Industrial Robots in Instruction at Tallinn University of Technology*, 13th International Symposium "Topical problems in the field of electrical and power engineering. Doctoral school of energy and geotechnology. II" : in memoriam of professor Juhan Laugis : Pärnu, Estonia, January 14-19, 2013: (Toim.) J. Zakis. Pärnu: Elektriajam, 2013, pp.197 - 200.

[69] Aleksandrov S, Čajetinac S, Šešlija D: *Didactic system Festo MPS - Sorting station and its application in education in the field of mechatronics*, 10th International Conference "Research and Development in Mechanical Industry" RaDMI 2010, , Donji Milanovac, Serbia,16-19.September 2010, pp.549-553.

<http://www.ftn.kg.ac.rs/konferencije/tio2012/PDF/Zbornik%20radova%20TIO%202012%20-%20za%20stampu/Zbornik%20radova%20TIO%202012%20-%20Knjiga%201.pdf>

[70] Gadzhanov S, Nafalski A: *Pedagogical effectiveness of remote laboratories for measurement and control*, World Transactions on Engineering of Technology Education", Vol.8,No.2,pp.162-167,2010.

[http://www.wiete.com.au/journals/WTE%26TE/Pages/Vol.8,%20No.2%20\(2010\)/6-15-GADZHANOV.pdf](http://www.wiete.com.au/journals/WTE%26TE/Pages/Vol.8,%20No.2%20(2010)/6-15-GADZHANOV.pdf)

[71] Aleksandrov S, Jovanović Z, Čajetinac S: *Programmable logic controller Festo connecting through controllers and industrial ethernet Transmission Control Protocol/Internet Protocol*, X Triennial International SAUM Conference on Systems, Automatic Control and Measurements Niš, Serbia, November 10th-12th, 2010.

[72] Aleksandrov S, Jovanović Z, Čajetinac S, Stoimenov L: *Access to PLC in real-time software package Team Viewer*, X Triennial International SAUM Conference on Systems, Automatic Control and Measurements Niš, Serbia, November 10th-12th,2010, pp. 145-148.

[73] Aleksandrov, Jovanović Z, Antić D: *The new approach to training engineers for applying programmable logic controllers in modern systems of automatic control*, Thematic collection of papers of international significance – Reengineering and entrepreneurship under the contemporary conditions of enterprise business, University of Niš, Faculty of electronic engineering, Faculty of economics, Niš, 2012. pp. 34-52.

[74] Aleksandrov S, Aleksandrov R, Jovanović Z, Čajetinac S: *Robot control over the Internet using computers and mobile phones*, 12th International Conference Research and

Development in Mechanical Industry, RaDMI 2012, 13 - 17 September 2012, Vrnjačka Banja, Serbia, pp.715-720.

[75] Malić I: *Mali uzorci i primena bootstrap metoda u ekonometriji*, master rad, Univerzitet u Novom Sadu, Prirodno-matematički fakultet, 2012.
http://www.dmi.uns.ac.rs/site/dmi/download/master/primenjena_matematika/IvanaMalic.pdf

[76] Prica S: *Teorija i praksa dobijanja uzoraka na osnovu raspoloživih podataka*, master rad, Univerzitet u Beogradu, matematički fakultet, 2014.
http://elibrary.matf.bg.ac.rs/bitstream/handle/123456789/3760/master_rad_Suzana_PricaR.pdf?sequence=1

[77] Lalović T: *Metodologija naučno-istraživačkog rada sa osnovama statistike*, materijal za studente, Fakultet za mediteranske poslovne studije Tivat. http://www.fms-tivat.me/predavanja4god/Metodologija_naucno_istrazivackog_rada_ZL.pdf

[78] Merkle M: *Verovatnoća i statistika – za inženjere i studente tehnike*, drugo izdanje, Akademska Misao, Beograd, 2006.

<http://www.asee.org/public/conferences/20/papers/6960/view>

[79] Pravilnik o nastavnom planu i programu oglada za obrazovni profil Tehničar mehatronike, Službeni glasnik RS - Prosvetni glasnik br.10/2014. Beograd.

[80] Aleksandrov S, Jovanović Z, Antić D, Nikolić S, Perić S, Aleksandrov R: *Analysis of Efficiency of Applied Virtual Simulation Models and Real Learning Systems in the Process of Education in Mechatronics*, Acta Polytechnica Hungarica, vol.10, No 6, 2013, pp. 59-76, DOI: 10.12700/APH.10.06.2013.6.4.

http://www.uni-obuda.hu/journal/Aleksandrov_Jovanovic_Antic_Nikolic_Peric_Aleksandrov_44.pdf

[81] Grupa autora, *Priručnik o polaganju maturalnog ispita u obrazovnom profile tehničar mehatronike-ogled*, Zavod za unapređivanje obrazovanja i vaspitanja i Centar za stručno obrazovanje i obrazovanje odraslih, Beograd, 2012.

[82] Glišić T, Ilić J, Jadrijević D: *Ocenjivanje zasnovano na kompetencijama u stručnom obrazovanju*, Zavod za unapređivanje obrazovanja i vaspitanja, Beograd, 2013. ISBN 978-86-87137-47-9

<http://www.zuov.gov.rs/novisajt2012/dokumenta/CSOOD/Publikacije/Ocenjivanje%20zasnovano%20na%20kompetencijama.pdf>

[83] Aleksandrov S, Jovanović Z, , Šešlija D, Aleksandrov R : *Analiza primene WEB laboratorije u nastavi mehatronike*, Tehnika i informatika u obrazovanju ,V konferencija sa međunarodnim učešćem, Fakultet tehničkih nauka u Čačku, 30 – 31. maj 2014.

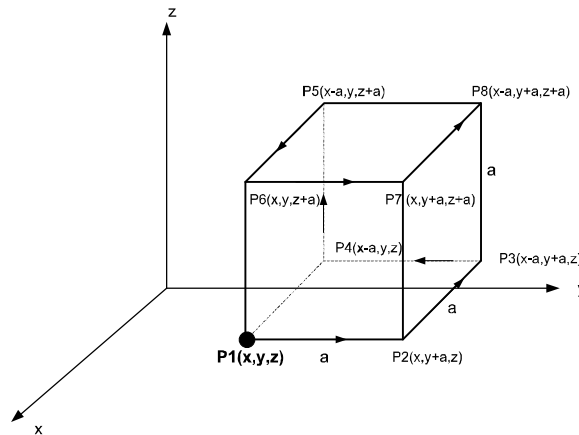
<http://www.ftn.kg.ac.rs/konferencije/tio2014/PDF/Zbornik%20radova%20TIO%202014.pdf> , pp.345-352.

[84] Aleksandrov R, Aleksandrov S, Jovanović Z: *Novi pristup u nastavi programiranja industrijskog robota*, Tehnika i informatika u obrazovanju, 4. Internacionalna konferencija, Tehnički fakultet Čačak, 1-3.6.2012., pp. 82-89, UDK: 007.52

PRILOG: Edukativne trajektorije

Vežba 1. Kretanje robota po trajektoriji sa jednom referentnom tačkom

Napisati program za kretanje alata robota po ivicama kocke stranice $a=20mm$, ako su poznate samo koordinate jednog temena kocke $P1(x,y,z)$. Robot polazi iz početne pozicije $P1$, a zatim zadatom brzinom (20% od maksimalne), po linearnoj trajektoriji nastavlja kontinualno linearno kretanje kroz pozicije $P2, P3, P4, P5, P6, P7$ do $P8$. Na slici p.1 označena su temena kocke i trajektorija kretanja robota.



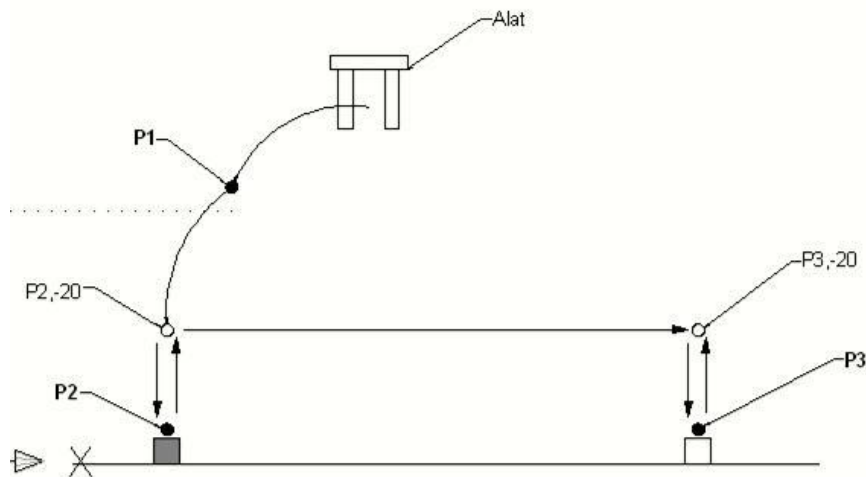
Slika p.1. Kretanje robota po ivicama kocke

Za ovu vežbu potrebno je definisati fajl pozicija robota, koji sadrži samo koordinate početne tačke $P1$. Koordinate drugih tačaka dobijaju se tako što se u programu robota vrši dodeljivanje koordinata tačaka u odnosu na prethodnu tačku robota. Dodeljivanje koordinata za svaku tačku vrši se po x, y i z koordinati. Kod programa za traženo kretanje robota je:

```
10 OVRD 20
20 HCLOSE 1
25 CNT 1
30 MOV P1
40 P2.X=P1.X
50 P2.Y=P1.Y+a
60 P2.Z=P1.Z
70 MVS P2
80 P3.X=P2.X-a
90 P2.Y=P2.X
100 P2.Z=P2.Z
110 MVS P3
....
500 P8.X=P7.X-a
510 P8.Y=P7.Y
520 P8.Z=P8.Z
530 MVS P8
535 CNT 0
540 END
```

Vežba 2. Kretanje robota od "tačke do tačke"

Napisati program za prenošenje radnog dela iz tačke P2 u P3 prema trajektoriji koja je prikazana na slici p.2. Algoritam rada je sledeći: Pre početka kretanja otvoriti pneumatsku hvataljku, definisati brzinu robota na 50% od maksimalne. Robot polazi iz početne tačke P1 i nastavlja kretanje do tačke P2 najkraćom putanjom. U poziciji koja je 20mm iznad P2, robot smanjuje brzinu na 10% od maksimalne i vertikalno se spušta u tačku P2, čeka 0.5s, hvata radni deo, čeka 0.5s, vertikalno se podiže 20 mm iznad tačke P2, zatim se horizontalno pomera maksimalnom brzinom do tačke koja je 20mm iznad tačke P3, smanjuje brzinu na 10% od maksimalne i vertikalno se spušta u tački P3, čeka 0.5s., otvara pneumatsku hvataljku, čeka 0.5s, vertikalno se podiže 20 mm iznad tačke P3.



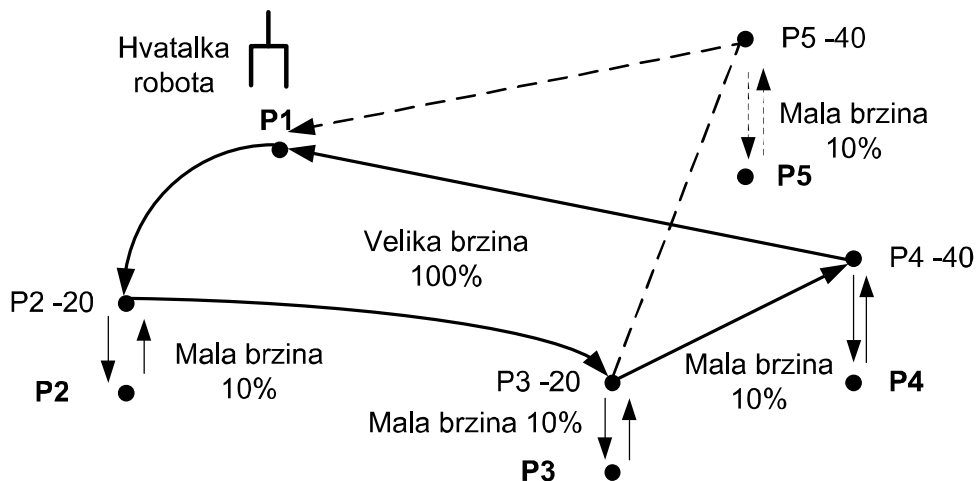
Slika p.2: Simulcija kretanja robota od tačke do tačke bez prepreka

Pre početka pisanja programa, neophodno je definisati fajl pozicija koji sadrži koordinate tačaka P1, P2 i P3. Programski kod koji upravlja ovakvim kretanjem je:

```
10 OVRD 50
20 HOPEN 1
30 MOV P1
40 MOV P2,-20
45 OVRD 10
50 MVS P2
60 DLY 0.5
70 HCLOSE 1
80 DLY 0.5
90 MVS P2,-20
95 OVRD 100
100 MOV P3,-20
105 OVRD 10
110 MVS P3
120 DLY 0.5
130 HOPEN 1
140 DLY 0.5
150 MVS P3
160 OVRD 50
170 END
```

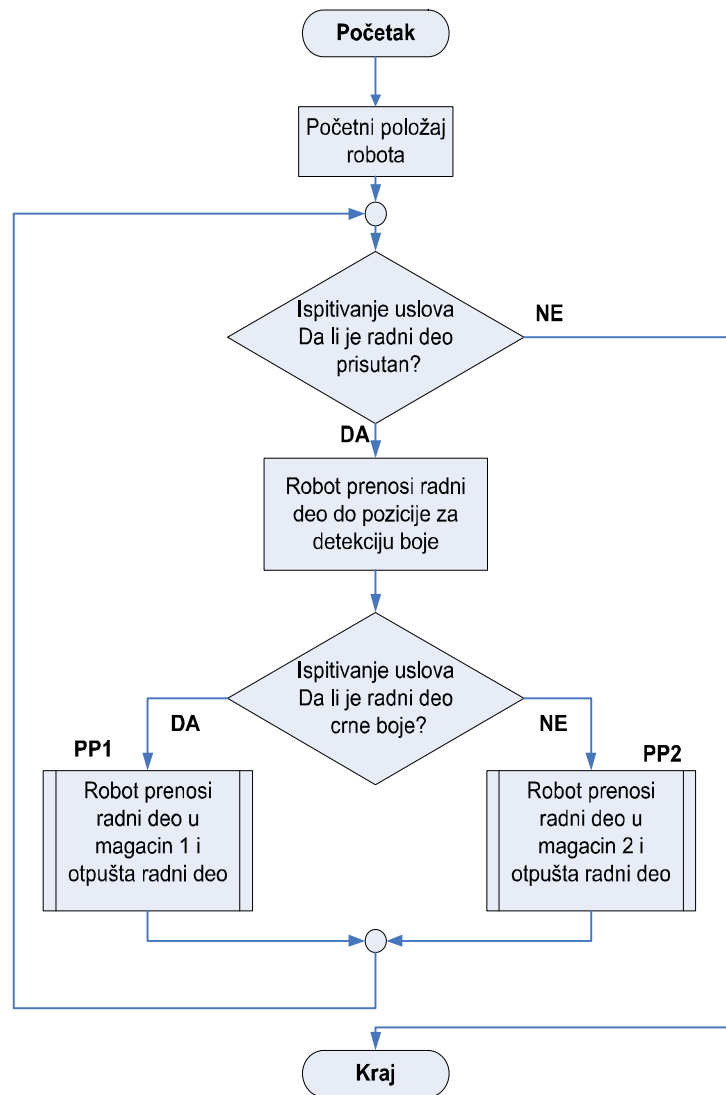
Vežba 3. Sortiranje delova prema boji i vrsti materijala

Napisati program za sortiranje radnih delova prema boji i vrsti materijala. Algoritam rada sa međupoložajima i različitim brzinama na delovima trajektorije, prikazan je na slici p.3. Pre početka pisanja programa, neophodno je definisati fajl pozicija koji sadrži koordinate tačaka P1, P2, P3, P4 i P5.



Slika p.3: Trajektorija kretanja robotske ruke za sortiranje delova

Algoritam programa za prenošenje i sortiranje prikazan je na slici p.4. Robot iz početne pozicije dolazi u položaj P1, otvara hvataljku i čeka sve dok radni deo ne stigne u poziciju za prenošenje P2. Kada se optički senzor za prisustvo radnog dela aktivira, robot se pozicionira 20 mm iznad radnog dela, vertikalno spušta, hvata radni deo, vertikalno podiže 20 mm i prenosi deo u položaj P3 gde se vrši detekcija boje. Ako je radni deo crvene boje, izvršava se potprogram za prenošenje crvenih delova PP1 i crveni deo prenosi u položaj P4, gde se nalazi magacin za crvene delove, a ukoliko nije onda se izvršava potprogram PP2 - za prenošenje crnih delova u poziciju P5, gde se nalazi magacin za crne delove. Brzina robota u segmentima gde su veća rastojanja može biti maksimalna, a kod preciznih pozicioniranja brzina se ograničava na 10% od maksimalne. Program se ponavlja ciklično[84].



Slika p.4: Algoritam programa za prenošenje i sortiranje

Za programiranje koristi se programski jezik Melfa Basic IV. Koraci u izvršenju programa za prenošenje, detekciju boje i sortiranje radnih delova su:

1. Otvori hvataljku robota
2. Robotska ruka se pomera u početnu poziciju P1
3. Robot čeka sve dok sa vertikalnog transportera ne stigne deo na platformu za hvatanje u tačku P2, kada aktivira optički senzor ($M_IN(8)=1$)
4. Robot dolazi u položaj za preuzimanje radnog dela u tačku P2, zatvara pneumatsku hvataljku
5. Robotska ruka se pomera vertikalno naviše i dolazi u poziciju P3 za detekciju boje
6. Ako se aktivira senzor boje, radni deo je crven i aktivira potprogram PP1 (prenošenje u magacin 1)
7. Ako senzor boje nije aktiviran, radni deo je crne boje i aktivira potprogram PP2 (prenošenje u magacin 2)

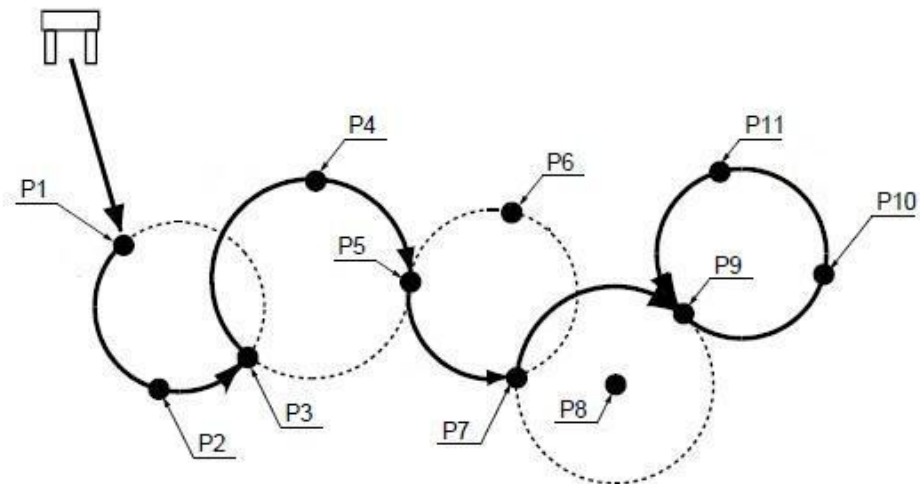
8. Kada robot stigne u magacin 1 (pozicija P4) ili magacin 2 (pozicija P5), otpušta radni deo i vraća se u početnu poziciju P1
9. Program se ciklično ponavlja sve dok se ne ostvari uslov za kraj
10. Kraj

Programski kod za realizaciju zadatog kretanja je:

```
10 OVRD 30
20 MOV P1
30 HOPEN 1
40 WAIT M_IN(8)=1
50 MOV P2,-20
60 MVS P2
70 DLY 0,1
80 HCLOSE 1
90 DLY 0.1
100 MVS P2,-20
110 MOV P3,-20
120 MVS P3
130 DLY 1
140 IF M_IN(10)=1 THEN *PP1 ELSE GOTO *PP2
150 *PP1
160 MOV P4,-40
170 MVS P4
180 DLY 0.1
190 HOPEN 1
200 DLY 0.1
210 MVS P4,-40
220 GOTO 40
230 *PP2
240 MOV P5,-40
250 MVS P5
260 DLY 0.1
270 HOPEN 1
280 DLY 1
290 MVS P5,-40
300 GOTO 40
310 END
```

Vežba 4. Kretanje robota od "tačke do tačke" po kružnim putanjama

Napisati program za kontinualno kretanje po trajektoriji koja je prikazana na slici p.5. Algoritam rada je sledeći: robot polazi iz tačke P1 krećući se po delu kružne putanje kroz tačku P2 do tačke P3. Kretanje se nastavlja po delu druge kružne linije kroz tačku P4 do tačke P5, pri čemu aktivira izlaz M_OUT 3. Robot iz tačke P5 nastavlja kretanje po delu treće kružne putanje samo ako ulazni senzor M_IN(10) nije aktivan, ali tako da zaobiđe tačku P6 koja se nalazi na toj kružnoj putanji. Ako je senzor M_IN(10)=1, ova naredba se preskače i prelazi na sledeću naredbu. Iz tačke P7 robot nastavlja kretanje po delu kružne putanje do tačke P9, gde je tačka P8 centar kruga. Iz tačke P9 robot nastavlja kretanje po kružnici kroz tačke P10 i P11 do tačke P9.



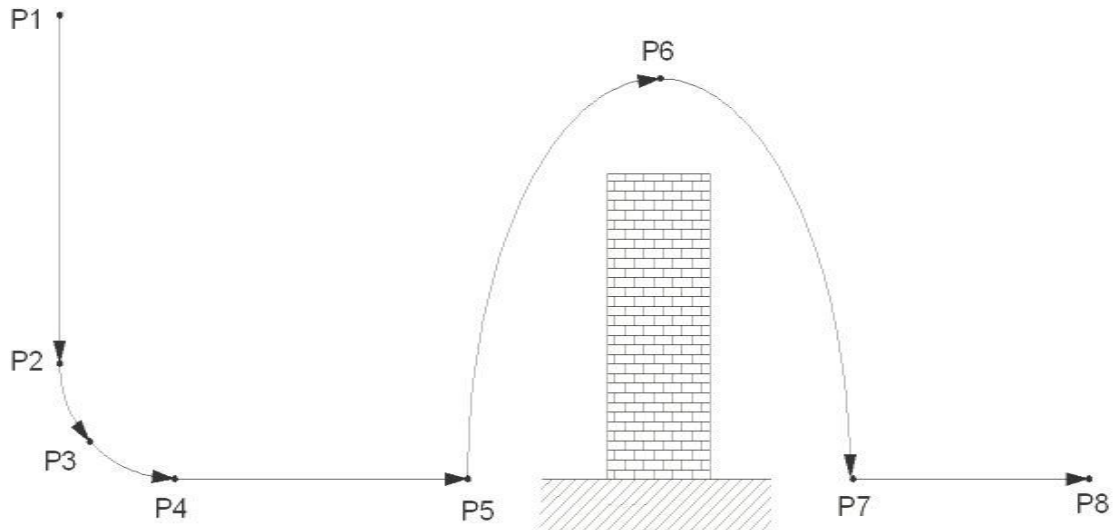
Slika p.5: Trajektorija kretanja robotske ruke po kružnim trajektorijama

Programski kod za kretanje po zadatoj trajektoriji uz zadate uslove je:

```
10 OVRD 30
20 HCLOSE 1
30 MOV P1
40 MVR P1,P2,P3
50 MVR P3,P4,P5 WTH M_OUT(3)=1
60 MVR2 P5,P7,P6 WTHIF M_IN(10)=1, SKIP
70 MVR3 P7,P8,P9
80 MVC P9,P10,P11
90 END
```


Vežba 5. Izbegavanje prepreke korišćenjem senzora

Napisati program za kontinualno kretanje robota po zadatoj putanji kao na slici p.6, tako da u slučaju detekcije prepreke, robot promeni putanju, zaobiđe prepreku i stigne u krajnji položaj.



Slika p.6: Trajektorija kretanja robota od tačke do tačke sa poznatom preprekom

Programski kod za kretanje po zadatoj trajektoriji uz zadate uslove je:

```
10 OVRD 30
20 HCLOSE 1
30 MOV P1
40 CNT 1
50 MVS P2
60 MVR P2,P3,P4
70 MVS P5
80 MVS2 P7 WTHIF M_IN(9)=1, SKIP
90 MVR P5,P6,P7
100 CNT 0
110 END
```

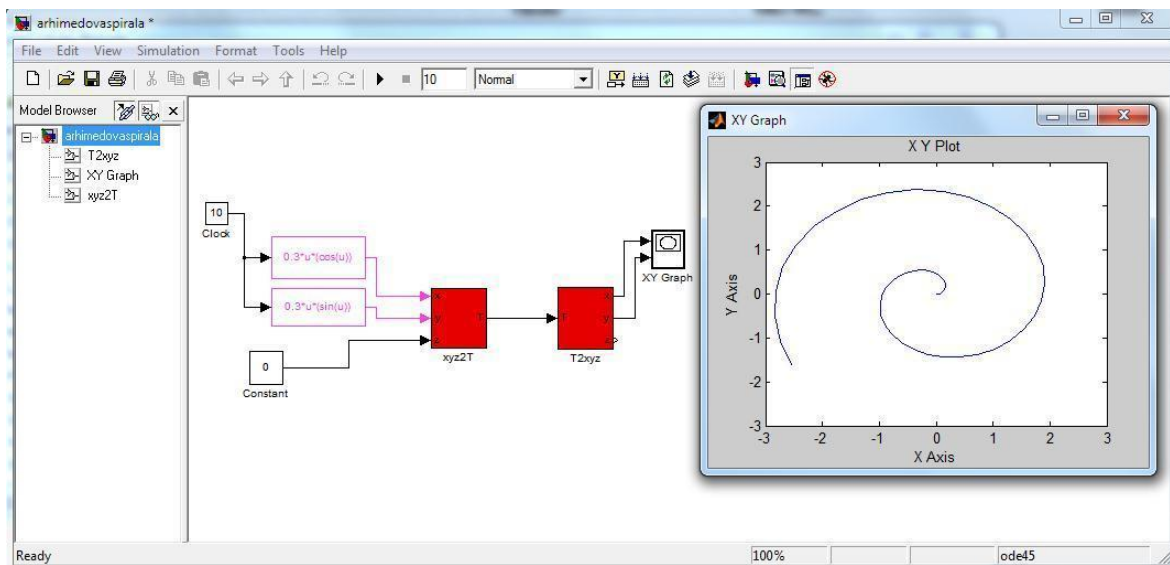
Vežba 6. Programiranje robota po složenim dvodimenzionalnim trajektorijama

Primena industrijskog robota na poslovima zavarivanja i vizuelnog ispitivanja kvaliteta zavarivanja zahteva kretanje robota po složenim dvodimenzionalnim i trodimenzionalnim trajektorijama. Napisati program za kontinualno kretanje robota po složenoj trajektoriji – Arhimedova spirala, čiji je parametarski oblik dat jednačinama:

$$x = a.t.\cos(t) \quad (\text{p.1})$$

$$y = b.t.\cos(t) \quad (\text{p.2})$$

Na slici p.7 prikazan je simulacioni model industrijskog robota za kretanje po Arhimedovoj spirali i simulirana trajektorija kretanja robota po datim jednačinama.



Slika p.7: Model robota za kretanje po Arhimedovoj spirali

Kod programiranja industrijskog robota potrebno je definisati apsolutne koordinate početne tačke (x_0, y_0, z_0) i početne uslove: brzinu, ubrzanje i granične vrednosti koordinata. Kod dvodimenzionalnog kretanja (x-y ravan), koordinata $z = z_0$ ima konstantnu vrednost tokom kretanja robota. U programskom kodu definiše se početna tačka robota, koristite se funkcije za pretvaranje ugaonih pomeraja iz stepena u radijane i vrši programiranje robota po zadatoj putanji. Kod programiranja po zadatoj trajektoriji mora se voditi računa da koordinate koje se dobijaju inverznom kinematikom budu u radnom opsegu robota. Na vrh robota postavljena je olovka koja označava trajektoriju kretanja. Na slici p.8 prikazan je industrijski robot koji izvršava kretanje robota po Arhimedovoj spirali.



Slika p.8: Kontinualno kretanje industrijskog robota po složenoj trajektoriji

Programski kod kretanja robota po arhimedovoj spirali je:

```
10 OVRD 30
20 HCLOSE 1
30 MOV P1,-20
40 MVS P1
50 VAR1=P1.X
60 VAR2=P1.Y
70 FOR I=0 TO 360
80 VAR3=VAR1+0.3*I*COS(RAD(I))
90 VAR4=VAR2+0.3*I*SIN(RAD(I))
100 P1.X=VAR3
110 P1.Y=VAR4
120 MOV P1
130 NEXT I
140 END
```

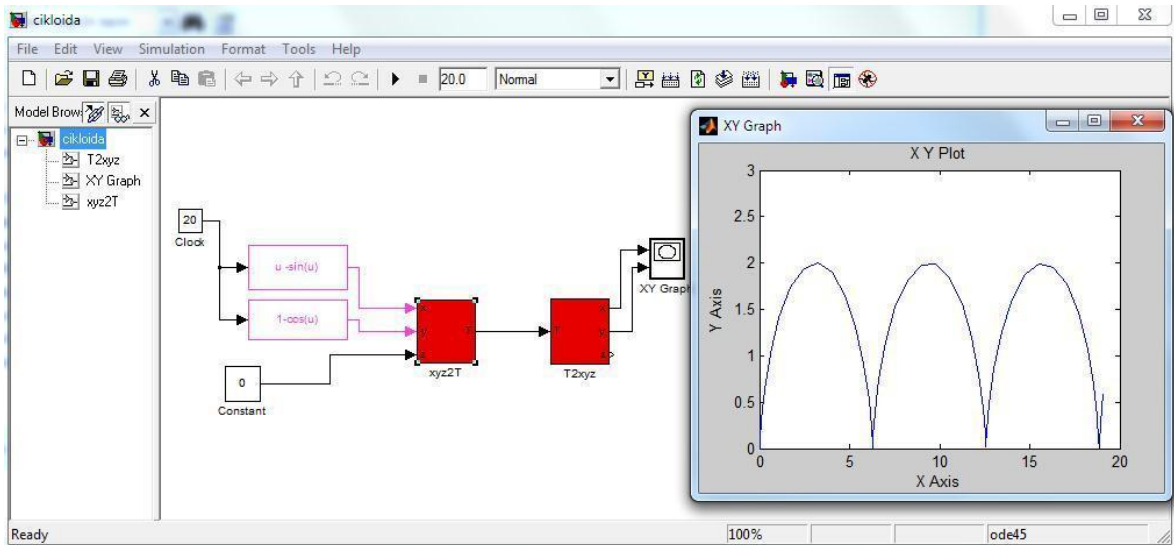
Vežba 7. Programiranje robota po složenim putanjama

Napisati program za kontinualno kretanje robota po složenoj trajektoriji – cikloida, čiji je parametarski oblik dat jednačinama:

$$x = t - \sin(t) \quad (\text{p.3})$$

$$y = 1 - \cos(t) \quad (\text{p.4})$$

Na slici p.9 prikazan je simulacioni model industrijskog robota za kretanje po cikloidi i simulirana trajektorija kretanja robota po datim jednačinama.



Slika p.9: Model robota za kretanje po cikloidi

Programski kod kretanja robota po cikloidi je:

```
10 OVRD 30
20 HCLOSE 1
30 MOV P1,-20
40 MVS P1
50 VAR1=P1.X
60 VAR2=P1.Y
70 FOR I=0 TO 720
80 VAR3=VAR1+(I-SIN(RAD(I)))
90 VAR4=VAR2+(1-COS(RAD(I)))
100 P1.X=VAR3
110 P1.Y=VAR4
120 MOV P1
130 NEXT I
140 END
```

Vežba 8. Programiranje robota po složenim trodimenzionalnim putanjama

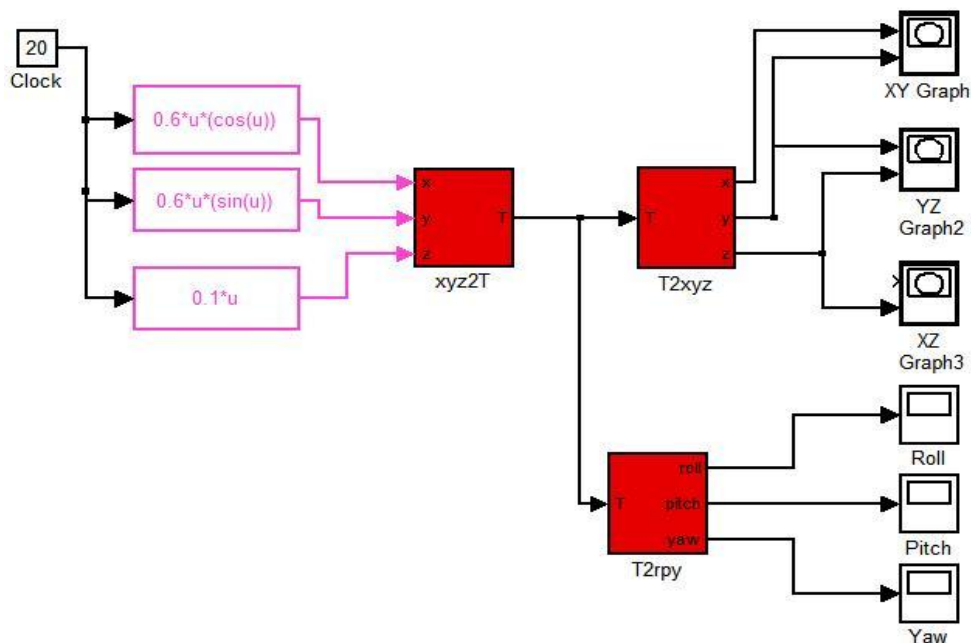
Kod trodimenzionalnog kretanja razvijen je simulacioni model za kontinualno kretanje po složenoj trodimenzionalnoj trajektoriji – helikoida čije su jednačine date u parametarskom obliku:

$$x = a.\cos(t) \quad (\text{p.5})$$

$$y = a.\sin(t) \quad (\text{p.6})$$

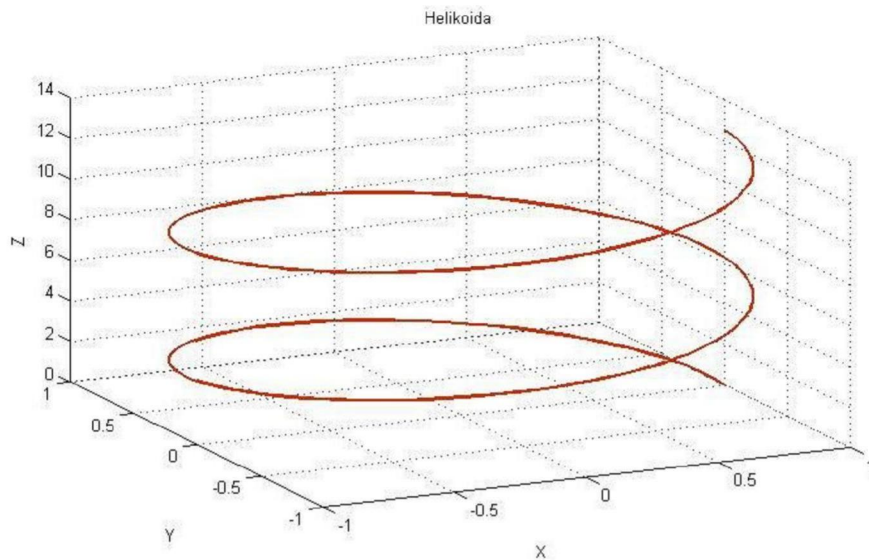
$$z = b.t \quad (\text{p.7})$$

Na slici p.10 prikazan je simulacioni model industrijskog robota za kretanje po helikoidi, a na slici p.11 simulirana trajektorija kretanja robota po datim jednačinama.



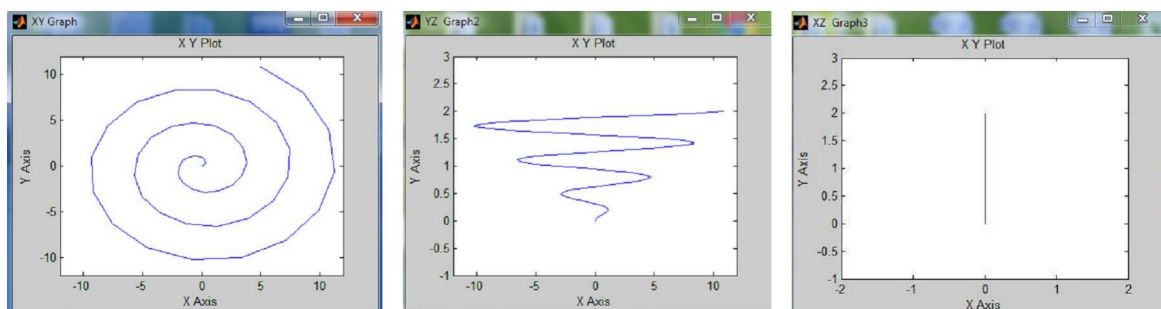
Slika p.10: Model robota u Matlabu za kretanje po helikoidnoj putanji

Kod programiranja i testiranja industrijskog robota po helikoidi javljaju se slični problemi kao kod dvodimenzionalnog kretanja. Brzina kretanja prilikom kretanja robota po složenim krivama ograničena je brojem tačaka kroz koje robot prolazi, brzinom procesora kontrolera i geometrijom robota. U ovakvim aplikacijama prioritet predstavlja tačnost i ponovljivost, dok su vednosti brzine od manjeg značaja.



Slika p.11: Simulacija kretanja robota po helikoidnoj putanji

Na slici p.12 prikazane su simulirane trajektorije robota kod helikoidnog kretanja u ravnima x-y, y-z i x-z.



Slika p.12: Praćenje kretanja robota u x-y ravni, y-z-ravni i x-z ravni

Programski kod kretanja robota po helikoidi je:

```

10 OVRD 30
20 HCLOSE 1
30 MOV P1,-20
40 MVS P1
50 VAR1=P1.X
60 VAR2=P1.Y
70 VAR3=P1.Z
80 FOR I=0 TO 1080
90 VAR4=VAR1+0.6*I*COS(RAD(I))
100 VAR5=VAR2+0.6*I*SIN(RAD(I))
110 VAR6=0.1*I/6.28
120 P1.X=VAR4
130 P1.Y=VAR5
140 P1.Z=VAR6
120 MOV P1
130 NEXT I
140 END

```

REČNIK TERMINA

Blended learning - Hibridno ili mešovito učenje

Computer-Aided Design (CAD) - Projektovanje podržano računarom,

Computer-Aided Manufacturing (CAM) - Proizvodnja podržana računarom

Computer Numerical Control (CNC) – Kompjuterski upravljane mašine

Content Management Systems (CMS) - Sistemi za upravljanje sadržajem

Distance learning - Učenje na daljinu

Distance Learning System (DLS) - Sistem za učenje na daljinu

e-learning - elektronsko učenje

Face-to-face – Licem u lice

Global System for Mobile communication (GSM) – Sistem za mobilnu komunikaciju

Hyper Text Transfer Protocol (HTTP) – Protokol za prenos hiperteksta

Information Technology (IT) -informacione tehnologije

Information Management Systems (IMS) - Informacioni sistemi za upravljanje

Ladder diagram - Jezik lestvičastih dijagrama

Learning Management Systems (LMS) - Sistem za upravljanje učenjem

Local Area Network (LAN) - Lokalna računarska mreža

Metropolitan Area Network (MAN) - Mreže srednjeg dometa

Modular Object-Oriented Dynamic Learning Environment (Moodle) – Modularno objektno orijentisano dinamičko okruženje za učenje

Programmable Logic Controller (PLC) - Programibilni logički kontroler

Remote learning – Učenje na daljinu

Shareable Content Object Reference Model (SCORM) - Objektni referentni model deljenog sadržaja

Transmission Control Protokol/Internet Protokol (TCP/IP) – Protokol za upravljanje prenosom podataka- Internet protokol

Virtual education – Virtuelno obrazovanje

World Wide Web (Web) – sistem međusobno povezanih hipertekstualnih dokumenata na Internetu

SPISAK SLIKA

Slika 2.1: Blumova taksonomija	11
Slika 2.2: Relacione veze između tradicionalnih didaktičkih metoda i e-alata	20
Slika 2.3: Struktura SCORM paketa	26
Slika 2.4: XAMPP upravljački interfejs	28
Slika 2.5: Blok šema sistema za daljinsko elektronsko učenje	29
Slika 2.6: LMS Moodle Web laboratorije mehatronike	30
Slika 3.1: Blok šema mehatronskog sistema	34
Slika 3.2: Ograničenja između svih domena na nivou konceptualnog projektovanja	36
Slika 3.3: Ograničenja između MCAD i ECAD modela na nivou realizacije	36
Slika 3.4: Tradicionalni proces projektovanja mehatronskog sistema	37
Slika 3.5: Struktura i opseg kretanja robota Mitsubishi RV2AJ	38
Slika 3.6: Modeliranje ograničenja robota Mitsubishi RV2AJ	39
Slika 3.7: Savremeni pristup projektovanja mehatronskog sistema – Projektovanje zasnovano na modelu	40
Slika 3.8: Algoritam projektovanja mehatronskog sistema „Model-Based Desing“	41
Slika 3.9: Osnovna konfiguracija robota tipa RRR	43
Slika 3.10: Osnovne konfiguracije manipulatora	44
Slika 3.11: Karakteristične veličine industrijskog robota	47
Slika 3.12: Danavit-Hartenbergovi parametri kinematskog para rotacionih zglobova	48
Slika 3.13: Blok šema upravljanja robotom u prostoru unutrašnjih koordinata	54
Slika 3.14: Blok šema upravljanja robotom u spoljašnjim koordinatama	54
Slika 3.15: Karakteristični slučajevi izbegavanja prepreka	58
Slika 3.16: Izbegavanje prepreka po algoritmu Bug 1	60
Slika 3.17: Izbegavanje prepreka po algoritmu Bug 2	60
Slika 3.18: D-H partametri industrijskog robota Mitsubishi RV2AJ	64
Slika 3.19: Model industrijskog robota Mitsubishi RV2AJ u MATLAB-u	66
Slika 3.20: Promene vrednosti položaja zglobova	67
Slika 3.21: Promene vrednosti brzina zglobova	68
Slika 3.22: Promene vrednosti ubrzanja zglobova	69
Slika 4.1: Struktura mehatronskog sistema – sinergija znanja iz različitih oblasti	74
Slika 4.2: Upporedni prikaz lokalnog i daljinskog učenja	76
Slika 4.3: Hibridni model učenja u mehatronici	77

Slika 4.4: Primena LMS sistema na Edmodo platformi	80
Slika 4.5: Ocenjivanje i praćenje pomoću LMS-a Edmodo	81
Slika 4.6: Organizacija Web laboratorije mehatronike Tehničke škole u Trsteniku	84
Slika 4.7: Virtuelni trodimenzionalni model stanice za distribuciju	87
Slika 4.8: Simulacija rada i stanja promenljivih stanice za distribuciju	89
Slika 4.9: Virtuelni trodimenzionalni model stanice za sortiranje	90
Slika 4.10: Virtuelno 3D okruženje softverskog paketa Cosimir Robotics	91
Slika 4.11: Trodimenzionalna simulacija kretanja robota po složenoj trajektoriji	93
Slika 4.12: Didaktički mehatronski sistemi Festo MPS – robotska stanica, stanica za distribuciju i stanica za sortiranje	95
Slika 4.14: Programsko okruženje Robot Explorer	98
Slika 4.15: Modularni prikaz stanice za sortiranje	101
Slika 4.16: Prikaz mehatronskog sistema za sortiranje	102
Slika 4.17: Modularni prikaz stanice za distribuciju	103
Slika 4.18: Stanica za distribuciju i stanica za sortiranje	105
Slika 4.19: Modularni elektropneumatski sistem upravljan PLC-om	106
Slika 4.20: Upravljanje asihronim motorom pomoću PLC-a i frekventnog regulatora	107
Slika 4.21: IP Web kamera u kabinetu mehatronike	109
Slika 4.22: Definisavanje portova rutera	110
Slika 4.23: Program DUC za dinamičko ažuriranje IP adresa	111
Slika 4.24: Daljinski pristup računaru pomoću Team Viewer-a	113
Slika 4.25: Praćenje i upravljanje robotom na daljinu pomoću Team Viewer-a i IP Web kamere	114
Slika 4.26: Praćenje i upravljanje didaktičkim sistemima pomoću Team Viewer-a i IP Web kamere	115
Slika 4.27: Eksperimentalno učenje na daljinu na modularnom sistemu	116
Slika 5.1: Procentualni prikaz raspodele ocena u školskoj 2010/2011 godini	125
Slika 5.2: Procentualni prikaz raspodele ocena u školskoj 2011/2012 godini	126
Slika 5.3: Histogram hipoteze H_{01} bootstrap ocena nepoznatog parametra θ i provera normalnosti skupa	127
Slika 5.4: Histogram hipoteza H_{02} bootstrap ocena nepoznatog parametra θ i provera normalnosti skupa	128
Slika 5.5: Procentualna raspodela ocena anketnog upitnika	135
Slika 5.6: Uporedni grafički prikaz uspeha referentnog i oglednog odeljenja	137

Slika 5.7: Histogram hipoteze H_{01} bootstrap ocena nepoznatog parametra θ i provera normalnosti skupa	140
Slika 5.8: Histogram hipoteze H_{02} bootstrap ocena nepoznatog parametra θ i provera normalnosti skupa	140
Slika 5.9 Histogram hipoteze H_{03} bootstrap ocena nepoznatog parametra θ i provera normalnosti skupa	140
Slika 5.10: Histogram hipoteze H_{04} bootstrap ocena nepoznatog parametra θ i provera normalnosti skupa	141
Slika 5.11: Histogram hipoteze H_{05} bootstrap ocena nepoznatog parametra θ i provera normalnosti skupa	141
Slika 5.12: Histogram hipoteze H_{06} bootstrap ocena nepoznatog parametra θ i provera normalnosti skupa	141
Slika 5.13: Modeli učenja ogledne i referentne grupe	144
Slika 5.14: Uporedni grafički prikaz uspeha ogledne i referentne grupe	146
Slika 5.15: Uporedni grafički prikaz teorijskih znanja ogledne i referentne grupe	147
Slika 5.16: Uporedni grafički prikaz praktičnih veština ogledne i referentne grupe	147
Slika 5.17: Uporedni prikaz histograma ulaznog i izlaznog testa teorijskih znanja ogledne grupe A	148
Slika 5.18: Uporedni prikaz histograma ulaznog i izlaznog testa teorijskih znanja referentne grupe B	149
Slika 5.19: Uporedni prikaz histograma ulaznog i izlaznog testa praktičnih veštine ogledne grupe A	149
Slika 5.20: Uporedni prikaz histograma ulaznog i izlaznog testa praktičnih veštine referentne grupe B	150
Slika p.1. Kretanje robota po ivicama kocke	165
Slika p.2: Simulacija kretanja robota od tačke do tačke bez prepreka	166
Slika p.3: Trajektorija kretanja robotske ruke za sortiranje delova	167
Slika p.4: Algoritam programa za prenošenje i sortiranje	168
Slika p.5: Trajektorija kretanja robotske ruke po kružnim trajektorijama	170
Slika p.6: Trajektorija kretanja robota od tačke do tačke sa poznatom preprekom	171
Slika p.7: Model robota za kretanje po Arhimedovoj spirali	172
Slika p.8: Kontinualno kretanje industrijskog robota po složenoj trajektoriji	173
Slika p.9: Model robota za kretanje po cikloidi	174
Slika p.10: Model robota u Matlab-u za kretanje po helikoidnoj putanji	175

Slika p.11: Simulacija kretanja robota po helikoidnoj putanji	176
Slika p.12: Praćenje kretanja robota u x-y ravni, y-z-ravni i x-z ravni	176

SPISAK TABELA

Tabela 3.1: Karakteristični parametri DH matric	63
Tabela 3.2: DH parametri industrijskog robota RV2AJ	65
Tabela 3.3: Uporedni prikaz simuliranih i realnih vrednosti koordinata vrha robota	70
Tabela 4.1: Realni didaktički sistemi u laboratoriji mehatronike	82
Tabela 4.2: Softverski paketi u laboratoriji mehatronike	83
Tabela 4.3: Funkcijski moduli i karakteristike realnih didaktičkih sistema	88
Tabela 4.4: Oblasti primene didaktičkih sistema	96
Tabela 4.5: Karakteristični Web servisi i odgovarajući portovi	109
Tabela 5.1: Vrednosti kritičnih vrednosti statistike	120
Tabela 5.2: Skala ocenjivanja ankete	123
Tabela 5.3: Uporedni prikaz srednje ocene upitnika u školskim 2010/2011. i 2011/2012. godinama	124
Tabela 5.4: Raspodela rezultata istraživanja u školskoj 2010/2011 godini	124
Tabela 5.5: Raspodela rezultata istraživanja u školskoj 2011/2012 godini	125
Tabela 5.6: Bootstrap ocene sredine, varijanse i standardne devijacije ocenjivača 2010/2011	126
Tabela 5.7: Bootstrap ocene sredine, varijanse i standardne devijacije ocenjivača 2011/2012	127
Tabela 5.8: Prosečna ocena na maturskom ispitu 2010/2011 po školama	131
Tabela 5.9: Uporedni prikaz sredine i standardne devijacije školske 2010/2011 i 2011/2012	132
Tabela 5.10: Upitnik i raspodela ocena istraživanja o značaju primene Web laboratorije	134
Tabela 5.11: Uporedni prikaz uspeha referentnog i oglednog odeljenja	136
Tabela 5.12: Bootstrap ocene sredine, varijanse i standardne devijacije ocenjivača	138
Tabela 5.13: Uporedni prikaz prosečnih ocena ogledne i referentne grupe	146
Tabela 5.14: Bootstrap ocene sredine, varijanse i standardne devijacije ocenjivača	148

BIOGRAFIJA AUTORA

Slobodan Aleksandrov rođen je 20.8.1968. godine u Bosilegradu gde je završio osnovnu i srednju školu sa odličnim uspehom. Nosilac je diploma „Vuk Karadžić“ i „Mihajlo Petrović - Alas“. Elektronski fakultet u Nišu upisao je školske 1988/1989. godine na profilu Automatika i elektronika, a diplomirao 25.11.1993. godine. Tokom studija angažovan je u nastavi kao saradnik na katedri za Automatiku.

U periodu od 1994.-1999. godine radio je u Elektronskoj industriji Niš na poslovima projektovanja elektronskih uređaja. Od septembra 1999. godine do januara 2002. godine radio je kao projektant procesne opreme u kompaniji IHP – Prva Petoletka Trstenik. Od početka 2002. godine do danas radi kao profesor elektrotehničke grupe predmeta u Tehničkoj školi Trstenik, a od školske 2010/2011. godine radi kao saradnik u nastavi na Visokoj tehničkoj mašinskoj školi strukovnih studija u Trsteniku.

Od 2005. godine član je republičkog tima za razvoj kurikuluma novog obrazovnog profila "Tehničar mehatronike-ogled", koji je uveden u obrazovni sistem Republike Srbije od školske 2006/2007. godine. Učestvovao je u razvoju teorijskih i praktičnih zadataka za polaganje stručne mature obrazovnog profila Tehničar mehatronike, i jedan od autora Priručnika za polaganje maturalnog ispita. Od 2009.-2011.godine, obavljao je poslove internog nosioca promena u okviru programa reforme srednjeg stručnog obrazovanja u Tehničkoj školi Trstenik, a školske 2010/2011. godine imenovan je za republičkog koordinatora oglednog profila Tehničar mehatronike. Na predlog Zavoda za unapređivanje obrazovanja i vaspitanja, angažovan je kao ekspert za reviziju kurikuluma obrazovnog profila Tehničar mehatronike. Aktivan je učesnik u mnogim domaćim i međunarodnim projektima. Tokom 2014. godine realizovao je veliki broj obuka nastavnika "Primena IKT u nastavi" u okviru projekta IPA 2011 „Podrška razvoju ljudskog kapitala i istraživanju – opšte obrazovanje i razvoj ljudskog kapitala”.

Doktorske studije na Elektronskom fakultetu upisao je školske 2008/2009. godine iz naučne oblasti Upravljanje sistemima. Tokom školovanja, kao autor i koautor publikovao je 21 rad i jednu monografiju. Autor je dva rada koji su publikovani u međunarodnim časopisima sa *SCI* liste i četiri rada u nacionalnim časopisima.



Универзитет у Нишу
ЕЛЕКТРОНСКИ ФАКУЛТЕТ

Изјава 1.

ИЗЈАВА О АУТОРСТВУ

Изјављујем да је докторска дисертација, под насловом

ДАЉИНСКО УЧЕЊЕ У МЕХАТРОНИЦИ ЗАСНОВАНО НА ПРИМЕНИ
ВИРТУЕЛНИХ И РЕАЛНИХ ДИДАКТИЧКИХ СИСТЕМА

која је одбрањена на Електронском факултету Универзитета у Нишу:

- резултат сопственог истраживачког рада;
- да ову дисертацију, ни у целини, нити у деловима, нисам пријављивао/ла на другим факултетима, нити универзитетима;
- да нисам повредио/ла ауторска права, нити злоупотребио/ла интелектуалну својину других лица.

Дозвољавам да се објаве моји лични подаци, који су у вези са ауторством и добијањем академског звања доктора наука, као што су име и презиме, година и место рођења и датум одбране рада, и то у каталогу Библиотеке, Дигиталном репозиторијуму Универзитета у Нишу, као и у публикацијама Универзитета у Нишу.

У Нишу, 03.06.2015.

Аутор дисертације: СЛОБОДАН Ч. АЛЕКСАНДРОВ

Потпис аутора дисертације:

Слободан Ч. Александров



Универзитет у Нишу
ЕЛЕКТРОНСКИ ФАКУЛТЕТ

Изјава 2.

**ИЗЈАВА О ИСТОВЕТНОСТИ ШТАМПАНОГ И ЕЛЕКТРОНСКОГ ОБЛИКА
ДОКТОРСКЕ ДИСЕРТАЦИЈЕ**

Име и презиме аутора: СЛОБОДАН Ч. АЛЕКСАНДРОВ

Наслов дисертације: ДАЉИНСКО УЧЕЊЕ У МЕХАТРОНИЦИ ЗАСНОВАНО НА
ПРИМЕНИ ВИРТУЕЛНИХ И РЕАЛНИХ ДИДАКТИЧКИХ СИСТЕМА

Ментор: ДР. ЗОРАН ЈОВАНОВИЋ

Изјављујем да је штампани облик моје докторске дисертације истоветан
електронском облику, који сам предао/ла за уношење у **Дигитални репозиторијум
Универзитета у Нишу.**

У Нишу, 03.06.2015.

Аутор дисертације: СЛОБОДАН Ч. АЛЕКСАНДРОВ

Потпис аутора дисертације:

Слободан Александров



Универзитет у Нишу
ЕЛЕКТРОНСКИ ФАКУЛТЕТ

Изјава 3:

ИЗЈАВА О КОРИШЋЕЊУ

Овлашћујем Универзитетску библиотеку „Никола Тесла“ да, у Дигитални репозиторијум Универзитета у Нишу, унесе моју докторску дисертацију, под насловом:

ДАЉИНСКО УЧЕЊЕ У МЕХАТРОНИЦИ ЗАСНОВАНО НА ПРИМЕНИ ВИРТУЕЛНИХ И РЕАЛНИХ ДИДАКТИЧКИХ СИСТЕМА

Дисертацију са свим прилозима предао/ла сам у електронском облику, погодном за трајно архивирање.

Моју докторску дисертацију, унету у Дигитални репозиторијум Универзитета у Нишу, могу користити сви који поштују одредбе садржане у одабраном типу лиценце Креативне заједнице (Creative Commons), за коју сам се одлучио/ла.

1. Ауторство (CC BY)
2. Ауторство – некомерцијално (CC BY-NC)
3. Ауторство – некомерцијално – без прераде (CC BY-NC-ND)
4. Ауторство–некомерцијално–делити под истим условима
(CC BY-NC-SA)
5. Ауторство – без прераде (CC BY-ND)
6. Ауторство – делити под истим условима (CC BY-SA)

(Молимо да подвучете само једну од шест понуђених лиценци; кратак опис лиценци дат је у наставку текста).

У Нишу, 03.06.2015.

Аутор дисертације: СЛОБОДАН Ч. АЛЕКСАНДРОВ

Потпис аутора дисертације: