

Upravljanje servopneumatskim linearnim aktuatorom zasnovano na FPGA

Laslo Tarjan, Ivana Šenk, Nikola Đukić, Igor Baranovski, Stevan Stankovski

Katedra za mehatroniku, robotiku i automatizaciju, Departman za Industrijsko inženjerstvo i menadžment
 Fakultet tehničkih nauka, Univerzitet u Novom Sadu
 Novi Sad, Srbija

laci@uns.ac.rs, ivanas@uns.ac.rs, nikoladj@uns.ac.rs, baranovski@uns.ac.rs, stevan@uns.ac.rs

Sadržaj—Pneumatski aktuatori su jedni od najviše primenjivanih aktuatora u industrijskim mašinama. Ovi aktuatori ostvaruju direktno translatorno kretanje i laki su za ugradnju i primenu. Primenom servopneumatskih razvodnih ventila otvara se mogućnost fine kontrole kretanja u zavisnosti od potrebe tehnološkog procesa za koju se mašina koristi. Korišćenje FPGA tehnologije omogućava znatno skraćivanje vremena izvršavanja upravljačkog algoritma, što dovodi do poboljšanja u radu aktuatora i ostavlja prostor za uključivanje dodatnih parametara sistema koji bi eventualno mogli poboljšati upravljanje. U radu je prikazan upravljački kontroler baziran na FPGA sistemu i prikazan je uporedni test u radu aktuatora upravljanog pomoću ovog i komercijalno dostupnog servo kontrolera.

Ključne riječi—FPGA upravljanje, servo-pneumatika, soft-stop

I. UVOD

Povišenju efikasnosti rada aktuatora u automatizovanom sistemu doprinosi i unapređenje upravljačke jedinice aktuatora. Efikasnost funkcionisanja aktuatora se ogleda u faktoru iskorišćenja uloženog resursa na dobijanje korisnog rada, kao i načina pomeranja. Pri izučavanju efikasnosti rada aktuatora posmatraju se faktori kao što su vreme i tačnost pozicioniranja, ponovljivost, potrošnja energije, itd.

Pneumatski aktuatori su jedni od najviše primenjivanih aktuatora u industrijskim mašinama, ostvaruju direktno translatorno kretanje i laki su za ugradnju i primenu. Primenom proporcionalnih pneumatskih razvodnih ventila otvara se mogućnost fine kontrole kretanja u zavisnosti od potrebe tehnološkog procesa za koju se mašina koristi. Za upravljanje servopneumatskim sistemima, korišćenjem proporcionalnog razvodnog ventila, skoro svaki proizvođač ovih ventila nudi i neki prateći servo kontroler, pomoću kojeg se može manje ili više uspešno upravljati pneumatskim sistemom.

Primena FPGA (eng. *Field Programmable Gate Array*) tehnologije bi, po prethodnim istraživanjima [1], skratila vreme izvršavanja upravljačkog algoritma za regulaciju aktuatora, što svakako pozitivno utiče na rad aktuatora, jer ostavlja prostora za dodavanje naprednih funkcija za pametniji rad upravljačko-regulacionog sistema. U literaturi [2], [3] se nalazi preporuka za korišćenje kombinacije FPGA tehnologije sa već i do sada korišćenom procesorskom tehnologijom, jer se na taj način mogu iskoristiti prednosti obe tehnologije [4].

Grupa autora [5] u svom radu opisuje istraživanje u kojem prikazuje komparativnu analizu tri arhitekture PID (eng. *Proportional Integral Differential*) regulatora realizovanog pomoću FPGA digitalnog kola. Implementacija je urađena u serijskoj, paralelnoj, i mešanoj arhitekturi. U svim slučajevima implementacije ovo hardversko rešenje PID regulatora daje brži odziv od softverskog rešenja na mikroprocesorima.

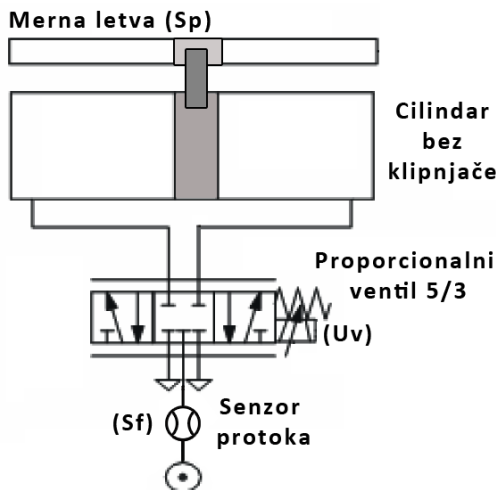
U drugom radu [6], predstavljen je modularni PID regulator baziran na distribuiranoj aritmetici (eng. *Distributed Arithmetic*). Predstavljeni regulator je realizovan uz pomoć komercijalno dostupnog FPGA čipa *Xilinx XC9572XL*. Krajnji proizvod je uspešno testiran, i pored vrlo niske potrošnje struje pokazuje i odlične upravljačke karakteristike (performanse i stabilnost).

Brojni autori prikazuju [7]–[10] da je moguće primeniti FPGA tehnologiju za potrebe realizacije upravljačkog sistema koji se može koristiti i u industrijskom okruženju, gde spada i upravljanje raznim aktuatorima. Mogućnost izvršavanja upravljačkog algoritma u pravom paralelizmu koju daje FPGA tehnologija, tj. direktna primena programabilne mreže digitalnih logičkih i aritmetičkih kola, skraćuje ukupno vreme potrebno za obradu upravljačkog algoritma.

U ovom radu prikazan je razvijeni upravljački sistem baziran na FPGA razvojnom sistemu Single Board RIO 9636 proizvođača National Instruments, na kojem se nalazi Xilinx-ov FPGA čip. Pomenuti upravljački sistem upravlja linearnim pneumatskim pogonom, cilindrom bez klipnjače tipa DGPL proizvođača Festo, preko proporcionalnog razvodnog ventila. U radu je dat uporedni test ovog razvijenog upravljačkog sistema i komercijalno dostupnog servopneumatskog upravljačkog sistema SPC 11 proizvođača Festo.

II. EKSPERIMENTALNA INSTALACIJA PNEUMATSKO LINEARNOG AKTUATORA

Za razvoj upravljačkog sistema na bazi FPGA tehnologije korišćen je pneumatski sistem sa linearnim aktuatorom, otporničkom mernom letvom i proporcionalnim pneumatskim razvodnim ventilom. Za praćenje trenutnog protoka korišćen je analogni senzor protoka od 6-600 L/min. Pneumatska šema ovog sistema prikazana je na Sl. 1. Ceo sistem je priključen na izvor vazduha pod pritiskom od 6 bara.



Slika 1. Pneumatska šema sistema sa linearnim aktuatorom:
 Sp - merna letva dužine 600 mm; cilindar bez klipnjače hoda 600 mm; Uv – proporcionalni ventil sa protokom do 450 L/min, Sf – analogni senzor protoka 6-600 L/min.

Linearni pneumatski pogon čini cilindar bez klipnjače tipa DGPL, proizvođača Festo, sa dužinom hoda 600 mm, od kojih je 550 mm hoda dostupno u eksperimentalnoj konfiguraciji. Pokretni deo linearnog pogona, koji je kruto vezan sa klipom cilindra, je direktno povezan sa mernom letvom (Sl. 1, *Sp*).

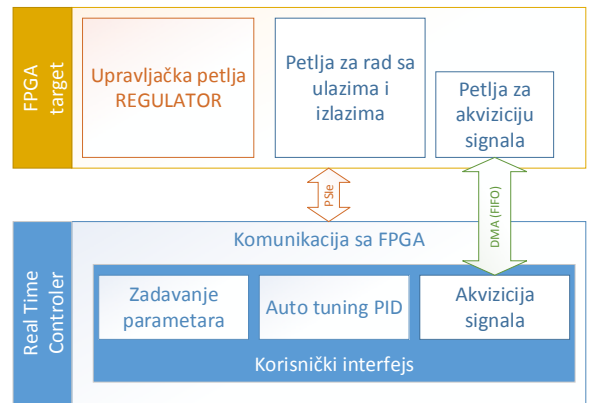
Za merenje apsolutne pozicije pokretnog dela aktuatora, korišćena je otpornička merna letva, oznake MLO-POT-600-TLF proizvođača Festo, opsega merenja od 0-600 mm sa rezolucijom od 0,1 mm. Na izlazu merne letve se dobija analogni napon od 0-10 V.

Za kontrolu protoka vazduha pod pritiskom, kojim se pneumatski aktuator pokreće, korišćen je proporcionalni razvodni ventil oznake MPYE-5-1/8-HF-010-B proizvođača Festo (Sl. 1, *Uv*). Ventil se upravlja analognim naponom od 0-10 V, za opseg protoka od -450 do 450 L/min na pritisku od 6 bar. Prenosna karakteristika razvodnika, prikazana na Sl. 2, ilustruje da se vazduh propušta u jednom smeru za opseg napona od 0-5V, a u drugom za upravljački napon od 5-10 V.

Da bi se tokom rada mogla pratiti potrošnja celog sistema,



Slika 2. Prenosna karakteristika servo ventila tipa MPYE



Slika 3. Blok šema upravljačkog sistema na bazi FPGA

na ulazni priključak vazduha pod pritiskom priključen je analogni protokomer oznake SFAB-600U-WQ10-2SA-M12 proizvođača Festo, za opseg merenja od 6-600 L/min. Protokomer na svom izlazu daje analogni naponski signal u rasponu od 0-10 V linearno proporcionalan protoku.

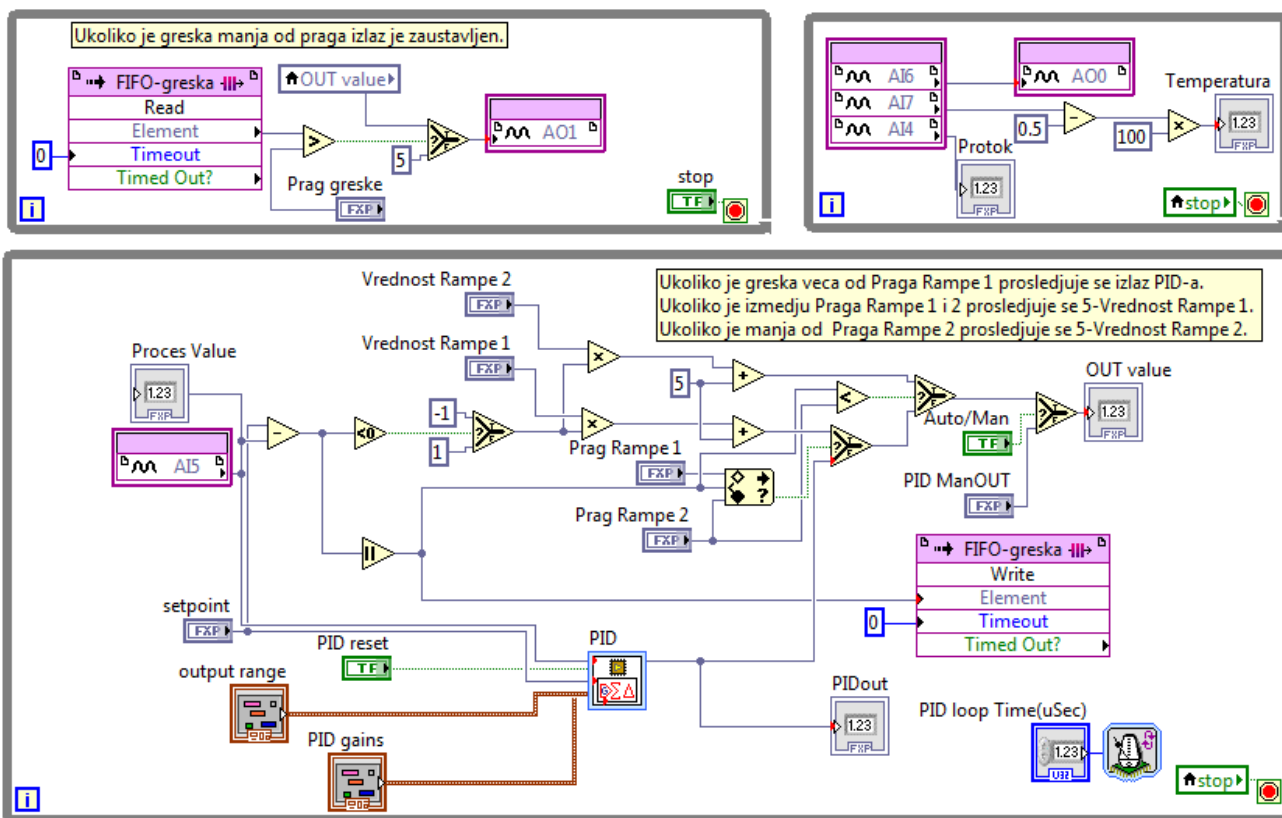
III. UPRAVLJAČKI SISTEM

Razvoj upravljačkog sistema za pneumatski linearni aktuator izveden je na razvojnom sistemu Single Board RIO, sbRIO 9636 proizvođača National Instruments. Za potrebe upravljačkog sistema iskorišćena su:

- 2 analogna naponska ulaza (0-10 V) na koji su spojeni signali sa merne letve (*Sp*) i sa protokometra (*Sf*),
- 1 analogni naponski izlaz (0-10 V) na koji je spojen upravljački signal proporcionalnog razvodnika (*Uv*)

Upravljački sistem je sačinjen iz dva dela, što je prikazano na Sl. 3. Korisnički interfejs je realizovan na RT (eng. *Real Time*) kontroleru i zadužen je za komunikaciju sa korisnikom. Tu se zadaju željeni parametri, i vrši se monitoring trenutnog stanja aktuatora. Omogućeno je i snimanje signala koji se menjaju na FPGA delu sistema kao što su: referentna vrednost pozicije, trenutna pozicija, izlaz PID regulatora i krajnji upravljački signal nakon dodatne upravljačke logike. Korišćenjem ugrađenog bloka *PID Online Autotuning (PID on the loop)*, omogućeno je automatsko podešavanje regulacionih parametara PID regulatora (eng. *Auto tuning*).

Regulacioni deo upravljačkog sistema se izvršava na FPGA čipu, na kojem su zadaci regulacije podeljeni u nekoliko paralelnih upravljačkih petlji, koji se simultano izvršavaju. Glavni delovi su petlja za regulaciju koja sadrži pozicioni PID regulator kao osnovni regulator i dodatnu upravljačku logiku koja na osnovu veličine greške procenjuje da li na izlaz upravljačkog sistema propušta izlaz PID regulatora ili unapred formiranu upravljačku veličinu koja dovodi do zaustavljanja sistema. U ovoj fazi pragovi odlučivanja su fiksirani i zadaju se kao konstantne vrednosti u obliku vrednosti rampe (Tabela II). Na Sl. 4 prikazan je deo upravljačke logike koja se izvršava na FPGA čipu. Pored ovih upravljačkih petlji postoji posebna petlja koja svake milisekunde snima trenutne vrednosti analognih signala i posredstvom FIFO memorijskih registara



Slika 4. Deo upravljačke logike na FPGA: Glavna upravljačka petlja (dole), formiranje izlaza (gore levo), rad sa ulazima (gore desno)

uz DMA (eng. *Direct memory access*) prenos distribuirane merene podatke na RT deo upravljačkog sistema.

performanse upravljačkog sistema mogu očekivati tek nakon više uzastopnih ponavljanja ciklusa pozicioniranja.

A. Servo Soft Stop kontroler SPC 11

Referentni kontroler, koji je uzet kao kontrolni, je servo kontroler za proporcionalne pneumatske sisteme SPC 11 proizvođača Festo, koji ima karakteristiku pozicioniranja bez udara (eng. *Soft stop*). Ovaj upravljački sistem omogućava podešavanje dve fiksne (krajnje tačke) i dve proizvoljne pozicije. Ove četiri unapred zadate pozicije se tokom rada ne mogu menjati i biraju se pomoću digitalnih signala. Tačnost kontrolera je po specifikaciji 0,01 mm [11].

Inicijalno se u kontroler unose parametri postavljenog pneumatskog sistema, kao što su vrsta pneumatskog aktuatora, sa dimenzijama (dužina hoda, prečnik, način montaže), tip proporcionalnog razvodnika, težina predviđenog tereta. Parametri koji su uneti u kontroler tokom eksperimenta prikazani su u Tabeli I [11].

TABELA I. PARAMETRI KONTROLERA SPC11

Parametar	Vrednost
A	16
C	20
S	12

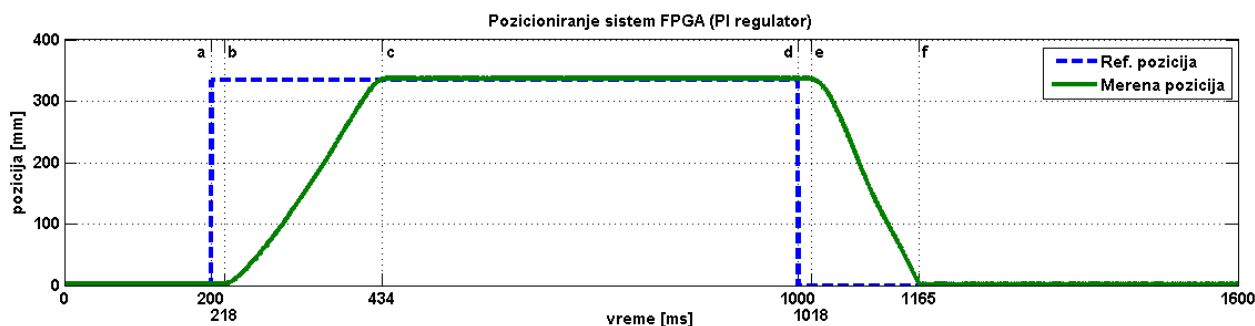
Na osnovu unetih inicijalnih parametara kontroler automatski vrši parametrizaciju svog regulatora. Upravljanje je zasnovano na adaptivnom PID regulatoru, tako da se najbolje

IV. EKSPERIMENTALNI REZULTATI

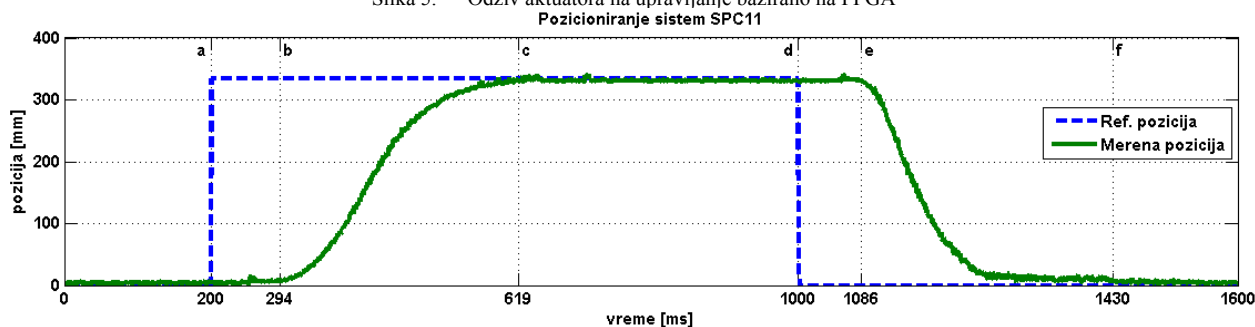
Radi utvrđivanja kvaliteta rada upravljačkog sistema razvijenog na bazi FPGA, izvršeno je testiranje novog upravljačkog sistema i komercijalnog kontrolera SPC 11, pod istim uslovima za iste tačke pozicioniranja. Prilikom analize dobijenih rezultata posmatrani su, sledeći faktori:

- tačnost pozicioniranja,
- vreme dostizanja pozicije ($\pm 1\%$),
- potrošnja vazduha pod pritiskom.

Testiranje se vršilo na pneumatskom sistemu koji je napajan vazduhom pod pritiskom od 6 bara, sa rasterećenim aktuatorom. Testiran je prelaz između fiksne nulte pozicije i pozicije na 334.7 mm. Upravljački sistem baziran na FPGA bio je podešen da radi kao PI regulator, sa dve vrednosti rampe i pragom greške od 0,6 mm (0.1%). Ostali parametri za ovaj regulator dati su u Tabeli II, a dobijeni su automatskom parametrizacijom PI regulatora. Upravljački sistem baziran na kontroleru SPC 11 bio je podešen prema Tabeli I, i urađena je inicijalna parametrizacija kao i inicijalno „učenje“ ponavljanjem ciklusa pozicioniranja 100 puta. Snimljeni su podaci za oba upravljačka sistema, a dobijeni eksperimentalni rezultati prikazani su na dijagramima na slikama Sl. 5 i Sl. 6.



Slika 5. Odziv aktuatora na upravljanje bazirano na FPGA



Slika 6. Odziv aktuatora na upravljanje pomoću SPC 11

TABELA II. PARAMETRI REGULATORA NA BAZI FPGA

Parametar	Vrednost
K_p	0,000679
T_i	8,47055
T_d	0
Loop Time	5 ms
Prag greške	0,1
Rampa 1	0,8
Vrednost Rampe 1	0,3
Rampa 2	0,3
Vrednost Rampe 2	0,15

A. Analiza dobijenih rezultata

Na slikama Sl. 5 i Sl. 6 prikazani su odzivi sistema upravljanog pomoću dva različita upravljačka sistema. Gornji dijagram prikazuje promenu referentne pozicije (isprekidana linija) sa nulte pozicije na poziciju 334.7 mm i nazad na početnu nultu poziciju, a puna linija prikazuje kretanje pozicije klipa cilindra. Donji dijagram prikazuje protok vazduha u svakom trenutku. Sa ova dva dijagrama se mogu uočiti ključne tačke obeležene tačkama *a* do *g*, a vremena sa komentarima prikazana su u Tabeli III. Uporedni faktori ova dva sistema prikazani su u Tabeli IV.

TABELA III. KLJUČNA VREMENA U ODZIVU SISTEMA UPRAVLJANOG POMOĆU FPGA

Vreme [ms] FPGA	Vreme [ms] SPC 11	Opis
200	200	promena reference na gore
215	264	početak promene u protoku
218	294	početak promene u poziciji
434	619	dostignuta pozicija
461	766	ustaljen protok
1000	1000	promena reference na dole
1011	1068	početak promene u protoku
1018	1086	početak promene u poziciji
1165	1430	dostignuta pozicija
1213	1480	ustaljen protok

TABELA IV. FAKTORI ZA OCENU USPEŠNOSTI UPRAVLJAČKOG SISTEMA

Faktor	FPGA	SPC11
Vreme pozicioniranja sa 0 na 334 mm [ms]	234	419
Vreme pozicioniranja sa 334 na 0 mm [ms]	165	430
Greška pozicioniranja	0,4%	0,6%
Potrošnja u ustaljenom stanju [L/min]	74	76
Potrošnja pozicioniranja 0 na 334 mm [L/min]	123.3	510.4
Potrošnja pozicioniranja 334 na 0 mm [L/min]	106.8	619.9

V. ZAKLJUČAK

Prema izvršenim eksperimentalnim merenjima, čiji je deo prikazan u ovom radu, ustanovljeno je da upravljački sistem baziran na FPGA tehnologiji prednjači po svim posmatranim faktorima. Što se vremena pozicioniranja i potrošnje vazduha tiče, beleži se višestruka efikasnost upravljačkog sistema zasnovanog na FPGA, a beleži se i neznatna prednost u tačnosti pozicioniranja.

Eksperimenti nisu sadržali merenja sa opterećenim aktuatorom, što će svakako biti deo daljih analiza tokom testiranja upravljačkog sistema. U narednom periodu potrebno je raditi na ugradnji dodatnog algoritma za prepoznavanje trenutnih spoljnih uticaja na aktuator na osnovu kojih je potrebno menjati parametre upravljanja.

LITERATURA

- [1] L. Tarjan, I. Šenk, D. Oros, and S. Horvat, "Mogućnosti primene FPGA za unapređenje industrijskih upravljačkih sistema," in *Zbornik radova - 13. Međunarodni naučno-stručni simpozijum INFOTEH-JAHORINA*, 2014, vol. 13, pp. 571–575.
- [2] P. Lapsley, *DSP Processor Fundamentals: Architecture and Features*. Piscataway, NJ: IEEE Press, 1997.
- [3] A. V. Deshmukh, *Microcontrollers, Theory and Applications*. ser. The Companies, Computer Engineering Series, New York: Mac-Graw-Hill, 2007.

- [4] L. Tarjan, I. Šenk, G. Ostojić, S. Stankovski, and L. Gogolak, "Application of FPGA Technology and a Real-Time Controller for Automatic Regulation of Rapidly Changing Variables," in *Proceedings of the 2nd Regional Conference - Mechatronics in Practice and Education (MECHEDU 2013)*, 2013, pp. 125–128.
- [5] L. Samet, N. Masmoudi, M. W. Kharrat, and A. Kamoun, "A digital PID controller for real time and multi loop control: a comparative study," in *Electronics, Circuits and Systems, 1998 IEEE International Conference on*, 1998, vol. 1, pp. 291–296 vol.1.
- [6] L. Venkatesan, A.D. Janarthanan, S. Gowrishankar, P.R. Aarathi, and G. S. Kumar, "IMPLEMENTATION OF FPGA BASED DA-PID CONTROLLER FOR TEMPERATURE SYSTEM," *Int. J. Power Syst. Oper. Energy Manag.*, vol. 2, no. 3,4, pp. 39–43, 2012.
- [7] E. Monmasson, L. Idkhajine, M. N. Cirstea, I. Bahri, A. Tisan, and M. Naouar, "FPGAs in Industrial Control Applications," *Industrial Informatics, IEEE Transactions on*, vol. 7, no. 2, pp. 224–243, 2011.
- [8] E. J. Bueno, A. Hernandez, F. J. Rodriguez, C. Girón, R. Mateos, and S. Cobrecas, "A DSP- and FPGA-Based Industrial Control With High-Speed Communication Interfaces for Grid Converters Applied to Distributed Power Generation Systems," *Industrial Electronics, IEEE Transactions on*, vol. 56, no. 3, pp. 654–669, 2009.
- [9] E. Monmasson and M. N. Cirstea, "FPGA Design Methodology for Industrial Control Systems - A Review," *Industrial Electronics, IEEE Transactions on*, vol. 54, no. 4, pp. 1824–1842, 2007.
- [10] M. Curkovic, K. Jezernik, and R. Horvat, "FPGA-based predictive sliding mode controller of a three-phase inverter," *IEEE Trans. Ind. Electron.*, vol. 60, no. 2, pp. 637–644, 2013.
- [11] Festo, "Supplementary description for Soft Stop SPC11," *Festo P.BE-SPC11-DNCI-EN en 1208a English*, 2012. [Online]. Available: <http://goo.gl/Nmiekk>.

ABSTRACT

Pneumatic actuators are one of the most applied actuators in industrial machines. These actuators perform direct linear motion and are easily embedded and applied. Application of servo-pneumatic distribution valves enables fine motion control, respective to the needs of the technological process for which the machine is used. Application of FPGA technology greatly decreases the control algorithm execution time, thus increasing the performance of the actuator and enabling the inclusion of additional system parameters, which could improve control. This paper presents a controller based on FPGA, and presents a parallel test for actuator control based on this controller and based on a common servo controller.

APPLICATION OF FPGA BASED CONTROLLER FOR SERVO CONTROL OF A PNEUMATIC LINEAR ACTUATOR

Laslo Tarjan, Ivana Šenk, Dragana Oros, Igor Baranovski, Stevan Stankovski