

## Magnetna levitacija

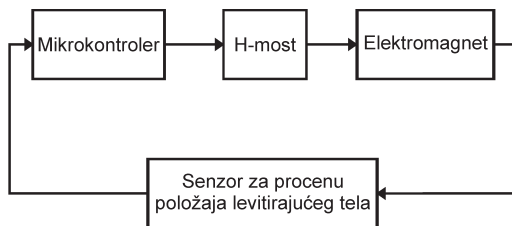
Konstruisan je sistem čiji je cilj levitacija određenog objekta ispod elektromagneta. Dejstvo gravitacione sile, koja deluje na telo i uzrokuje njegov pad, poništava se magnetnim poljem elektromagneta. Eksperimentisano je sa dva različita senzora za procenu pozicije levitirajućeg tela, a to su Holov sensor i laser sa nizom fotootpornika. U slučaju sa Holovim sensorom stalni magnet je korišćen kao levitirajuće telo dok je u drugom slučaju za tu namenu upotrebljen metalni šraf. Da bi se telo održalo u levitirajućem položaju potrebno je menjati struju kroz elektromagnet na osnovu trenutnog položaja. Promenu struje, a time i kontrolu levitacije, vršio je PIC mikrokontroler.

### Uvod

Levitacija nekog tela zasniva se na poništavanju delovanja gravitacione sile na to telo, pri čemu se poništavanje vrši uz pomoć magnetne sile, koju stvara magnetno polje elektromagneta. Usled promene položaja levitirajućeg tela menja se jačina magnetnog polja elektromagneta kako bi se telo održalo u ravnotežnom položaju.

Magnetna levitacija se primenjuje u železničkom transportu, vozovi koji funkcionišu na ovom principu nazivaju se maglev (eng. magnetic levitation) vozovi. Takvi vozovi lebde iznad šina pa između samog vozila i šine ne postoji sila trenja. Kretanje voza otežava samo sila otpora vazduha koja je mnogo manja u odnosu na silu trenja između klasičnih vozova i šina. Time se kod maglev vozova postiže drastično veća brzina, pa su oni efikasniji i brži u odnosu na klasične. Postoje tri osnovna tipa maglev tehnologije a jedan od njih je elektromagnetna suspenzija ili

EMS (engl. electromagnetic suspension) gde se na vozilu nalaze elektromagneti čije magnetno polje ima suprotan smer od magnetnog polja šina, pa se pod dejstvom sila ovih magnetnih polja vozilo nalazi u levitirajućem položaju. Postoje i ležajevi koji funkcionišu na principu magnetne levitacije i koji se koriste kao oslonac za rotirajuća tela pri čemu ne postoji sila trenja.



Slika 1. Blok šema sistema

Figure 1. Block scheme of the system

Na slici 1 prikazana je blok šema sistema. Za realizaciju sistema, koji levitirajuće telo održava u stanju labilne ravnoteže, korišćen je sistem zasnovan na principu EMS maglev tehnologije. Povratna sprega zatvorena je sensorom za određivanje položaja levitirajućeg tela na osnovu čijeg izlaza mikrokontroler generiše signal kojim menja struju kroz elektromagnet i tako indirektno reguliše jačinu magnetnog polja elektromagneta. Regulacijom jačine magnetnog polja vrši se stabilizacija levitirajućeg tela na određenoj visini. Kako bi se omogućilo upravljanje strujom elektromagneta pomoću signala mikrokontrolera i obezbedio potreban intenzitet struje upotrebljava se H-most.

Lazar Timotić (1992), *Badovinci, Miloša Obilića 176, učenik 4. razreda Tehničke škole u Šapcu*

MENTOR: Marko Bežulj, student Elektrotehničkog fakulteta Univerziteta u Beogradu

## Aparatura i metod rada

Sistem magnetne levitacije (slika 2) može se predstaviti matematičkim modelom posmatrajući odvojeno mehaničke i električne osobine sistema na osnovu kojih se mogu napisati sledeće jednakosti (Khemissi 2010; Passino i Yurkovich 1997):

$$m \frac{dv}{dt} = mg - k \cdot \left(\frac{i}{h}\right)^2$$

$$u = Ri - i \frac{2k}{x^2} v + L \frac{di}{dt}$$

gde je:

$m$  – masa levitirajućeg tela

$g$  – ubrzanje sile Zemljine teže

$x$  – rastojanje tela od elektromagneta,

$i$  – jačina struje elektromagneta

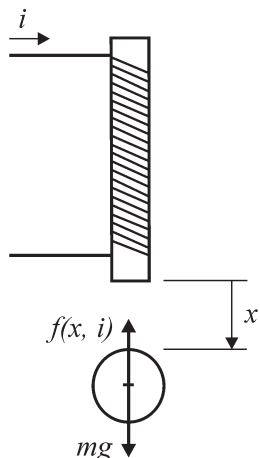
$v$  – brzina kretanja levitirajućeg tela

$u$  – napon na krajevima elektromagneta

$R$  – otpor elektromagneta

$L$  – induktivnost elektromagneta

$k$  – konstanta koja predstavlja delovanje magnetnih sila elektromagneta i levitirajućeg tela.



Slika 2. Elektromagnet i levitirajuće telo

Figure 2. Electromagnet and levitating object

Pomoću ovih jednakosti mogu se izvesti jednačine koje reprezentuju model prostora stanja (eng. state space) sistema magnetne levitacije. Model prostora stanja opisuje fizički sistem kao  $n$  diferencijalnih jednačina prvog reda umesto jedne ulazno/izlazne

diferencijalne jednačine  $n$ -tog reda (web 1). Ako se uvedu tri nove promenljive takve da je  $x_1 = x$ ,  $x_2 = v$ ,  $x_3 = i$ , matematički model sistema se zapisuje na sledeći način:

$$\frac{dx_1}{dt} = x_2$$

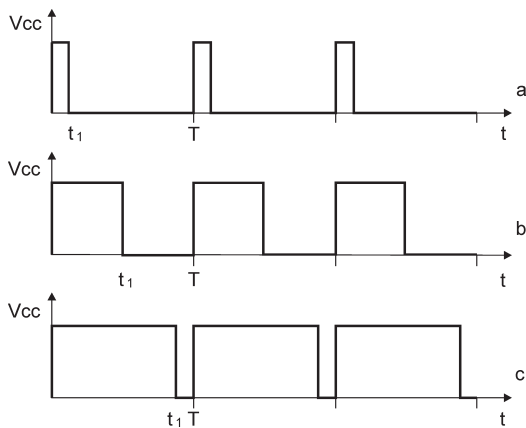
$$\frac{dx_2}{dt} = g - \frac{k}{m} \left(\frac{x_3}{x_1}\right)^2$$

$$\frac{dx_3}{dt} = -\frac{L}{R} x_3 + \frac{2k}{L} \cdot \frac{x_2 x_3}{x_1} + \frac{u}{L}$$

Za promenu jačine struje kroz kalem korišćena je impulsno-širinska modulacija ili Pulse-Width Modulation (PWM), pri čemu PWM signal generiše mikrokontroler. Promenom struje kalema menja se i magnetno polje kalema. PWM predstavlja način da se analognim kolima upravlja pomoću digitalnih izlaza. Najčešće se koristi za upravljanje DC motorima. Ukoliko bi neki DC motor povezali na napajanje preko prekidača i dovoljno brzo uključivali i isključivali taj prekidač, broj obrtaja motora bi se menjao srazmerno srednjoj vrednosti upravljačkog signala na njegovoj učestanosti odnosno u praksi u zavisnosti od toga koliko je dugo prekidač uključen odnosno isključen. Odnos vremena za koje je prekidač uključen i vremena za koje je isključen (impuls/pauza) zove se faktor ispunjenosti (eng. duty ratio). Ovaj odnos se izražava u procentima, gde je 0% uvek isključen prekidač i struja jednaka nuli a 100% uvek uključen prekidač i struja maksimalna (web 2). Posredno upravljanje magnetnom silom vrši se PWM signalom koji preko H-mosta (eng. H-bridge) upravlja strujom elektromagneta menjajući jačinu struje. Primeri PWM signala, za različite faktore ispunjenosti, dati su na slici 3.

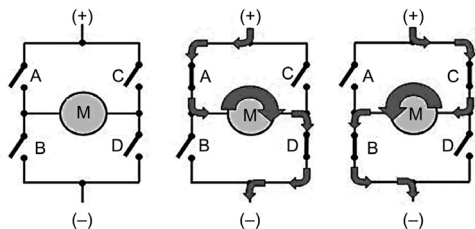
H-most obezbeđuje jaču struju potrebnu za elektromagnet jer je izlazna struja mikrokontrolera manja od dovoljne kao i promenu smera struje kroz elektromagnet u slučaju kada se stalni magnet koristi kao levitirajuće telo. Koncept H-mosta prikazan je na slici 4.

Uključivanjem prekidača A i B ili C i D vrši se promena smera struje, pri tome prekidači A i B ili C i D ne smeju biti u isto vreme uključeni jer može doći do kratkog spoja između krajeva izvora. Na slici 6 je sa M označen motor, ali se umesto njega može postaviti kalem kao što je to urađeno u ovom slučaju, jer je upravljanje strujom isto za bilo koji potrošač, pa tako i za motor i kalem.



Slika 3. Primeri PWM signala sa različitim faktorom ispunjenosti: a) duty ratio 0.1, b) duty ratio 0.5, c) duty ratio 0.9

Figure 3. Pulse Width Modulated signal with different duty ratios: a) duty ratio 0.1, b) duty ratio 0.5, c) duty ratio 0.9

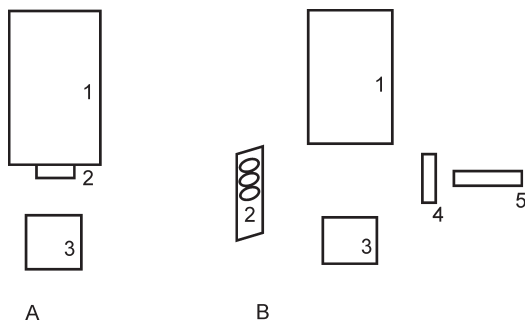


Slika 4. H-most

Figure 4. H-Bridge concept

Kao senzor za procenu položaja levitirajućeg tela upotrebljeni su nezavisno Holov senzor i optički senzor koji se sastoji od lasera i niza fotooptpornika. Sistem je prvo realizovan sa Holovim senzorom, a zatim modifikovan prema optičkom senzoru. Holov senzor funkcioniše na principu Holovog efekta. Holov efekat se javlja usled sila koje deluju unutar provodnika izloženog magnetnom polju. U materijalu (čvrstog agregatnog stanja), kroz koji je propuštena struja i koji je postavljen u spoljašnje magnetno polje, dolazi do pojave Holovog napona, pri čemu je pravac kretanja elektrona kroz provodnik normalan na pravac magnetnog polja (Adžić *et al.* 2008). Napon na izlazu

Holovog senzora je srazmeran promeni magnetne indukcije u njegovoj neposrednoj okolini. Senzor se postavlja direktno na osu elektromagneta gde je najveća vrednost magnetne indukcije (slika 5A). Kako se u ovom slučaju kao levitirajuće telo koristi stalni magnet, promena njegove udaljenosti od jezgra biće detektovana senzorom jer se magnetna indukcija menja promenom rastojanja.



Slika 5.

A – Sistem sa Holovim senzorom: 1 – elektromagnet, 2 – Holov senzor, 3 – levitirajuće telo (stalni magnet)

B – Sistem sa optičkim senzorom: 1 – elektromagnet, 2 – ploča sa nizom fotooptpornika, 3 – levitirajuće telo (metalni šraf), 4 – polarizator, 5 – laser

Figure 5.

A – System with hall sensor: 1 – electromagnet, 2 – Hall sensor, 3 – levitating object (magnet)

B – System with laser sensor: 1 – electromagnet, 2 – photoresistor array, 3 – levitating object (metal), 4 – light polarisator, 5 – laser

Kod optičkog senzora laser se upotrebljava kao fotopredajnik dok se niz fotooptpornika (u ovom slučaju tri) koristi kao prijemnik. Ploča sa fotooptpornicima postavljena je ispod elektromagneta paralelno njegovoj vertikalnoj osi dok se sa suprotne strane nalaze laser koji predstavlja izvor svetlosti i polarizator koji lasersku tačku raspršuje u vertikalnu liniju kako bi svi fotooptpornici bili izloženi svetlosti (slika 5B). U zavisnosti od rastojanja levitirajućeg tela i jezgra menja se količina svetlosti koja dolazi do površine fotooptpornika a time i napon na njihovim krajevima čime se detektuje promena položaja tela.

Elektromagnet je pričvršćen za postolje tako da ispod njega postoji prostor za telo koje je predviđeno

za levitaciju. Za generisanje PWM signala koristi se mikrokontroler koji taj signal prosleđuje H mostu preko koga je povezan kalem. Sistem je realizovan na razvojnoj ploči LV24–33A sa mikrokontrolerom PIC24FJ96GA010. Kako bi se utvrdio položaj levitirajućeg tela, potrebno je senzor za procenu položaja povezati sa mikrokontrolerom koji na osnovu napona na senzoru vrši promenu struje elektromagneta. Napon je analogni signal i mora se konvertovati u digitalni zapis, jer mikrokontroler obrađuje samo digitalne signale. Za tu konverziju upotrebljava se AD (analogno-digitalni) konvertor koji se nalazi u samom mikrokontroleru, upotrebljen AD konvertor je desetobitan i ima šesnaest kanala, što znači da u isto vreme na njega može biti povezano šesnaest različitih signala. U slučaju sa Holovim senzorom upotrebljava se samo jedan kanal dok se kod upotrebe fotooptornika koriste tri kanala, za svaki fotooptornik po jedan. Zbir vrednosti sa sva tri kanala predstavlja poziciju levitirajućeg tela.

Za upravljanje procesom levitacije pokušana je implementacija P (proporcionalno), PD (proporcionalno-diferencijalni) i Fazi (eng. Fuzzy) kontrolera.

Sistem sa proporcionalnim upravljanjem definišu dve promenljive gde jedna predstavlja izlaz sistema a druga njime upravlja. Zavisnost ove dve promenljive je linearna,  $y = k \cdot x$ , gde je  $x$  promenljiva čijom promenom se postiže promena na izlazu sistema ( $y$ ), a  $k$  predstavlja proizvoljni koeficijent koji se naziva koeficijent proporcionalnosti. U slučaju magnetne levitacije, pri pokretanju sistema pamti se vrednost na izlazu senzora za procenu pozicije koja predstavlja referentni položaj. Pri njenoj eventualnoj promeni izračunava se odstupanje nove vrednosti od referentne i srazmerno tom odstupanju menja se upravljačka promenljiva a time i vrednost na izlazu sistema koja će ponovo biti jednaka referentnoj vrednosti (Nikolić i Martinović 1990).

Da bi se postigle bolje osobine regulatora kombinuju se proporcionalni i diferencijalni zakon upravljanja. Delovanje PD regulatora opisuje jednačina

$$y = K_p \left( x - T_d \frac{dx}{dt} \right),$$

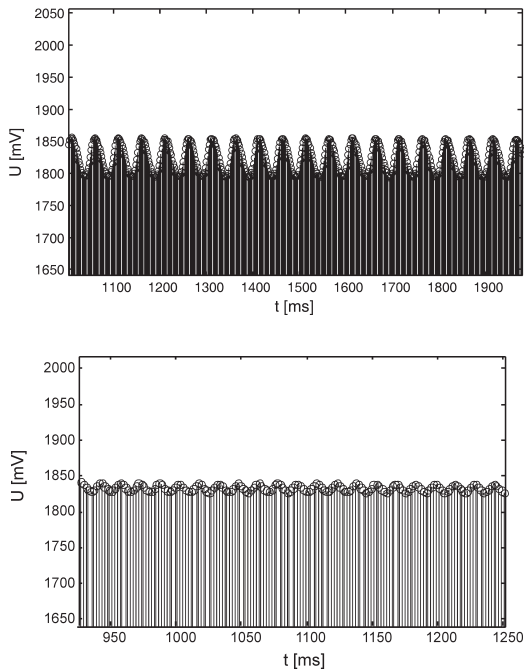
gde je  $K_p$  koeficijent proporcionalnosti, a  $T_d$  vremenski interval za koji diferencijalno dejstvo prednjači u odnosu na proporcionalno dejstvo uz linearnu promenu greške.

Za adekvatnu kontrolu pomoću prethodna dva regulatora potrebno je odrediti određene koeficijente pri čemu je potrebno dobro poznavanje karakteristika

sistema. Drugačiji tip kontrolera predstavlja Fazi kontroler za čije modeliranje nije potrebno koristiti kompleksan matematički aparat. Fazi kontroler se sastoji od nekoliko osnovnih elemenata: baze pravila, interfejsa, fazifikatora i defazifikatora. Baza pravila sadrži informacije o tome kako najbolje kontrolisati sistem, pri čemu su te informacije u formi skupa logičkih (if-then) pravila. Interfejs odlučuje o tome koja su kontrolna pravila relevantna za trenutno stanje sistema i formira upravljački signal. Fazifikator modifikuje signale sa ulaza kako bi bili adekvatno upoređeni sa pravilima u bazi pravila. Defazifikator transformiše izabrano pravilo od strane interfejsa u odgovarajući oblik signala koji se prosleđuje na izlaz (web 3). Fazi kontroler upoređuje podatke sa senzora za procenu položaja levitirajućeg tela, upoređuje ih sa bazom pravila i formira odgovarajući PWM signal.

Ukoliko se Holov senzor upotrebljava za procenu položaja tela potrebno je obratiti pažnju na magnetno polje elektromagneta. Pri promeni položaja levitirajućeg tela (stalnog magneta) menja se magnetna indukcija u okolini senzora, međutim magnetna indukcija se menja i promenom struje kroz elektromagnet. Zato je potrebno izdvojiti magnetno polje levitirajućeg tela. To se može postići upotrebom dva Holova senzora tako što će jedan biti postavljen na gornji kraj jezgra i tako meriti samo magnetnu indukciju elektromagneta. Položaj levitirajućeg tela je u tom slučaju srazmeran apsolutnoj vrednosti razlike napona na izlazima ova dva senzora.

Usled dnevne svetlosti i osvetljenja prostorije dolazi do prevelikih oscilacija napona na fotooptornicima. Da bi se smanjio uticaj spoljašnjih smetnji vrednosti sa AD konvertora se usrednjavaju tako što se pri pokretanju sistema učita nekoliko vrednosti koje se smeštaju u poseban niz, u toku rada svaka nova vrednost se upisuje na mesto najstarije vrednosti u nizu (eng. Moving average). Srednja vrednost elemenata niza se koristi za procenu položaja levitirajućeg tela (slika 6). Cilj sistema jeste da održi telo na određenoj visini. Pri svakoj promeni visine menja se širina impulsa PWM-a, a time i jačina magnetnog polja koje deluje na levitirajuće telo. Promenom intenziteta magnetnog polja reguliše se položaj levitirajućeg tela pri čemu sistem uvek teži da ga vrati na unapred određenu visinu.



Slika 6. Očitavanja ADC-a bez usrednjavanja (gore) i sa usrednjavanjem vrednosti (dole)

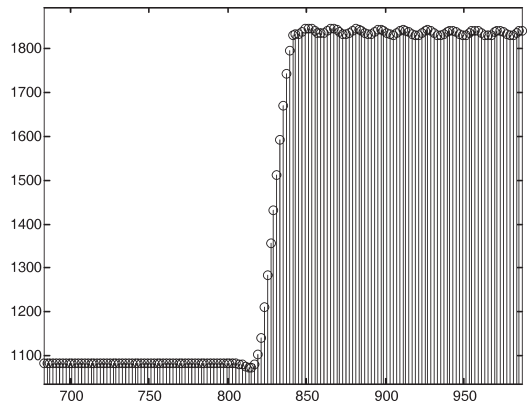
Figure 6. AD convertor readings, without moving average (up) and with moving average (down)

## Rezultati i diskusija

Ukoliko se telo postavi na najveće rastojanje od jezgra sa kojeg elektromagnet može da ga privuče i širina impulsa PWM-a postavi na maksimalnu vrednost, elektromagnet će naglo privući telo koje će ostati zalepljeno za jezgro. Promena napona na fotooptpornicima dok se telo kreće prema jezgru prikazana je na slici 7.

Kako bi opseg u kome se vrši stabilizacija tela bio maksimalan za referentni položaj postavlja se vrednost koja se nalazi na sredini linearnog dela grafika, međutim u tom slučaju kada telo pada elektromagnetna sila nije dovoljno jaka da ga povuče nazad pa se referentni položaj postavlja bliže jezgru elektromagneta.

Usled promene struje kroz elektromagnet u širokom opsegu vrednosti, dolazi do oscilacija levitirajućeg tela između jezgra elektromagneta i nekog



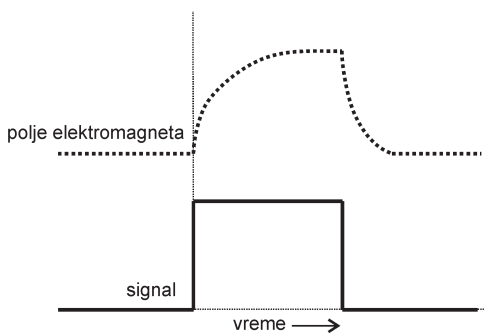
Slika 7. Promena napona na fotooptpornicima u odnosu na udaljenost tela od jezgra

Figure 7. Voltage on photoresistor array versus object distance from electromagnet

položaja ispod njega. Kako bi se ove oscilacije otklonile i telo postavilo u stabilan položaj implementiran je P kontroler, međutim usled nedovoljne preciznosti oscilacije nisu umanjene. Posle loše regulacije P kontrole, modelovan je Fazi kontroler tako što su u mikrokontroleru zadati određeni položaji levitirajućeg tela i ponašanje sistema za svaki od položaja. Ovakvim pristupom nije adekvatno definisan izlaz sistema za svaki položaj tela pa je kontroler prefiše robustan. Nedostatak preciznosti je otklonjen PD kontrolerom, međutim pri njegovoj upotrebi javlja se drugi problem. Kako je levitirajuće telo u obliku kvadra ne dolazi do ravnornog uspona ili pada tela, jedna ivica ostaje bliža jezgru i prouzrokuje prelamanje laserskog snopa čime se na fotooptpornicima detektuje lažan izvor svetlosti pa se na izlazu sistema formira pogrešan signal. Ovaj nedostatak se može otkloniti upotrebom lake metalne kuglice kao levitirajućeg tela.

Promena struje kroz elektromagnet mora biti dovoljno brza kako bi se posle pomeranja telo na vreme vratilo u željeni položaj. Dva najveća kašnjenja u sistemu posledice su akvizicije podataka AD konvertora i promene struje elektromagneta. Da bi kašnjenje usled akvizicije podataka bilo što manje AD konvertor mora dovoljno brzo da očitava nove podatke sa fotooptpornika. To se postiže pomoću programskih prekida (eng. interrupt) i određenih podešavanja AD konvertora. AD konvertor učitava podatke u odre-

đenim vremenskim intervalima, izvršavanje glavnog programa se prekida kako bi se novi podaci učitali. Podaci se učitavaju tako što se naizmenično upisuju u različit niz lokacija određenog registra AD konvertora. Dok se prvom nizu lokacija pristupa u drugi se upisuju novi podaci. Kako je struja elektromagneta vremenski promenljiva usled elektromagnetne indukcije u kalemu se javlja indukovana struja koja teži da svojim dejstvom poništi uzrok svog postanka (Piroćanac 2003), zbog toga se prilikom promene širine impulsa PWM-a struja kroz kalem promeni tek posle nekog vremena (slika 9).



Slika 8. Impulsni odziv elektromagneta. Signal (puna linija) i polje elektromagneta (tačkasta linija)

Figure 8. Impulse response of electromagnet. Signal (bold line) and electromagnetic field (dotted line)

## Zaključak

Kašnjenje usled promene struje kroz elektromagnet onemogućava pravovremen odziv sistema. U trenutku kada se struja elektromagneta promeni prema podacima mikrokontrolera, telo se nađe u nekom drugom položaju pa izmenjena struja nije adekvatna za novi položaj. Vreme koje je potrebno da se promeni vrednost struje kroz elektromagnet zavisi od njegove vremenske konstante. Vremenska konstanta elektromagneta predstavlja vreme koje je potrebno da struja elektromagneta dostigne 63.2 posto svoje maksimalne vrednosti (web 4), izračunava se prema obrascu  $\tau = L/R$  ( $\tau$  – vremenska konstanta elektromagneta,  $L$  – induktivnost elektromagneta, a  $R$  – aktivna otpornost elektromagneta)

Iz formule se vidi da je vremenska konstanta manja ukoliko je i induktivnost manja i tada je

promena struje brža. Međutim ako je induktivnost manja smanjuje se i elektromagnetna sila ispod jezgra i postaje nedovoljno jaka da povuče levitirajuće telo naviše kada počne da pada. Može se pokušati sa dodavanjem otpornika redno elektromagnetu kako bi se regulisala vremenska konstanta kao i da se softverskim putem umanjí uticaj kašnjenja zbog nedovoljno brze promene struje elektromagneta (web 5). Dalji rad zahteva preispitivanje tehničkih karakteristika elektromagneta u slicnim sistemima, kao i detaljnu analizu impulsnog odziva Holovog senzora. Ovi parametri bi doprineli bolje razumevanju problema upravljanja ovakvim sistemom.

## Literatura

- Adžić I., Smiljković N., Pavlović G., Marčeta Z. 2008. Sistematizacija i automatizacija verifikacije senzora u auto industriji primenom BBT-a. Telekomunikacioni forum 2008.
- Khemissi Y. 2010. Control using sliding mode of the magnetic suspension system. *Electrical Computer Sciences IJECS-IJENS*, **10** (3): 1.
- Nikolić G., Martinović D. 1990. *Osnove automatskog upravljanja*. Beograd: Zavod za izdavanje udžbenika
- Passino K. M., Yurkovich S. 1997. *Fuzzy Control*. Boston: Addison-Wesley
- Piroćanac M. 2003. *Osnove elektrotehnike I*. Beograd: Zavod za udzbenike i nastavna sredstva
- web 1:  
<http://karmela.fsb.hr/katedra/download/materijali/1004.pdf> (oktobar 2010)
- web 2:  
<http://www.otpornik.com/elektronika/motori/osnovn-o-o-impulsno-sirinskoj-modulaciji.html> (oktobar 2010)
- web 3:  
[http://automatika.etf.bg.ac.rs/index.php?option=com\\_content&task=blogcategory&id=26&Itemid=155](http://automatika.etf.bg.ac.rs/index.php?option=com_content&task=blogcategory&id=26&Itemid=155) (oktobar 2010) – Skripte za predmet Nelinearni sistemi upravljanja 2 katedre za automatiku Elektrotehničkog fakulteta u Beogradu
- web 4:  
[http://www.sayedsaad.com/fundmental/9\\_inductance%20of%20a%20coil.%20htm](http://www.sayedsaad.com/fundmental/9_inductance%20of%20a%20coil.%20htm) (oktobar 2010)
- web 5:  
<http://mekonik.wordpress.com/2009/03/17/arduino-magnet-levitation/> (oktobar 2010)

## Magnetic Levitation

The objective of this research was to develop a system that can levitate an object below an electromagnet. The effect of gravitational force, which acts on the body and causes it to fall, is canceled by the magnetic field of the electromagnet. Two different position sensors were tested – a Hall effect sensor and an optical sensor which consists of a laser and a photo resistor array. In the first case, when the Hall effect sensor was used, a levitating object was a permanent magnet, and in the other case the levitating object was a metal screw. To prevent the object from falling it was necessary to maintain the change of the electromagnet's current. Current change is based on a position sensor output. A PIC micro controller performs all calculations and produces pulse width a modulation signal, which is used to drive the electromagnet. The H-bridge provides current direction change and the required intensity of the current. P, PD and Fuzzy controllers were implemented independently to control the process of levitation. 