

# Odnos proporcionalnog i širinsko impulsnog pneumatskog upravljanja iz aspekta pozicioniranja i potrošnje vazduha pod pritiskom

Vule Reljić, Slobodan Dudić, Dragan Šešlija, Zoran Adamov, Jovan Šulc, Vladimir Jurošević

Fakultet tehničkih nauka  
Univerzitet u Novom Sadu  
Novi Sad, Republika Srbija  
vuketa90@uns.ac.rs

**Sažetak**—Ovaj rad prikazuje odnos proporcionalnog i širinsko impulsnog pneumatskog upravljanja. Pri korišćenju proporcionalnog upravljanja, greška pozicioniranja je ravna nuli ali nakon nekog vremena dolazi do gubitka pozicije. Upravljački sistem vraća klip u željenu poziciju što utiče na povećanje potrošnje vazduha pod pritiskom. Sa druge strane, pri korišćenju širinsko impulsnog upravljanja, dolazi do pojave greške pozicioniranja ali se ne javlja gubitak pozicije, te je u tom slučaju potrošnja vazduha pod pritiskom manja.

**Ključne riječi**—proporcionalno upravljanje; širinsko impulsno upravljanje; vazduh pod pritiskom

## I. UVOD

Duži vremenski period od početka primjene pneumatski aktuatori korišćeni su samo za ostvarivanje elementarnog kretanja između dvije krajnje pozicije (*eng. bang-bang control*). U tom slučaju, upravljanje se vrši bez povratne sprege, prostim aktiviranjem odnosno deaktiviranjem (*eng. on-off*) razvodnih ventila, čime se može uspostaviti ili prekinuti protok vazduha pod pritiskom, promijeniti smjer kretanja pneumatskog aktuatora, i slično. Ovakav tip primjene pneumatskih aktuatora sreće se često u slučajevima relativno jednostavnih zadataka industrijske automatizacije i biće primjenljiv i u budućnosti, uzimajući u obzir da postoji veliki broj slučajeva kod kojih takav način upravljanja zadovoljava postavljene uslove.

Međutim, neke upravljačke probleme nije moguće riješiti primjenom isključivo onih razvodnih ventila koji omogućavaju pozicioniranje aktuatora samo u dva krajnja položaja, već je potrebno izvršiti dodatno pozicioniranje u nekim međupoložajima, i to sa veoma visokom tačnošću i ponovljivošću, pri čemu tačnost pozicioniranja nekad čak mora biti u granicama od desetog dijela milimetra. U tim slučajevima, koriste se različite tehnike upravljanja, kao što su primjena proporcionalnih ventila (proporcionalna pneumatika) [1]–[3] i primjena prekidačkih tehnologija (digitalna pneumatika) [4]–[7].

U prvom slučaju koriste se komponente koje imaju mogućnost regulisanja protoka tokom kretanja aktuatora, a tipični predstavnik ove grupe je proporcionalni razvodni ventil [8]. Naime, tokom kretanja, kotva razvodnika, koja se koristi za pozicioniranje klipa za upravljanje protokom, zauzima poziciju

između potpuno otvorenog i potpuno zatvorenog položaja, u zavisnosti od električnog signala koji dobija sa upravljačkog uređaja. Na taj način se kontinualno upravlja protokom i omogućava pozicioniranje pneumatskog aktuatora u nekom od međupoložaja. Trenutna pozicija klipa aktuatora određuje se korišćenjem odgovarajuće mjerne letve, mjerenjem napona ili jačine električne struje na istoj i izvršenjem odgovarajuće konverzije. Upravljački sistem upoređuje pomenutu trenutnu poziciju sa željenom, izračunava grešku pozicioniranja i, na osnovu izračunate greške i unaprijed generisanog upravljačkog algoritma, generiše odgovarajuće upravljanje. Dakle, ovakvo upravljanje sastoji se od sistema za upravljanje i regulaciju pozicije, proporcionalnog razvodnika, pneumatskog aktuatora i sistema za mjerenje pozicije.

U drugom slučaju koriste se tzv. prekidačke tehnologije, odnosno korišćenjem odgovarajućih tehnika upravljanja, brzo i kontinualno se aktiviraju pojedinačne, ili nekoliko komponenti odjednom. Te komponente su isključivo prekidački (*eng. on-off*) razvodni ventili, a najčešće korišćeni način upravljanja je primjena širinsko impulsne modulacije – PWM (*eng. Pulse Width Modulation*), samostalno ili u kombinaciji sa nekom od drugih poznatih tehnika upravljanja [9]. Potrebno je napomenuti i to da pomenuti prekidački ventili moraju imati veoma kratko vrijeme promjene stanja (otvoren protok/blokiran protok) jer u suprotnom, ukoliko je širina impulsa kraća od vremena otvaranja/zatvaranja ventila, on neće odreagovati. U skladu sa tim, veliki svjetski proizvođači pneumatske opreme, u posljednje vrijeme razvijaju namjenske, specifične ventile koji imaju veoma kratko vrijeme otvaranja i zatvaranja. Jedan od primjera je i monostabilni, normalno zatvoren, električno aktiviran, 3/2 razvodni ventil MHE3-MS1H-3/2G-1/8, proizvođača Festo [10], sa vremenom otvaranja od svega 2,8 ms i vremenom zatvaranja od svega 2,3 ms.

Cilj izrade ovog rada je poređenje proporcionalnog i PWM pneumatskog upravljanja [2], [11], [12] iz aspekta pozicioniranja i potrošnje vazduha pod pritiskom. Sva eksperimentalna ispitivanja izvršena su na uređaju za podizanje i držanje predmeta rada, koji se sastoji od jednog vertikalno postavljenog pneumatskog cilindra bez klipnjače sa integrisanom vakuum hvataljkom, a koja se koristi za hvatanje i držanje predmeta rada.

Rad je organizovan na sljedeći način: u odjeljku 2 detaljno su prikazana dva načina upravljanja radom uređaja za podizanje i držanje predmeta rada: primjena proporcionalnog razvodnog ventila i primjena PWM upravljanja korišćenjem četiri 2/2 razvodna ventila. Pored toga, objašnjen je način prikupljanja podataka vezanih za pozicioniranje i potrošnju vazduha pod pritiskom. U odjeljku 3 detaljno su prikazani i diskutovani dobijeni rezultati. Na samom kraju, u odjeljku 4 izvedeni su najvažniji zaključci.

## II. EKSPERIMENTALNI DIO

### A. Upravljanje uređajem korišćenjem proporcionalnog razvodnog ventila

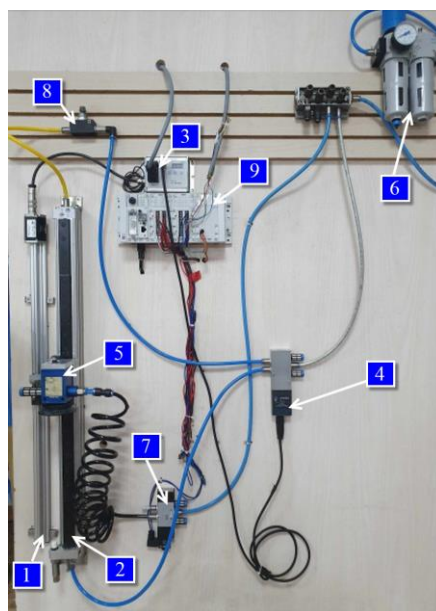
Za upravljanje proporcionalnim ventilima koriste se namjenski razvijeni kontroleri. U skladu sa tim, i u ovom slučaju je korišćen jedan takav kontroler a to je Soft-Stop servo pneumatski upravljački sistem (industrijski kontroler proizvođača Festo iz serije SPC [13]), koji obezbjeđuje pozicioniranje bez udara u četiri pozicije (dvije krajnje i dvije proizvoljne) pri velikim brzinama kretanja, za unaprijed definisano transportovano opterećenje. Korišćenjem pomenutog kontrolera omogućeno je zaustavljanje klipa vertikalno postavljenog pneumatskog cilindra bez klipnjače u četiri pozicije: dvije krajnje (donja i gornja) i dvije proizvoljno definisane međupozicije.

Parametrizacija i puštanje u rad pomenutog kontrolera omogućeni su putem ugrađenog ekrana i tastera, kao i putem digitalnih ulaza i izlaza. Obučavanje parametara kontrolera vrši se automatski, pokretanjem režima za učenje i pamćenje definisanih pozicija (*eng. Teach mode*). Parametrizacija je izvršena u skladu sa uputstvom proizvođača [13], uzimajući u obzir sve neophodne uslove. Tako je, na primjer, radi smanjenja fluktuacija radnog pritiska, prije pripreme grupe bio postavljen rezervoar zapremine 24 l, čime je zadovoljen uslov da zapremina pomenutog rezervoara mora biti najmanje četiri puta veća od zapremine korišćenog aktuatora [13].

Pored prethodno pomenutog kontrolera, u ovom slučaju korišćen je i programabilni logički kontroler – PLC (*eng. Programmable Logic Controller*) proizvođača Festo iz serije CPX za upravljanje monostabilnim, električno aktiviranim, 5/2 razvodnim ventilom preko koga se vazduh pod pritiskom doprema do vakuum generatora sa kojim je dalje povezana vakuum sisaljka, a koja omogućava hvatanje i držanje predmeta rada u potrebnom vremenu. Pomenuti 5/2 razvodni ventil korišćen je u funkciji 3/2 razvodnog ventila što je omogućeno blokiranjem odgovarajućeg izlaznog priključka.

Konačno, za realizaciju proporcionalnog upravljanja uređajem za podizanje i držanje predmeta rada, korišćena je sljedeća oprema proizvođača Festo (Sl.1) [12]:

1. mjerna letva MME-MTS-600-TLF-AIF;
2. cilindar bez klipnjače DGPL-25-600-PPV-A-B-KF-SH-D2;
3. industrijski kontroler SPC11-MTS-AIF;
4. proporcionalni 5/3 razvodni ventil MPYE-5-1/8-LF-010-B;
5. vakuum hvataljka koja se sastoji od vakuum generatora VAK1/4 i vakuum sisaljke VAS-75-1/4-NBR;
6. priprema grupa FRC-1/8-DB-7-MINI;



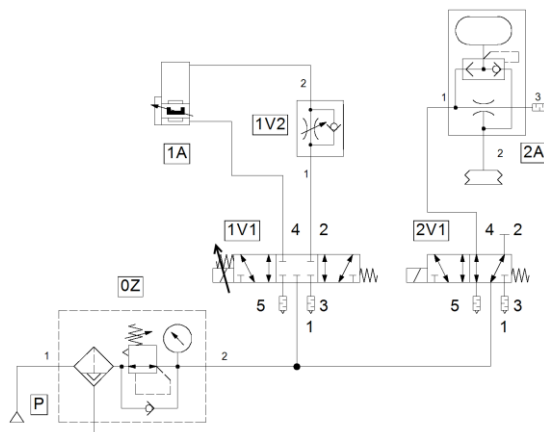
Slika 1. Fizička realizacija proporcionalnog upravljanja.

7. monostabilni, električno aktiviran, 5/2 razvodni ventil VUVS-L20-M52-MD-G18-F7, u funkciji 3/2 razvodnog ventila;
8. prigušno-nepovratni ventil GRA-1/4-B;
9. PLC CPX-CEC.

Radi lakšeg razumijevanja rada uređaja, na Sl. 2 prikazana je pneumatska upravljačka šema proporcionalnog upravljanja.

### B. Upravljanje uređajem korišćenjem četiri 2/2 razvodna ventila i primjenom PWM-a

Prilikom realizacije upravljanja uređajem za podizanje i držanje predmeta rada primjenom PWM-a, realizovana je izvedba sa četiri monostabilna, električno aktivirana, 3/2 razvodna ventila sa veoma kratkim vremenom otvaranja i zatvaranja, koji su korišćeni u funkciji 2/2 razvodnih ventila, a što je postignuto blokiranjem odgovarajućih priključaka. Za upravljanje ovim razvodnim ventilima korišćen je PLC proizvođača Festo iz serije CPX, koji je dodatno, kao i u slučaju proporcionalnog upravljanja, i u ovom slučaju korišćen i za upravljanje monostabilnim, električno aktiviranim, 5/2



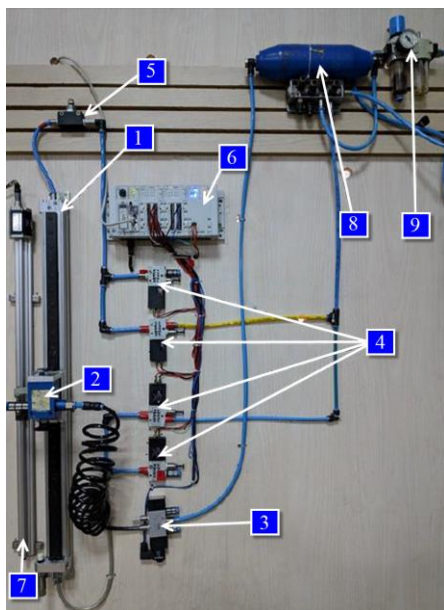
Slika 2. Pneumatska upravljačka šema proporcionalnog upravljanja.

razvodnim ventilom preko koga se vazduh pod pritiskom doprema do vakuuma generatora sa kojim je dalje povezana vakuum sisaljka, a koja omogućava hvatanje i držanje predmeta rada u potrebnom vremenu.

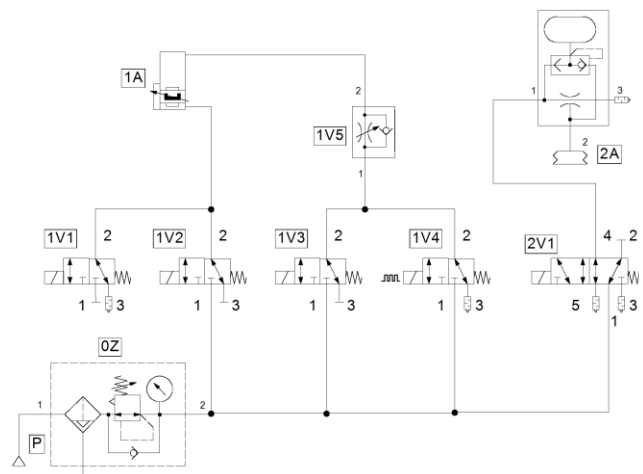
Konačno, za realizaciju PWM upravljanja uređajem za podizanje i držanje predmeta rada, korišćena je sljedeća oprema proizvođača Festo (Sl.3) [12]:

1. cilindar bez klipnjače DGPL-25-600-PPV-A-B-KF-SH-D2;
2. vakuum hvataljka koja se sastoji od vakuuma generatora VAK1/4 i vakuuma sisaljke VAS-75-1/4-NBR;
3. monostabilni, električno aktiviran, 5/2 razvodni ventil VUVS-L20-M52-MD-G18-F7, u funkciji 3/2 razvodnog ventila;
4. četiri monostabilna, električno aktivirana, 3/2 razvodna ventila MHE3-MSIH-3/2G-1/8, u funkciji 2/2 razvodnih ventila;
5. prigušno-nepovratni ventil GRA-1/4-B;
6. PLC CPX-CEC;
7. mjerna letva MME-MTS-600-TLF-AIF;
8. dodatni rezervoar vazduha pod pritiskom VZS-0.75;
9. pripremna grupa FRC-1/8-DB-7-MINI.

Radi lakšeg razumijevanja rada uređaja u ovom slučaju, na Sl. 4 prikazana je pneumatska upravljačka šema. PWM upravljanje je realizovano uz prigušenje izlaznog vazduha (*eng. Meter-out control*), pri čemu je PWM signal dovođen samo na razvodni ventil koji se koristi za ispuštanje iskorišćenog vazduha pod pritiskom u atmosferu. Za pokretanje klipa cilindra prema gore (podizanje predmeta rada) korišćen je par razvodnih ventila 1V2 i 1V4, pri čemu se razvodni ventil 1V2 priključuje na radni pritisak a razvodni ventil 1V4 je pod PWM upravljanjem i služi za prigušenje izlaznog vazduha u zavisnosti od greške. Naime, prvo se, u odgovarajućim vremenskim intervalima, računa greška pozicioniranja, kao razlika željene i trenutne pozicije, koja se očitava pomoću mjerne letve. Na osnovu greške, formira se faktor ispune PWM signala i dalje se, preko PWM signala, upravlja razvodnim ventilom 1V4, koji se koristi za ispuštanje



Slika 3. Fizička realizacija PWM upravljanja.



Slika 4. Pneumatska upravljačka šema PWM upravljanja.

iskorišćenog vazduha pod pritiskom u atmosferu. Regulisan prilaz željenoj poziciji u ovom slučaju omogućavao je PD regulator. Podešavanje parametara regulatora vršeno je eksperimentalnim putem, Zigler-Nikolsovom metodom.

Za pokretanje klipa cilindra u suprotnom smjeru (povratak klipa u početni, krajnji donji položaj), korišćeni su razvodnici 1V1 i 1V3. Pošto je, prilikom ispitivanja, naglasak stavljen samo na pozicioniranje prilikom podizanja predmeta rada a ne i prilikom slobodnog povratnog hoda, u ovom slučaju nije vršena regulacija regulatorom, već je klip samo usporavan kako bi se izbjegli udari.

### C. Mjerenje postignute pozicije i potrošnje vazduha pod pritiskom

Radi određivanja tačnosti i ponovljivosti pozicioniranja prilikom podizanja predmeta rada na gore i utvrđivanja potrošnje vazduha pod pritiskom u tim slučajevima, izvršena su četiri različita mjerenja od kojih je svako ponovljeno po pet puta, radi dobijanja tačnijih rezultata. Eksperimenti su vršeni tako da je omogućeno podizanje predmeta rada, čija je masa približno 3,7 kg, do krajnjeg gornjeg položaja klipa cilindra (600 mm), sa zaustavljanjem u proizvoljno definisanim međupozicijama na dva različita načina [12]:

1. zaustavljanje u dvije međupozicije, od kojih je prva na 17% ukupne dužine hoda (102 mm), a druga na 51% ukupne dužine hoda (306 mm);
2. zaustavljanje u jednoj međupoziciji koja se nalazi na 83% ukupne dužine hoda (498 mm).

Oba prethodna definisana načina rada izvedena su uz stepen prigušenja prigušno-nepovratnog ventila od 20%. Pomenuti režimi rada uređaja omogućeni su i u slučaju korišćenja proporcionalnog upravljanja i u slučaju PWM upravljanja, čime su konačno dobijena četiri različita režima rada, a za svaki od njih je utvrđena postignuta pozicija i određena je potrošnja vazduha pod pritiskom.

Očitavanje postignute pozicije vršeno je direktno sa PLC-a. Potrebno je napomenuti da je u tom slučaju korišćen namjenski mjerni modul, CPX-CMIX, koji je putem CAN komunikacije povezan sa mjernom letvom.

Potrošnja vazduha pod pritiskom je određivana indirektno, zbog malih protoka, mjerenjem razlike pritisaka u rezervoaru. Za to je korišćen diferencijalni mjerač pritiska, razvijen na Fakultetu tehničkih nauka u Novom Sadu, a koji se sastoji od tri komponente (Sl. 5):

1. senzorske jedinice sa pripadajućom upravljačkom elektronikom [14];
2. izvora napajanja;
3. bazne jedinice – PLC-a FC660.

Senzorska jedinica sadrži dva senzora pritiska MBS 3000, proizvođača Danfos. Bazna jedinica je korišćena za prijem podataka sa senzorske jedinice i njihov ispis na ekranu korisničkog računara. Korišćenjem odgovarajuće korisničke aplikacije vršena je konverzija očitanih podataka u vrijednost nadpritiska.

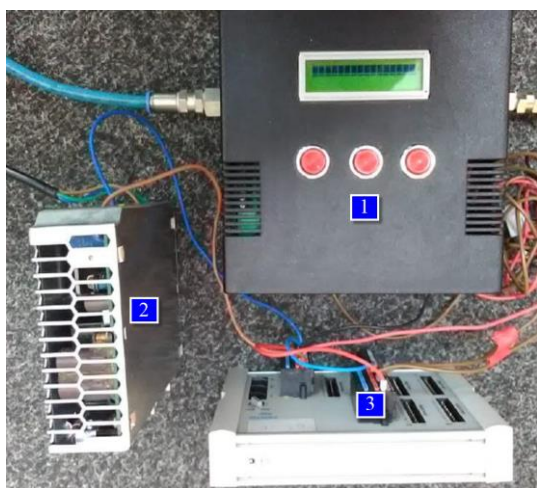
Mjerenje potrošnje izvršeno je na taj način što je, kao što je već prethodno pomenuto, prije pripreme grupe, bio postavljen rezervoar zapremine 24 l na čiji ulaz je bio postavljen jedan priključak diferencijalnog mjerača pritiska. Drugi priključak diferencijalnog mjerača pritiska bio je slobodno povezan sa atmosferom. Vrijednost radnog pritiska u rezervoaru očitavana je na početku i na kraju jednog ciklusa podizanja i držanja predmeta rada, a onda je utvrđivan odgovarajući pad pritiska. Korišćenjem Bojl-Mariotovog zakona, uz pretpostavku da je radna temperatura konstantna, izračunata je potrošnja vazduha pod pritiskom korišćenjem formula od 1 do 3:

$$V_1 = \frac{p_1 \cdot V_R}{p_{atm}}; \quad (1)$$

$$V_2 = \frac{p_2 \cdot V_R}{p_{atm}}; \quad (2)$$

$$Q = V_1 - V_2; \quad (3)$$

gdje je  $V_1$  količina vazduha u rezervoaru na početku rada,  $V_2$  količina vazduha u rezervoaru nakon izvršenog jednog ciklusa rada sistema (podizanja i držanja predmeta rada),  $V_R$  zapremina rezervoara (24 l),  $p_1$  apsolutni pritisak u rezervoaru na početku rada,  $p_2$  apsolutni pritisak u rezervoaru nakon izvršenog jednog ciklusa rada sistema (podizanja i držanja predmeta rada),  $p_{atm}$  atmosferski pritisak i  $Q$  utrošena količina vazduha pod pritiskom za jedan radni ciklus, izražena u Nl.

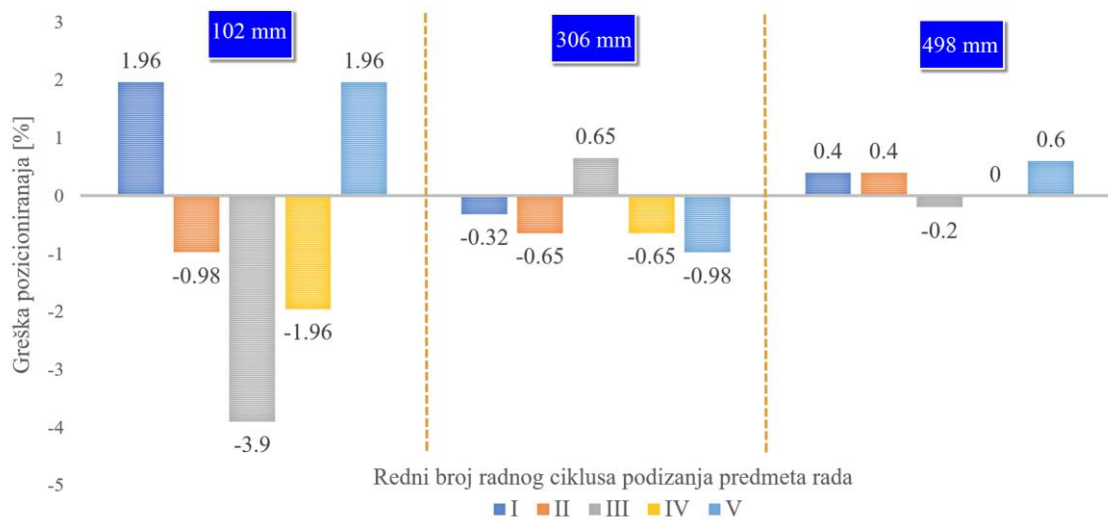


Slika 5. Diferencijalni mjerač pritiska.

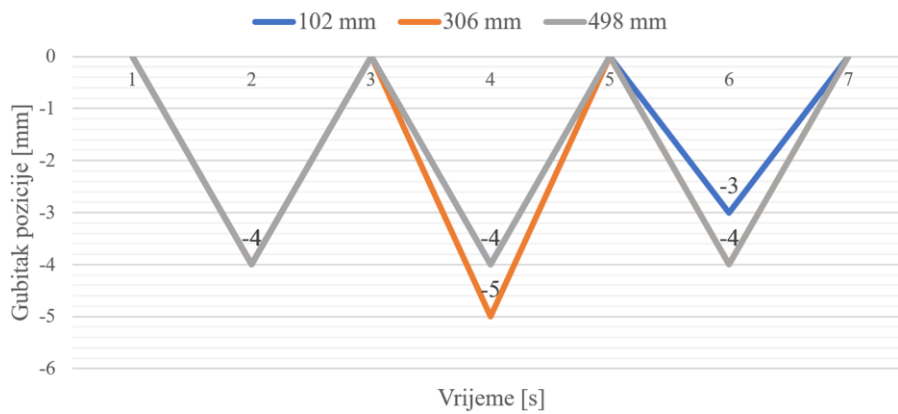
### III. REZULTATI I DISKUSIJA

Nakon izvršenih testiranja, utvrđeno je nekoliko bitnih stvari:

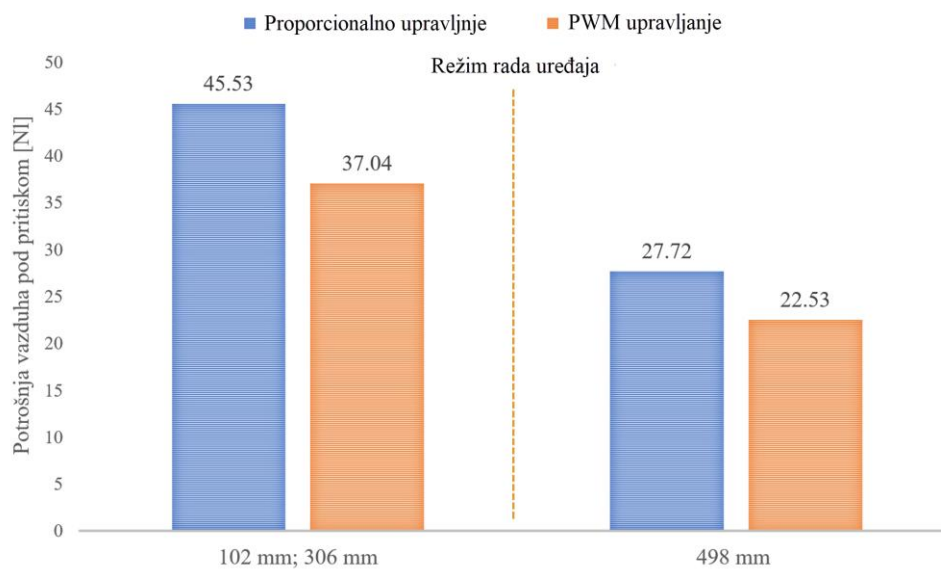
1. pri korišćenju proporcionalnog upravljanja, klip cilindra se, bez obzira na to o kojoj poziciji je riječ, uvijek pozicionirao u tačnu poziciju, odnosno greška pozicioniranja je bila ravna nuli te se tačnost i ponovljivost pozicioniranja korišćenjem ovog načina upravljanja ocjenjuju kao odlični. U drugom slučaju, pri primjeni PWM upravljanja, pri pozicioniranju klipa u željenu poziciju, uglavnom je dolazilo do pojave greške (Sl. 6). Apsolutna vrijednost relativne greške pozicioniranja je u velikoj većini slučajeva manja od 2% te se tačnost pozicioniranja zbog toga može ocijeniti kao zadovoljavajuća. Ono što je potrebno naglasiti jeste i to da je apsolutna vrijednost relativne greške pozicioniranja bila iznad 1% samo u slučaju kada je željena pozicija bila jednaka 102 mm, odnosno kada je bilo potrebno izvršiti pozicioniranje klipa u prvoj trećini hoda cilindra. To je posljedica ograničenja u sistemu i dešava se zbog toga što profil brzine klipa, u opštem slučaju, ima približno trapezni oblik, odnosno što je, zbog dotoka vazduha pod pritiskom, ubrzanje veće na samom početku hoda pa je u slučaju kraćeg puta veća greška pozicioniranja. U srednjem i krajnjem dijelu hoda jednostavnije je ostvariti konstantnu brzinu klipa, sa blagim usporenjem, i pozicioniranje je tačnije. Rasipanje rezultata u smislu apsolutne vrijednosti relativne greške pozicioniranja je malo, pa se zbog toga ponovljivost pozicioniranja može ocijeniti kao dobra. Ukupno gledano, tačnost i ponovljivost pozicioniranja korišćenjem PWM upravljanja mogu se ocijeniti kao zadovoljavajuće;
2. pri korišćenju PWM upravljanja, bez obzira na to koja pozicija je postignuta, nije dolazilo do gubitka iste u posmatranom vremenskom periodu nakon pozicioniranja, te se iz ovog aspekta dobijeni rezultati ocjenjuju kao odlični. Sa druge strane, prilikom primjene proporcionalnog upravljanja, nakon pozicioniranja klipa cilindra u tačnu poziciju, dolazilo je do konstantnog gubitka iste, odnosno do blagog oscilovanja pozicije klipa jer bi ga upravljački sistem konstantno vraćao u željenu poziciju (Sl. 7). Bez obzira u kojoj od tri definisane međupozicije bi bio pozicioniran, klip cilindra bi skliznuo uglavnom oko 4 mm, što znači da je pri pozicioniranju u prvoj međupoziciji (102 mm), dolazilo do gubitka pozicije od 3,92%. U skladu sa tim, rezultati dobijeni pri proporcionalnom upravljanju se iz ovog aspekta mogu ocijeniti kao zadovoljavajući;
3. potrošnja vazduha pod pritiskom, bez obzira da li bilo riječi o zaustavljanju i držanju klipa cilindra u dvije međupozicije (102 mm i 306 mm) ili u samo jednoj (498 mm), manja je pri primjeni PWM upravljanja (Sl. 8), i to za približno 18,6%.



Slika 6. Greška pozicioniranja pri PWM upravljanju.



Slika 7. Gubitak pozicije pri proporcionalnom upravljanju.



Slika 8. Potrošnja vazduha pod pritiskom.

#### IV. ZAKLJUČAK

U ovom radu, na primjeru uređaja za podizanje i držanje predmeta rada, koji se sastoji iz pneumatskog cilindra bez klipnjače i vakuum hvataljke, ispitan je i prikazan odnos proporcionalnog i PWM pneumatskog upravljanja. Rezultati su pokazali da proporcionalno upravljanje klip cilindra uvijek dovodi u tačnu poziciju, ali da nakon nekog vremena dolazi do gubitka iste. Upravljački sistem konstantno vraća klip u željenu poziciju čime se konstantno troši vazduh pod pritiskom. Sa druge strane, kod PWM upravljanja uglavnom dolazi do pojave greške pozicioniranja ali nakon pozicioniranja klip cilindra ostaje u postignutoj poziciji, te prilikom držanja predmeta rada ne dolazi do pojave dodatne potrošnje vazduha pod pritiskom. Na osnovu svega navedenog, korisniku se ostavlja mogućnost izbora u zavisnosti od toga da li je presudan kriterijum tačnost i ponovljivost pozicioniranja ili manja potrošnja vazduha pod pritiskom, odnosno veća energetska efikasnost sistema.

#### LITERATURA

- [1] D. Saravanakumar, B. Mohan, and T. Muthuramalingam, "A review on recent research trends in servo pneumatic positioning systems," *Precision Engineering*, vol. 49, Elsevier Inc., pp. 481–492, Jul. 01, 2017. doi: 10.1016/j.precisioneng.2017.01.014.
- [2] H. Huang, J. Lin, L. Wu, B. Fang, and F. Sun, "Optimal control scheme for pneumatic soft actuator under comparison of proportional and PWM-solenoid valves," *Photonic Network Communications*, vol. 37, no. 2, pp. 153–163, Apr. 2019, doi: 10.1007/s11107-018-0815-3.
- [3] M. Sorli, G. Figliolini, and S. Pastorelli, "Dynamic model and experimental investigation of a pneumatic proportional pressure valve," *IEEE/ASME Transactions on Mechatronics*, vol. 9, no. 1, pp. 78–86, Mar. 2004, doi: 10.1109/TMECH.2004.823880.
- [4] S. Čajetinac, D. Šešlija, S. Aleksandrov, and M. Todorović, "PWM control and identification of frequency characteristics of a pneumatic actuator using PLC controller," *Elektronika ir Elektrotehnika*, vol. 123, no. 7, pp. 21–26, 2012, doi: 10.5755/j01.eee.123.7.2369.
- [5] M. Taghizadeh, A. Ghaffari, and F. Najafi, "Modeling and identification of a solenoid valve for PWM control applications," *Comptes Rendus - Mecanique*, vol. 337, no. 3, pp. 131–140, 2009, doi: 10.1016/j.crme.2009.03.009.
- [6] N. Ye, S. Scavarda, M. Betemps, and A. Jutard, "Models of a Pneumatic PWM Solenoid Valve for Engineering Applications," *Journal of Dynamic Systems, Measurement, and Control*, vol. 114, no. 4, pp. 680–688, 1992, doi: 10.1115/1.2897741.
- [7] E. J. Barth, J. Zhang, and M. Goldfarb, "Sliding mode approach to PWM-controlled pneumatic systems," *Proceedings of the 2002 American Control Conference (IEEE Cat. No.CH37301)*, Anchorage, May 8–10, 2002, pp. 2362–2367, doi: 10.1109/ACC.2002.1023995.
- [8] H. J. Eberhardt and D. Scholz, *Festo workbook: Servo-Pneumatic Positioning*. Denckendorf: Festo Didactic GmbH & Co., 2001.
- [9] C. Ferraresi, "A new PCM-PWM combined technique for pneumatic flow-regulating valves," *Proceedings of the Joint Hungarian–British Mechatronics Conference*, September 1994, Budapest, pp. 385–390.
- [10] Festo, "Solenoid valves MH2, MH3, MH4, fast-switching valves." Accessed: Jan. 28, 2022. [Online]. Available: <https://www.festo.com/media/pim/636/D15000100122636.PDF>
- [11] B. Mohan and D. Saravanakumar, "Comparison of Servo Positioning Performance of Pneumatic Cylinders using Proportional Valve Method and PWM Control Method," in *Applied Mechanics and Materials*, 2014, vol. 541–542, pp. 1233–1237. doi: 10.4028/www.scientific.net/AMM.541-542.1233.
- [12] Z. Adamov, "Odnos proporcionalnog i širinsko impulsnog pneumatskog upravljanja u pogledu potrošnje i pozicioniranja," *diplomski rad*, Univerzitet u Novom Sadu, Fakultet tehničkih nauka, 2019.
- [13] Festo, "Soft Stop SPC11." Accessed: Feb. 28, 2022. [Online]. Available: [https://www.festo.com/net/SupportPortal/Files/403963/SPC11\\_SYS\\_2014-06e\\_196724g1.pdf](https://www.festo.com/net/SupportPortal/Files/403963/SPC11_SYS_2014-06e_196724g1.pdf)
- [14] J. Marković, "Daljinsko očitavanje stanja zaprljanosti filtera za vazduh pod pritiskom," *diplomski-master rad*, Univerzitet u Novom Sadu, Fakultet tehničkih nauka, 2011.

#### ABSTRACT

This paper presents the comparison of proportional and PWM pneumatic control. When using proportional control, the positioning error is zero but after some time there is a loss of position. The control system returns the piston to the desired position, so the compressed air consumption increases. On the other hand, when using PWM control, a positioning error occurs but no loss of position, so in that case the compressed air consumption is lower.

#### COMPARISON OF PROPORTIONAL AND PWM PNEUMATIC CONTROL IN TERMS OF POSITIONING AND COMPRESSED AIR CONSUMPTION

Vule Reljic, Slobodan Dudic, Dragan Seslija, Zoran Adamov, Jovan Sulc, Vladimir Jurosevic