

# Analiza metode taktnog lanca iz aspekta potrošnje vazduha pod pritiskom i vremena trajanja ciklusa rada

Vule Reljić, Vladimir Jurošević, Slobodan Dudić,  
Nikolina Dakić  
Fakultet tehničkih nauka  
Univerzitet u Novom Sadu  
Novi Sad, Republika Srbija  
vuketa90@uns.ac.rs, vladimirjurosevicvl@uns.ac.rs,  
dudic@uns.ac.rs, nikolinadakic@uns.ac.rs

Rade Andrijašević  
TTTech Auto Novi Sad  
Novi Sad, Republika Srbija  
rade.andrijasevic@tttech-auto.com

**Sažetak**—U sklopu ovog rada realizovan je upravljački deo uređaja za doziranje na dva različita načina, primenom minimalne i maksimalne forme taktnog lanca. U laboratorijskim uslovima rada povezane su razvijene upravljačke šeme i ispitana je potrošnja vazduha pod pritiskom i vreme trajanja ciklusa rada. Eksperimentalni rezultati su pokazali da je vreme trajanja upravljačkog ciklusa kraće u slučaju maksimalne forme taktnog lanca ali da je potrošnja vazduha pod pritiskom manja u slučaju minimalne forme taktnog lanca.

**Ključne reči**—metoda taktnog lanca; minimalna i maksimalna forma; potrošnja vazduha pod pritiskom; vreme trajanja ciklusa rada

## I. UVOD

Jedan od problema koji se veoma često dešava u tehnici pneumatskog upravljanja je pojava neželjenih signala (na primer, signala graničnih prekidača koji su još aktivirani u trenutku kada dođe do pojave signala sa suprotnim dejstvom i koji onemogućavaju da taj signal izazove određenu reakciju). Ovakvi problemi rešavaju se primenom različitih metoda [1]-[6] koje podrazumevaju potiskivanje neželjenog signala (pomoću nekog jačeg signala), poništavanje neželjenog signala (pomoću određenih uređaja ili određenih veza u okviru šeme) ili sistemsko poništavanje neželjenog signala primenom pomoćnog memorijskog razvodnika.

U poslednjem slučaju, koji se u praksi najčešće koristi, primenjuju se preklopni impulsni ventili, pa se tako razlikuju metoda preklopnika, kaskadna metoda, metoda taktnog lanca [7] i metoda mehaničkog sekvencera [8]. Svaka od navedenih metoda razvijena je na način da omogući sistemsko rešavanje problema pojave neželjenog signala ali i da eliminiše nedostatke koja pokazuju druge metode iz iste grupe. Tako je, na primer, kod metode taktnog lanca rešen nedostatak vezan za pad pritiska, jer su preklopni ventili povezani paralelno za razliku od izvedbe kod kaskadne metode pri kojoj se preklopni ventili povezuju redno [1]-[3]. Sa druge strane, kod metode mehaničkog sekvencera rešen je problem kašnjenja koji se javlja kod taktnih lanaca u slučaju velikog broja taktnih stepeni, itd [2], [3].

U skladu sa navedenim, ustanovljene su preporuke koje govore o tome kada je poželjno primeniti koju metodu [1]-[3]

ali ne postoje jasne „granice“ između njih. Iz tog razloga je, u ovom radu, analizirana metoda taktnog lanca i za primenu minimalne forme, koja se obično preporučuje, ali i za primenu maksimalne forme, koja se češće preporučuje kod metode mehaničkog sekvencera. Pomenuta analiza izvršena je iz aspekta potrošnje vazduha pod pritiskom, odnosno u slučaju kada je kriterijum optimalnosti rada upravljačkog sistema njegova energetska efikasnost, i iz aspekta vremena trajanja ciklusa rada, odnosno u slučaju kada je kriterijum optimalnosti rada upravljačkog sistema njegova produktivnost [9].

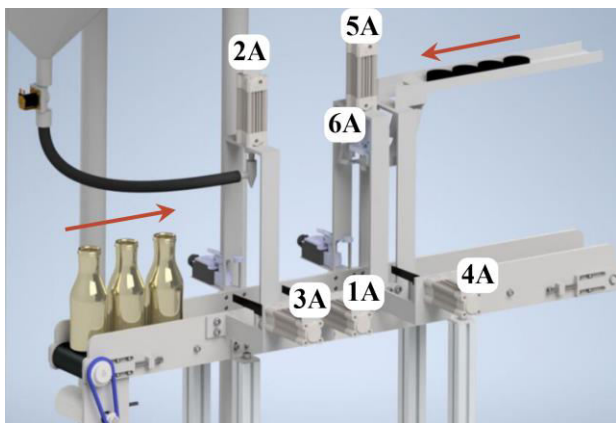
Za potrebe sprovođenja navedene analize projektovan je jedan virtuelni pneumatski uređaj. Razvijen je 3D model uređaja i napravljena animacija njegovog rada, odnosno njegov digitalni blizanac (engl. *digital twin*). Pneumatski upravljački sistem ovog uređaja je realizovan metodom taktnog lanca. Razvijene su pneumatske upravljačke šeme uređaja koje su realizovane u laboratorijskim uslovima rada, što je prikazano u odeljku 2. U navedenim uslovima izvršena su sva potrebna merenja i dobijeni odgovarajući rezultati. Prikaz rezultata, kao i njihova analiza, dati su u odeljku 3. Na osnovu detaljnih analiza rezultata izvedeni su odgovarajući zaključci koji su dati u odeljku 4.

## II. RAZVOJ UPRAVLJAČKOG DELA UREĐAJA ZA DOZIRANJE

### A. Princip rada uređaja za doziranje

Uređaj za doziranje (Sl. 1) sastoji se od pokretne trake na kojoj su postavljeni pneumatski aktuatori u cilju rukovanja predmetima rada (bocama) i jednog dozatora za tečnost koja se dozira u boce [9]. Boce dolaze pokretnom trakom (kako je na Sl. 1 označeno crvenom strelicom sa leve strane) i zaustavljaju se u dve radne pozicije, prvi put ispod mlaznice za doziranje a drugi put ispod mehanizma za postavljanje zatvarača sa navojem na bocu.

Dva horizontalno postavljena pneumatska cilindra (1A i 3A) potrebna su za ostvarivanje prve pozicije. Naime, dok cilindar 1A (engl. *stopper cylinder*) zaustavlja dalje kretanje boce, cilindar 3A je razdvaja od preostalih dolazećih. Na taj način je omogućeno tačno pozicioniranje u položaj za doziranje (pozicija 1).



Slika 1. Skica uređaja za doziranje boca.

Direktno iznad tako pozicionirane boce u vertikalni položaj postavljen je treći pneumatski cilindar (2A) uz pomoć koga se mlaznica približava otvoru boce. Sam postupak doziranja se odvija u unapred definisanom vremenskom intervalu  $t$  i reguliše se pomoću elektromagnetnog ventila koji se aktivira u trenucima kada je potrebno omogućiti protok tečnosti, i kao takav (zbog načina aktiviranja) nije predmet analize ovog rada.

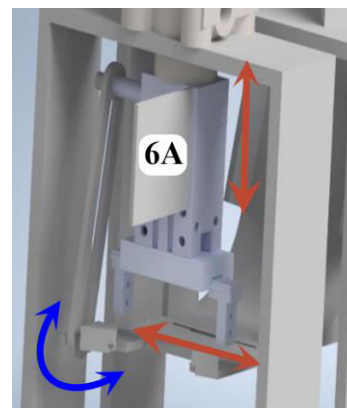
Uz detekciju prisustva boce u položaju za doziranje pomoću mehanički aktiviranog senzora, u nastavku rada potrebno je postaviti zatvarač sa navojem direktno na grlo napunjene boce. U tom cilju, dodat je još jedan horizontalno orijentisani pneumatski cilindar (4A), čija je uloga da zaustavi dalje kretanje boce (engl. *stopper cylinder*). Direktno iznad boce u vertikalni položaj postavljen je peti pneumatski cilindar (5A) čija je uloga tačno pozicioniranje pneumatske hvataljke 6A (engl. *pneumatic gripper*), koja nosi zatvarač i čijim se otvaranjem pomenuti zatvarač postavlja na grlo boce. Detekcija prisustva boce i u ovom slučaju, odnosno u položaju za postavljanje zatvarača (pozicija 2), vrši se pomoću mehanički aktiviranog senzora. U nastavku procesa, na nekoj drugoj poziciji, na mašini za zatvaranje (čepilici), vrši se zavrtnje zatvarača, i kao takvo nije predmet analize ovog rada.

Potrebno je napomenuti i to da je dotok zatvarača ka poziciji za zatvaranje boce omogućen iz gravitacionog spremišta (kako je na Sl. 1 označeno crvenom strelicom sa desne strane) i obezbeđen dodatnim, namenski projektovanim mehanizmom (Sl. 2). Pokretni deo mehanizma, koji onemogućava dalje kretanje zatvarača kako bi ga hvataljka prihvatila, povezan je sa samom hvataljkom.

Zatvaranjem hvataljke (kako je na Sl. 2 označeno donjom crvenom linijom sa obostranom strelicom) i njenim daljim pozicioniranjem iznad napunjene boce (kako je na Sl. 2 označeno gornjom crvenom linijom sa obostranom strelicom), i taj pokretni deo se rotira (kako je na Sl. 2 označeno plavom linijom sa obostranom strelicom). Time se omogućava da se zatvarač postavi tačno na grlo boce, odnosno sprečava se dalje kretanje dolazećih zatvarača.

### B. Upravljačka šema – minimalna forma

Kao što je već prethodno napomenuto, u sklopu ovog rada analiziran je samo čisto pneumatski upravljački deo uređaja za doziranje. Na osnovu opisa rada uređaja zaključuje se da

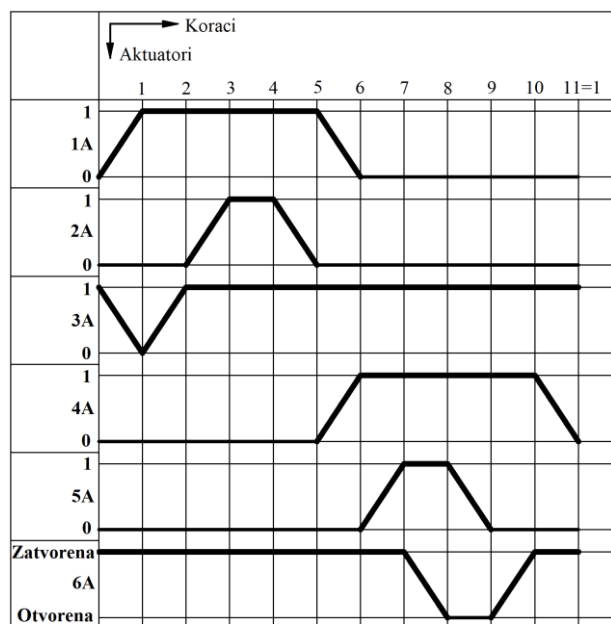


Slika 2. Skica mehanizma za pozicioniranje zatvarača.

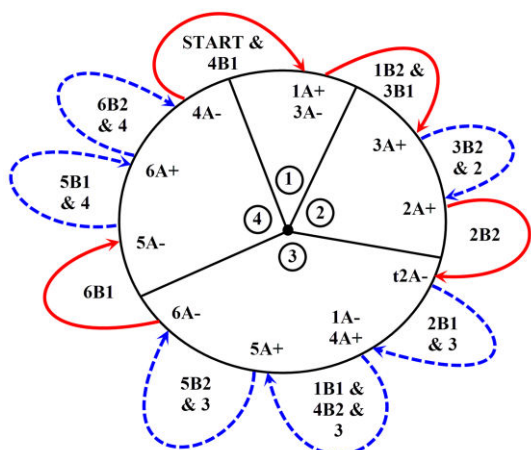
pneumatski deo sačinjava šest pneumatskih aktuatora od kojih su pet pneumatski cilindri i jedna pneumatska mehanička hvataljka. Svi izabrani aktuatori su dvosmernog dejstva. Radi lakšeg razumevanja načina rada uređaja i aktiviranja pojedinih koraka, na Sl. 3 prikazan je dijagram put-korak [9].

Rešenje definisanog upravljačkog problema izvedeno je metodom taktnog lanca. Prema preporukama, prilikom primene metode taktnog lanca, formira se upravljački krug koji se zatim deli na delimična upravljačka kola, tj. DUK-ove. Prilikom podele na DUK-ove vodi se računa o tome da se suprotne upravljačke aktivnosti jednog aktuatora (na primer, izvlačenje i uvlačenje klipnjače jednog pneumatskog cilindra) ne smeju pojaviti u istom DUK-u.

U cilju smanjenja broja impulsnih memorijskih ventila na najmanju moguću meru, prilikom realizacije minimalne forme, potrebno je formirati najveće moguće DUK-ove, odnosno DUK-ove sa što je moguće više upravljačkih aktivnosti. U skladu sa navedenim, izvršena je podela upravljačkog kruga na DUK-ove, prikazana na Sl. 4. Na osnovu upravljačkog kruga i analize upravljačkih signala, nacrtana je pneumatska



Slika 3. Dijagram put-korak.



Slika 4. Podela upravljačkog kruga na DUK-ove – minimalna forma.  
 upravljačka šema korišćenjem metode taktnog lanca (Sl. 5).

U nastavku rada, u laboratorijskim uslovima, realizovana šema je i povezana u funkcionalnu celinu (Sl. 6) [9]. Prilikom povezivanja, korišćena je oprema iz didaktičkih setova za osnove pneumatike, TP 101 [10], i napredno pneumatsko upravljanje, TP 102 [11], proizvođača Festo. Kako u pomenutim setovima nisu posebno integrisane pneumatske mehaničke hvataljke i mehanički aktivirani senzori, prilikom povezivanja u realnim uslovima rada, umesto hvataljke je korišćen pneumatski cilindar (6A) čiji su krajnji položaji

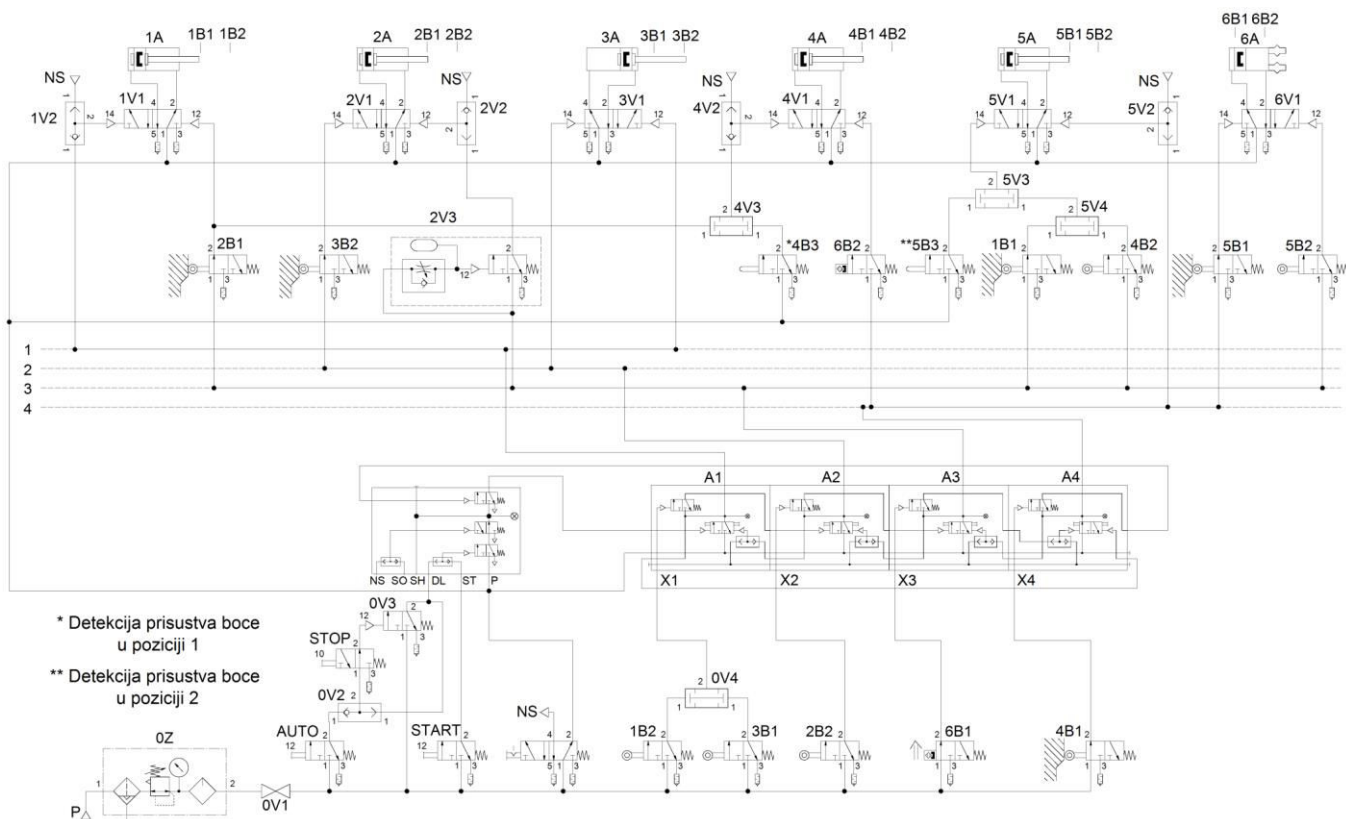
detektovani pomoću graničnih prekidača (6B1 i 6B2) a umesto mehanički aktiviranih senzora korišćeni su tasteri (4B3 i 5B3).

Potrebno je napomenuti još i to da su pri definisanju celokupnog režima rada sistema u obzir uzeti sledeći granični uslovi [9]:

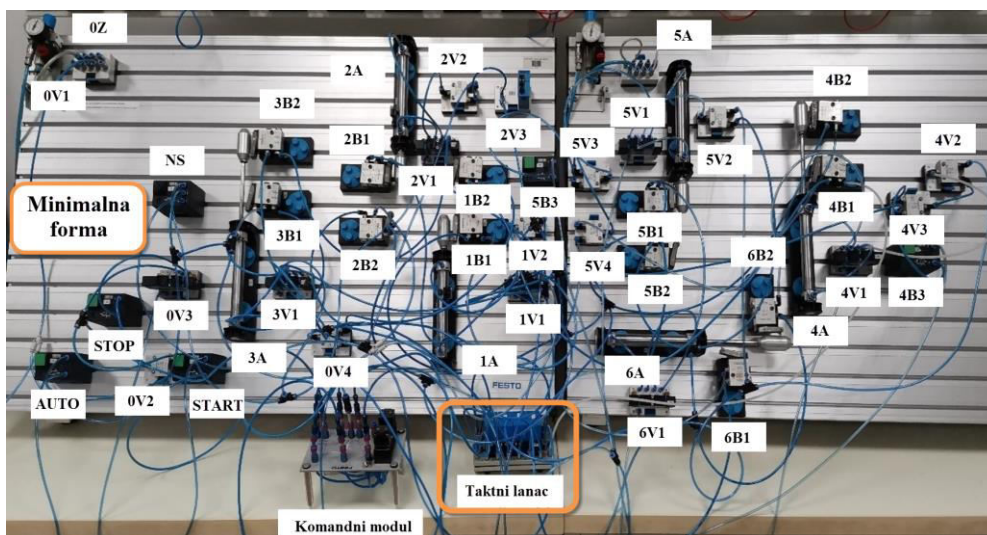
- Aktiviranjem tastera START započinje izvršavanje jednog ciklusa rada;
- Aktiviranjem tastera AUTO započinje automatski režim rada sistema, odnosno izvršava se veći broj ciklusa;
- Aktiviranjem tastera STOP prekida se automatski režim rada, pri čemu se započeti ciklus odvija do kraja;
- Aktiviranjem prekidača NS, u slučaju opasnosti, prekida se automatski režim rada i omogućava to da se klipnjače cilindara 1A i 4A uvuku, a klipnjače cilindara 2A i 5A izvuku istovremeno.

### C. Upravljačka šema – maksimalna forma

U cilju postizanja što je moguće lakšeg upravljanja i kasnijeg održavanja sistema, upravljački sistem primenom metode taktnih lanaca moguće je izvesti i maksimalnom formom. U tom slučaju, prilikom podele upravljačkog kruga na DUK-ove, svaka upravljačka aktivnost se upisuje u poseban DUK, kao što je prikazano na Sl. 7.



Slika 5. Pneumatska upravljačka šema – minimalna forma.



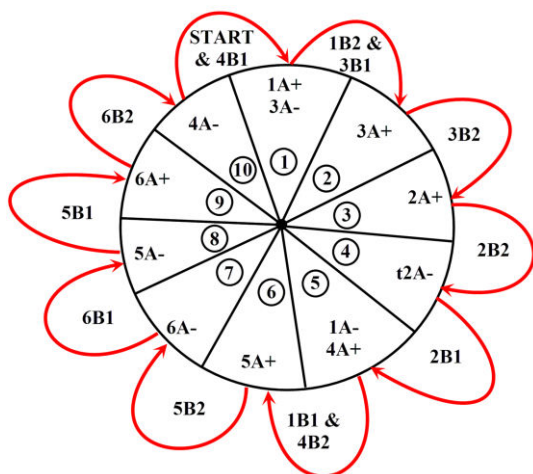
Slika 6. Povezan sistem – minimalna forma.

Na osnovu upravljačkog kruga i analize upravljačkih signala i u ovom slučaju nacrtana je pneumatska upravljačka šema (Sl. 8) a zatim, u laboratorijskim uslovima rada, povezana u funkcionalnu celinu (Sl. 9) [9].

### III. REZULTATI I DISKUSIJA

Nakon povezivanja upravljačkih šema i provere funkcionalnosti sistema praćenjem odvijanja upravljačkih operacija prema dijagramu put-korak, izvršena su odgovarajuća merenja. Kako je, pri definisanju graničnih uslova, omogućen i pojedinačni i trajni režim rada, radi dobijanja tačnijih rezultata, sistem je ispitivan i pri prvom i pri drugom režimu, s tim što je trajni režim rada prekidan nakon pet kompletno završenih ciklusa. Svako merenje ponovljeno je po tri puta a zatim su za odgovarajuće rezultate uzete aritmetičke sredine prethodno dobijenih vrednosti.

Za ispitivanje potrošnje vazduha pod pritiskom korišćen je laboratorijski uređaj AirBox [12], proizvođača Festo. AirBox je u sistem povezan odmah nakon pripreme grupe tako da je



Slika 7. Podela upravljačkog kruga na DUK-ove – maksimalna forma.

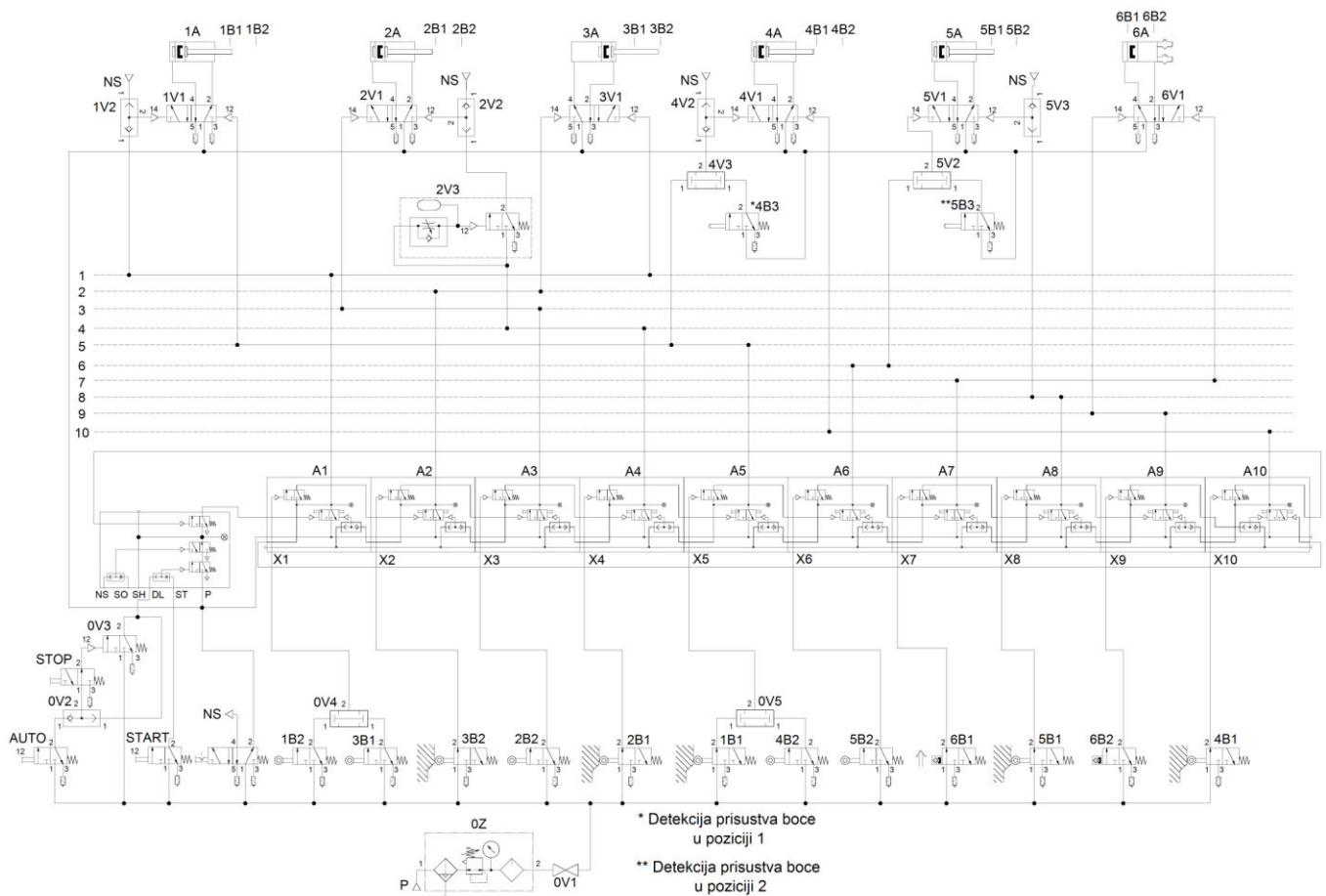
celokupan protok vazduha pod pritiskom direktno sa izvora napajanja usmeravan kroz sam uređaj. Kako su sva merenja obavljena u laboratorijskim uslovima rada, sa didaktičkim komponentama koje ne zahtevaju velike protoke, AirBox je podešen tako da se protok vazduha pod pritiskom očitava putem protokomera niskog protoka, oznake SFE1, za protoke u rasponu od 10 NI/min do 200 NI/min, sa tačnošću merenja od  $\pm 3\%$  i ponovljivošću 0,8%, uz maksimalan radni pritisak od 10 bar. Po uspešnom završenom postupku očitavanja protoka kroz uređaj, podaci iz AirBox-a su putem serijske RS232 komunikacije preuzeti na računar u grafičkoj (kao dijagrami) i numeričkoj (kao .csv fajlovi) formi, i vršena je dalja obrada istih. Kako AirBox prikazuje i vreme početka i završetka merenja, vreme trajanja ciklusa rada očitano je direktno sa uređaja. U cilju provere proteklog vremena, vreme trajanja ciklusa rada dodatno je mereno i pomoću štoperice. Jedan primer dobijenih rezultata u formi dijagrama (za slučaj minimalne forme, za pet ciklusa rada) prikazan je na Sl. 10.

Dobijeni rezultati u pogledu potrošnje vazduha pod pritiskom pokazali su sledeće [9]:

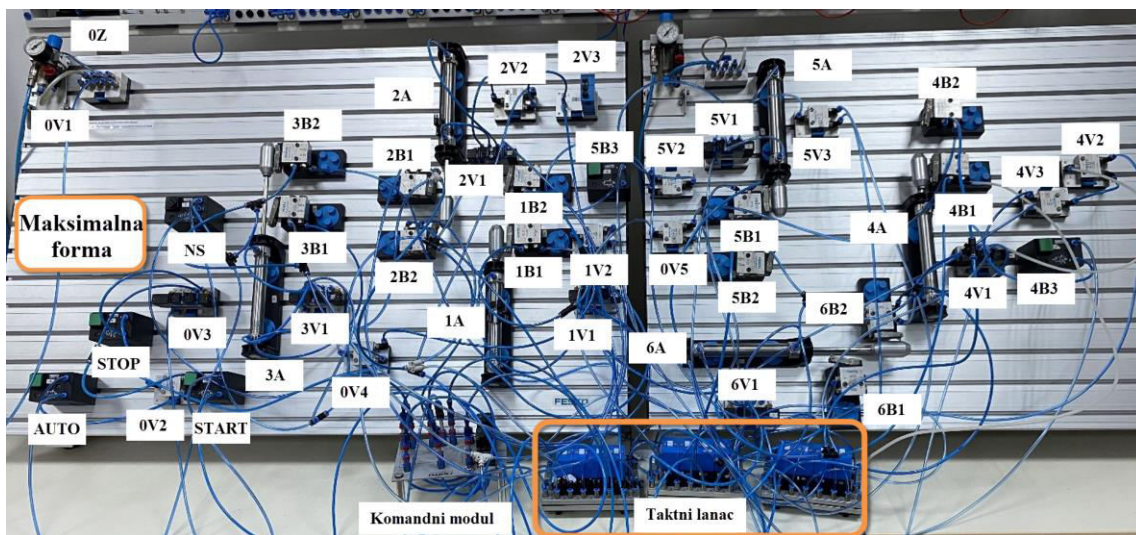
- U slučaju korišćenja minimalne forme taktnog lanca prosečna potrošnja vazduha pod pritiskom za jedan ciklus rada iznosila je 4,47 NI;
- U slučaju korišćenja maksimalne forme taktnog lanca prosečna potrošnja vazduha pod pritiskom za jedan ciklus rada iznosila je 5,08 NI.

Dobijeni rezultati u pogledu vremena trajanja ciklusa rada pokazali su sledeće [9]:

- U slučaju korišćenja minimalne forme taktnog lanca prosečno vreme trajanja jednog ciklusa rada bilo je 8,25 s;
- U slučaju korišćenja maksimalne forme taktnog lanca prosečno vreme trajanja jednog ciklusa rada bilo je 6,99 s.



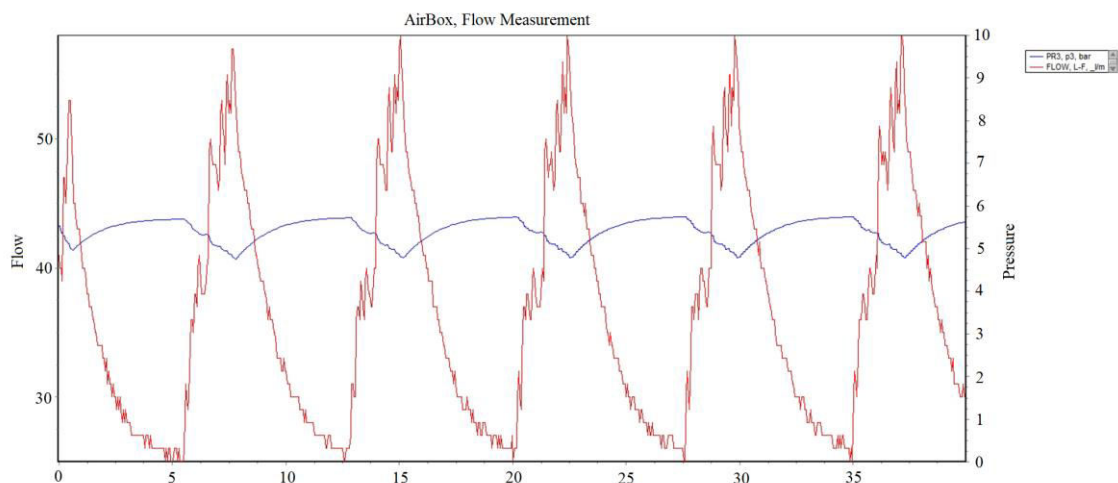
Slika 8. Pneumatska upravljačka šema – maksimalna forma.



Slika 9. Povezan sistem – maksimalna forma.

Na osnovu dobijenih rezultata zaključuje se da je potrošnja vazduha pod pritiskom veća u slučaju maksimalne forme a uzrok tome je veći broj korišćenih komponenti, odnosno veći broj elemenata taktinog lanca. Povećanje broja komponenti dovodi i do veće početne investicije. U skladu sa tim, ukoliko

bi se kao kriterijum optimalnosti posmatrala energetska efikasnost, minimalna forma taktinog lanca se nameće kao odgovarajuće rešenje.



Slika 10. Grafički prikaz jednog primera dobijenih rezultata.

Sa druge strane, vreme trajanja ciklusa rada je kraće u slučaju maksimalne forme a uzrok tome je konstantno aktiviranje pneumatskih aktuatora „direktno iz grane“, odnosno direktno sa elemenata taktnog lanca (a ne preko dodatnih ventila). Ovo vodi i ka jednostavnijem upravljanju i jednostavnijem održavanju sistema, te se maksimalna forma taktnog lanca nameće kao odgovarajuće rešenje u slučaju kada se kao kriterijum u sistemu postavi produktivnost.

#### IV. ZAKLJUČAK

Metoda taktnog lanca je jedna iz grupe sistemskih metoda poništavanja neželjenog signala u čisto pneumatskim upravljačkim sistemima. Obično se preporučuje da se pomenuta metoda izvodi korišćenjem minimalne forme, u cilju svođenja broja memorijskih ventila na najmanju moguću meru a da se u slučaju većeg broja koraka primenjuje metoda mehaničkog sekvencera. Time se ujedno postiže i manja potrošnja vazduha pod pritiskom.

Ovim radom je pokazano da se metoda taktnog lanca može koristiti i u slučaju maksimalne forme, što doprinosi skraćanju vremena trajanja ciklusa rada i povećanju produktivnosti. Ipak, investicioni troškovi su veći jer je potreban veći broj komponenti a i povećava se potrošnja vazduha pod pritiskom. Dakle, izbor odgovarajuće forme zahteva pažljivu analizu kompletnih investicionih troškova, kao i projektovanih troškova rada i održavanja, te postavljanje prioritarnih kriterijuma u fokus.

#### LITERATURA

- [1] J. P. Hasebrink i R. Kobler, Osnovi pneumatskog upravljanja, 3. izdanje, Novi Sad: Fakultet tehničkih nauka, 1979.
- [2] D. Šešlija, Automatizacija procesa rada – pneumatske komponente i sistemi, Novi Sad: Fakultet tehničkih nauka, 2020.
- [3] S. Dudić i dr., Zbirka rešenih zadataka sa teorijskim osnovama iz pneumatskog upravljanja, 2. izdanje, Novi Sad: Fakultet tehničkih nauka, 2021.
- [4] M. Stojiljković, Logička sinteza pneumatskog upravljanja, Niš: Mašinski fakultet, 2002.

- [5] W. Liu and Q. Sun, “Research on a design method of pneumatic logic control system,” *Measurement and Control*, vol. 54(5-6), pp. 1105-1112, 2021.
- [6] A. A. Santos and A. F. da Silva, “Methodology for manipulation of Karnaugh maps designing for pneumatic sequential logic circuits,” *International Journal of Mechatronics and Automation*, vol. 6, no. 1, pp.46–54, 2017.
- [7] Festo, “Stepper module,” [Online]. Available: [https://ip.festo-didactic.com/InfoPortal/DataSheets/INT/152886\\_en\\_v2.0\\_Stepper\\_module.pdf](https://ip.festo-didactic.com/InfoPortal/DataSheets/INT/152886_en_v2.0_Stepper_module.pdf), [Accessed: 30-Jan-2024]
- [8] Festo, “Quickstepper,” [Online]. Available: [https://ftp.festo.com/Public/PNEUMATIC/SOFTWARE\\_SERVICE/Documentation/2023/US/FSS\\_ENUS.PDF](https://ftp.festo.com/Public/PNEUMATIC/SOFTWARE_SERVICE/Documentation/2023/US/FSS_ENUS.PDF), [Accessed: 30-Jan-2024]
- [9] R. Andrijašević, “Analiza metode taktnog lanca na primeru uređaja za doziranje,” diplomski rad, Novi Sad: Fakultet tehničkih nauka, 2022.
- [10] Festo, “Basic level pneumatics – Equipment set TP 101,” [Online]. Available: [https://www.festo.com/gb/en/p/basic-level-pneumatics-equipment-set-id\\_PROD\\_DID\\_540710/?page=0](https://www.festo.com/gb/en/p/basic-level-pneumatics-equipment-set-id_PROD_DID_540710/?page=0), [Accessed: 30-Jan-2024]
- [11] Festo, “Advanced level pneumatics – Equipment set TP 102,” [Online]. Available: [https://www.festo.com/gb/en/p/advanced-level-pneumatics-equipment-set-id\\_PROD\\_DID\\_540711/?page=0](https://www.festo.com/gb/en/p/advanced-level-pneumatics-equipment-set-id_PROD_DID_540711/?page=0), [Accessed: 30-Jan-2024]
- [12] Festo, “Air Box Type GHDA-FQ-M-FDMJ-A—Operating Instructions,” Festo: Esslingen, 2006.

#### ABSTRACT

In this paper, a control part of the dosing machine is developed in two different ways, using the minimum and maximum forms of the pneumatic stepper module. In laboratory working conditions, the developed control schemes were connected and the compressed air consumption and the cycle time were examined. Experimental results showed that the cycle time is shorter in the case of the maximum form of the pneumatic stepper module, but that the compressed air consumption is lower in the case of the minimum form of the pneumatic stepper module.

#### ANALYSIS OF THE PNEUMATIC STEPPER MODULE FROM THE ASPECT OF COMPRESSED AIR CONSUMPTION AND CYCLE TIME

Vule Reljic, Vladimir Jurosevic, Slobodan Dudic, Nikolina Dakic, Rade Andrijasevic