

**KONCEPTI RADA LINEARNOG SOLENOIDA I EKSPERIMENTALNO
ODREĐIVANJE USLOVA NJEGOVOG UPRAVLJANJA****CONCEPTS OF LINEAR SOLENOID OPERATION AND EXPERIMENTAL
DETERMINATION OF ITS CONTROL CONDITION**Sebastian Drača, *Fakultet tehničkih nauka, Novi Sad***Oblast – MEHATRONIKA**

Sažetak – Rad predstavlja opis algoritma za upravljanje linearnim solenoidom kao i eksperimentalnu prezentaciju načina njegovog rada. Opisuje osnovne stvari vezane za upravljanje solenoidom i objašnjava osnovne koncepte upravljanja solenoida kao aktuatora u zavisnosti od faktora koji utiču na njegovo upravljanje. Eksperimentalno opisuju brzinu promene temperature prilikom rada solenoida u standardnim uslovima.

Ključne reči: linearni solenoid, solenoid, embedded sistemi, digitalna upravljacka elektronika

Abstract – The paper presents a description of the algorithm for controlling a linear solenoid as well as an experimental presentation of how it works. It describes the basic things related to solenoid control, explains the basic concepts of solenoid control as an actuator depending on the factors that affect its control. They experimentally describe the rate of temperature change during solenoid operation under standard conditions.

Keywords: Linear solenoid, Solenoid, Embedded systems, Digital control electronics

1. UVOD

Solenoid kao aktuator je veoma ekonomičan pretvarač pokreta zbog svoje jednostavne strukture. Smer i veličina elektromagnetne sile koja se koristi može biti lako kontrolisana promenom ulazne struje. Za optimalno konstruisanje potrebno je posedovati teorijsko i empirijsko znanje. Teorijsko znanje služi za sticanje informacija vezanih za način upravljanja operativnim karakteristikama elektromagnetskog aktuatora.

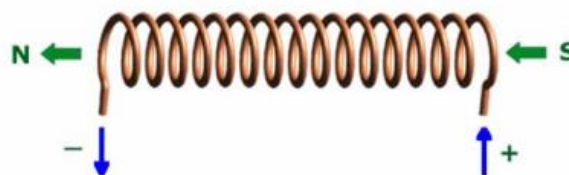
Empirijsko znanje je tu da bi nadoknadilo teorijska ograničenja na osnovu konstruisanja prethodno dobijenih rešenja i rada sa različitim vrstama aktuatora ovog tipa [1]. Empirijsko znanje je od veće važnosti od teorijskog za izradu oblika klipa i za određivanje faktora potrebnog prostora iz razloga što su oblici klipova raznoliki i njihov faktor prostora ima veoma subjektivno svojstvo [2]. Konvencionalni solenoid koristi dugu petlju žice omotan oko metalnog jezgra i proizvodi magnetno polje za generisanje linearnog kretanja poniranja kada se propušta električna struja kroz žičani kalem [3].

NAPOMENA:

Ovaj rad proistekao je iz master rada čiji mentor je bio dr Vladimir Rajs, docent.

2. SOLENOID

Solenoid je elektromagnetni uređaj koji pretvara električnu energiju u mehaničku silu ili pokret. Njegov osnovni deo predstavlja zavijena žica kroz koju se propušta struja kako bi se ostvario pokret. Magnetno polje solenoida predstavlja superpoziciju magnetnih polja ostvarenih prolaskom struje kroz svaki namotaj. Jačina magnetnog polja gotovo je jednolika unutar uređaja dok je spolja ravna približno nuli. Sličan je polju šipkastog magneta koji na jednom kraju ima severni, a na drugom južni pol (Slika 1) u zavisnosti od smera strujanja [4]. Osnovna podela ove grupe aktuatora je na linearne i rotacione. Obe vrste dostupne su kao uređaji koji rade konstantno pod naponom ili kao ON-OFF uređaji.



Slika 1. Prikaz polova u zavisnosti od smera proticanja struje

Rade istim principom kao i releji, a mogu se upravljati korišćenjem tranzistora ili MOSFET-a [5]. Dele se na linearne i na rotacione, gde su rotacioni solenoidi zapravo linearni solenoidi koji koriste princip kose ravni da transformišu kretanje iz linearnog u rotaciono.

2.1 Linearni solenoid

Solenoid se sastoji od zavojnice i kotve od železa koja se može pomerati unutar zavojnice. Puštanjem jednosmerne, ili naizmenične struje kroz zavojnicu na kotvu počinje da deluje elektromagnetna sila koja je uvlači unutar zavojnice [7]. Za povratak kotve u početni položaj koristi se opruga. Kada se struja provuče kroz namotaje ona se ponaša kao elektromagnet, a klip koji se nalazi unutra privlači se zbog postavke magnetnog fluksa unutar tela kalema. Sila i brzina kretanja klipa određuju se snagom magnetnog fluksa generisanog unutar kalema. Gašenjem struje napajanja dolazi do rušenja magnetnog polja koje je stvoreno od strane zavojnice i energija uskladištena u kompromitovanoj opruzi prisiljava klip da se vrati u početni položaj mirovanja [4].

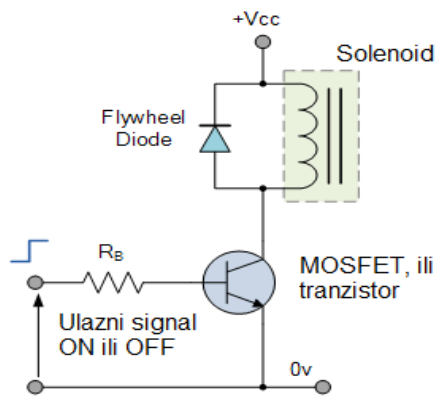
2.2 Aktiviranje solenoida

Solenoidi rade primenom jednosmernog napona. Postoji mogućnost da se solenoid upravlja i korišćenjem

sinusoidnog napona naizmenične struje primenom punosnih ispravljača za ispravljanje napajanja koji se potom mogu koristiti za prebacivanje jednosmernog elektromagnetnog polja.

Solenoidi DC tipa mogu se lako upravljati korišćenjem tranzistorskih ili MOSFET prekidača (Slika 2.), što je idealno za upotrebu u robotskim aplikacijama. Linearni solenoidi, kao i releji su induktivni uređaji [4].

Kao takvi uređaji zahtevaju potrebu za zaštitom preko svoje zavojnice kako bi se sprečila mogućnost da visoki naponi oštete poluprovodnički prekidački uređaj. Potencijalno rešenje ovoga problema jeste korišćenje odgovarajuće Zener diode i odgovarajućeg otpornika u zavisnosti od tipa solenoida koji se koristi. Takođe može da se koristi i flywheel dioda.



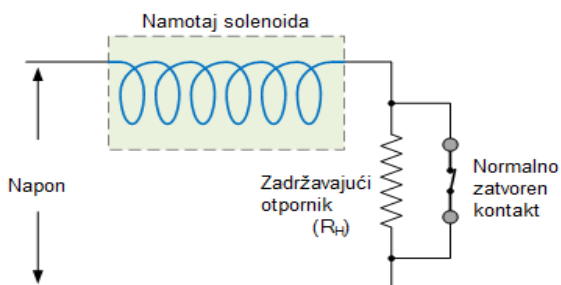
Slika 2. Električna šema zaštite i aktiviranja solenoida

2.3 Smanjenje potrošnje energije

Neprekidnim puštanjem napona kroz zavojnicu ne može doći do hlađenja žice. Kako bi rešili ovaj problem potrebno je definisati uslove rada pod kojim solenoid radi [5]. Jedan od rešenja je smanjenje vremena tokom kojeg je namotaj pod naponom ili pustiti slabiju struju kroz uređaj.

Jedan od načina primene manje struje jeste primena dovoljno visokog napona na kalem kako bi se obezbedilo potrebno magnetno polje za rad i postavljanje klipa, ali da nakon prve aktivacije dođe do smanjivanja napona napajanja kroz kalem da održi klip u mirnom, sedećem položaju. Ovo se postiže postavkom zadržavajućeg otpornika na mrežu. Kada se prekidač zatvori, isključuje se otpor i puna struja prolazi direktno na namotaj kalema.

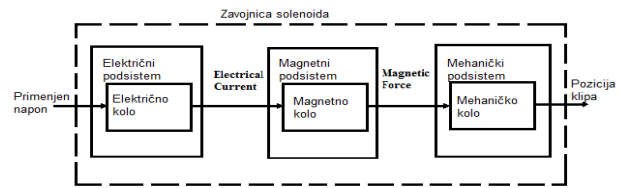
Kada je pod punim naponom dolazi do aktiviranja elektromagneta i time dolazi do otvaranja kontakta pri čemu i postojeća otpornost učestvuje u kolu.



Slika 3. Ušteda energije

3. MATEMATIČKI MODEL SOLENOIDA

Prilikom opisivanja načina rada solenoida matematički princip njegovog rada možemo podeliti u tri dela: električni, magnetni i mehanički (Slika 4.).



Slika 4. Prikaz kola solenoida

Napon se vezuje za električni deo sistema solenoida kao ulazni signal specifične vrednosti. Magnetni blok zatim formira magnetnu silu zavisnu od struje koja prolazi kroz kalem i time ostvaruje mehaničku kretanju kalema u određenu poziciju [9]. Električni deo magnetne zavojnice predstavlja serijsku kombinaciju induktivnosti i otpornosti, a i obično se smatra RL kolom. Prema Kirkhofovom zakonu važi da je napon duž zavojnice solenoida algebarska suma napona na otporniku i induktivitetu kalema. Matematički se računa:

$$V_t = V_R + V_L \quad (1)$$

gde su: V_t - Celokupan napon na kalem solenoida, V_R - Napon na otporniku R , V_L - Napon na induktivnosti L i važi:

$$V_t = i(t)R + L \frac{di(t)}{dt} \quad (2)$$

Koristeći pretpostavku da su sve početne vrednosti jednake nuli, Laplasova transformacija daje:

$$V_t(s) = RI(s) + sLI(s) \quad (3)$$

$$V_t(s) = I(s)[R + sL] \quad (4)$$

Iz toga se zaključuje da je funkcija transformacije kalema solenoida:

$$G_{Sol} = \frac{I(s)}{V_t(s)} = \frac{1}{(Ls + R)} \quad (5)$$

Napajanjem magnetnog kola solenoida električnom energijom podešava se magnetna sila koja se provlači u armaturu smeštenu unutar jezgra solenoida. Proizvedena magnetna sila (F_m) kalema zavisi od rastojanja kretanja klipa (x) i električne struje (t). Može se računati na sledeći način:

$$F_m = \int_0^t \lambda(i, x) di = \frac{1}{2} L(x) i^2(t) \quad (6)$$

gde je: λ - veza magnetnog fluksa, L - induktivnost kalema, $i(t)$ - električna struja kalema.

Izrada mehaničkog dela solenoida se u osnovi sastoji od klipa ili armature i poseduje osovinu sa federom. Zbog ovoga se mehanički deo solenoida može predstaviti kao „masa-opruga-amortizer“ sistem. Diferencijalna jednačina za opisivanje kretanje klipa glasi:

$$m\ddot{x} + c\dot{x} + kx + F_f = F_m = k_c i(t) \quad (7)$$

gde je: m - masa klipa (kg), x - rastojanje klipa (m), kx - sila opruge (N), c - koeficijent prigušenja, F_f - frikciona sila (N), F_m - magnetna sila, K_c - koeficijent sile zavojnice

4. MODEL MAKETE EKSPERIMENTA

Za eksperimentalno testiranje rada linearnog solenoida i traženja optimalnih načina za njegovo upravljanje

potrebno je prethodno dizajnirati model makete eksperimenta koji se koristi. Prilikom dizajniranja makete potrebno je uvrstiti sve neophodne komponente za upravljanje solenoidom. Pored potrebnih komponenti za upravljanje solenoidom potrebno je povesti računa o napajanju celog sistema i obezbediti dodatne zaštite sistema kako bi kolo na koje je povezan solenoid funkcionisalo ispravno i kako bi mogućnost za pojavljivanjem grešaka bila što manja.

4.1 Odabir mikrokontrolera

Osmobitni mikrokontroleri imaju veliku ulogu u radu sa digitalnom elektronikom. Prednost ovih tipova mikrokontrolera je u njihovoj jednostavnosti za razumevanjem i mogućnosti za pojednostavljanje digitalnih kola [14]. ATmega 32 ima 40 pinova i idealan je za upravljanje solenoida.

Dva pina za napajanje (Pin 10 za +5V, pin 11 za GND), dva pina za oscilator (pin 12, pin 13), pin za reset (pin 9), tri pina za obezbeđivanje potrebe snage i ulazima. Port A može da se koristi kao digitalni input/output, a takođe svaki njegov pin može da se koristi i kao interni ADC. Komuniciraju preko dvožičane veze, USART-a ili serijskog interface-a [14].

4.2 LCD SA I2C komunikacijom

Za praćenje stanja rada uređaja odabran je LCD 16x2 sa I2C komunikacijom. I2C komunikacija je veoma popularna i moćna komunikacija koja se koristi za komunikaciju između jednog glavnog (ili više) i više pomoćnih uređaja.

Ova komunikacija koristi „open-drain/open-collector“ sa ulaznim buffer-om na istoj liniji što omogućava da preko jedne linije podataka šalje i prima informacije u oba smera [15].

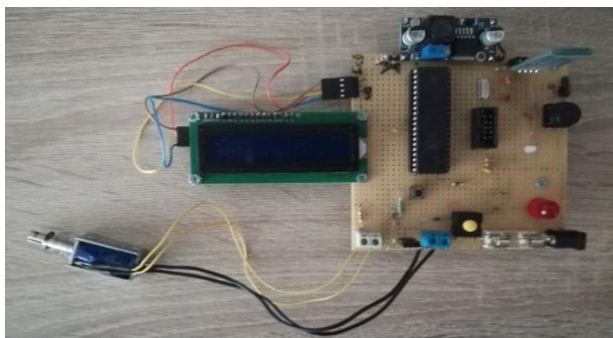
4.3 BLUETOOTH HC-05

Bluetooth modul HC-05 je jednostavan tip Bluetooth SPP (Serial Port Protocol) modula. Kreiran je za transparentno podešavanje serijske komunikacione veze. Komunicira na jednostavan način i veoma je pogodan za povezivanje uređaja sa računarom ili nekim drugim uređajem koji podržava bluetooth komunikaciju.

Ovaj tip uređaja takođe podržava prebacivanje master i slave moda što znači da je u mogućnosti i da vrši primanje podataka i slanje. Ovaj uređaj na sebi poseduje 5 pinova.

4.4 Prikaz uređaja

Na slici 5. prikazana je maketa uređaja.



Slika 5. Prikaz makete

5. SOFTVERSKA REŠENJA

5.1.1 common

Common biblioteka predstavlja jednu od osnovnih biblioteka ovog projekta. Svoju primenu nalazi u osnovi u ostalim bibliotekama koje se koriste. Posедуje jedanaest funkcija koje imaju ulogu da odrede tačnu binarnu cifru vrednosti koja se dobije od strane uređaja za merenje.

5.1.2 ports

Ports biblioteka u svojoj osnovi služi za definisanje portova. DDRx (Data direction register) deo koda služi za definisanje smera kretanja podataka registra x. Što se smera kretanja podataka tiče izlazni pinovi se definišu sa stanjem na 1, dok ulazni pinovi su definisani na stanju 0. DDRB i DDRC su definisani na isti način, odnosno svi pinovi su definisani kao izlazni, dok je kod DDRA i DDRD nešto drugačija situacija. Što se tiče pinout-a, PA3 služi za input, odnosno za ADC, PB0 i PB1 služe za rad sa zelenom i crvenom diodom koje imaju ulogu za indikaciju. Na portu C se koriste pinovi PC0 i PC1 sa LCD odnosno za SCL i SDA pin ekrana. PORT D koristi PD1 za TXD USART-a, PD3 kao ulazni pin za dugme i PD7 kao izlazni pin za PWM signal.

6. SOFTVERSKA REŠENJA ZA KOMUNIKACIJU I UPRAVLJANJE

6.1.1 usart

Usart biblioteka definiše standard za serijsku komunikaciju fizički povezano na mikrokontroleru na pinove PD0 i PD1. USART je standard koji omogućava i sinhronu i asinhronu komunikaciju. Navedeni pinovi su povezani na RXD (ulazni pin) i TXD (izlazni pin) mikrokontrolera [17]. Biblioteka je definisana da na osnovu baud rate vrednosti šalje i prima podatke preko registara definisanih za USART. Ova biblioteka takođe šalje informacije u vidu poruka koji se mogu pročitati od strane korisnika. Pored standardnih biblioteka, ova biblioteka koristi sa sobom common. biblioteku koja joj pomaže prilikom određivanja vrednosti koje se prosleđuju.

6.1.2 adc.h

ATmega 32 može da prihvati ADC ulaze do osam kanala. Ovo znači da na mikrokontroler može da se poveže do osam različitih izvor analognih ulaznih signala, međutim pri konverziji signala konvertuje se samo jedan ulaz. Pri svakoj konverziji neophodno je odrediti koji će od ulaznih kanala biti konvertovan pre nego što se započne konverzija. Ovo se radi pre ADMUX registra i na ATmega32 ovu su ulazi od 33 do 40 [18].

6.1.3 pwm.h

Biblioteka PWM zadužena za impulsno širinsku modulaciju i koja predstavlja tehniku za obezbeđivanje srednjih količina električne energije između potpuno uključenih i potpuno isključenih nivoa. Obično se dešava da digitalni impulsi imaju isto vreme za uključivanje i za isključivanje [19]. Međutim u situacijama kada se koristi solenoid zahteva nestandardu promenu.

6.1.4 I2C.h

Biblioteka namenjena za obezbeđivanje I2C komunikacije. I2C komunikacija neophodna je prilikom rada sa LCD ekranom koji se koristi na maketi. U osnovi

ova biblioteka služi za definisanje smera kretanja podataka prilikom upisa i isčitavanja.

6.1.5 LED.h

Led biblioteka namenjena za rad sa led diodama koje služe za vizuelizaciju rada makete.

6.1.6 button.h

Button biblioteka namenjena za rad sa tasterom. Ova biblioteka zadužena je za obavljanje provere pritiska tastera. Unutar ove biblioteke definisana je debouncing metoda.

6.1.7 thermistor.h

Thermistor ova biblioteka zadužena je za obezbeđivanje potrebnih funkcija prilikom rada sa termistorom. Njene funkcije zadužene su za inicijalizaciju uređaja i određivanje vrednosti temperature u celzijusima.

7. EKSPERIMENT

Eksperiment je vršen na sobnoj temperaturi. Praćeno je koliko brzo se solenoid zagreva na temperaturu od 35 stepeni. Prilikom upravljanja solenoida postavljale su se različite vrednosti Duty Cycle-a i analizirane su dobijene vrednosti..

8. ZAKLJUČAK

Linearni solenoidi predstavljaju aktuatore koji mogu da budu adekvatna zamena za tradicionalne aktuatore koji se koriste za ostvarivanje linearnog kretanja. Zbog svog principa rada, konstrukcije i dostupnosti adekvatni su za rad sa robotima, kao i za rad u savremenoj industriji. Pored jednostavnog principa upravljanja i kompaktne konstrukcije. Savremena robotika danas sve više koristi ove uređaje, pogotovo kod antropomorfni roboti, za izgradnju udova robota i za preciznije upravljanje. Većina novih robota poseduju sa sobom neki tip solenoida kao aktuatora za ostvarivanje neophodnog kretanja robota.

9. LITERATURA

1. **C, Roters.** *Electro Magnetic Device*. New York : John Wiley & Sons Inc., 1970.
2. **Sung, Baek Ju.** *Solenoid Actuator Design for Improvement of Response Speed*. Daejon 34103 : Reliability Assessment Center, Korean Institute of Machinery & Materials, May 31, 2016.
3. **Lee, Chang-Woo Song and Seung-Yop.** *Design of a Solenoid Actuator with a Magnetic Plunger for Miniaturized Segment Robots*. Seoul, Korea : Department of Mechanical Engineering, Sogang University, 1 Shinsu-dong, Mapo-gu., 18 September 2015.
4. **Hashim, Bushra J Hussein Intesar H.** *Effect of Solenoid Magnetic Field Distribution on Beam Focusing*. s.l. : Department of Physics, College of Education for Pure Science , January 2016.
5. **Storr, Wayne.** *Linear Solenoid Actuator*. *Electronics Tutorials*. [Online] 2014.
6. **Rotary Solenoids.** *Shindengen*. [Online] February 2nd, 2002. [Cited: September 15th, 2020.] <https://smt.shindengen.co.jp/english/>.
7. *scribd*. [Online] December 19, 2018. [Cited: September 16, 2020.] <https://www.scribd.com/document/396002190/esau5-pdf>.

8. *Magnetic Sensor Systems Solenoid construction. Solenoid City*. [Online] [Cited: September 25th, 2020.] <http://www.solenoidcity.com/solenoid/manual/construction/construction.htm>.

9. *Modelling and Simulation of a Controlled Solenoid*. **Badr, M.F.** Baghdad, Iraq : Mechanical Engineering Department, Faculty of Engineering, Al-Mustansiriyah University, 2018.

10. **Justinijanović, Milorad N.** Električne instalacije i osvetljenja. *Električne instalacije i osvetljenja*. Beograd : Zavod za udžbenike i nastavna sredstva, 1989.

11. **Radetić, Dr Radojle.** *Prekidačka napajanja. Prekidačka napajanja*. Beograd : Nauka Beograd, December 2005.

12. **Despotović, Prof.dr Željko.** *DC/DC Pretvarači-čoperi*. Beograd : Visoka škola elektrotehnike i računarstva strukovnih studija-Višer.

13. **Pawel Olejnik, Jan Awrejcewicz.** *An Overview of ATmega AVR Microcontrollers Used in Scientific Research and Industrial Applications*. [Online] March 2015. [Cited: October 6th, 2020.]

<https://www.researchgate.net/publication/273379962>.

14. **Bute, Rakesh.** *AVR Microcontroller (Atmega32) - An Introduction*. *Circuits today*. [Online] 2010. <https://www.circuitstoday.com/atmega32-avr-microcontroller-an-introduction>.

15. **Jonathan Valdez, Jared Becker.** *Understanding the I2C Bus*. Dallas : Texas Instruments, 2015.

16. **T.K.HAREENDRAN.** *Arduino I2C LCD Backpack Introductory Tutorial*. *Electro schematics*. [Online] 2015. [Cited: October 10th, 2020.]

<https://www.electroschematics.com/arduino-i2c-lcd-backpack-introductory-tutorial/>.

17. **Mazidi, Muhhamad Ali, Janice Gillispie Mazidi.** *The 8051 Microcontroller and Embedded Systems*. Taiwan : Department of Computer Science and Information Engineering National Cheng Kung University, 1995.

18. *How to Use ACD (nalog to Digital Converter) in AVR - Atmega32*. *Circuits today*. [Online] 2017.

19. **T.K.HAREENDRAN.** *AVR PWM Pulse Width Modulation*. *Electro schematics*. [Online] 2015. [Cited: October 20th, 2020.]

<https://www.electroschematics.com/avr-pwm/>.

Kratka biografija:



Sebastian Drača rođen je u Novom Sadu 1995. godine. Osnovne akademske studije na smeru Mehatronika - Mehatronika, robotika i automatizacija završio je 2018. godine sa prosečnom ocenom 8,58. Master studije na Fakultetu tehničkih nauka iz oblasti Mehatronika - Mehatronika, robotika i automatizacija upisao je 2019 godine.