



Nedeljković, D., Milovanović, M., Jakovljević, Ž.¹⁾

PROTOTIP ELEKTROPNEUMATSKOG SISTEMA ZA POZICIONIRANJE^{2),3)}

Rezime

Elektropneumatski sistemi za pozicioniranje predstavljaju ekonomično rešenje za izvršavanje zadataka pozicioniranja. Po pravilu, ovi sistemi imaju nižu cenu u odnosu na elektromehaničke sisteme uz nešto manju tačnost i predstavljaju povoljan izbor pogotovo u situacijama kada je potrebna velika brzina pozicioniranja. U okviru ovog rada opisuje se prototip ekonomičnog elektropneumatskog sistema za pozicioniranje koji je razvijen u Laboratoriji za automatizaciju proizvodnje. Pored samog sistema za pozicioniranje, u radu je opisan i sistem za interakciju korisnika sa pomenutim sistemom posredstvom programabilnog terminala sa ekranom osetljivim na dodir. Upravljanje elektropneumatskim sistemom zasnovano je na primeni programabilnog logičkog kontrolera.

Ključne reči: servo sistem, elektropneumatski sistem, interfejs čovek-mašina, automatizacija proizvodnje

1. UVOD

U industrijskim aplikacijama, pneumatski aktuatori tradicionalno se koriste za realizaciju jednostavnih rotacionih i translacionih kretanja između krajnjih položaja. S druge strane, za rešavanje zadataka pozicioniranja i upravljanja kretanjem najčešće su u upotrebi elektromehanički servo sistemi. Nelinearnost pneumatskih sistema [1] koja se javlja kao posledica uticaja niza spoljašnjih (temperatura okoline, vlažnost vazduha, razni hemijski uticaji itd.) i unutrašnjih faktora (trenje, pre svega statičko, ali i dinamičko), ali i kao posledica stišljivosti vazduha kao radnog medijuma, dovodi do niza problema u realizaciji elektropneumatskih servo sistema. Ovi problemi su pre svega vezani za manju tačnost u odnosu na elektromehaničke sisteme. Međutim, razvoj naprednih algoritama upravljanja i mikroprocesorskih sistema sa visokim proračunskim performansama doveo je do pojave elektropneumatskih sistema pozicioniranja koji ostvaruju stepen tačnosti pogodan za izvršenje određenih zadataka, uz ostvarivanje velikih brzina [2]. Zahvaljujući niskoj ceni, lakom održavanju, čistoći vazduha kao radnog medijuma, odsustvu elektromagnetnog polja, energetske efikasnosti i drugim prednostima, elektropneumatski sistemi za pozicioniranje zamenjuju elektromehaničke sisteme u određenim aplikacijama.

Tipičan elektropneumatski sistem za pozicioniranje (slika 1) sastoji se od dvosmernog cilindra bez klipnjače napajanog različitim pritiscima sa dve strane klipa [3, 4, 5]. Na osnovu razlike u pritiscima, ostvaruje se željena pozicija. Za upravljanje pritiskom sa jedne i druge strane koriste se dva elektropneumatska regulatora pritiska. Regulatori propuštaju pritisak čiji je intenzitet proporcionalan analognom signalu na ulazu što omogućava da se ostvari pritisak manji nego na izlazu iz pripremljene grupe. Pozicioni kontroler vrši upravljanje pritiskom na regulatorima korišćenjem PID regulatora na osnovu signala sa lineranog enkodera koji obezbeđuje zatvaranje povratne sprege. Kontroleri mogu biti namenski računarski sistemi (engl. *Embedded Systems*) zasnovani na mikrokontrolerima, a u slučaju složenijih sistema, na

¹⁾ Dušan Nedeljković, asistent, Univerzitet u Beogradu, Mašinski fakultet, (dnedeljkovic@mas.bg.ac.rs),

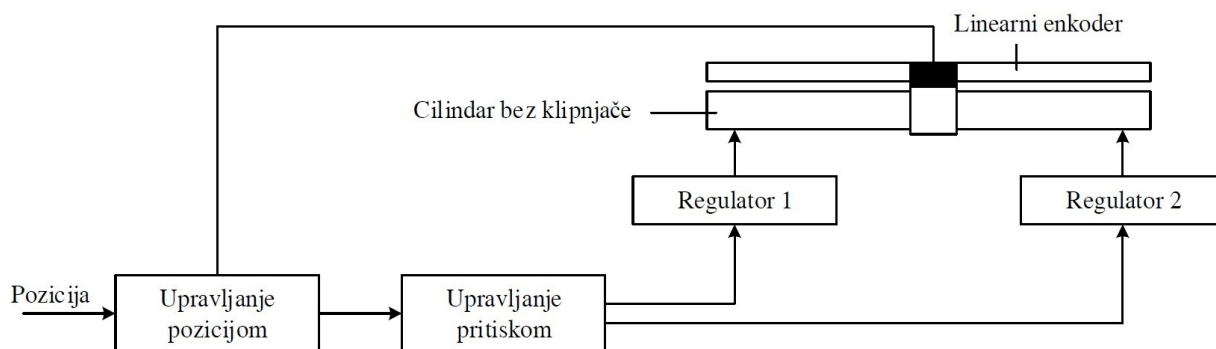
Milan Milovanović, Servotek d.o.o, Beograd, (milanmilovanovic26@gmail.com),

dr Živana Jakovljević, vanredni profesor, Univerzitet u Beogradu, Mašinski fakultet, (zjakovljevic@mas.bg.ac.rs).

²⁾ Rad je nastao u okviru istraživanja na projektu „Inovativni pristup u primeni inteligentnih tehnoloških sistema za proizvodnju delova od lima zasnovan na ekološkim principima“ (evid. br. TR-35004) Ministarstva prosvete, nauke i tehnološkog razvoja Vlade Republike Srbije.

³⁾ U okviru ovog rada korišćene su komponente dobijene donacijom kompanije Predstavništvo SMC Industrial Automation SRB Laboratoriji za automatizaciju proizvodnih procesa. Ovom prilikom autori izražavaju zahvalnost kompaniji Predstavništvo SMC Industrial Automation SRB.

mikroprocesorima sa eksternom memorijom i periferijom ili se mogu realizovati primenom programabilnih logičkih kontrolera (PLC – engl. *Programmable Logic Controller*).



Slika 1. Šema tipičnog elektropneumatskog sistema za pozicioniranje

Cena jednog ovakvog sistema jeste niža od cene elektromehaničke servo ose, ali je i dalje relativno visoka pogotovo uzimajući u obzir ostvarivu tačnost pozicioniranja. Značajan udeo u ceni imaju elektropneumatski regulatori i postavlja se pitanje da li je moguće realizovati ovakav sistem primenom samo jednog od njih.

U okviru ovog rada opisuje se prototip elektropneumatskog sistema za pozicioniranje koji je zasnovan na primeni jednog elektropneumatskog regulatora pritiska koji dovodi promenljiv pritisak sa jedne strane klipa, dok se sa druge strane dovodi pritisak konstantnog intenziteta. Na ovaj način vrši se značajna ušteda resursa i smanjenje troškova uz dobijanje zadovoljavajućih performansi.

Ostatak rada je strukturiran na sledeći način. U drugom odeljku opisuje se struktura i način rada prototipa. Treći odeljak se odnosi na interfejs za interakciju između korisnika i sistema, dok se u četvrtom odeljku daju zaključne napomene.

2. RAZVOJ I FIZIČKA REALIZACIJA ELEKTROPNEUMATSKOG SISTEMA ZA POZICIONIRANJE

Pneumatska šema razvijenog prototipa prikazana je na slici 2. On se sastoji od sledećih elektropneumatskih komponenata:

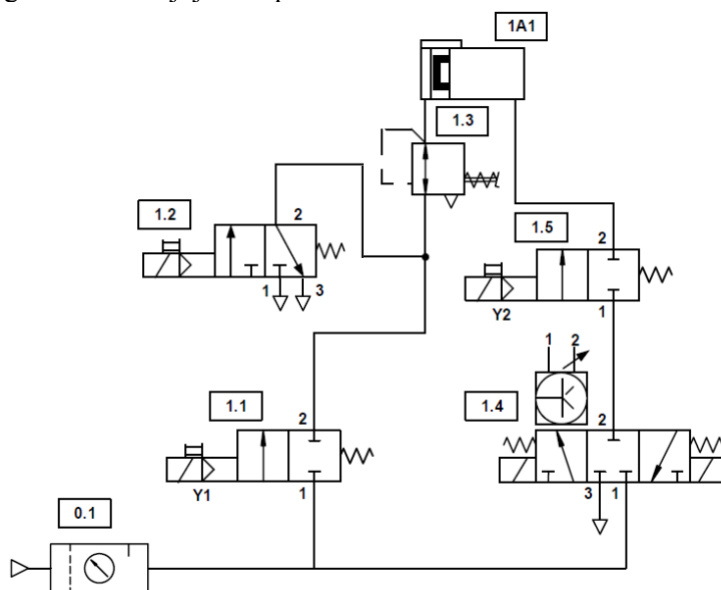
1. Elektropneumatski regulator pritiska SMC ITV2050-33F2N3 (1.4) koji može regulisati pritisak u opsegu 2-10 bara,
2. Mehanički podesiv regulator pritiska AZ Pneumatica MREG 2-08 (1.3) na kome se može podesiti pritisak u opsegu 4-8 bara,
3. Dva električno aktivirana razvodnika 2/2 normalno zatvorena (1.1) i (1.5),
4. Jedan električno aktiviran razvodnik 3/2 normalno zatvoren (1.2)
5. Cilindar bez klipnjače SMC MY3B16-600 (1.6),
6. Pripremna grupa (0.1).

i upravljan je pomoću programabilnog logičkog kontrolera OMRON CP1L-EM30DT1-D [6]. Za zatvaranje povratne sprege koristi se linearni enkoder BALLUFF BML-S1B0-Q53G-M400-L0-KA05 [7].

Prototip funkcioniše na sledećem principu. Sa jedne strane klipa, pomoću mehaničkog regulatora pritiska (1.3), pritisak je podešen na 4 bara, dok se sa druge strane korišćenjem elektropneumatskog regulatora pritiska (1.4) podešava u opsegu od 2-6 bara. Elektropneumatski regulator pritiska na ulazu ima napon u opsegu od 0 do 10V. Razvodnici (1.1) i (1.2) uspostavljaju dovod i odvod vazduha sa jedne strane klipa, dok se sa druge strane vazduh dovodi i ispušta pomoću elektropneumatskog regulatora pritiska. Razvodnik (1.5) koristi se za uspostavljanje i prekid toka fluida od (1.4) ka cilindru tokom inicijalizacije dok se pritisak ne stabilizuje na zadatu vrednost.

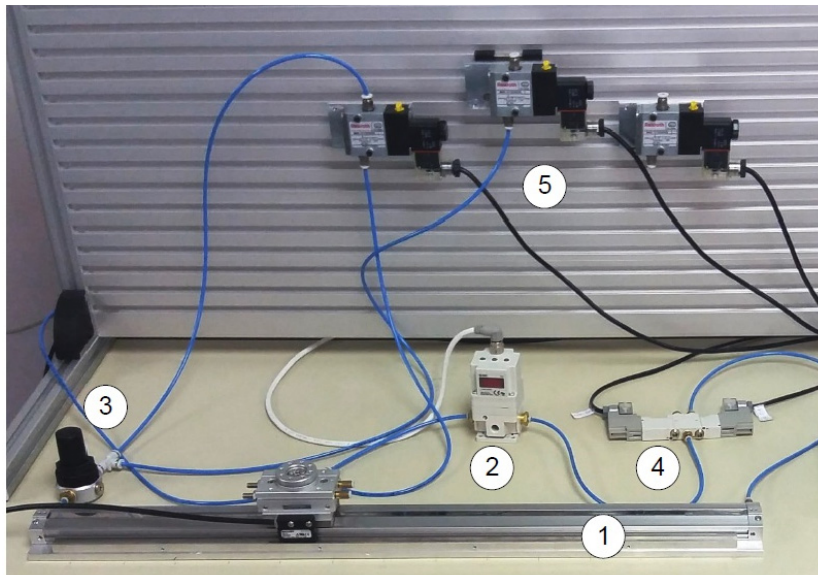
U radu sistema predviđena su dva moda: (1) inicijalizacija/povratak u početni položaj i (2) radni hod. Inicijalizacija sistema obuhvata dovođenje klipa u početnu poziciju. Za početnu poziciju usvojen je levi kraj cilindra. Inicijalizacija se sastoji iz dva koraka. U prvom koraku razvodnici (1.1), (1.2) i (1.5) su zatvoreni, a na (1.4) se podešava pritisak od 2,4 bara. Kada se ovaj pritisak dostigne, u drugom koraku, aktiviraju se razvodnici (1.2) i (1.5) i klip dolazi u početni položaj. Ako je u toku rada sistema potrebno da se klip vrati u početni položaj, koristi se samo drugi korak uz podešavanje pritiska na 2,4 bara bez čekanja. Tokom radnog hoda, aktivni su razvodnici (1.1) i (1.5), a regulator (1.4) podešava pritisak u zavisnosti od željene pozicije na

osnovu signala sa kontrolera. Razlika pritiska između krajeva cilindra, pa samim tim i kretanje klipa prouzrokovano je variranjem vrednosti pritiska elektropneumatskim regulatorom. U trenutku kada klip dostigne zadatu poziciju, pritisci će se izjednačiti i klip će stati. Ukoliko klip premaši vrednost željene pozicije, elektropneumatski regulator će povećati pritisak iznad 4 bara i na taj način izvršiti fino podešavanje. U suprotnom, kada klip ne dostigne željenu poziciju, odnosno kada se zaustavi ranije, pritisak na elektropneumatskom regulatoru smanjuje se ispod 4 bara.



Slika 2. Pneumatska šema sistema

Na slici 3. prikazana je fizička realizacija elektropneumatskog sistema za pozicioniranje koji se nalazi u Laboratoriji za automatizaciju proizvodnih procesa Katedre za proizvodno mašinstvo.



Slika 3. Fizička realizacija elektropneumatskog sistema za pozicioniranje

Svaka komponenta sa slike 3, označena je brojem, pa je tako:

1. Cilindar bez klipnjače,
2. Elektropneumatski regulator pritiska,
3. Mehanički podesiv regulator pritiska,
4. Električno aktivirani razvodnik 5/3 (u sistemu korišćen kao razvodnik 2/2),
5. Električno aktivirani razvodnici 3/2 (u sistemu su dva od njih korišćeni kao razvodnici 2/2).

Upravljanje sistemom zasnovano je na primeni navedenog programabilnog logičkog kontrolera. Njegovo podešavanje i programiranje izvodi se u namenskom softveru CX Programmer [8]. Shodno standardu IEC 61131-3 [9], CX Programmer raspolaže standardnim funkcijama i funkcijskim blokovima.

U PLC-u je integrisana funkcija PID regulatora [10], dok se merenje ostvarene pozicije vrši povezivanjem linearnog enkodera na brojač impulsa, koji takođe predstavlja integralni deo PLC-a. Parametri PID regulatora su eksperimentalno utvrđeni i njihove vrednosti sa adresama na kojima se nalaze u okviru korišćenog PLC-a navedene su u tabeli 1. Na adresu H100 unosi se željena vrednost pozicioniranja.

Tabela 1. Parametri PID regulatora		
Adresa	Parametar	Decimalna vrednost
H100	Zadata vrednost (SV)	2000
H101	Proporcionalni opseg (P)	800
H102	Integralna konstanta (T_I)	5
H103	Diferencijalna konstanta (T_D)	1
H104	Period odabiranja (τ)	1
H105	$\alpha = 0$, napred režim regulisanja, izmena PID parametara u realnom vremenu	4103
H106	Opseg izlazne vrednosti, integralna i diferencijalna jedinica, opseg ulazne vrednosti, ograničenje vrednosti upravljane veličine	6296
H107	Minimalna vrednost upravljane veličine	1333
H108	Maksimalna vrednost upravljane veličine	4000
H109	Samopodešavanje isključeno	0

Ukoliko je potrebno, može se pokrenuti samopodešavanje parametara PID regulatora postavljanjem bita na adresi H109, a podešeni parametri koriste se u sledećem procesu pozicioniranja. Vrednosti parametara dobijene samopodešavanjem mogu se koristiti i kao osnova za kasnije manuelno podešavanje. Pravilno određene vrednosti parametara, rezultiraće najmanjim odstupanjem ostvarene od željene vrednosti. U suprotnom, dodeljivanje neodgovarajućih vrednosti parametrima, prouzrokuje sve veće odstupanje ostvarene od željene vrednosti ili nestabilnost sistema. Ovaj sistem za pozicioniranje primenom PID regulatora ostvaruje tačnost do 1 mm za parametre regulatora prikazane u tabeli 1. Tačnost i ponovljivost sistema ne zavise od zadatih pomeraja, što znači da sistem ostvaruje istu tačnost i ponovljivost za velika rastojanja (100 mm i veće), kao i za izuzetno mala rastojanja (od 10 do 50 mm).

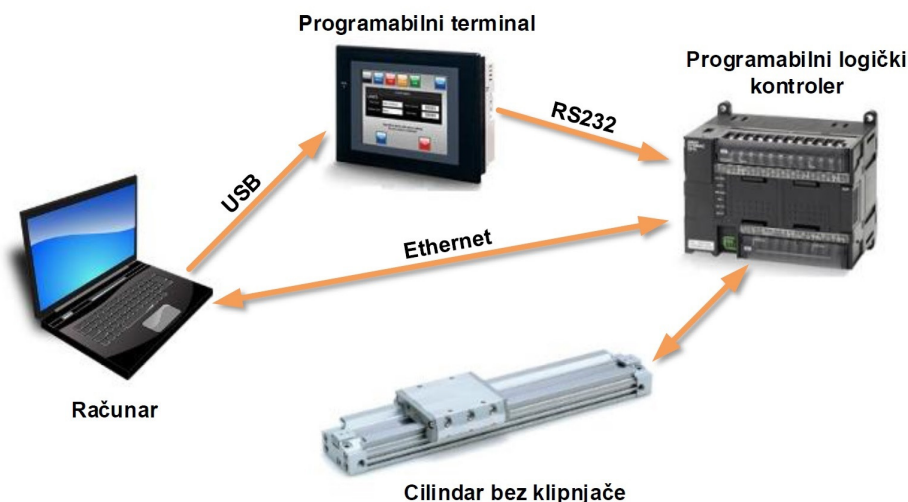
3. PROJEKTOVANJE KORISNIČKOG INTERFEJSA ELEKTROPNEUMATSKOG SISTEMA ZA POZICIONIRANJE

Interfejs čovek-mašina (HMI - engl. *Human Machine Interface*) omogućava da čovek sa mašinom komunicira na vizuelni, grafički način. Za tu svrhu, u ovom radu koristi se programabilni terminal [11] sa ekranom osetljivim na dodir OMRON NB5Q-TW01B. Na šemi celokupnog sistema koja pored prototipa sadrži i PLC kojim se vrši upravljanje i računar za programiranje PLC-a (slika 4) može se videti mesto koje programabilni terminal zauzima, kao i interakcije koje ostvaruje sa ostalim komponentama sistema. Takođe, mogu se primetiti i određeni protokoli (USB, RS232 i Ethernet) koji su korišćeni pri ostvarivanju veza između komponenta sistema.

Razvijeni HMI omogućuje dva različita načina zadavanja željene pozicije, gde svaki način generiše iste rezultate, tj. efikasno izvršava zadate funkcije. Takođe, svaki projektovani način upravljanja mora biti razumljiv za korisnike, što se postiže grafičkim simbolima i tekstem koji bliže opisuju generisane funkcije. Interfejs sadrži dva ekrana (po jedan za oba načina zadavanja pozicije), od kojih jedan mora biti odabran za početni, odnosno ekran koji se pojavljuje odmah po uključanju programabilnog terminala. Projektovani interfejs pruža mogućnost interakcije između ekrana, tj. prelazak sa jednog na drugi ekran. Na slici 5. prikazani su ekrani korisničkog interfejsa za upravljanje radom elektropneumatskog sistema za pozicioniranje, kreirani u softverskom paketu „NB Designer“ [12]. Prvi ekran je prikazan na slici 5a, a drugi na slici 5b.

Kod prvog načina upravljanja, operacije radnog hoda, samopodešavanja i vraćanja klipa u koordinatni početak, sa gledišta korisničkog interfejsa, ostvaruju se pomoću tri dugmeta na ekranu (W_3, W_4 i W_5). Bitovi W_3, W_4 i W_5 promenom svojih stanja za posledicu imaju izvršavanje navedenih operacija.

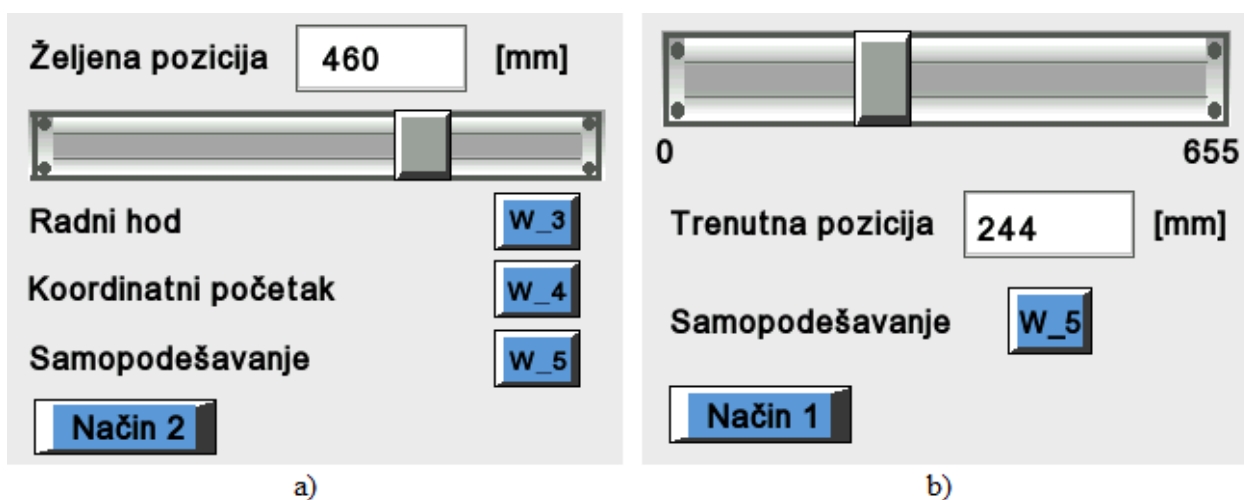
Željena pozicija se zadaje unosom vrednosti u odgovarajuće polje. Opseg kojim se raspolaže u sistemu za pozicioniranje je 65636, gde inkrement predstavlja jedan bit. Pošto je za koordinatni početak definisana vrednost 0 (kraj cilindra), sledi da su donja i gornja granica 0-65535. Ipak, kako bi se zadovoljili kriterijumi kvalitetnog korisničkog interfejsa (pre svega razumljivost, efikasnost i srodnost), pozicija klipa definisana je u milimetrima, gde jedan milimetar predstavlja 100 bitova. Shodno tome, nove granice cilindra između kojih klip ostvaruje kretanje su 0 i 655 mm.



Slika 4. Međusobne interakcije komponenta sistema za pozicioniranje

Pozicija klipa na cilindru (definisana u polju za unos podataka) prikazana je grafički pomoću naredbe scrol bar-a. Kako skrol bar sam po sebi ima klizač čije je kretanje ograničeno minimalnom i maksimalnom zadatom vrednošću, on se može iskoristiti za efektivan prikaz cilindra bez klipnjače, gde se klip kreće između graničnih pozicija. Kada korisnik unese vrednost pozicije klipa u polje za unos, klip ostvaruje kretanje na željenu poziciju. U ovom načinu upravljanja, skrol bar koristi se isključivo za grafički prikaz trenutnog položaja klipa.

Drugi način za zadavanje pozicije elektropneumatskog sistema za pozicioniranje (slika 5b) može se okarakterisati kao inverzni postupak načina 1. Kod ovog načina, skrol bar koristi se za zadavanje pozicije klipa na cilindru, dok se polje sa numeričkim vrednostima koristi isključivo za prikaz vrednosti ostvarene pozicije klipa. Upravljanje pozicijom klipa izvodi se u realnom vremenu (sa određenim kašnjenjem), jednostavnim pomeranjem klizača, nakon čega se vrednost zadate pozicije ispisuje u polju sa numeričkim vrednostima. Operacija samopodešavanja se i u ovom načinu posebno zadaje aktiviranjem prekidača W_5.



Slika 5. Korisnički interfejs elektropneumatskog sistema za pozicioniranje: a) prvi ekran; b) drugi ekran

Terminal komunicira sa PLC-om pomoću RS232 interfejsa preko odgovarajućih adresa u memoriji PLC-a. Ove adrese se definišu u okviru parametara pojedinih elemenata prilikom kreiranja korisničkog interfejsa (ekrana koji će se prikazati na terminalu).

5. ZAKLJUČAK

U ovom radu opisan je prototip ekonomičnog elektropneumatskog sistema za pozicioniranje koji je razvijen, pre svega za edukacione potrebe, u okviru Laboratorije za automatizaciju proizvodnih procesa. Specifičnost ovog sistema ogleda se u tome što je zasnovan na primeni samo jednog elektropneumatskog regulatora što povoljno utiče na njegovu cenu. I pored toga, ostvarena tačnost pozicioniranja korišćenjem ovog prototipa je 1 mm i reda je veličine tipične tačnosti elektropneumatskih servo sistema.

Za upravljanje radom aktuatora, pored upravljačkog programa, razvijen je intuitivni korisnički interfejs zasnovan na primeni ekrana osetljivog na dodir. Sve funkcije u elektropneumatskom sistemu za pozicioniranje kojima se upravlja, smeštene su u dva ekrana programabilnog terminala. Korišćenjem različitih grafičkih simbola i teksta koji bliže opisuju svaku funkciju, u projektovanom interfejsu postignut je visok nivo razumljivosti. U okviru daljih aktivnosti razvijeni prototip će biti integrisan u odgovarajuće sisteme za manipulaciju.

6. LITERATURA

- [1] D. Saravanakumar, B. Mohan, T. Muthuramalingam, A review on recent research trends in servo pneumatic positioning systems, *Precision Engineering*, Vol. 49, pp 481-492, 2017
- [2] Franco Langro, Pneumatic vs electric: A niche for each, <https://www.designworldonline.com/pneumatics-vs-electrics-a-niche-for-each/#>, June, 2011.
- [3] Electro Pneumatic Positioning System - EPPS, <http://www.valin.com/Newsletters/2014/April/Fluid-Power/Bosch-Rexroth-Electro-Pneumatic-Positioning-System-Datasheet.pdf>, 2014.
- [4] S2 positioning – better rodless cylinder positioning, <http://www.enfieldtech.com/portfolio/Position/better-rodless-cylinder-positioning>
- [5] Michael Kriegsmann, Servocontrol with pneumatic actuators, *Machine Design*, <http://www.machinedesign.com/pneumatics/servocontrol-pneumatic-actuators>, October, 2007.
- [6] Omron: CP1L-EL/EM CPU Unit, Operation Manual, Cat. No. W516-E1-01, - Omron, 2012.
- [7] Magnetic linear encoder system BML, http://usa.balluff.com/manuals/BML%20Rotary_Linear%20Encoder/BML-S1B%20MANUAL%20.pdf
- [8] Omron: CX-Programmer Ver. 9., Operation Manual, Cat. No. W447-E1-15, - Omron, 2016.
- [9] *IEC 61131-1 – Programmable Controllers – Part 1: General Information*, International Electrotechnical Commission, Geneva, Switzerland, 2003.
- [10] Filipović, V., Nedić, N.: *PID Regulatori*, Mašinski fakultet, Kraljevo, 2008.
- [11] Omron: NB-Series Programmable Terminals, Startup Guide Manual, Cat. No. V109-E1-08, - Omron, 2011.
- [12] Omron: NB-Series Programmable Terminals, NB-Designer Operation Manual, Cat. No. V106-E1-04, - Omron, 2012.

Nedeljković, D., Milovanović, M., Jakovljević, Ž.

PROTOTYPE OF ELECTRO-PNEUMATIC POSITIONING SYSTEM

Abstract: *Electro-pneumatic positioning systems represent an economical solution for performing positioning tasks. As a rule, these systems are characterized by lower cost than electromechanical systems, however with lower accuracy; they represent a favorable choice in situations where high positioning speed is required. This paper describes the prototype of an economical electro-pneumatic positioning system developed at Laboratory for Manufacturing Automation. In addition, the paper presents the developed interface for interaction with the user that is based on programmable terminal with a touch screen. The control of the electro-pneumatic system is carried out using a programmable logic controller.*

Key words: *servo system, electro-pneumatic system, human machine interface, manufacturing automation*