3. Nacionalna konferencija sa međunarodnim učešćem
Fakultet tehničkih nauka u Čačku, 25-27. Septembar 2015.

3rd National Conference With International Participation
Faculty of Technical Sciences in Čačak, 25-27. September 2015.

UDK: 004.4:007.52 Stručni rad

INTERAKTIVNA SIMULACIJA I PROGRAMIRANJE INDUSTRIJSKIJSKOG ROBOTA

INTERACTIVE SIMULATION AND PROGRAMMING OF INDUSTRIAL ROBOT

Slobodan Aleksandrov[1], Zoran Jovanović[2], Stanimir Čajetinac[3], Radica Aleksandrov[4]

[1,4]Tehnička škola Trstenik, Trstenik
[2] Elektronski fakultet, Niš,
[3]Visoka tehnička mašinska škola strukovnih studija, Trstenik
[1]aleksandrovs@yahoo.com, [2]zoran.jovanovic@elfak.ni.ac.rs, [3]caja.dublje@gmail.com, [4]radica09@gmail.com

Apstrakt: *Primena softverskih paketa za modeliranje i simulaciju ima veoma važnu ulogu u obrazovanju, projektovanju, modeliranju i testiranju mehatronskih sistema. U ovom radu prikazane su mogućnosti i značaj primene softvera za interaktivno trodimenzionalno modeliranje i programiranje industrijskog robota. Prikazan je novi pristup koji omogućava razvoj modela sistema, praćenje parametara sistema, trodimenzionalno modeliranje, programiranje i testiranje u virtuelnom i realnom okruženju. Od posebnog je značaja interaktivno programiranje u simulacionim softverskim paketima, koje omogućava savremeno i bezbedno okruženje za sticanje praktičnih znanja i veština u robotici. Primenom novih tehnologija u obrazovanju i novih nastavnih metoda, nastavni proces se osavremenjava i prilagođava navikama novih generacija učenika i potrebama savremenog informatičkog društva.*
Ključne reči: *robotika, modeliranje, simulacija, programiranje.*

Abstract: *Application software packages for modeling and simulation plays an important role in education, design, modeling and testing of mechatronic systems. The possibilities and importance of application software for interactive three-dimensional modeling and programming of industrial robots are presented in this paper. The paper shows the new approach that allows the development of a model system, monitoring system parameters, three-dimensional modeling, programming and testing in virtual and real environment. Interactive programming and simulation software package, which enables modern and safe environment for acquiring practical knowledge and skills in robotics is of particular importance. By application of new technologies in education and new teaching methods, teaching process is being modernized and adapted to the habits of new generations of students and the needs of a modern information society.*
Key words: *robotics, modeling, simulation, programming.*

1. UVOD

Primena računarskih sistema i novih softverskih alata za projektovanje, modeliranje i simulaciju sistema, omogućavaju savremen pristup u razvoju novih proizvoda – mehatronski pristup. Mehatronika je multidisciplinarna naučna oblast, koja vrši horizontalnu i vertikalnu integraciju znanja iz mašinstva, elektrotehnike, informatike i automatskog upravljanja. Mehatronski pristup u projektovanju proizvoda i sistema ima za cilj objedinjavanje različitih naučnih disciplina u cilju optimizacije projektovanog modela sistema. Kod ovog inovativnog pristupa projektovanja sistema, vrši se integracija i optimizacija mehaničkih sistema, električnih senzora, aktuatora i digitalnih upravljačkih sistema. Ovaj sistem projektovanja zasniva se na primeni računara i novih CAD/CAM/CAE tehnologija.

Savremeni softverski paketi koji se koriste u projektovanju proizvoda u računarskom okruženju, osim samog projektovanja i dizajna proizvoda, omogućavaju 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, počev od njegovog modeliranja, konstruisanja, preko provere u sklopu, do finalnih modela. 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. Modeliranje i simulacija serijskog robota u mnogim radovima bazirani su na industrijskom robotu Puma 560 [1], [2]. Razvoj i verifikacija modela industrijskog robota Mitsubishi RV2AJ prikazan je u radu [3], dok je programiranje industrijskog robota prikazano u radu [4]. U ovom radu prikazane su osnovne mogućnosti modeliranja i simulacije robota u MATLAB-u, programiranje i simulacija rada robota u virtuelnom trodimenzionalnom okruženju programskog paketa COSIMIR Robotics.

2. MODELIRANJE I SIMULACIJA INDUSTRIJSKOG ROBOTA U MATLAB-u

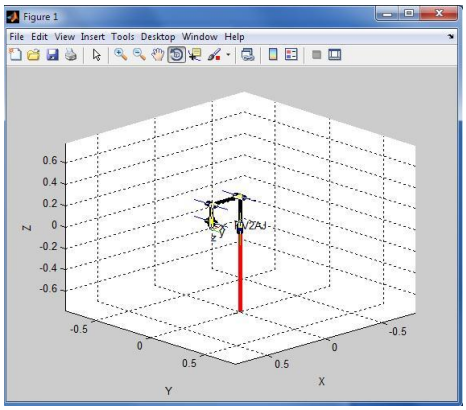
Robot predstavlja nelinearni sistem koji se može opisati nelinearnim diferencijalnim jednačinama. Za primenu jednostavnije linearne upravljačke strukture, potrebno je sistem matematički modelirati linearnim diferencijalnim jednačinama. Za programiranje robota potrebno je poznavati direktnu i inverznu kinematiku, senzore, aktuatore i digitalni upravljački sistem Upravljanje robotom se može definisati u prostoru zglobova (*joint space control*) i u radnom prostoru (*operation space control*). Kod upravljanja u prostoru zglobova, potrebno je na osnovu inverznog kinematskog

modela pretvoriti spoljašnje koordinate u unutrašnje. Upravljanje robotom u radnom prostoru zahteva kompleksan algoritam upravljanja. Prednost ove vrste upravljanja je postojanje mogućnosti praćenja promenjivih spoljašnjih koordinata. Nedostatak ovog načina upravljanja je što se spoljašnje koordinate ne mogu meriti direktno, već se dobijaju rešavanjem direktnog kinematskog modela. Putanja robota predstavlja kontinualni skup tačaka u prostoru koji odgovaraju proizvoljnoj trodimenzionalnoj krivoj, koja je predstavljena jednačinom:

$$\begin{bmatrix} x \\ y \\ z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} x(\sigma) \\ y(\sigma) \\ z(\sigma) \end{bmatrix} \tag{1}$$

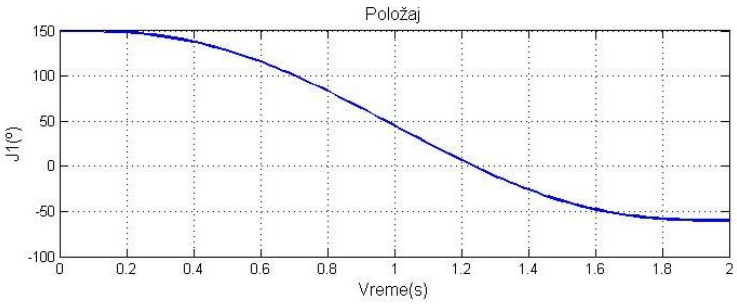
gde je σ geometrijski parametar koji opisuje putanju i predstavlja funkciju vremena $\sigma(t)$. Jednačina trajektorije po kojoj se kreće vrh robota zadaje se u parametarskom obliku. Pored tipa trajektorije, potrebno je zadati početni i krajnji položaj, vremenski interval u kome se kretanje odvija, kao i zakon promene brzine i ubrzanja tokom kretanja. Kontinualno kretanje robota po zadatoj trajektoriji predstavlja kompleksniji vid kretanja gde vrh robota mora biti u svakom trenutku na analitički zadatoj putanji. Sve primene robota u industriji zahtevaju orijentaciju alata pod tačno određenim uglom u odnosu na putanju (zavarivanje, sečenje, farbanje, montaža). Za potpunu definiciju kretanja vrha robota potrebno je zadati orijentaciju vrha robota u prostoru - vektor $\boldsymbol{r}_0 = [\theta\ \varphi\ \psi]^T$. Primenom trodimenzionalnog virtuelnog softvera omogućava se praćenje kretanja robota po složenim putanjama, podešavanje parametera u cilju optimizacije putanje robota i bezbednog rada robota.

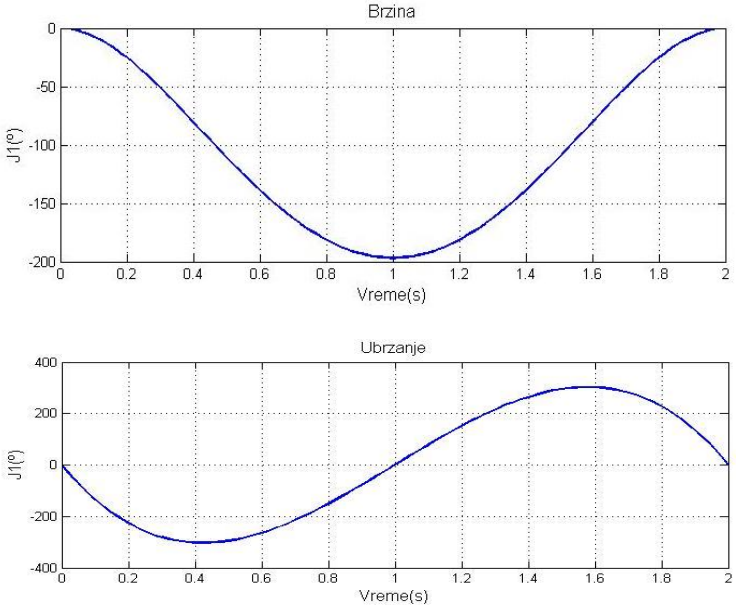
Za modeliranje industrijskog robota koristimo univerzalni softverski paket MATLAB, koji omogućava simulaciju i praćenje različitih parametara sistema automatskog upravljanja. Programski paket MATLAB predstavlja softversko okruženje podržano višim programskim jezicima, namenjeno za numerička izračunavanja, kreiranje modela sistema, aplikacija, programiranje, simulaciju, vizeluelizaciju i analizu podataka. Naziv ovog programskog paketa potiče od izraza ***Mat****rix* ***Lab****oratory*, što označava da su matrice osnovni elementi u proračunima. Ovaj softverski alat omogućava rad sa vektorima i matricama, homogene transformacije, modeliranje, rešavanje problema direktne i inverzne kinematike, generisanje trajektorije kretanja i orijentacije robota. Na slici 1 prikazan je model industrijskog robota sa pet stepeni slobode - Mitsubishi RV2AJ.



Slika 1. Model industrijskog robota u MATLAB-u

Za definisani model robota Mitsubishi RV2AJ izvršena je simulacija kretanja industrijskog robota *"point to point"*, iz početne tačke A, sa koordinatama položaja q_1*=[150 30 60 30 -30]*, do tačke B, sa koordinatama q_2*=[-60 0 45 30 0]*. Tokom simulacije praćena je promena položaja, brzine i ubzanja u svim zglobovima. Maksimalna vrednost brzina robota po zglobovima je: 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 Δt=0.02s. Vrednosti promene položaja, brzine i ubrzanja zgloba **J1** prikazani su na slici 2.



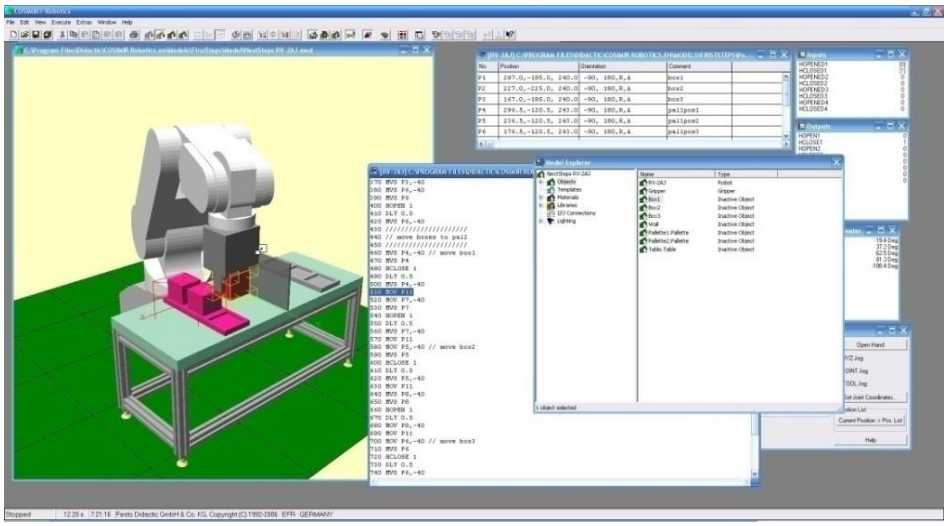


Slika 2. Promena koordinata položaja, brzine i ubrzanja robota

Praćenje parametara robota može se izvršiti za bilo koji zglob robota: J1, J2, J3, J5 i J6. Na osnovu datih dijagrama, može se pratiti promena pozicije zgloba J1 (od 150° do -60°), promena brzine i ubrzanja zgloba J1 u definisanom vremenskom periodu.

3. INTERAKTIVNO PROGRAMIRANJE ROBOTA

Programski paket COSIMIR (**C**ell **O**riented **Sim**ulation of **I**ndustrial **R**obots) je softverski paket kompanije FESTO, koji je namenjen za kreiranje trodimenzionalnog (3D) virtuelnog okruženja sa modelima mehatronskih sistema, programiranje robota i simulaciju rada u 3D okruženju. COSIMIR Robotics poseduje biblioteku sa velikim brojem modela industrijskih robota: ABB, Fanuc, KUKA, Mitsubishi. Kreiranje virtuelnog okruženja vrši se izborom već definisanih biblioteka, kao što su roboti, alati, magacini, radni delovi i druge komponente. Pored definisanih biblioteka, postoji mogućnost kreiranja novih korisničkih 3D modela u nekom od CAD softvera za 3D modeliranje. Na ovaj način olakšava se planiranje, programiranje i testiranje robota u 3D virtuelnom okruženju. Ovim sistemom simuliraju se sve sekvence pomeranja, hvatanja i prenošenja, vrši se optimizacija putanje, optimizacija vremenskog ciklusa i eliminacija sudara. Na slici 3. prikazano je radno okruženje softverskog paketa COSIMIR Robotics.

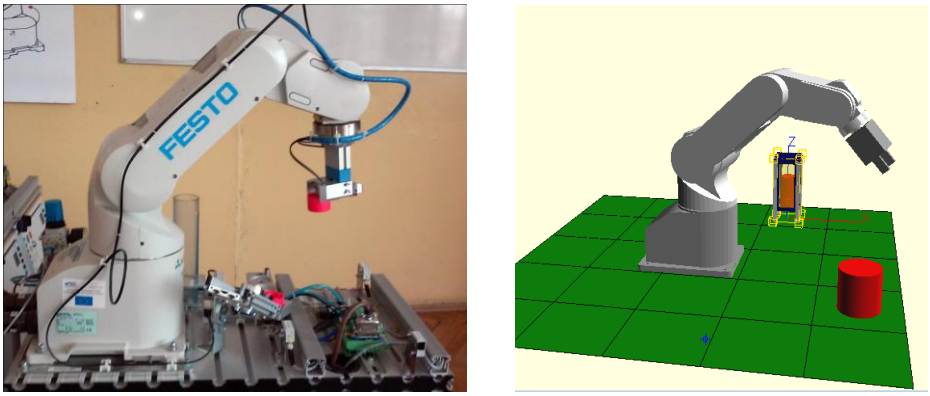


Slika 3. Virtuelno 3D okruženje softverskog paketa COSIMIR Robotics

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. 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 tutorijale i animacije. Veoma značajna karakteristika ovog sistema je da trodimenzionalni virtuelni robot svojom konstrukcijom, dimenzijama, komponentama i načinom rada u potpunosti odgovara realnom industrijskom robotu. Virtuelno radno okruženje Cosimir Robotics omogućava izbor koordinatnih sistema, praćenje koordinata alata, 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, različiti 3D oblici objekta, izbor različitih materijala i tekstura, mehanizmi, senzori i kontroleri. Za svaki od modela definišu se njegove dimenzije, kao i koordinate gde se objekt postavlja. Dodavanjem senzora i graničnika, 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. Zatim sledi izbor programskog jezika (MRL-Movemaster Comand (MRL), MELFA Basic IV, V+, IRL). COSIMIR Robotics Education 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 osnove, 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) 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 editor, a ekstenzija ovog fajla za programski jezik MELFA Basic 4 je *.MB4. Sledeći koraci su linkovanje, kompajliranje programa i startovanje simulacije programa. Pored toga, ovaj program omogućava definisanje sistema za izbegavanje sudara. Testiranje programa vrši se u virtuelnom 3D okruženju, čime se omogućava interaktivno praćenje kretanje alata robota prema programa 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. Na slici 4 prikazan je uporedni prikaz realnog i virtuelnog modela robota Mitsubishi RV2AJ.



Slika 4. Uporedni prikaz realnog i virtuelnog industrijskog robota

Direktno programiranja robota omogućava profesionalna verzija programa COSIMIR Robotics-Profesional, a nova verzija ovog programskog paketa nosi naziv COSIROP.

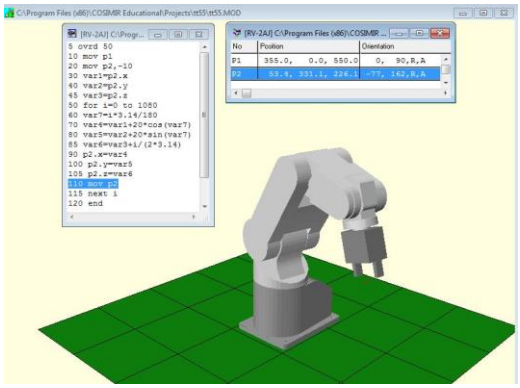
U laboratoriji mehatronike Tehničke škole Trstenik razvijen je set laboratorijskih vežbi iz mehatronike. U ovom radu prikazana je laboratorijksa vežba za programiranje robota u COSIMIR Robotics-u: Potrebno je napisati program za kontinualno kretanje robota po složenoj trodimenzionalnoj trajektoriji – helikoida, i odrediti minimalne i maksimalne vrednosti parametara helikoide, tako da robot ostane u svom radnom prostoru. Početna tačka je definisana svojim koordinatama. Parametarski oblik jednačine helikode dat je jednačinama:

$$x = a.cos(t) \quad (2)$$

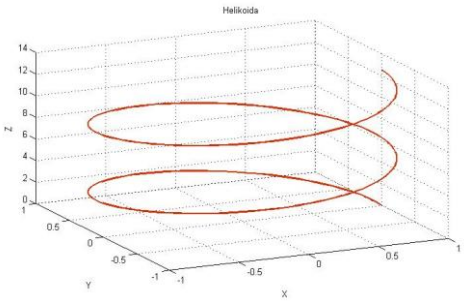
$$y = a.sin(t) \quad (3)$$

$$z = b.t \tag{4}$$

Tokom pisanja i testiranja programa, vrši se promena parametara helikode. Kada su parametri van određenog opsega, simulacija robota se zaustavlja, a programmer menja parametre ,sve dok ne dobije opseg u kome robot vrši bezbedno i neprekidno kretanje po zadatoj trajektoriji. Na slici 5 prikazano je virtuelno radno okruženje COSIMIR Robotics, zadate pozicije robota i program po kome se vrši simulacija rada. Trajektorija helikoide po kojoj se vrši kretanje robota dobijena je simulacijom u MATLAB Simulink-u i prikazana je na slici 6.



Slika 5. Trodimenzionalni model industrijskog robota u COSIMIR Robotics-u



Slika 6. Trajektorija kretanja robota po helikoidi

Primena savremenih softverskih alata ima sve veći značaj u obrazovanju i stručnom usavršavanju. Ovi softverski alati omogućavaju usvajanje znanja i veština željenom dinamikom na savremen način, praćenje rada sistema "korak po korak", interaktivno programiranje, smanjuje rizik od povreda i havarijskih oštećenja, ubrzava process programiranja, povećava dostupnost novim tehnologijama i smanjuje cenu školovanja.

4. ZAKLJUČAK

Primenom virtuelnog simulacionog softvera promovišu se savremene metode istraživanja, testiranja i projektovanja. Primenom savremenih softverskih alata programiranje i upravljanje industrijskim robotima je lakše, brže i bezbednije. Korišćenjem virtuelnih modela stiču se primenjiva znanja i veštine za rad sa realnim modelima, omogućava poređenje rezultata virtuelnih i realnih sistema. Trodimenzionalni virtuelni modeli omogućavaju razvoj savremenih mehatronskih sistema, detekciju i eliminaciju greški na sistemima, poboljšanje efikasnosti rada sistema i kreiranje složenih sistema na osnovu početnog osnovnog modela. Od posebnog je značaja mogućnost primene virtuelnih softverskih paketa kod programiranja robota po složenim trajektorijama, optimizacija putanje, detekciju sudara i eliminaciju neželjenih havarijskih oštećenja. Primenom novih tehnologija nastavni proces se osavremenjava i prilagođava navikama novih "*digitalnih generacija*" učenika i potrebama savremene privrede.

LITERATURA

[1] P. I. Corke: A computer tool for simulation and analysis: the Robotic Toolbox for MATLAB, *IEEE Robotics and Automation Magazine*, vol. 3(1), pp. 24-32, 1996.

[2] I. Milićević, R. Slavković, D.Golubović: Industrial Robot Models Designing and Analysis with Application of MATLAB Software, *Machine Design*, pp. 71-78, 2007.

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

[4] R. Aleksandrov, S. Aleksandrov, Z. Jovanović: Novi pristup u nastavi programiranja industrijskog robota, *Tehnika i informatika u obrazovanju, 4. Internacionalna konferencija*, Tehnički fakultet Čačak, pp. 82-89, 1.-3. June 2012

[5] Ulrich Karras, Festo COSIMIR Educational User's Guide, *Festo Didactic GmbH&Co.*, Denkendorf, Germany, 2003.