

SIMULACIJA I MERENJE VREMENA PRELETA KOTVE ELEKTROMAGNETSKOG RAZVODNIKA

Stanimir Čajetinac¹⁾, Derdemez Ismet²⁾, Selver Pepić²⁾, Goran Mihajlović¹⁾

Kategorija rada:
PREGLEDNI RAD

AFILIJACIJA/ADRESA:
1) VTMSŠ SS Trstenik, R. Krstića 19, Trstenik
2) Tehnička škola Tutin

Rezime: Matematičko modeliranje sistema se primenjuje radi boljeg razumevanja funkcionisanja sistema, predviđanja ponašanja i ispitivanje međusobnih uticaja delova sistema. Simulacija bazirana na matematičkom modelu može dati informacije o sistemu pre izvođenja fizičkih eksperimenata koji mogu biti skupi i komplikovani.

U ovom radu daje se matematički model elektropneumatskog razvodnika. Simulacija je izvršena korišćenjem modula SIMULINK. Rezultati simulacije su verifikovani merenjem na konkretnom servorazvodniku.

Ključne reči: electro-pneumatski razvodnik, modelovanje, simulacija, merenje.

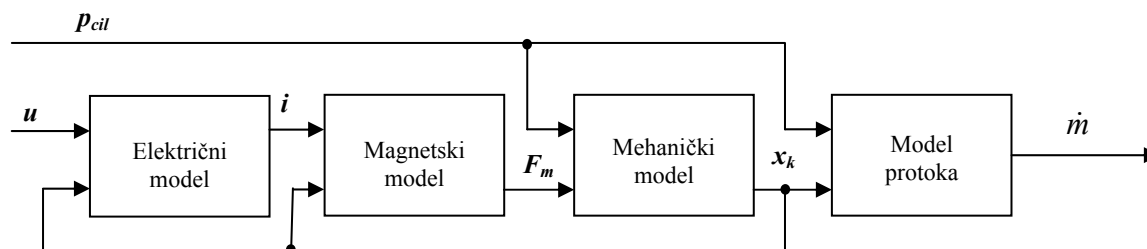
1. UVOD

Tehnološka unapređenja i inovacije na polju pneumatskih komponenta, kao i napredak na području digitalne obrade signala i upravljanja, omogućuju nove načine primene klasičnih pneumatskih sistema. Trend razvoja je usmeren prema optimizaciji komponenta korišćenjem novih materijala i tehnologija, minijaturizaciji, inegraciji komponenta sa upravljanjem i senzorima, i razvoju aktuatora specijalne namene [1]. Zahtevi za povećanom primenom pneumatike, podstiču razvoj na polju elektropneumatskih interfejsa. Oni služe da električni ili optički signal male snage pretvore u protok vazduha. Elektromagnetski razvodnik je klasičan elektropneumatski interfejs i još uvek dominantan u pneumatskim uređajima. U toku su istraživanja novih principa kao što je primena piezoelektričnog efekta, upotreba materijala sa pamćenjem oblika, pokretanje pomoću bimetalnih ploča, elektrostatičko pomeranje, termalno pomeranje [2]. Piezoelektrični razvodnik već postoji u komercijalnoj varijanti.

U ovom radu ispituje se elektromagnetski razvodnik, pri čemu je pažnja usmerena na simulaciju rada električnog dela razvodnika i merenje brzine preleta kotve elektromagneta.

2. MODEL ELEKTROMAGNETSKOG RAZVODNIKA

Model elektromagnetnog razvodnika se može podeliti na četiri podsistema, čije se međusobne veze vide na sl.1 [3]. Električni i magnetski podsistem su sadržani u elektromagnetu koji predstavlja pretvarač napona u mehaničku silu. Ulaz u električni podsistem je napon za uključivanje elektromagneta u , a izlaz je struja elektromagneta. Ulaz u magnetski model je struja elektromagneta i , a izlaz je elektromagnetska sila koja deluje na kotvu. Mehanički podsistem čini opruga i kotva koja svojim kretanjem otvara kanal kroz koji struji vazduh. Mehanički model silu elektromagneta F_m prevodi u pomeraj kotve. Model protoka prevodi pomeranje kotve x_k u maseni protok \dot{m} . Na slici je još pokazano da pritisak u cilindru p_{cil} utiče na mehanički model i model protoka, a da pomeraj kotve x_k utiče na struju i silu elektromagneta.



Sl.1. Model pneumatskog ventila prikazan preko podsistema

2.1 Električni model

Električni podsistem određuje struju kroz kalem elektromagneta, zavisno od dovedenog komandnog napona u , i pozicije kotve x_k . Kalem elektromagneta, kao element električnog kola, može se predstaviti kao serijska veza omskog otpora i induktiviteta.

Struja u kalemu se dobija kao rešenje jednačine (1) koja predstavlja jednačinu naponske ravnoteže u električnom kolu elektromagneta, na osnovu II Kirhofovog zakona:

$$u = Ri + \frac{d\Psi}{dt}, \text{ gde je} \quad (1)$$

$$\Psi = N\Phi = Li, \quad (2)$$

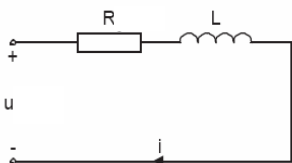
ukupan magnetski fluks u kalemu, N - broj zavoja, Φ - magnetski fluks, L - koeficijent samoindukcije kalema. Induktivnost kalema nije konstanta. Pomeranje kotve smanjuje vazdušni zazor a time i magnetski otpor u magnetskom kolu, što povećava magnetski fluks, a time i induktivnost. Najjednostavnije je pretpostaviti da induktivnost linearno zavisi od položaja kotve:

$$L = L_0 + \alpha_L \cdot x_k, \text{ gde je} \quad (3)$$

x_k - pomeraj kotve, L_0 - početna vrednosti induktivnosti, tj. kad je kotva otvorena, α_L - koeficijent promene induktivnosti.

Na osnovu toga se član $\frac{d\Psi}{dt}$ može predstaviti kao

$$\frac{d\Psi}{dt} = \frac{d}{dt}(Li) = \frac{dL}{dt}i + L\frac{di}{dt} = \alpha_L \cdot i \frac{dx_k}{dt} + (L_0 + \alpha_L \cdot x_k) \frac{di}{dt} \quad (4)$$



Sl.2. Ekvivalentna šema kalema elektromagneta

Jednačina (1) koja definiše promenu struje u elektromagnetu sada postaje:

$$u = Ri + \alpha_L \cdot i \frac{dx_k}{dt} + (L_0 + \alpha_L \cdot x_k) \frac{di}{dt} \quad (5)$$

2.2 Magnetski model

Magnetski model određuje silu koja deluje na kotvu na osnovu struje kalema koju isporučuje električni podsistem i položaja kotve. Opšti izraz za silu elektromagneta glasi

$$F = \frac{B^2 S}{2\mu_0} \quad (6)$$

gde je: **B** - magnetska indukcija, **S** - površina preseka kotve, μ_0 - koeficijent magnetske propustljivosti vazduha.

Magnetsku indukciju **B** u jednačini (6) možemo ćemo izračunati iz Amperovog zakona totalne struje

$$B(x_0 - x_k) = \mu_0 N i, \quad (7)$$

gde je x_0 veličina vazdušnog zazora pre uključenja elektromagneta, x_k - pomeraj kotve, **N** - broj zavoja u namotaju elektromagneta.

Ako površinu preseka kotve označimo sa A_k i izraz za magnetsku indukciju iz jednačine (7) zamenimo u izraz za silu elektromagneta (6), dobijamo

$$F_m = \frac{\mu_0 A_k N^2 i^2}{2(x_0 - x_k)^2} \quad (8)$$

Na osnovu izraza (8) vidi se da sila elektromagneta promenljiva i najmanja na početku kretanja kotve, jer je tada vazdušni zazor $x_0 - x_k$ najveći i struja **i** najmanja. Zbog toga je kretanje kotve u početku sporo, a brzina naglo raste sa smanjenjem vazdušnog zazora i porastom struje kalema.

2.3 Mehanički model

Na kretanje kotve dominantno utiče elektromagnetna sila (8) i sila opruge. Sila opruge je definisana silom prednaprezanja i krutošću opruge:

$$F_o = F_{pn} + k_p x_k, \text{ gde je} \quad (9)$$

F_{pn} - sila prednaprezanja opruge, k_p - krutost opruge, x_k - pomeraj kotve.

Na kotvu još deluju i sila koja nastaje usled razlike pritiska na različitim stranama kotve $F_{\Delta p}$:

$$F_{\Delta p} = \frac{d_0^2 \pi}{4} (p_g - p_d), \text{ gde je} \quad (10)$$

d_0 - prečnik otvora ventila kroz koji ističe vazduh, $(p_g - p_d)$ - razlika pritiska na različitim stranama kotve.

Jednačina ravnoteže sila na kotvu koja definiše pomeranje kotve, je

$$m_k \ddot{x}_k = F_m + F_{\Delta p} - F_{pn} - k_p x_k \quad (11)$$

U jednačini (11) zanemarene su sile trenja i gravitaciona sila.

3. SIMULACIJA RADA ELEKTROMAGNETSKOG RAZVODNIKA

Matematički model sistema opisuje principe rada, predviđa ponašanje i daje informacije o interakciji delova sistema. Simulacija na osnovu modela omogućuje informacije o sistemu, pre izvođenja eksperimenata koji mogu biti skupi i složeni. Model opisan jednačinama (1) do (11) korišćen je za analizu rada elektropneumatskog razvodnika **Burkert 6106**. Podaci o ovom elektropneumatskom razvodniku dati su u **Tabeli 1**.

Za simulaciju je korišćen SIMULINK, programski paket koji radi kao proširenje MATLAB-a [4]. Pogodan za simulaciju dinamičkih pojava u sistemu. Simulacija se ostvaruje numeričkim rešavanjem diferencijanih jednačina, a za tu svrhu se koriste SIMULINK funkcije. SIMULINK se primenjuje u dve faze. U prvoj fazi se vrši formiranje simulacionog modela u vidu blok dijagrama. Blokovi se kopiraju iz standardne biblioteke blokova, ili iz biblioteke koju formira korisnik. Blokovi se međusobno povezuju i njihovi parametri postavljaju na vrednosti koje odgovaraju fizičkom modelu.

U drugoj fazi vrši se analiza modela, tj. simulacija. U toku simulacije se mogu menjati parametri blokova, što odgovara promeni veličina u fizičkom eksperimentu. Na taj način se menja i podešava ponašanje sistema, ispituje uticaj izvršenih promena i njihova povezanost.

Tabela 1

Oznaka	Veličina	Vrednost	Jedinica
<i>I</i>	Struja elektromagneta	računa se (0 - 49)	mA
<i>R</i>	Omski otpor kalema	492	Ω
<i>U</i>	Napon napajanja EM	24	V
<i>L</i> ₀	Početna vrednost induktiviteta	4,5	H
α_L	Koeficijent promene induktiviteta	778	H/m
<i>x</i> _k	Hod kotve	računa se (0-0,8)	mm
<i>x</i> ₀	Početna vrednost vazdušnog zazora	5,2	mm
<i>N</i>	Broj namotaja EM	3000	zavoja
μ_0	Magnetska propustljivost vazduha	$4\pi \cdot 10^{-7}$	Tm/A
<i>A</i> _k	Površina preseka kotve	$2,37 \cdot 10^{-5}$	m ²
<i>F</i> _m	Sila elektromagneta	računa se	N
<i>F</i> _{pn}	Sila prednaprezanja opruge	1,5	N
<i>k</i> _p	Krutost opruge	1600	N/m
<i>d</i> ₀	Prečnik otvora isticanja vazduha	0,9	mm

3.1 Simulacija elektromagneta

Na sl.3 dat je simulacioni dijagram, formiran za simulaciju rada elektromagnetnog razvodnika. Oznake korišćenih veličina, i njihove vrednosti korišćene u simulaciji date su u Tabeli 1. Ove veličine su delom uzete iz kataloških podataka, a na samom elektromagnetnom razvodniku izmerene su

veličina vazdušnog zazora elektromagneta, krutost i sila prednaprezanja opruge, početna vrednost i koeficijent promene induktivnosti.

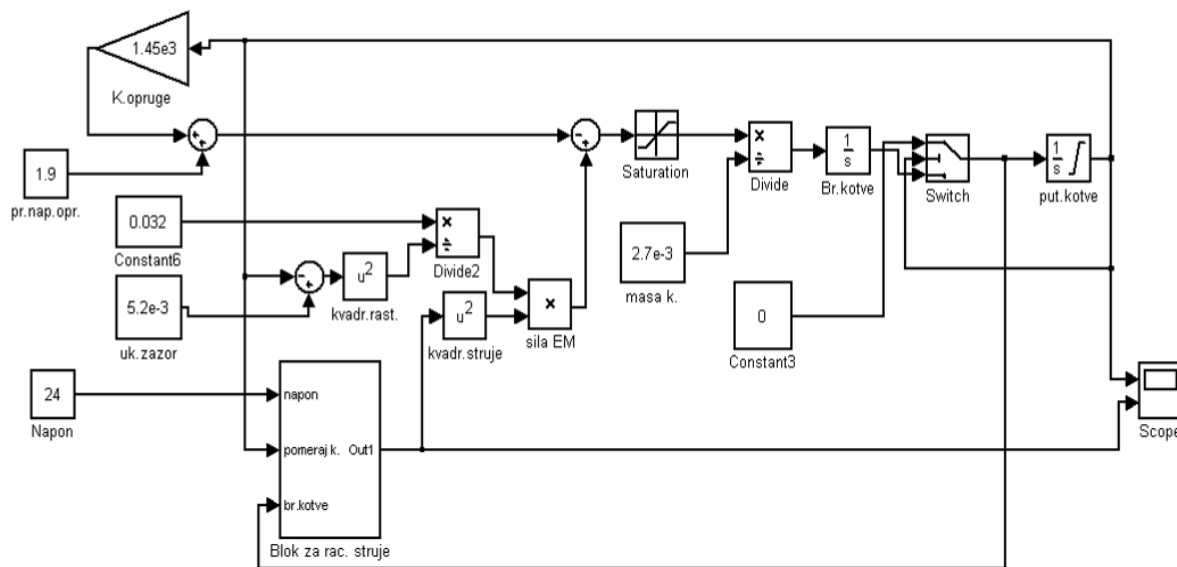
Merenje induktivnosti kalema elektromagneta vršeno je posredno tako što je određivana impedansa kola sa slike 2, merenjem efektivne vrednosti struje i napona kad je kotva potpuno otvorena i kad je kotve potpuno privučena. Na osnovu izmerene struje i napona računata je impedansa $Z = U/I$.

Na osnovu formule za impedansu:

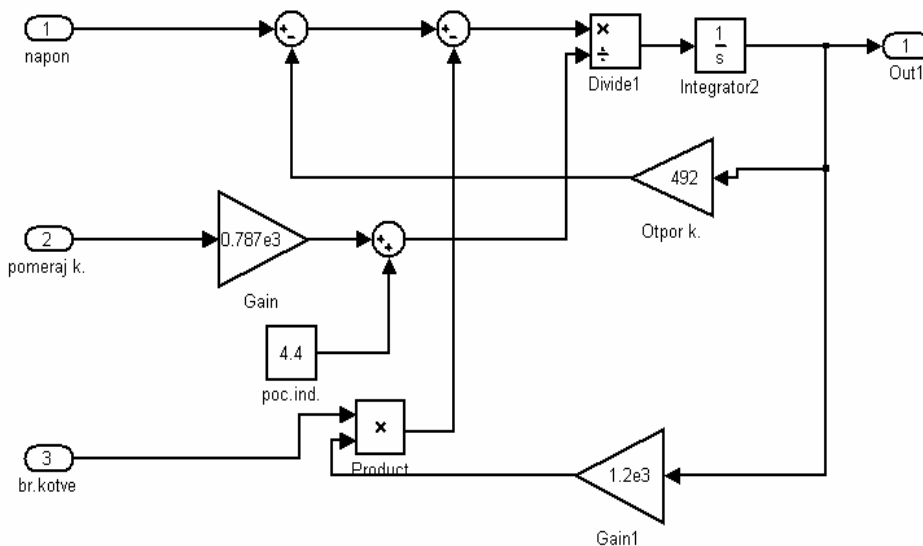
$$Z = \sqrt{R^2 + (\omega L)^2}$$

gde je R omski otpor kalema, a ω kružna učestanost struje sa kojom je mereno, računata je početna i krajnja vrednost induktivnosti L . Na taj način su potpuno određeni koeficijenti u jednačini (3).

Model električnog dela razvodnika, jednačine (1) do (5), formiran je u obliku posebnog bloka i dat na sl. 4. Rezultat rada ovog bloka je promena struje, koja se dalje u dijagramu na sl. 3 koristi za računanje sile elektromagneta.



Sl.3. Simulacioni dijagram za rešavanje jednačina (1) do (11)



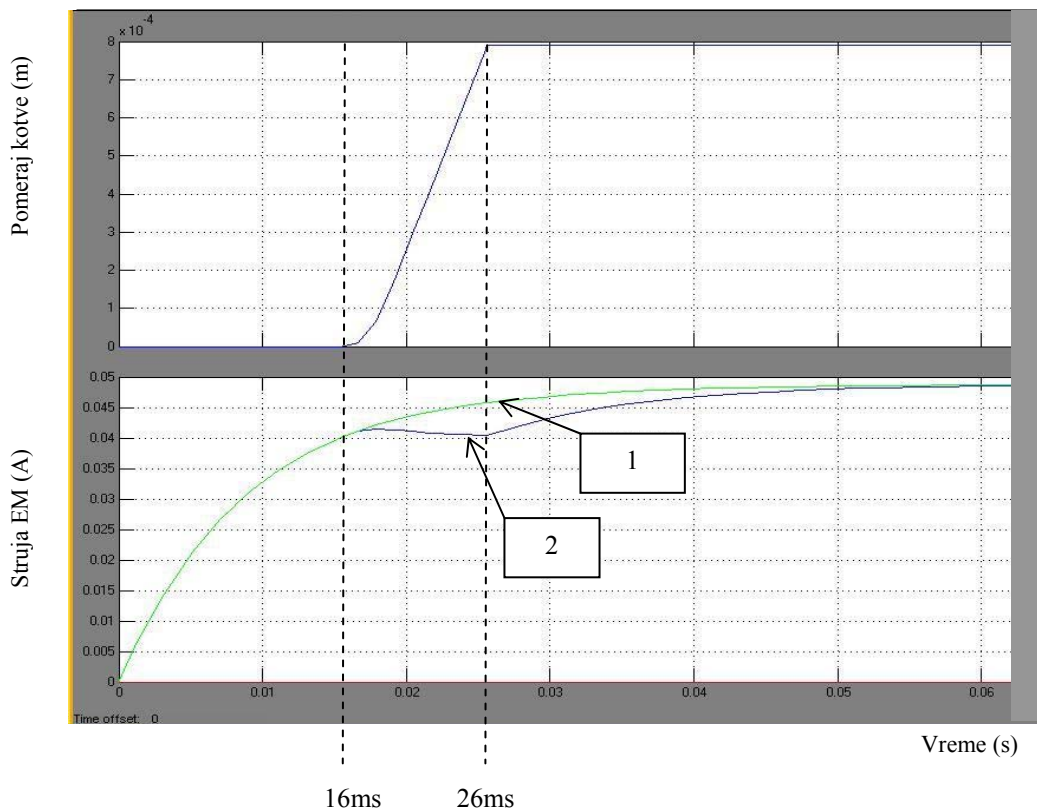
Sl.4. Simulacioni dijagram bloka za računanje struje EM

Rezultati simulacije, na osnovu simulacionih dijagrama sl.3. i sl.4 dati su na slici 5 u obliku krivih koje pokazuju struju elektromagneta i pomeraj kotve. Moguće je posmatrati promenu bilo koje od veličina uključenih u sistem jednačina (1) do (11). Ovde je prikazan pomeraj kotve zbog korišćenja te veličine u daljoj simulaciji pneumatskog aktuatora.

Na delu dijagrama koji pokazuje promenu struje EM date su dve krive. Kriva 1 pokazuje promenu struje kada je član $\alpha_L \cdot i \frac{dx_k}{dt}$ u jednačini (5) zanemaren, a kriva 2 kada je taj član uzet u obzir. Vidi se da pad struje na dijagramu 2 nastaje oko 26ms, a to je u trenutku kada se završava kretanje kotve. Pošto je brzina kotve najveća na kraju kretanja, najveći je i

pad napona koji izaziva član $\frac{dx_k}{dt}$, a to uzrokuje da struja ima minimum. U momentu kad prestaje pad napona usled uticaja člana $\alpha_L \cdot i \frac{dx_k}{dt}$, (posle

zaustavljanja je $\frac{dx_k}{dt} = 0$), struja se ponovo menja po eksponencijalnom zakonu.

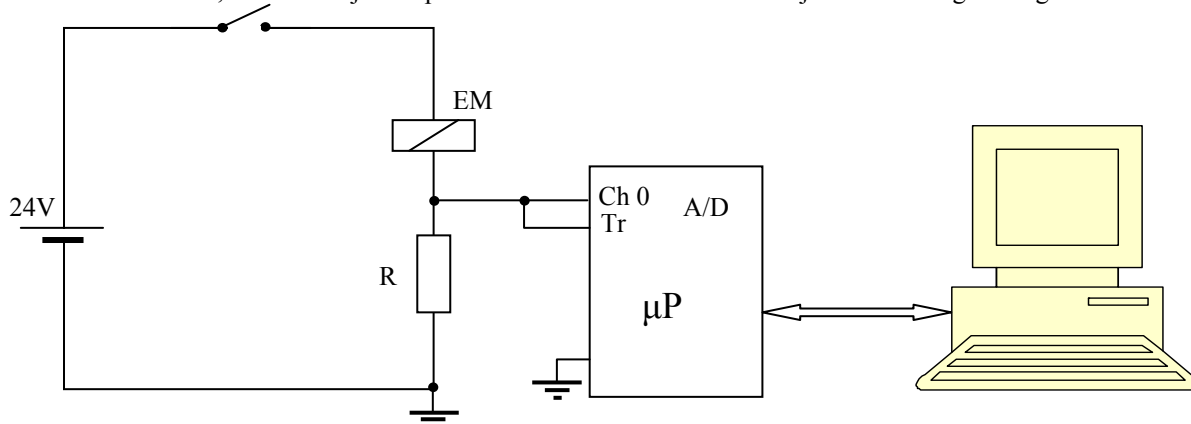


Sl.5 Simulacija kretanja kotve i struje elektromagneta
 1 - simulacija struje uz zanemarivanje uticaja brzine kotve na struju elektromagneta
 2 - simulacija struje uzimajući u obzir brzine kotve na struju elektromagneta, jednačina(5)

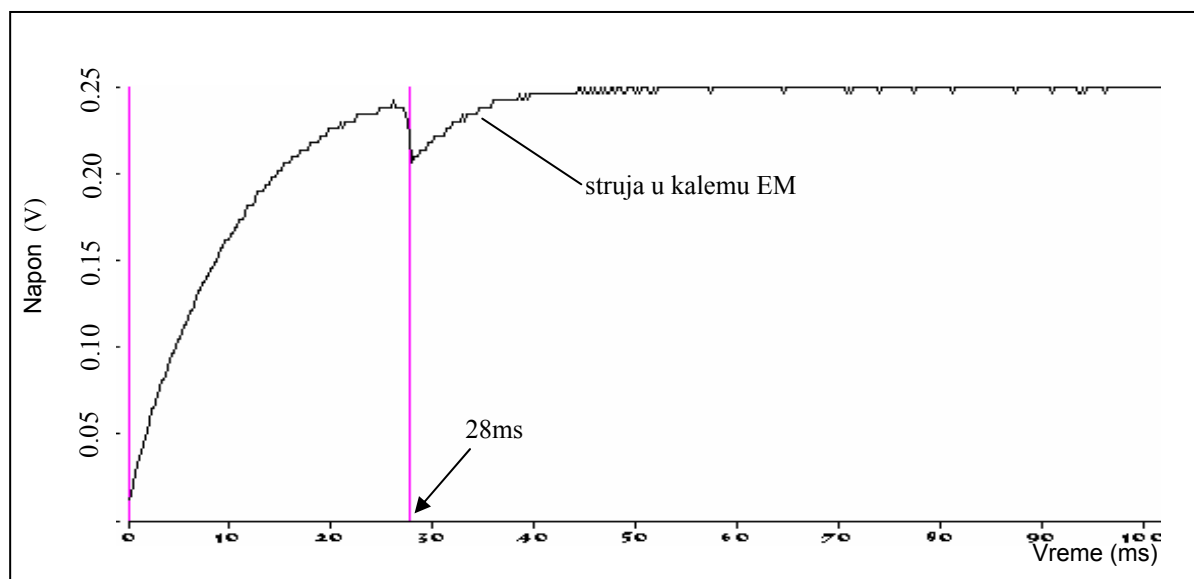
4. EKSPERIMENTALNO MERENJE

U cilju provere rezultata simulacija i potvrde kataloških vrednosti, formiran je eksperiment za

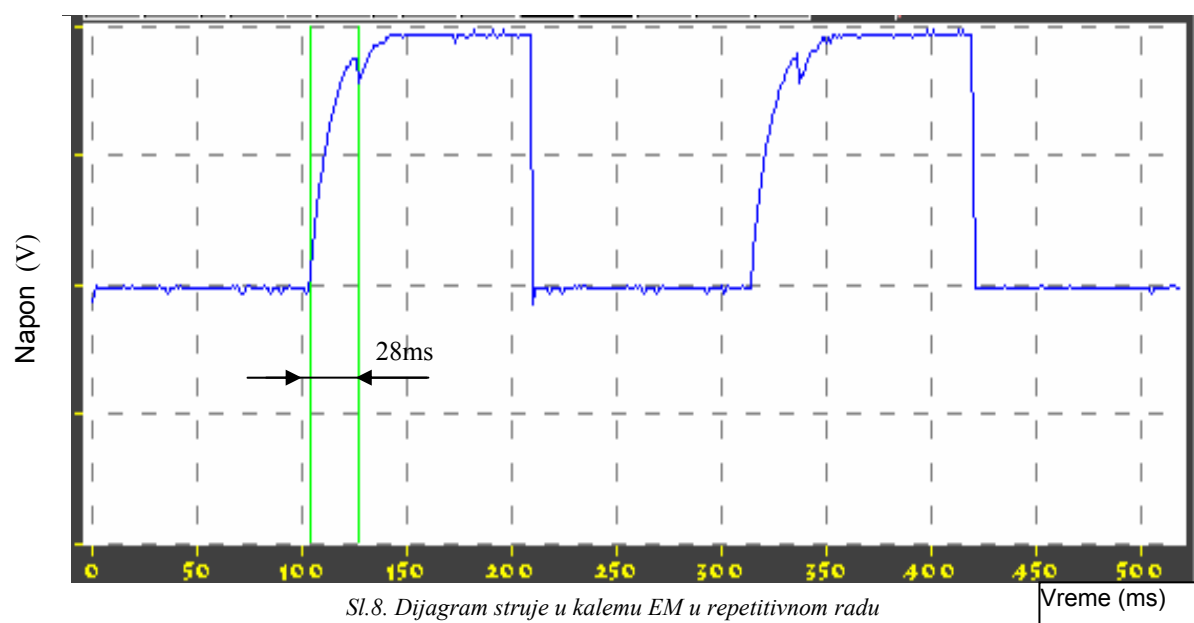
merenje struje elektromagneta. Simulacijom je pokazano da se na osnovu struje elektromagneta može odrediti vreme preleta kotve (sl. 5), odnosno, vreme otvaranja elektromagnetskog razvodnika.



Sl.6 Blok šema merenja vremena kretanja kotve



Sl.7. Dijagram struje u kalemu EM dobijen merenjem



Sl.8. Dijagram struje u kalemu EM u repetitivnom radu

Na slici 8 dat je dijagram struje elektromagneta pri čemu je elektromagnet pobuđivan povorkom impulsa trajanja 100ms. Nije uočena razlika u vremenu otvaranja razvodnika kada se pobuđuje serijom impulsa i kada se uključuje jednokratno. Ova provera je pokazala da razvodnik može da se koristi za PWM upravljanje, gde je njegov rad isključivo repetitivan.

4. ZAKLJUČAK

Simulacija pomeraja kotve pokazuje da se postoji od čistog kašnjenja koje iznosi oko 16ms, i samog kretanja koji traje oko 10ms. Na taj način ukupno vreme kretanja kotve u ovoj simulaciji iznosi 26 ms. Merenjem, sa dijagrama na slici 6 i slici 8, vidi se da je vreme kretanja kotve u ovom eksperimentu bilo oko 28ms.

Prema katalogu vreme otvaranja elektromagnetnog razvodnika **Burkert 6106** iznosi 23ms [5].

Simulacija i merenje su pokazali da se vreme preleta kotve može odrediti indirektno preko promene struje EM. Na ovaj način je merenje vremena kretanja kotve zamenjeno merenjem struje kroz kalem elektromagneta, a merenje struje je zamenjeno merenjem naponskog oblika na otporniku redno vezanim sa kalemom. Zaključak je bitan za eksperimente određivanja vremena preleta kotve jer je struju EM je jednostavno odrediti (sl.6), dok bi za merenje položaja kotve bila potrebna vrlo komplikovana oprema.

LITERATURA

- [1] Dr. Kurt Stoll, **New Developments In Pneumatics**, Festo AG&Co., Ruitestr.82, D-73734 Esslingen, Germany 2003.

- [2] G. Belforte, **New Developments And New Trends In Pneumatics** Department Of Mechanics Politecnico di Torino Corso Duca degli Abruzzi 24, 2002 Torino – Italy.
- [3] Maisam Jeddi Tehrani, **Pressure Control of a Pneumatic Actuator Using On/Off Solenoid Valves**, Masters' Degree Project Stockholm, Sweden May 2008.
- [4] Sergey E. Lyshevski, **Engineering and Scientific Computations Using MATLAB**, Published by John Wiley & Sons, Inc., Hoboken, New Jersey 2003.
- [5] BURKERT Fluid Control Systems, **Direct-acting rocker Solenoid Valve type 6105/6106**, catalogue number.
- [6] B. Pejović, A. Todić, A. Sekulić: Jedan način uspostavljanja analogije između samoizazvanih oscilacija kod mašina alatki i električnih sistema, Časopis "IMK-14 Istraživanje i razvoj", br 34, str. 77, Kruševac, 2010.

SIMULATION AND TIME MEASUREMENT OF FLYBACK OF ELECTROMAGNETIC VALVE ARMATURE

***Summary:** Mathematical models of physical system are widely used to better understand manner of functioning, behavioral predictions and examination of interactions between parts of a system. Simulations based on a model can help gather information about the system before performing actual experiments which can be expensive and complicated.*

In this paper we represent mathematical model of an electro-pneumatic valve. Simulation is preformed using SIMULIK. Results of the simulation are verified by measurement on a particular valve.

***Key words:** electro-pneumatic valve, modeling, simulation, measurement*

Datum prijema rada: 03. II 2010.