

ŠOLSKI CENTER VELENJE  
ELEKTRO IN RAČUNALNIŠKA ŠOLA  
Trg mladosti 3, 3320 VELENJE

MLADI RAZISKOVALCI ZA RAZVOJ ŠALEŠKE DOLINE

RAZISKOVALNA NALOGA

**MAGNETNA LEVITACIJA**

Tematsko področje: APLIKATIVNI INOVACIJSKI PREDLOGI IN PROJEKTI

Avtorica:  
Enida Suljić, 4.letnik

Mentor:  
Sašo Gnilšek, prof.

Somentor:  
Peter Vrčkovnik, prof.

Velenje, 2012

Naloga je bila opravljena na Medpodjetniškoizobraževalnem centru Velenje, deloma tudi doma.

Mentor: Sašo Gnilšek, prof.

Somentor: Peter Vrčkovnik, prof.

Datum predavitve:

## KLJUČNA DOKUMENTACIJSKA INFORMACIJA

- ŠD ŠCV 2011/2012
- KG Elektrotehnika/ Regulacije/ Magnetno polje
- AV SULJIĆ, Enida
- KZ 3320 Velenje, SLO, Kidričeva 10
- ZA Šolski center Velenje, Elektro in računalniška šola
- LI 2012
- IN Magnetna levitacija
- TD RAZISKOVALNA NALOGA
- OP V, 19 foto. , 1 sh. , 3 graf. , 1 tab.
- IJ SL
- JI sl/en
- AI Magnetna levitacija ali magnetno lebdenje je metoda, s katero objekt lebdi v prostoru s pomočjo magnetnega polja. Ta tehnologija nam omogoča nove načine transportacije, pogona, ločevanja zlitin, pomanjšanja izgub in podobno. Njena glavna prednost je, da lahko izdelamo sisteme, ki skoraj nimajo izgub. Obstaja več različnih sistemov, ki pripeljejo do magnetne levitacije; nekateri imajo veliko možnost uspeha v prihodnosti, npr.: transportni sistemi, magnetna levitacijska pečica in še posebej superprevodni magnetni ležaji, ki imajo mnogo prednosti pred klasičnimi, saj zmanjšajo vibracije, trenje in s tem tudi izgube. Obstajajo tudi drugi načini uporabe magnetne levitacije za raziskovalne namene.

V tej raziskovalni nalogi se bomo osredotočili na konkreten primer in poskusili izvedeti, kaj vse je potrebno, da pride do lebdenja predmeta. Zgradili bomo celoten sistem, sestavljen iz močnostnega in krmilnega dela ter ugotovili, kaj vse vpliva na magnetno polje in magnetno levitacijo. Čez elektromagnet bo stekel enosmerni tok, ki bo povzročil nastanek elektromagnetne sile; le-ta je nasprotna gravitacijski sili. S pomočjo meritev in krmilnega dela (senzorji, regulator toka...) bomo zagotovili lebdenje predmeta - v našem primeru železne kroglice.

## KEY WORDS DOCUMENTATION

ND ŠCV 2011/2012

CX Electrotechnik/ Regulations/ Magnetic field

AU SULJIĆ, Enida

PP 3320 Velenje, SLO, Kidričeva 10

PB Šolski center Velenje, Elektro in računalniška šola

PY 2012

TI Magnetic levitation

DT RESEARCH WORK

NO V, 19 photo. , 1 sch. , 3 graph. , 1 tab.

LA SL

AL sl/en

AB Magnetic levitation or magnetic floating is a method with which an object floats in a certain space with the help of the magnetic field. This technology enables us new ways of transportation, power (drive) , sorting alloys as well as reducing the losses. Its main advantage is that we can build systems with almost no loss. There are also various systems which lead to magnetic levitation and some of these have a lot of potential to succeed in the future, such as transport systems, magnetic levitation ovens and particularly superconductor magnetic bearings. The latter exceed the classic ones, since they reduce the vibrations, frictions and losses. There are also some other ways of using the magnetic levitation for research purposes.

The following research paper is focused on a specific example. We intend to find out what is needed for the floating of an object. We will also build the whole system, composed of the power and control section, and furthermore find out what affects the magnetic field and magnetic levitation. Direct current will flow through electromagnet, thus causing the emergence of the electromagnetic force which is opposite to the gravitational force. The measurements and control section (sensors, current regulator...) will provide the object flotation – in our case the iron ball.

## KAZALO

Ključna dokumentacijska informacija	II
Key words documentation	III
Kazalo vsebine, kazalo prilog	IV
Kazalo fotografij, shem, grafov in tabel	V
1 UVOD	1
1.1 Hipoteze raziskovalne naloge	1
2 IZSLEDKI IN RAZPRAVE	2
3 METODOLOGIJA DELA	3
3.1 Močnostni del	3
3.1.1 Zgradba močnostnega dela-izdelava tuljavnika	3
3.1.2 Železno jedro	4
3.1.3 Lastnosti tuljave	4
3.1.4 Lastnosti in karakteristika elektromagneta	5
3.1.5 Izračun sile elektromagneta	6
3.2 Krmilni del	9
3.2.1 Krmilnik	9
3.2.2 Programiranje	9
3.2.3 Senzorji	10
3.3 Regulator toka	12
3.3.1 Regulacija toka	12
3.3.2 PWM regulator	14
4 REZULTATI IN RAZPRAVE	15
4.1 Končni izdelek	15
4.2 Delovanje sistema	16
4.3 Končni rezultati	18
4.4 Uporaba magnetne levitacije v transportnih sistemih	19
4.5 Magnetna levitacijska pečica	19
4.6 Uporaba magnetnih ležajev	19
5 ZAKLJUČEK	20
6 ZAHVALA	20
7 VIRI IN LITERATURA	21
8 PRILOGE	22

## **KAZALO FOTOGRAFIJ, SHEM, GRAFOV IN TABEL**

### **Kazalo fotografij**

- Slika 1: Magnetna levitacija
- Slika 2: Oblika železnega jedra
- Slika 3: Skica izdelka
- Slika 4: Krmilnik
- Slika 5: Senzor (chip) NE555N
- Slika 6: Sharpov senzor za merjenje razdalje
- Slika 7: LED dioda in FOTO tranzistor
- Slika 8: Operacijski ojačevalnik LM324
- Slika 9: Tranzistor BD677
- Slika 10: Tiskano vezje
- Slika 11: Regulator toka 1
- Slika 12: FET tranzistor (BUZ11 – 30A)
- Slika 13: PWM regulator (FET tranzistor-BUZ11)
- Slika 14: Usmernik (230V AC - 24V DC)
- Slika 15: Močnostni del (stojalo in elektromagnet)
- Slika 16: Krmilni del (krmilnik, regulator toka)
- Slika 17: Svetlobna zavesa (senzor-LED diode in FOTO tranzistorji)
- Slika 18: Povezan sistem
- Slika 19: Končni izdelek

### **Kazalo shem**

- Shema 1: Shema sestavljenega tuljavnika

### **Kazalo grafov**

- Graf 1: Diagram odvisnosti sile od razdalje elektromagneta
- Graf 2: Karakteristika senzorja
- Graf 3: Diagram poteka (programa v Bascom-u)

### **Kazalo tabel**

- Tabela 1: Vrednost mase in sile v odvisnosti od razdalje

### **Kazalo prilog**

- Priloga 1: Shema vezja krmilnika (LCD in tipkovnica)
- Priloga 2: Shema vezja krmilnika (Procesorski del)
- Priloga 3: Shema vezja za regulator toka 1
- Priloga 4: Tiskano vezje za regulator toka 1
- Priloga 5: Shema vezja PWM regulatorja
- Priloga 6: Program v Bascomu

## 1 Uvod

Magnetna levitacija je tehnologija, ki nam omogoča nove načine transportacije, pogona, ločevanja zlitin, pomanjšanja izgub in podobno. Njena glavna prednost je, da lahko izdelamo sisteme, ki skoraj nimajo izgub. Pomaga nam tudi prestopiti nekatere omejitve, ki jih do sedaj ni bilo mogoče. Seveda nam pomaga tudi pri raziskovanju. Tu mislimo predvsem na raziskovanje lastnosti snovi in njihovo obnašanje v breztežnosti, kakršna je v vesolju. Obstajajo tudi drugi načini uporabe magnetne levitacije za raziskovalne namene.

Sistemov, ki pripeljejo do magnetne levitacije, je več:

- Prvi temelji na odbojnosti oziroma privlačnosti dveh magnetov (včasih tudi magneta in feromagneta).
- Drugi za levitacijo uporablja silo, ki se pojavi, ko postavimo prevodnik, po katerem teče tok v magnetno polje.
- Tretji sistem, pri katerem lahko opazujemo magnetno levitacijo, uporablja *Meissnerjev efekt* (superprevodniki).

V tej raziskovalni nalogi se ne bomo osredotočili na aplikativno uporabo magnetne levitacije, njene prednosti in pomanjivosti, ampak bomo na določenem primeru poskusili dokazati, da pride do magnetnega lebdenja predmeta s pomočjo navadnih, vsakdanjih reči; prav tako bomo poskusili dokazati, da se celotna zadeva lahko krmili oz. regulira s pomočjo samostojno izdelanega krmilnika ter da bo ta projekt uporaben za nadaljne raziskave, kakor tudi za samo prihodnost magnetne levitacije.

### 1.1 Hipoteze raziskovalne naloge:

- Ali je mogoče izdelati sistem magnetne levitacije?
- Ali lahko reguliramo sistem in s tem nastavljamo odklon lebdeče kroglice?
- Ali je možno uporabljati magnetno levitacijo v transportnih sistemih?
- Ali je možno uporabljati magnetno levitacijsko pečico?
- Ali je možno uporabljati magnetne ležaje?

## 2 Izsledki in razprave

Cilj naloge je izdelati sistem, sestavljen iz močnostnega in krmilnega dela, ki deluje na principu elektromagnetne sile. Elektromagnetna sila je nasprotna gravitacijski sili in s tem zagotavlja lebdenje objekta s pomočjo magnetnega polja. Ideja naloge je sestaviti močnostni del, opraviti meritve elektromagneta in na koncu izdelati še krmilni del. Magnetni jarem bo dvignil magnetno telo na določeno višino, krmilni del pa bo krmilil magnetno polje. Izmenično bo vklapljal in izklapljal elektromagnet, da se bo telo dotaknilo magnetnega jarma ter bo dalo iluzijo, da predmet v prostoru lebdi.



*Slika 1: Magnetna levitacija*



### 3 Metodologija dela

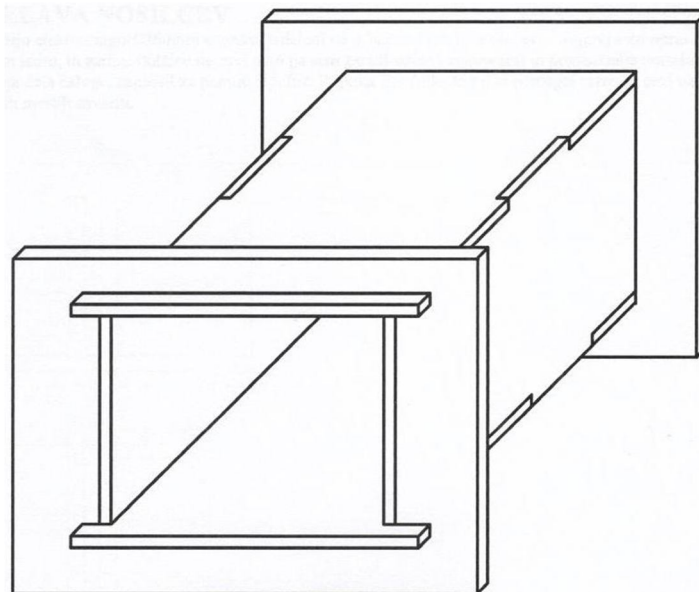
#### 3.1 Močnostni del

Elektromagnet dobimo, kadar okoli železnega jedra navijemo tuljavo in jo priključimo na napetost. Čez tuljavo steče električni tok, ki v železnem jedru povzroči magnetilni pretok in s tem magnetno polje. Tako dobimo magnet, ki se od trajnega magneta razlikuje v tem, da ga lahko izklopimo, kadar želimo, poljubno pa lahko nastavimo tudi moč elektromagneta, s tem da povečujemo ali zmanjšujemo napetost oziroma tok čez tuljavo.

##### 3.1.1 Zgradba močnostnega dela - izdelava tuljavnika

Močnostni del je sestavljen iz stojala, na katerem je pritrjena tuljava, elektromagneta (s priključnimi sponkami za enosmerno napetost) in predmeta, ki lebdi (v našem primeru kroglice).

Najprej je bilo treba sestaviti tuljavnik, na katerega je navita bakrena žica. Tuljavnik je iz neprevodnega materiala pertinaksa, skupaj pa je spojen z močnim dvokomponentnim lepilom. Potrebno je bilo izmeriti velikost tuljave in izrezati 6 delov pertinaksa, ki se z lahkoto sestavijo v tuljavnik in nato zalepiti z močnim lepilom za plastiko (Slika 2). V tuljavnik je vstavljena lesena kocka velikosti, kot je železno jedro, da bi preprečili krčenje tuljavnika med navijanjem.

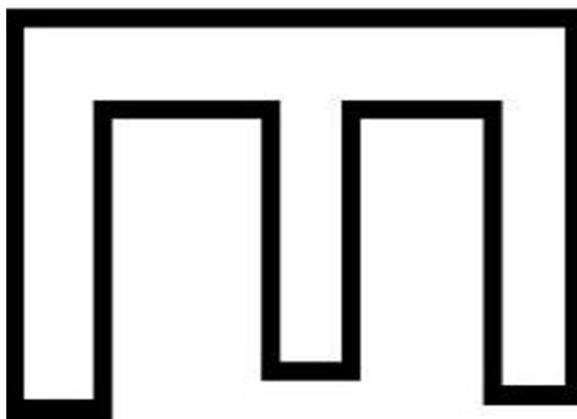


Shema 1: Shema sestavljenega tuljavnika

### 3.1.2 Železno jedro

Dilemo smo imeli glede železnega jedra, saj nismo vedli katera oblika železnega jedra bi prišla prav. Vsem je znano, da se magnetne silnice vedno sklonejo čez magnet, da ne gredo nikoli mimo – lahko imajo samo krajšo ali daljšo pot. Če bi izbrali železno jedro v obliki črke »I« bi silnice imele najdaljšo pot in bi sila, ki jo povzroči elektromagnet bila premajhna, saj bi premajhen del celotne sile deloval na kroglico. Drugi poskus je bil z železnim jedrom v obliki črke »T« , kjer se sila porazdeli malo drugače, vendar ne dovolj dobro, da bi uporabili kot rešitev. Na koncu smo se odločili za železno jedro v obliki črke »E« in smo ugotovili, da je v tem primeru izkoristek najboljši, saj silnice imajo krajšo pot in večji del sile deluje na kroglico.

Najboljša rešitev pa bi bilo železno jedro podobno obliki črke »Ω« , saj v takem primeru celotna sila deluje vmes – med obema stranema železnega jedra, vendar je do takšne oblike zelo težko priti in zato smo se odločili za tisto, ki je bolj pogosto uporabljena in jo lahko dobimo povsod oz. jo lahko sami izdelamo. Železno jedro v bistvu sestavina železa in silicija. Silicij je dodan zato, ker poveča zelo specifično upornost, kar posledično zmanjša vrtilne tokove in s tem vrtilne izgube. Sestavljeno pa je iz medsebojno izoliranih lamel.



*Slika 2: Oblika železnega jedra*

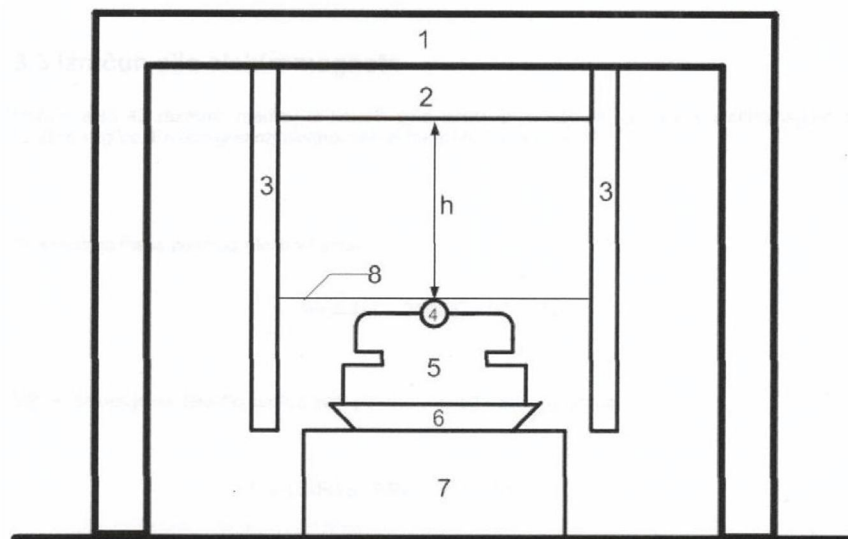
### 3.1.3 Lastnosti tuljave

Med iskanjem prave oblike železnega jedra, smo se tudi pozanimali za najbolj uporabno tuljavo. Prvi poskus je bil z žico preseka  $0,4 \text{ mm}^2$  in z večjim številom ovojev, vendar sila, ki je nastala pri tem ni bila dovolj močna, da bi dvignila predmet – kroglico. Zato smo se odločili za drugi poskus: na tuljavnik je navitih 1100 ovojev bakrene žice preseka  $1,1 \text{ mm}^2$  in je priključena na enosmerno napetost 24V. Takšna tuljava oz. sestavljen elektromagnet povzroči dovolj močno, včasih tudi premočno silo, za dvigovanje oz. samo lebdenje premeta. Zunanost tuljave je prelakirana, tako je navitje izolirano. Največji tok, ki teče dlje časa čež tuljavo, je 5A. Lahko steče tudi večji tok, vendar kratek čas, saj se tuljava greje.

### 3.1.4 Lastnosti in karakteristika elektromagneta

Opraviti je bilo treba meritve karakteristike elektromagneta, in sicer nas je zanimala odvisnost sile od razdalje med objektom in elektromagnetom. Najprej je bilo treba izbrati primerno metodo merjenja razdalje. Na vsako stran tuljavnika sta nameščeni dve enaki ravnili, ki sta bili enako oddaljeni od podlage. S tanko nitko smo naredili en ovoj okoli ravnili. Kroglico smo postopoma približevali k elektromagnetu, in sicer najprej po 0,5 cm nato 0,2 cm in nazadnje še 0,1 cm. Najprej je bilo treba narediti stojalo za kroglico; le-to je bilo iz nemagnetnega materiala, kar je zagotovilo pravilnost meritve (primer: aluminjasto). Uporabili smo tudi stojalo, na katero smo nepremično pritrdili kroglico, stojalo pa je služilo tudi kot obežitev, da smo lahko izmerili maso. Stojalo smo položili na tehtnico in ga postopoma približevali (0,5; 0,2; 0,1 cm) elektromagnetu.

Za vsako spremembo razdalje smo odčitali vrednost s tehtnice. Bolj kot smo približevali kroglico, bolj je tehtnica prikazovala manjšo maso, saj je elektromagnet deloval nanjo z večjo privlačno silo.



Slika 3: Skica izdelka

- 1 – stojalo
- 2 – elektromagnet
- 3 – ravnili
- 4 – kroglica
- 5 – aluminjasto stojalo
- 6 – tehtnica
- 7 – podlaga
- 8 – tanka nit
- h – višina približevanja

### 3.1.5 Izračun sile elektromagneta

Opravljenih je bilo 43 različnih meritev, iz katerih je izračunano, s kakšno silo deluje elektromagnet na železno kroglico na določeni razdalji. Pri tem je skozi elektromagnet tekkel konstantni tok 3A.

Spremembo mase povzroči elektromagnet:

$$\Delta m = (m - 3088g) * 10^{-3} \text{ [kg]}$$

kjer je:

$\Delta m$  – sprememba mase

$m$  – masa stojala + masa kuglice

3088g – masa stojala

Sila, ki deluje na železno kroglico:

$$F = (0,08kg * 9,81 \text{ m/s}^2) - (\Delta m * 9,81 \text{ m/s}^2) \text{ [N]}$$

kjer je:

$F$  – sila, ki deluje na kroglico

$\Delta m$  – sprememba mase

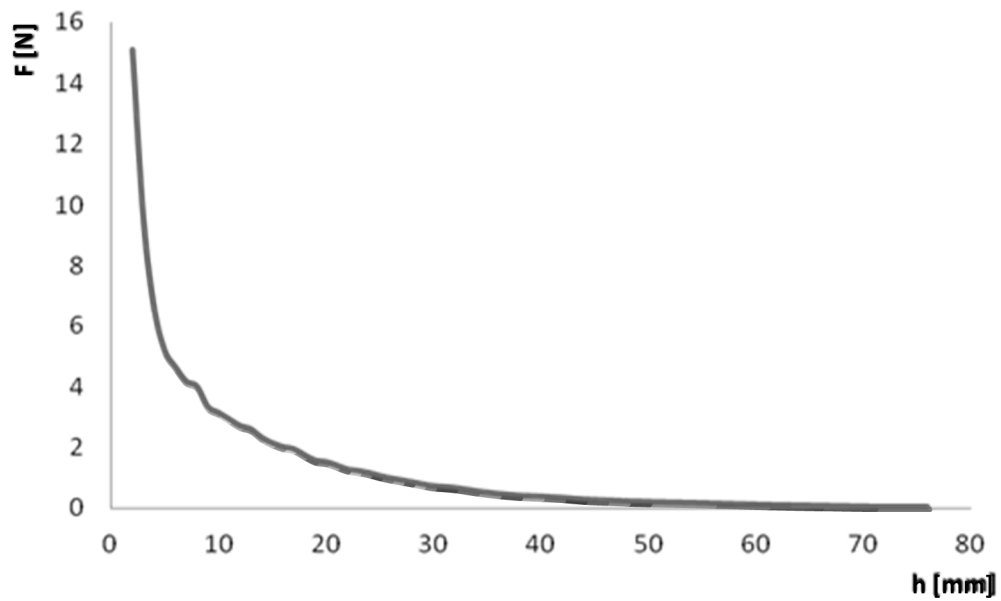
$9,81 \text{ m/s}^2$  – gravitacijski pospešek

0,08 kg – masa kroglice

h [mm]	m [g]	m - 3088	$\Delta m$ [kg]	F [N]
76	3164	76	0,076	0,03924
71	3163	75	0,075	0,04905
66	3160	72	0,072	0,07848
61	3157	69	0,069	0,10791
56	3152	64	0,064	0,15696
50	3147	59	0,059	0,20601
48	3145	57	0,057	0,22563
46	3142	54	0,054	0,25506
44	3139	51	0,051	0,28449
42	3133	45	0,045	0,34335
40	3129	41	0,041	0,38259
38	3126	38	0,038	0,41202
36	3120	32	0,032	0,47088
34	3111	23	0,023	0,55917
32	3100	12	0,012	0,66708
30	3094	6	0,006	0,72594
29	3088	0	0	0,7848
28	3081	-7	-0,007	0,85347
27	3074	-14	-0,014	0,92214
26	3068	-20	-0,02	0,981
25	3060	-28	-0,028	1,05948
24	3050	-38	-0,038	1,15758
23	3043	-45	-0,045	1,22625
22	3038	-50	-0,05	1,2753
21	3025	-63	-0,063	1,40283
20	3013	-75	-0,075	1,52055
19	3008	-80	-0,08	1,5696
18	2990	-98	-0,098	1,74618
17	2970	-118	-0,118	1,94238
16	2963	-125	-0,125	2,01105
15	2950	-138	-0,138	2,13858
14	2931	-157	-0,157	2,32497
13	2903	-185	-0,185	2,59965
12	2892	-196	-0,196	2,70756
11	2870	-218	-0,218	2,92338
10	2848	-240	-0,24	3,1392
9	2828	-260	-0,26	3,3354
8	2760	-328	-0,328	4,00248
7	2743	-345	-0,345	4,16925
6	2695	-393	-0,393	4,64013
5	2640	-448	-0,448	5,17968
4	2492	-596	-0,596	6,63156
3	2188	-900	-0,9	9,6138
2	1630	-1458	-1,458	15,08778

Tabela 1: Vrednost mase in sile v odvisnosti od razdalje elektromagneta

kjer je:  
 $h$  – višina med kroglico in elektromagnetom  
 $m$  – masa stojala + masa kroglice  
3088g – masa stojala  
80g – masa kroglice  
 $9,81 \text{ m/s}^2$  – gravitacijski pospešek



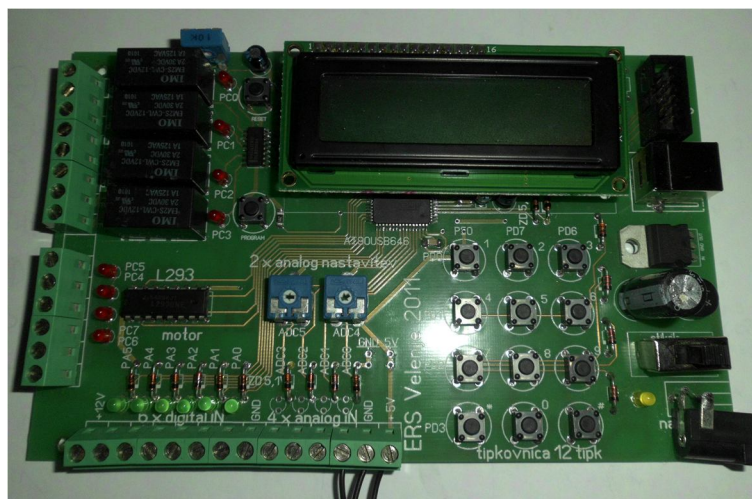
Graf 1: Diagram odvisnosti razdalje od sile elektromagneta

### 3.2 Krmilni del

Da bi sploh prišlo do lebdenja predmeta, bo treba krmiliti tok čez tuljavo. Ker je od toka in razdalje odvisna sila, s katero deluje elektromagnet na kroglico, moramo regulirati tudi silo. Na kateri razdalji se nahaja objekt in koliko se bo potrebno premakniti gor ali dol, da bi lebdel, bo zaznal senzor, ki bo podatke pošiljal v krmilnik; le-ta bo s PWM-jem (Pulzno Širinska Modulacija – način regluacije, kjer s pomočjo dolžine signala/impulza določaš moč na izhodu od 0 do 100%) reguliral velikost toka.

#### 3.2.1 Krmilnik

Krmilnik smo sami izdelali že za prejšnje projekte in ga tudi uporabili za krmiljenje magnetnega jarma oziroma sile, s katero deluje elektromagnet na predmet. Krmilnik ima določeno število analognih in digitalnih vhodov in izhodov, na katere smo priključili senzorje, ki bodo zaznali oddaljenost med objektom in elektromagnetom.



Slika 4: Krmilnik

#### 3.2.2 Programiranje

Program, ki smo ga uporabljali za krmiljenje ploščice, sensorja in s tem tudi samega sistema je *Bascom Avr*. Programiranje v *Bascom*-u je zelo enostavno, saj z dovolj dobrim znanjem angleškega jezika se lahko hitro naučiš osnih stvari. S tem programom se že dlje časa ukvarjamo in poznamo tudi vse lastnosti, način programiranja in podobno. Krmilnik je bil že vnaprej narejen za programiranje v *Bascomu*.

### 3.2.3 Senzorji

Zelo pomemben del celotnega sistema je senzor. Uporabljen naj bi bil senzor za merjenje oddaljenosti, ki mora zaznavati, na kakšni razdalji se kroglica nahaja in nato poslati podatke preko analognega vhoda na krmilnik; ta vrednost se potem pretvori v cm (v programu); program bo zagotovil to, da se razdalja lahko spreminja gor ali dol za nekaj milimetrov, vendar kroglice ne sme zabiti v elektromagnet niti ne sme kroglica pasti na tla.

*Prvi uporabljeni senzor:*

Raziskave so pokazale, da senzorja (NE555N), ki smo ga uporabili na začetku, zdaj ne moremo uporabiti. Ta deluje tako, da daje impulze, ko zazna predmet, ampak s tem si ne moremo pomagati, kajti če bi na razdalji 4,5 cm (največja razdalja pri kateri elektromagnetna sila deluje na kroglico) postavili vsaj 3 senzorje, bi eden zaradi ozkega snopa zazanavanja zaznal, da je treba zmanjšati tok oz. silo, ker je kroglica preblizu elektromagnetu; drugi senzor pa bi v kratkem času zaznal, da je treba tok povečati, sicer bo kroglica padla. Ker se to dogaja v zelo kratkem času in deluje hitro, bi kroglico zabilo v elektromagnet in levitacija bi izginila.



*Slika 5: Senzor (chip) NE555N*

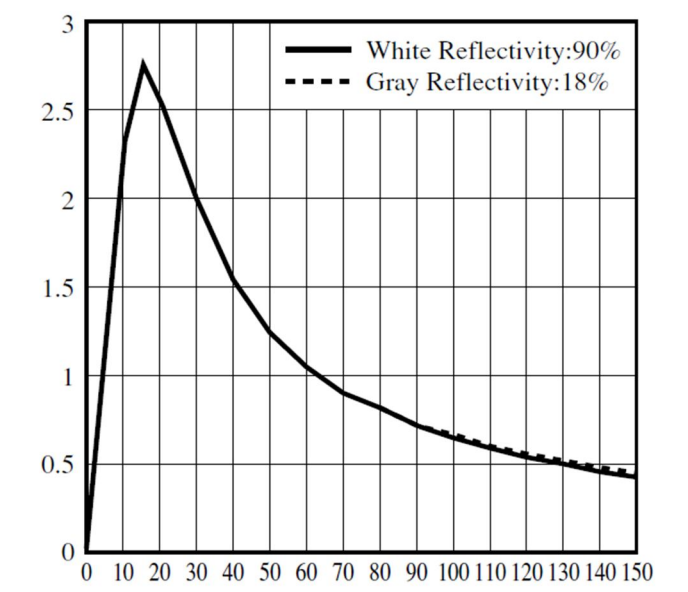
*Drugi uporabljeni senzor:*

Pozanimali smo se za druge senzorje za merjenje razdalje, ki imajo drugačno karakteristiko in delujejo na drugačnem principu. Izbran je Sharpov senzor GP2Y0A02YK, ki bi ga naj postavili na spodnji del celotnega sistema.



*Slika 6: Sharpov senzor za merjenje razdalje*





Graf 2: Karakteristika senzorja

Kot je videti je, karakteristika senzorja nenavadna, saj dobimo pri dveh različnih vrednostih razdalje isto izhodno napetost. Pri nas to ne bi povzročalo težav, saj bi senzor bil oddaljen manj kot 15 cm od sistema. Izhodno napetost iz senzorja bi v programu preračunali v cm in jo primerjali z dovoljeno vrednostjo.

Ta senzor za zaznavanje razdalje ni dovolj natančen, ker se vrednosti stalno spreminjajo in niso konstante; res pa je tudi to, da je kroglica premajhna in v nekem trenutku je senzor sploh ne zazna, saj gre mimo poti, ki jo senzor zazna. Edina rešitev je, da bi se senzor premikal hkrati s kroglico, kar za enkrat ni možno.

#### *Tretji uporabljeni senzor:*

Ta senzor je samo izdelan in se ne imenuje senzor, vendar deluje na podobnem principu. Je pa pohvalen in uporaben za merjenje pozicije. Sestavljen je iz šest LED diod, ki so postavljene na letvici na eni strani stojala. Na drugi strani se nahaja šest FOTO tranzistorjev. LED diode naj bi prižigali po vrsti: najprej prvo, nato drugo itd, ter gledali, ali je FOTO tranzistor, ki je nasproti LED diode, zatemnjen ali ne. Tako bi dobili šest pozicij, kar bi zadoščalo za meritev.



Slika 7: LED dioda in FOTO tranzistor

### 3.3 Regulator toka

Najbolj pomemben del za delovanje sistema je regulacija toka oz. regulacija sile, ki deluje na predmet. Povezanost s krmilnim delom in skupni odziv predstavljata prvo resno težavo. Krmilili naj bi tok s PWM regulatorjem, vendar bi lahko PWM za takšen sistem bil prepočasen in bi pošiljanje ter sama obdelava podatkov v krmilniku predolgo trajalo. Največji problem je karakteristika oz. odvisnost sile od razdalje (Graf 1, stran x), ker je nelinearna in je težko izdelati sistem, s katerim bo mogoče regulirati silo. Diagram odvisnosti nam pove, da v trenutku, ko se sila slučajno poveča, se razdalja zmanjša; zato ker se je zmanjšala razdalja, se bo sila še bolj povečala - in s tem nismo prav nič dosegli. Treba je poskusiti vse možne načine, da bi preprečili to dejanje.

#### *Obratni sistem*

Obstaja možnost, da celoten sistem obrnemo na glavo in takrat ne bi prišlo do takšnih težav, saj je karakteristika drugačna in sila deluje v nasprotni smeri; vendar to ne bi predstavljalo magnetne levitacije, ampak samo odbijanje oz. privlačenje dveh magnetov, kar pa ni cilj raziskovalne naloge.

#### *Ograjen sistem*

V primeru, da bi postavili ograjo z dveh strani in uporabili drugačen magnetni predmet, takšen da se ne more premikati v stran (ker ga ograja ovira), ampak samo gor pa dol, bi spet prišlo do odbijanja dveh magnetov in ne do magnetnega lebdenja.

#### *Kockica*

Ena možnost je, da bi namesto kroglice uporabili kockico, saj se na takšnem telesu sila razporedi drugače, vendar ne dovolj dobro, da bi uporabili kot rešitev.

#### *Dodatni ovoji*

Tretja možnost je, da bi na kroglico navili par ovojev in bi s tem dosegli to, da v trenutku ko bi se kroglica nahajala pod elektromagnetom, bi se v njej oz. v navitju inducirala napetost in bi povzročila silo, ki bi delovala v nasprotni smeri kot elektromagnetna. V tem primeru se elektromagnetna sila ne bi tako hitro in z lahkoto spreminjala, saj sila v nasprotni smeri tega ne dovoli. Teoretično bi to lahko uspelo, vendar praktično pa ne.

#### 3.3.1 Regulacija toka

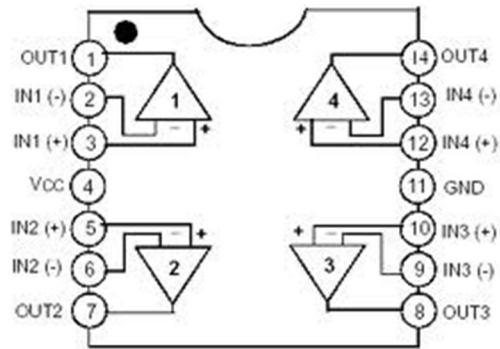
Vse zgoraj navedeno vpliva na regulacijo sistema. Poskusili smo izdelati regulator, ki je sestavljen iz samo izdelanega analogno-digitalnega pretvornika, operacijskega ojačevalnika in tranzistorja.

Uporabili smo vezje LM 324 (14-pin, sestavljeno iz 4 operacijskega ojačevalnika) in tranzistor BD 677 (1A).

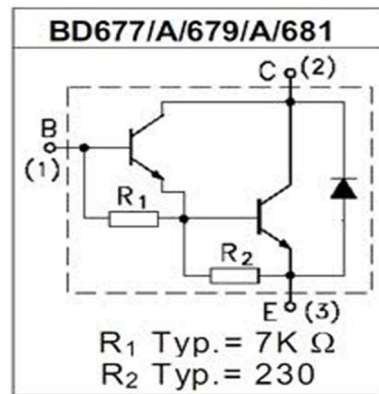
Deluje tako, da v odvisnosti od tega, kakšno napetost damo na vhod operacijskega ojačevalnika (drug operacijski ojačevalnik služi za to, da bi negativno vrednost napetosti pretvoril v pozitivno), se bo tranzistor bolj ali manj odprl. Stekel bo tok in povzročil bo padec napetosti na enem od uporov. Ta padec napetosti se primerja z vhodno napetostjo (na tretjem operacijskem ojačevalniku); čim večja je razlika med tema dvema, tem bolj se bo tranzistor odprl in stekel bo večji tok. Zdaj bo padec napetosti na uporih večji, kot je bil prej in razlika med vhodno napetostjo in padcem bo manjša – stekel bo manjši tok.



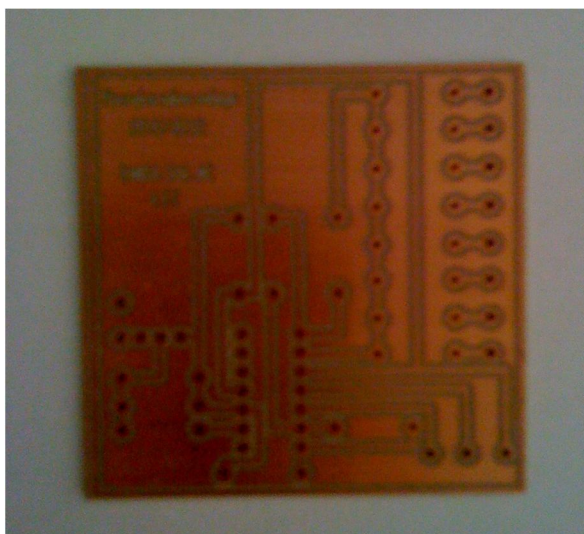
© Solarbotics LLC. WWW.SOLARBOTICS.COM



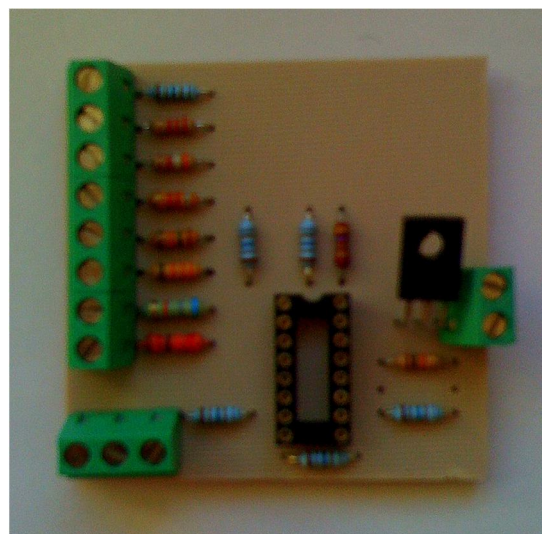
Slika 8: Operacijski ojačevalnik LM324



Slika 9: Tranzistor BD677



Slika 10: Tiskano vezje



Slika 11: Regulator toka 1

Ugotovili smo, da tudi to ni dobra rešitev iz več razlogov: upornost navitja je majhna, približno  $5\ \Omega$ ; pri priključenih napetosti 24V DC steče približno 5A toka, kar je zelo velik. To povzroči veliko elektromagnetno silo in naša zamisel je bila, da bi priključili večjo upornost (s pomočjo spremenljivega upora, potenciometra), da bi stekel manjši tok, ki bi ga bilo lažje regulirati. Zato smo izbrali takšno vezje in 1A – ski tranzistor, vendar je ta tok premajhen in elektromagnet ni dovolj močan, da bi dvignil predmet. Potreben je regulator za večji tok, kar bi lahko dosegel PWM, čeprav je mogoč prepočasen; vendar ta čas, ki ga izgubimo, moramo dobiti nekje drugje. Primer: LED diode bomo povezali direktno preko ULN2003 na krmilniku (odstraniti releje), ker bo sistem hitrejši. FOTO tranzistorji bodo povezani na digitalne vhode krmilnika.

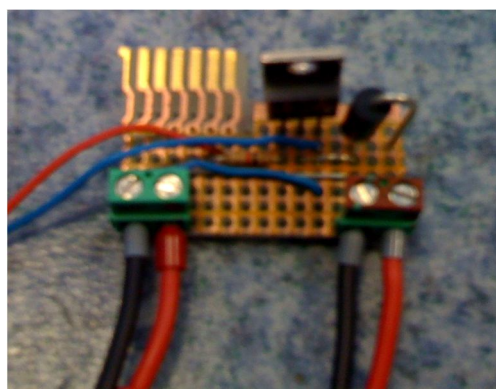
### 3.3.2 PWM regulator

Približno 40 ms je čas, ki ga imamo na voljo. To je čas, v katerem mora senzor zaznati trenutno pozicijo, poslati podatke v krmilnik, obdelati podatke v programu (jih primerjati z dovoljeno vrednostjo), nato poslati podatke na izhod krmilnika in povedati (s pomočjo programa) tranzistorju, ali se naj bolj ali manj odpre oz. ali naj steče več toka ali manj oz. ali naj deluje elektromagnet z večjo ali manjšo silo na predmet.

S PWM-jem naj bi krmilili FET tranzistor in s tem tudi moč magneta. FET tranzistor (BUZ11) bo povezan na enega izmed tranzistorskih izhodov L293 na krmilniku (PC7). Če je kroglica spodaj, se na PWM pošlje večja moč, višje kot je kroglica, manjša je moč. To lahko nelinearno (kot je karakteristika *Graf 1: Diagram odvisnosti razdalje od sile elektromagneta*) krmilimo s sedmimi IF stavki v programu (Bascom Avr – *Priloga 6*).



Slika 12: FET tranzistor (BUZ11 – 30A)



Slika 13: PWM regulator (FET tranzistor-BUZ11)

## 4 Rezultati in razprave

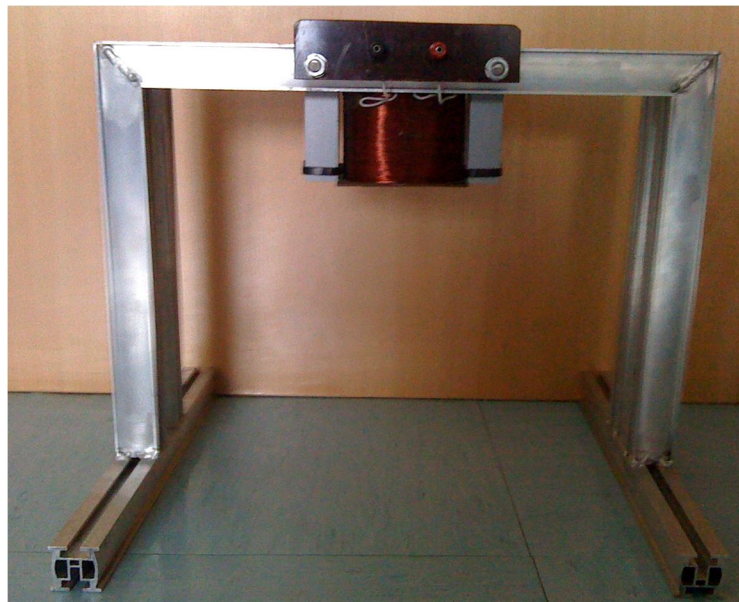
### 4.1 Končni izdelek

Končni izdelek je sestavljen iz močnostnega dela, omenjenega na začetku: stojala in elektromagneta ter krmilnega dela: krmilnika za programiranje v *Bascomu*, regulatorja toka s pulсно širinsko modulacijo in t.i. svetlobne zavese (senzor za merjenje pozicije, sestavljen iz oddajnih in sprejemnih diod).

Napajanje dobimo iz usmernika, ki iz 230 V AC (izmenične) pretvori v 24 V DC (enosmerne) napetosti. Za napajanje krmilnika rabimo 12 V DC.

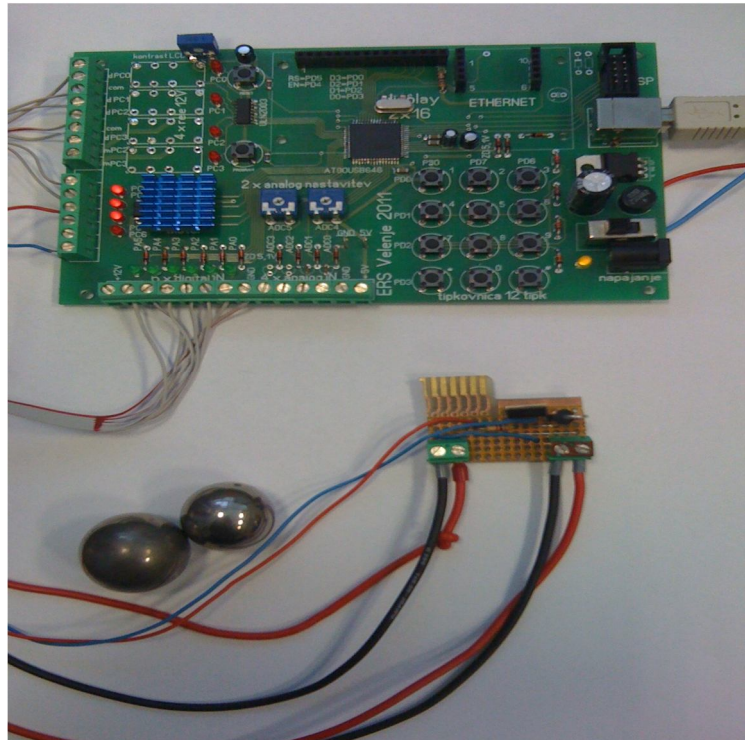


*Slika 14: Usmernik (230V AC - 24V DC)*



*Slika 15: Močnostni del (stojalo in elektromagnet)*





*Slika 16: Krmilni del (krmilnik, regulator toka)*



*Slika 17: Svetlobna zavesa (senzor-LED diode in FOTO tranzistorji)*

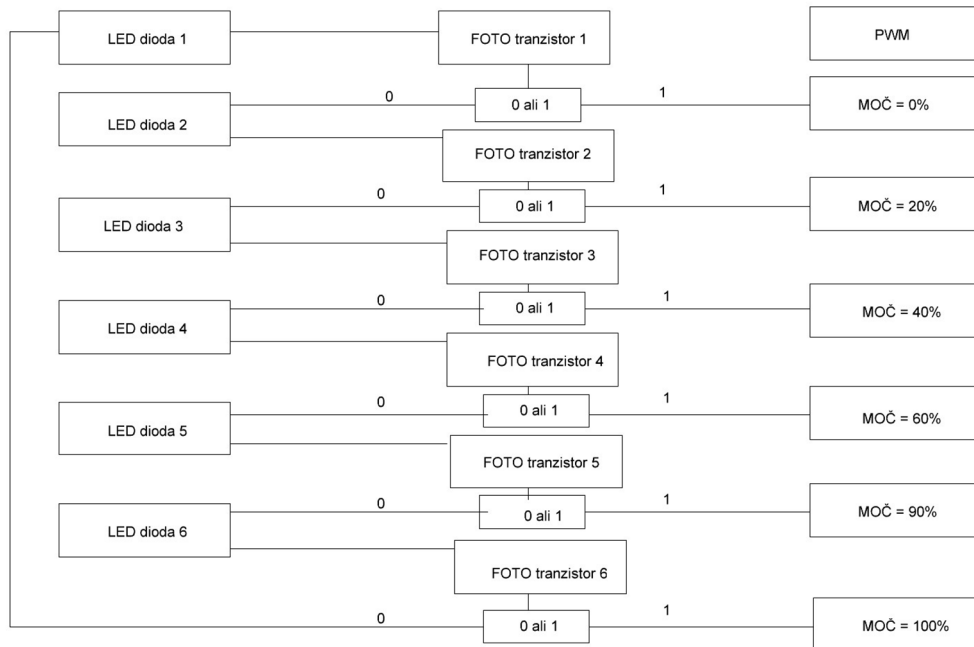
#### **4.2 Delovanje sistema**

Spustimo tok čez elektromagnet. Tok povzroči elektromagnetno silo, ki začne delovati na kroglico. Glede na to, kakšen tok steče, je odvisno, kakšna bo moč elektromagneta.

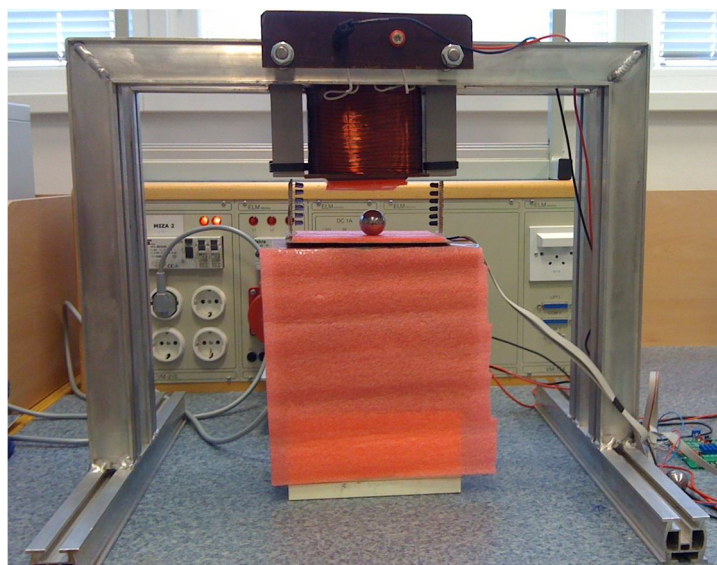
Hkrati pa je treba meriti trenutno pozicijo, na kateri se nahaja kroglica. Za to poskrbijo LED diode, ki se prižigajo po vrsti in FOTO tranzistorji, ki povedo, ali so zatemnjeni ali ne. Če prvi FOTO tranzistor ni zatemnjen, se kroglica ne nahaja na prvi poziciji in se prižiga naslednja LED dioda; naslednji FOTO tranzistor, ki je nasproti nje, pa preverja, ali je ali ni zatemnjen.

S PWM-jem krmilimo FET tranzistor, in sicer, če je kroglica na enem od spodnjih nivojih, se na PWM pošlje večja moč (od 0 do 100 % v odvisnosti, na kateri poziciji se nahaja) in višje kot je kroglica, manjša je moč. Vse to zagotavlja program v krmilniku.

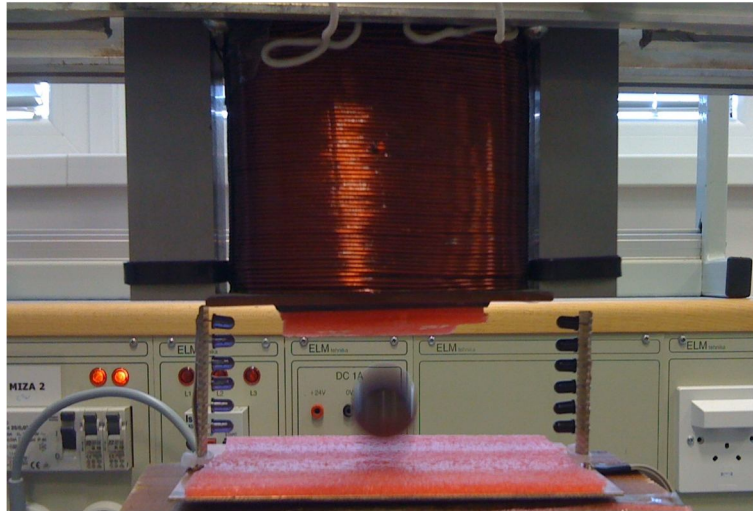
### Diagram poteka



Graf 3: Diagram poteka (programa v Bascom-u)



Slika 18: Povezan sistem



*Slika 19: Končni izdelek*

### 4.3 Končni rezultat

Elektromagnet je precej močan, elektromagnetno silo je težko regulirati. Zaradi nelinearnosti karakteristike in nezvezne regulacije toka se kroglica odbija gor in dol oz. ves čas skače. Razlog, zakaj kroglica skače, je tudi ta, da v trenutku ko se kroglica nahaja na poziciji 1 (moč na PWM-ju je 0), je elektromagnet izklopljen in sile ne bi smelo biti, vendar je železno jedro iz mehkega železa, zaradi česar rabi nekaj časa, da se razmagnet; to pomeni, da ostane nekaj časa namagneteno (kroglica tudi), čeprav toka ni. To povzroča velik težav in odstopanj.

Na žalost, zaradi vseh teh razlogov sistem ne deluje tako kot bi moral – kroglica ne lebdi ves čas in takšen način regulacije, ki smo ga izbrali ni primeren za ta sistem. Raziskave so pokazale kaj so razlogi za ne delovanje (nezvezna regulacija, namagneteno magnet), sami smo pa ugibali in tudi ugotovili kaj bi lahko bile rešitve.

Ena od rešitev je, da bi poskusili narediti zvezno regulacijo, ker za enkrat tistih šest nivojev, ki jih imamo, pravzaprav predstavlja šest stopnic, in je vrednost lahko prva, druga, tretja, četrta, peta ali šesta; ne more pa biti nič vmes in program nima določene dovoljene vrednosti, s katero bi lahko primerjal trenutno. Da bi regulacija bila bolj natančna bi morali imet neskončno število nivojev (stopnic), kar seveda ni izvedljivo. Za to bi lahko uporabili senzor, ki ima zelo širok snop zaznavanja za kar je najbolj primeren IR (infrardeči) oddajnik in sprejemnik. Pomembno je le to, da je regulacija zvezna – da ni sestavljena iz posameznih nivojev.

Problem predstavlja tudi namagneteno magnet, saj rabi veliko časa, da se razmagnet. Rešitev za to je, da bi v trenutku ko je elektromagnet izklopljen (vrednost na PWM-ju je 0), spustili tok v drugi smeri, da bi se čim prej razmagnetil. Čeprav bi to pomagalo pri regulaciji, vseeno ne bi prišlo do popolnega lebdenja, saj nujno potrebujemo zvezno regulacijo za delovanje.



To so odprta vprašanja za nadaljnje raziskave, na katera bomo po vsej verjetnosti našli odgovore v prihodnosti in poskusili čim prej in čim bolj učinkovito priti do končne faze projekta. Prav gotovo smo pokazali, da je možno povzročiti magnetno lebdenje, vendar ga ni možno regulirati in krmiliti na ta način, ki smo ga mi izbrali in na žalost za enkrat ne moremo potrditi hipoteze o regulaciji sistema, vemo pa na kakšen način lahko pridemo do potrditve. Potrebovali bomo nekaj časa (do zagovora verjetno), da lahko do konca zgradimo vse potrebno in potrdimo postavljene hipoteze.

Ne glede na našo nepotrjeno hipotezo so raziskave o splošni uporabi magnetne levitacije pokazale, da je praktična uporaba zelo razširjena, v prihodnosti se bo še tudi povečala, saj bodo na ta način zmanjšali izgube, vibracije, trenja in spremenili načine delovanja dosedanjih sistemov. Z uporabo magnetne levitacije v transportnih sistemih, levitacijskih pečicah in magnetnih ležajih smo potrdili hipoteze, postavljene na začetku, razložene v nadaljevanju.

#### **4.4 Uporaba magnetne levitacije v transportnih sistemih**

Vsem nam so znani Maglev sistemi ali t.i. transrapidi, ki se od konvencionalnih sistemov, kot so: avtomobili, vlaki in avtobusi razlikujejo po tem, da se s podlago stikajo preko koles, ki so pritrjena na mehansko vzmetenje, kar omogoča blaženje ter mehkejšo in varnejšo vožnjo.

Čeprav delujejo s pomočjo superprevodnikov, je to še vedno na principu magnetne levitacije; uporaba je zelo pohvalna. Na Japonskem in Kitajskem se je začelo javno uporabljati že leta 2003, v Evropi pa gre bolj počasi.

Je pa definitivno boljši sistem glede na klasične vlake, saj z njim odpravimo obrabo tračnic ter zmanjšamo hrup in vibracije vozila. Magnetna levitacija ima uspešno prihodnost, saj bodo verjetno čez nekaj let vozili povsod takšni vlaki in bodo sistemi uveljavljeni.

#### **4.5 Magnetna levitacijska pečica**

Brezposodno topljenje je ena od najbolj praktičnih in uporabnih aplikacij magnetne levitacije. Prednosti brezposodnega topljenja so čista obdelava brez onesnaženja obdelanca zaradi posode, lažja proizvodnja in doseganje višjih temperatur od tališča talilne posode. Dizajn magnetne levitacijske pečice je precej zahteven, saj potrebuje močno magnetno polje, segrevanje na visoke temperature s pomočjo CO<sub>2</sub> laserja in opazovanje obnašanja levitirajočega vzorca.

Magnetno polje ne vpliva na laserski žarek. Laser ima to lastnost, da segreva samo vzorec in ne okolice. Eden od primerov je, da se je steklena kocka spremenila v popolno kroglo po topljenju in strditvi; je pa še veliko drugih efektov, ki se zasnujejo na principu elektromagnetne levitacije in jih bodo izumili v prihodnosti.

#### **4.6 Uporaba magnetnih ležajev**

Superprevodni magnetni ležaji imajo veliko možnost uspeha zaradi sposobnosti pasivne levitacije. Potencialna možnost njihove uporabe je v motorjih, generatorjih in vztrajnikih. Ležaji te vrste so sposobni prenašati rotorje s težo nekaj sto kilogramov.

Magnetni ležaji imajo mnogo prednosti pred klasičnimi. Zagotavljajo nekontaktno delovanje, kar zmanjša vibracije in hrupnost sistemov. Z njimi odpravimo potrebo po podmazovanju, kar omogoča čistejše, neonesnaženo okolje. Poglavitna prednost magnetnih ležajnih sistemov je v izgubah, ki so v primerjavi s klasičnimi ležaji zanemarljive.

## **5 Zaključek**

Naloga je bila bolj zahtevna, kot smo pričakovali, bilo je potrebno opraviti veliko meritev, raziskav in poskusov, vendar se je izplačalo, saj smo se naučili veliko novega. Ugotovili smo tudi to, da ni nujno, da vedno pridemo do postavljenega cilja in da smo lahko uspešni tudi, če ne potrdimo hipoteze, saj je naša naloga raziskovat, ne glede na to kakšni bodo končni rezultati. Vseeno upamo, da bo ta raziskovalna naloga na kakršenkoli način predstavljala pomoč pri nadaljnjih raziskavah, saj je to vsekakor tehnologija, v katero se splača vložiti za boljši jutri in ima potencial, da postane tehnologija prihodnosti. Prav tako upamo, da smo kaj novega in uporabnega izumili, s čem bomo v prihodnosti tudi nadaljevali.

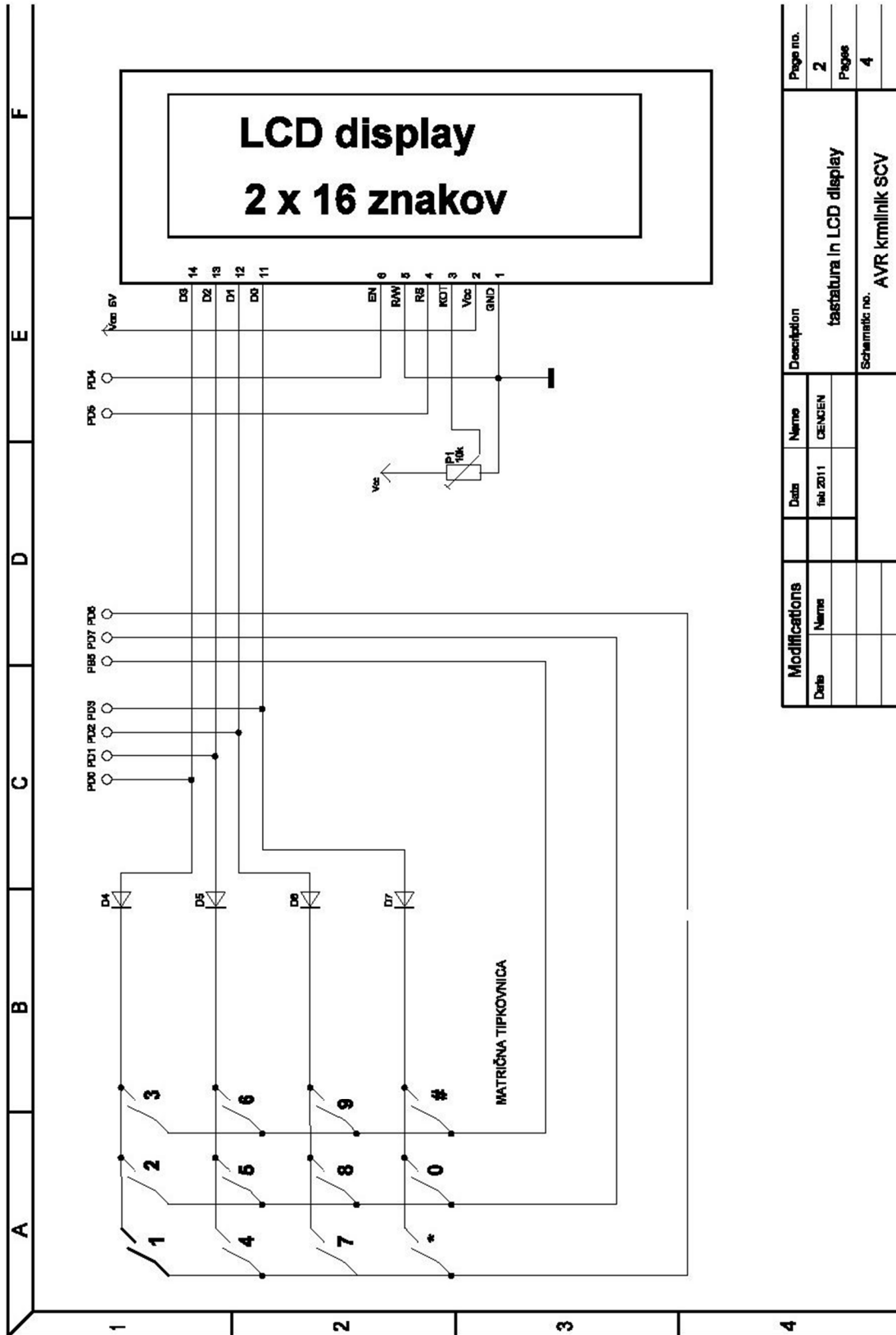
## **6 Zahvala**

Zahvaljujem se mentorju, gospodu Sašu Gnilšku in somentorju, gospodu Petru Vrčkovniku za pomoč in vodenje pri izdelavi raziskovalne naloge, gospi Simoni Diklič za lektoriranje naloge, kakor tudi Šolskemu centru Velenje, Medpodjetniškoizobraževalnemu centru ter gibanju Mladi raziskovalci za razvoj Šaleške doline, ki so poskrbeli za prostor, material in vse potrebno za nalogo. Predvsem pa še velika zahvala gospodu Zvonetu Cencnu, ki me je ves čas spodbujal in mi pomagal uresničiti svoje ideje in priti do cilja.

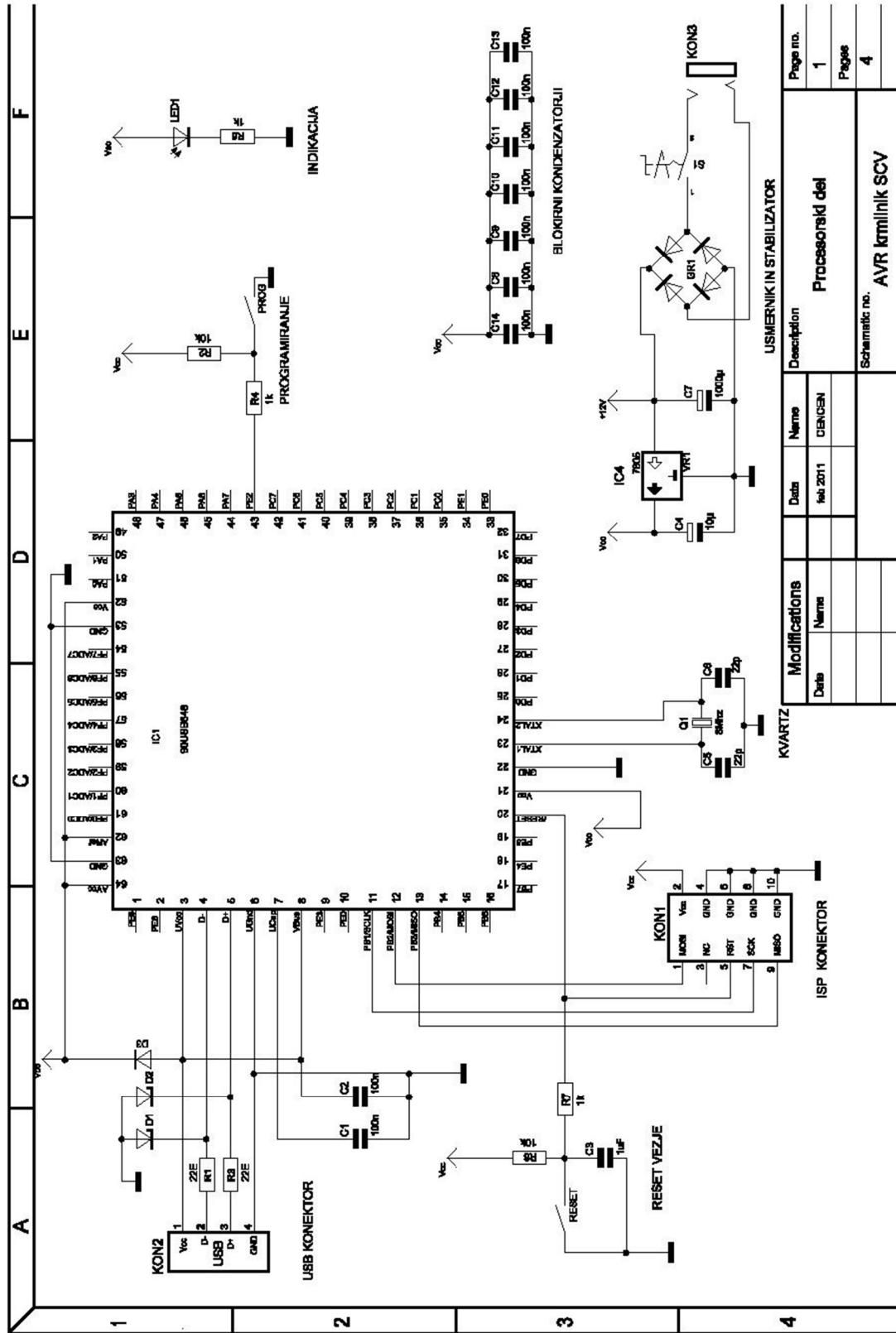
## 7 Viri in literatura

- <http://www.datasheetcatalog.com/>
- <https://www.google.si/webhp?hl=sl&tab=iw>
- <https://www.google.si/imghp?hl=sl&tab=wi>

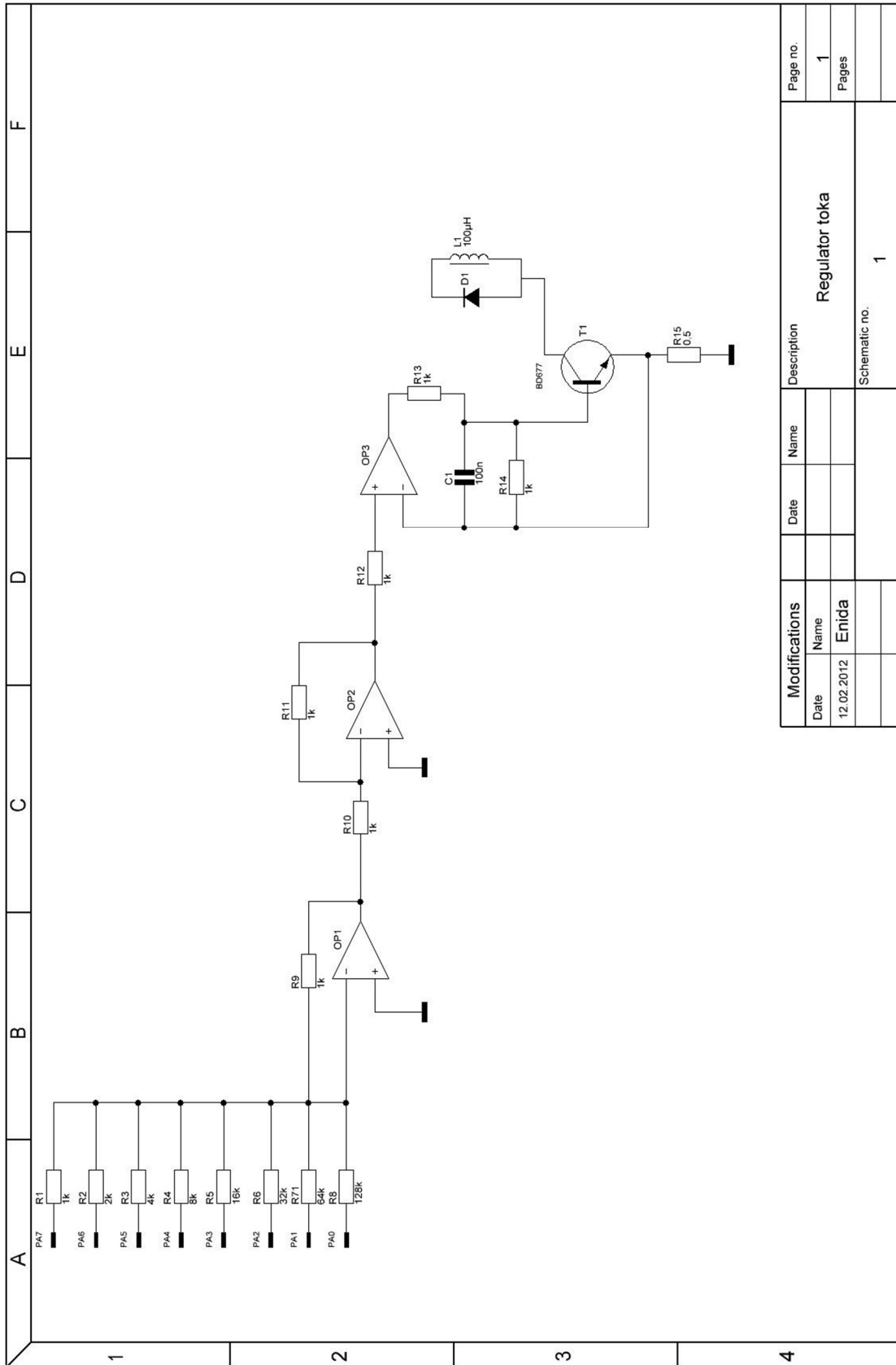
## 8 Priloge



Priloga 1: Shema vezja krmilnika (LCD in tipkovnica)

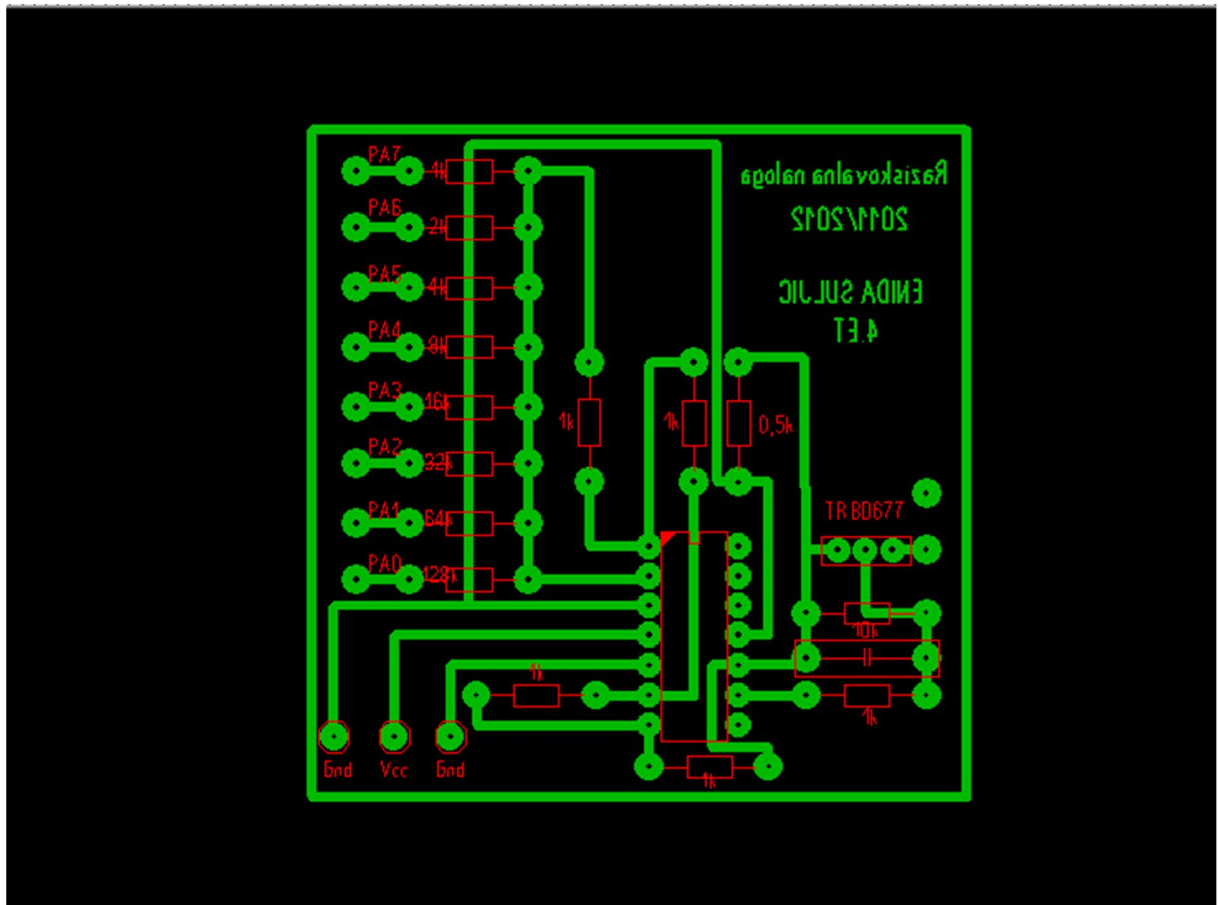


Priloga 2: Shema vezja krmilnika (Procesorski del)

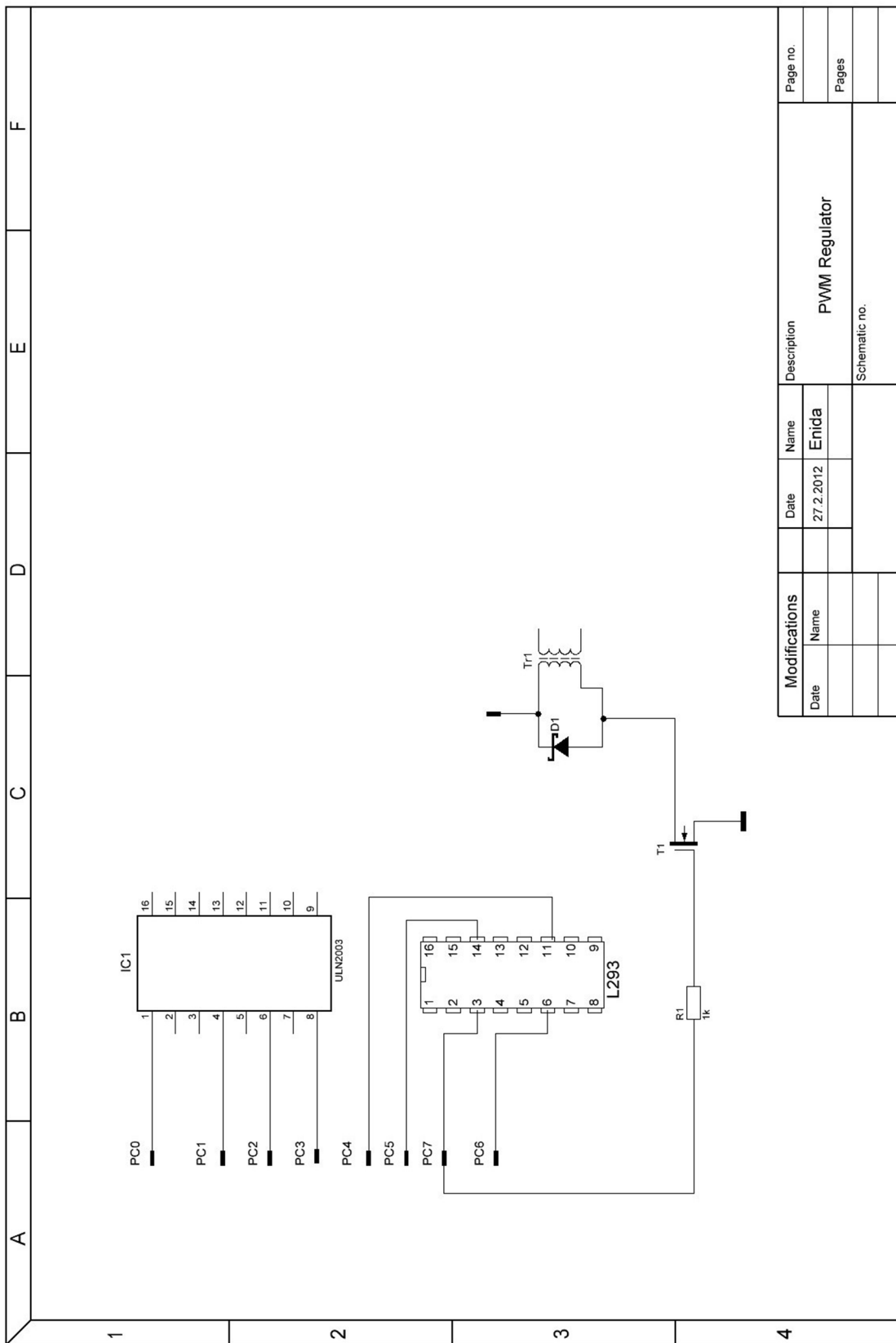


Modifications		Date	Name	Description	Page no.
		12.02.2012	Enida	Regulator toka	1
				Schematic no.	1

Priloga 3: Shema vezja za regulator toka



*Priloga 4: Tiskano vezje za regulator toka1*



Priloga 5: Shema vezja PWM regulatorja



**'Program za krmiljenje toka čez tuljavo**

**\$prog &HEC , &H5E , &HDF , &HF3** ' generated. Take care that the chip supports all fuse bytes.

' Datum : 5.marec -program za krmiljenje tuljave z BUZ11, ki je priključen na PC5 preko L293  
' Pozicija Se Meri S Pomočjo Bar Led Diod In Foto Tranzistorjev

' Foto diode so priključene na vhode PA0 do PA5,  
' LED diode pa so priključene na izhode : PC0 -- PC5 (releji se odstranijo)

**Sregfile = "usb646.dat"** ' specify the used micro  
**Scrystal = 8000000** ' used crystal frequency  
**Dim A As Integer**  
**Dim Stevec As Byte** ' stevec za meritev - krmili LED fiode in FT  
**Dim Stev\_pwm As Integer** ' stevec za PWM od 0 do 100%  
**Dim Moc As Integer** ' moč s katero krmilimo magnet  
**Dim Pozicija As Word** ' izmerjena pozicija kroglice

**DDRD = 255**

**Config Lcdpin = Pin , Db4 = Portd.3 , Db5 = Portd.2 , Db6 = Portd.1 , Db7 = Portd.0 , E = Portd.4 , Rs = Portd.5**  
**Config Lcd = 16 \* 2**

**DDRC = 255**  
**PORTC = 0**

**Cls**  
**Lcd "test regulacije za levitacijo"** ' začetni napis, ki je samo na začetku, ' ' nato je zaradi hitrosi displaj neaktive

**Waitms 300**

**Pozicija = 0**

**Do** ' glavna zanka

**For Stevec = 0 To 5**  
**Gosub Meri** ' merjenje pozicije kroglice

**If Pozicija = 1 Then Moc = 0**  
**If Pozicija = 2 Then Moc = 20** ' regulacija moči glede na pozicijo kroglice  
**If Pozicija = 3 Then Moc = 40**  
**If Pozicija = 4 Then Moc = 60**  
**If Pozicija = 5 Then Moc = 90**  
**If Pozicija = 6 Then Moc = 100**

**Next**

**Gosub Pwm** ' krmiljenje moči magnet  
**Loop**

**End**  
'-----

```
Meri:                                ' program za merjenje pozicije kroglice
Portc = 48 - 32                       ' prižge LED diodo 6
Waitus 40                             ' počaka da zasveti
If Pina.5 = 1 Then Pozicija = 6

Portc = 48 - 16                       ' prižge LED diodo 5
Waitus 40                             ' počaka da zasveti
If Pina.4 = 1 Then Pozicija = 5

Portc = 48 + 8                       ' prižge LED diodo 4
Waitus 40                             ' počaka da zasveti
If Pina.3 = 1 Then Pozicija = 4

Portc = 48 + 4                       ' prižge LED diodo 3
Waitus 40                             ' počaka da zasveti
If Pina.2 = 1 Then Pozicija = 3

Portc = 48 + 2                       ' prižge LED diodo 2
Waitus 40                             ' počaka da zasveti
If Pina.1 = 1 Then Pozicija = 2

Portc = 48 + 1                       ' prižge LED diodo 1
Waitus 40                             ' počaka da zasveti
If Pina.0 = 1 Then Pozicija = 1

Portc = 48
Return
```

<b>Pwm:</b>	' program za krmiljenje magneta
<b>For Stev_pwm = 1 To 100</b>	' natančnost PWM je 1%
<b>If Moc &gt; Stev_pwm Then</b>	' FET je vezan na PORTC.7
<b>Set PORTC.7</b>	
<b>Else</b>	' ga prižiga in ugaša
<b>Reset PORTC.7</b>	
<b>End If</b>	' frekvenca PWM je 100x100mikro sekund= 100Hz
<b>Waitus 100</b>	
Next	
Return	

*Priloga 6: Program v Bascomu*