

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

MLADI RAZISKOVALCI ZA RAZVOJ ŠALEŠKE DOLINE

RAZISKOVALNA NALOGA

IZDELAVA LINEARNEGA POSPEŠEVALNIKA

Tematsko področje: **ELEKTROTEHNIKA, ELEKTRONIKA IN ROBOTIKA**

Avtorja:

Blaž Hleb, 4. ET

Jaka Vavdi, 4. ET

Mentor:

Klemen Hleb, dipl. inž. elektrotehnike (UN)

Somentor:

Matjaž Žerak, univ. dipl. inž. elektrotehnike

Velenje 2016

Raziskovalna naloga je bila opravljena na ŠC Velenje, Elektro in računalniški šol, v šolskem letu 2016/17.

Mentor: Klemen Hleb, dipl. inž. Elektrotehnike (UN)

Somentor: Matjaž Žerak, univ. dipl. inž. elektrotehnike

Datum predavitve:

KLJUČNA DOKUMENTACIJSKA INFORMACIJA

ŠD ŠC Velenje, šolsko leto 2016/17

KG elektrotehnika/magnetika/linearni pospeševalnik

AV HLEB, Blaž/VAVDI, Jaka

SA HLEB, Klemen/ŽERAK, Matjaž

LE ŠUSTER, Lidija

KZ 3320 Velenje, SLO, Trg mladosti 3

ZA ŠC Velenje, Elektro in računalniška šola

LI 2017

IN IZDELAVA LINEARNEGA POSPEŠEVALNIKA

TD RAZISKOVALNA NAOGA

OP VII, 34 s., 22 sl., 1 preg., 3 graf.

IJ SL

JI sl

AI Za to raziskovalno nalogo smo se odločili, ker smo želeli izdelati delujoč linearni pospeševalnik. Skozi raziskave in testiranja smo ugotovili, katera od omenjenih možnosti je najboljša za polnjenje kondenzatorjev. Naloga je zahtevala izdelavo lastnega merilnika hitrosti, saj smo merili izhodno hitrost. Meritve hitrosti smo izvedli z različnimi projektili in skozi meritve ugotovili, kateri je najprimernejši. Dobljene rezultate smo analizirali in obrazložili. Na podlagi tega smo hipoteze potrdili ali ovrgli.

KEY WORDS DOCUMENTATION

ND ŠC Velenje, 2016/17

CX electrotehnic/magnetics/linear accelerator

AU HLEB, Blaž/VAVDI, Jaka

AA HLEB, Klemen/ŽERAK, Matjaž

PR ŠUSTER, Lidija

PP 3320 Velenje, SLO, Trg mladosti 3

PB ŠC Velenje, Elektro in računalniška šola

PY 2017

TI LINEAR ACCELERATOR

DT RESEARCH WORK

NO VII, 34 p., 22 pic., 1 tab., 3 graf.

LA SL

AL sl/en

AB We decided for this research because we wanted to build working linear accelator. Through the researches and testing we found out which of the mentioned possibilities is the best for charging the capacitors. We needen to build our own speedometer, because we mesasured output velocity. We used different projectiles for velocity measurements and through the researches we found out which of projectiles is most suitable. We analysed and explained the given resaults. On the base of resaults the hypothesis were confirmed or rejected.

KAZALO

1 UVOD	1
1.1 Hipoteze.....	1
2 PREGLED LINEARNIH POSPEŠEVALNIKOV	2
2.1 Kaj je linearni pospeševalnik?.....	2
2.2 Sestavni deli	2
2.2.1 Lakirana bakrena žica	2
2.2.2 Tuljavnik.....	2
2.2.3 Tuljava	2
2.2.4 Kondenzatorji	3
2.2.5 DC/DC-pretvornik	3
2.2.6 Cev	3
2.2.7 Izstrelek.....	3
3 IZDELAVA LINEARNEGA POSPEŠEVALNIKA.....	4
3.1 Izdelava tuljave.....	4
3.2 Izdelava tuljavnika	4
3.2.1 3D-printanje	5
3.2.2 Solidworks	6
3.3 Način polnjenja kondenzatorjev	7
3.3.1 Polnjenje z DC-DC-ojačevalnikom	7
3.3.2 Polnjenje z avtotransformatorjem.....	8
3.3.3 Polnjenje z 9 V baterijo	9
3.4 Dimenzioniranje projektila.....	10
3.4.1 Vpliv oblike na projektil.....	10
3.4.2 Dolžina projektila	11
3.4.3 Material projektila	11
3.4.4 Masa projektila	11
3.4.5 Projektil dimenzij 25 x 6.5 mm	12
3.4.6 Projektil dimenzij 35 x 6.5 mm	12
3.4.7 Projektil dimenzij 50 x 6.5 mm	13
4 MERJENJE HITROSTI.....	14
4.1 IR-dioda	14

4.1.1 IR-dioda kot delilnik napetosti	14
4.1.2 Kaj je Arduino?.....	15
4.1.3 Zakaj Arduino?	16
4.1.4 LCD-display	17
4.1.5 Meritve.....	17
4.2 Odzivni čas mikrokontrolerja Arduino.....	18
4.2.1 Spominski osciloskop	18
4.2.2 Meritev odzivnega časa	19
5 REZULTATI.....	20
6 DISKUSIJA IN ZAKLJUČEK	23
7 POVZETEK	25
8 ZAHVALA	25
9 PRILOGE.....	26
10 VIRI	28

KAZALO PREGLEDNIC

Tabela 1: Rezultati meritev hitrosti.....	20
---	----

KAZALO SLIK

Slika 1: Navijanje tuljave.....	4
Slika 2: Tiskanje delov tuljavnika.....	5
Slika 3: Tehnična risba tuljavnika.....	5
Slika 4: 3D-tiskalnik	6
Slika 5: Solidworks	6
Slika 6: DC-DC-ojačevalnik	7
Slika 7: 3-fazni avtotransformator	8
Slika 8: Modul z vgrajenim avtotransformatorjem	8
Slika 9: Merjenje izhodne napetosti ojačevalnika.....	9
Slika 10: Vpliv oblike na pot projektila z ravnim zadnjim delom [6]	10
Slika 11: Vpliv oblike na pot projektila z zaobljenim zadnjim delom [6].....	10
Slika 12: Projektil 25 x 6.5 mm poln	12
Slika 13: Projektil 25 x 6.5 mm votel	12
Slika 14: Projektil 35 x 6.5 mm poln	12
Slika 15: Projektil 35 x 6.5 mm votel	12

Slika 16: Projektil 50 x 6.5 mm poln	13
Slika 17: Projektil 50 x 6.5 mm votel	13
Slika 18: Vezje senzorja za zaznavanje položaja projektil	14
Slika 19: Arduino Mega 2560 [9]	16
Slika 20: Vezava LCD displaya [8]	17
Slika 21: LCD display [8]	17
Slika 22: Meritev odzivnega časa Arduina	19

KAZALO GRAFOV

Graf 1: Primerjava hitrosti votlega in polnega 50mm projektila	21
Graf 2: Primerjava hitrosti votlega in polnega 35mm projektila	21
Graf 3: Primerjava hitrosti votlega in polnega 25mm projektila	22

KAZALO PRILOG

Priloga 1: Merilnik hitrosti.....	26
Priloga 2: Navijanje tuljave.....	26
Priloga 3: Program za merjenje hitrosti	27
Priloga 4: Polnjenje kondenzatorjev	27

SEZNAM OKRAJŠAV

Seznam simbolov

v	hitrost
t	čas
s	pot
g	gravitacijski pospešek
W_k	kinetična energija

1 UVOD

Kot vsi mladi raziskovalci sva tudi midva iskala nekaj, kar bi lahko izdelala in morda tudi izboljšala. Zato sva se odločila za izdelavo linearnega pospeševalnika. Človek že od nekdaj uporablja različne vire energije za pogon raznovrstnih strojev in naprav. V današnjem času napredkov in čiste energije je to elektrika. Zakaj torej ne bi učinki električne energije zamenjali zastarelega smodnika ali pa goriva, ki ga potrebujemo za izstrelitev rakete. Namen najine raziskovalne naloge je bil zasnovati in izdelati delujoč linearni pospeševalnik. Linearni pospeševalnik potrebuje za svoje delovanje samo električni tok, ki ga je potrebno v pravem trenutku izklopiti, da dosežemo maksimalno hitrost. Princip magnetne puške je tuljava, navita okoli cevi, skozi katero izstrelimo feromagnetni projektil.

Za izdelavo linearnega pospeševalnika z kar največjo možno uporabnostjo in izkoristkom so najprej potrebne raziskave. Raziskovala sva vpliv oblike izstrelka na izhodno hitrost, vpliv oblike in dolžine tuljave na izstrelek. Potrebno je bilo tudi raziskati vpliv kondenzatorjev različnih velikosti na moč pospeševalnika.

1.1 Hipoteze

- Linearni pospeševalnik lahko izdelamo z osnovnim znanje o elektrotehniki.
- Cena izdelave linearnega pospeševalnika ne presega 100 €.
- Izhodna hitrost je primerljiva z malo kalibrskimi puškami.
- Polnjenje kondenzatorjev z 9 V baterijo bo enako učinkovito kot polnjenje iz omrežnega vira.
- Lastnosti projektila vplivajo na izhodno hitrost.

2 PREGLED LINEARNIH POSPEŠEVALNIKOV

2.1 Kaj je linearni pospeševalnik?

Linearni pospeševalnik je pospeševalnik, ki je sestavljen iz ene ali več tuljav, ki so zaporedno nanizane na cev pospeševalnika. Tuljave so uporabljene kot elektromagneti. Uporablja magnetno polje, da pospeši feromagnetni projektil.

2.2 Sestavni deli

Linearni pospeševalnik je sestavljen iz ene ali več tuljav, ki so zaporedno nanizane na cev. Glede na število tuljav se delijo na enostopenjske ter večstopenjske. Za napajanje tuljav uporabimo visokonapetostne kondenzatorje.

- **2.2.1 Lakirana bakrena žica**
Za navijanje tuljave se uporablja bakrena žica. Ta žica mora biti izolirana z lakom, da med ovoji tuljave ne pride do stika.
- **2.2.2 Tuljavnik**
Tuljavnik je sestavni del tuljave. Poskrbi, da ostane navita lakirana bakrena žica na mestu. Tuljavnik je po navadi narejen iz različnih plastičnih mas ali drugih materialov. Ti materiali pa ne smejo imeti magnetnih lastnosti ter ne smejo biti prevodni zaradi vrtničnih tokov, ki nastanejo pri hitri spremembi magnetnega polja.
- **2.2.3 Tuljava**
Tuljava je glavni del linearnega magnetnega pospeševalnika. Sestavljena je iz lakirane bakrene žice, ki je navita na tuljavnik s poljubim številom ovojev. S pomočjo tuljav izstrelimo izstrelek.

Ko skozi tuljavo steče električni tok, le-ta ustvari magnetno polje, ki deluje s silo na feromagnetni izstrelek. Ker velikost toka vpliva na gostoto magnetnega polja, je potrebno v zelo kratkem času zagotoviti velik tokovni impulz.

- **2.2.4 Kondenzatorji**

Kondenzator je pasivni električni element, ki v enosmernem tokokrogu predstavlja neskončno upornost, v izmeničnem tokokrogu pa navidezno prevaja. Pri linearnem magnetnem pospeševalniku se kondenzator uporablja zaradi impulznega napajanja. Zaradi moči pospeševalnik moramo izbrati kondenzatorje, ki zdržijo večje napetosti 200 V + in imajo velike kapacitivnost.

- **2.2.5 DC/DC-pretvornik**

DC/DC-pretvornik se uporablja za povečanje enosmerne napetosti. Pri pospeševalniku ga uporabimo za polnjenje kondenzatorjev. Tako lahko pridemo od malih napetosti + 5 V, + 12 V do večjih napetosti 200 V +, ki so primerne za polnjenje kondenzatorjev.

- **2.2.6 Cev**

Za cev pospeševalnika izberemo cev, ki je iz plastike ali drugih materialov. Vendar ti materiali ne smejo biti prevodni ali feromagnetni. Stena cevi mora biti čim tanjša, da se čim manj magnetnega polja porazgubi.

- **2.2.7 Izstrelek**

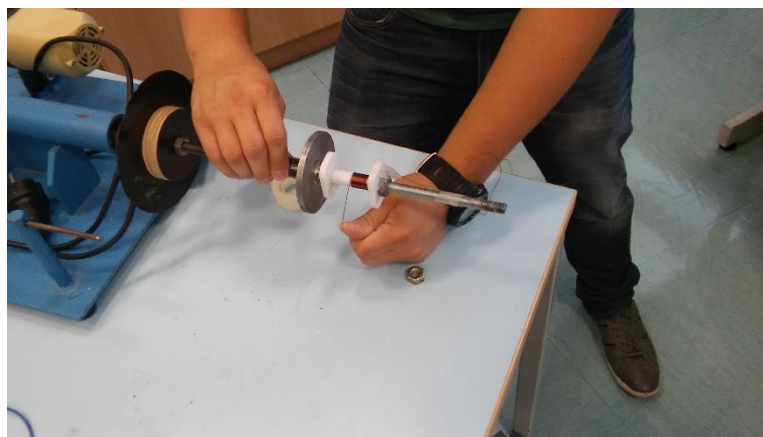
Izstrelek mora biti iz feromagnetnega materiala (železo, kobalt, nikelj in njihove zlitine). Izstrelek mora biti aerodinamične oblike, da nam omogoča doseganje višjih hitrosti ter čim večjo natančnost, prav tako pa mora imeti pravilno razporeditev teže, da se v zraku ne začne prevračati.

3 IZDELAVA LINEARNEGA POSPEŠEVALNIKA

3.1 Izdelava tuljave

Tuljava je glavna komponenta linearnega magnetnega pospeševalnika, zato je njeno dimenzioniranje zelo pomembno. Za začetek smo dolžino tuljave izbrali poljubno, da bi ugotovili, katera tuljava ima močnejši vpliv na feromagnetni izstrelek. Izdelali smo 4 cm ter 10 cm dolgo tuljavo. Izdelali smo štiri 4 cm velike tuljave ter eno 10 cm veliko tuljavo. S pomočjo stroja za navijanje tuljav smo na tuljavnik navili lamilirano bakreno žico. Število ovojev smo izbrali poljubno. Na vsak tuljavnik smo navili drugačno število ovojev, da smo pozneje lahko primerjali vpliv števila ovojev na izhodno hitrost. Število ovojev se je gibalo med 300 in 500 ter do 1000 na največji tuljavi.

Daljša kot je tuljava, dlje časa bo projektil potreboval do centra tuljave. Z večanjem števila ovojev dosežemo gostejše magnetno polje, kar pomeni večjo moč pospeševalnika. Daljša kot je žica na tuljavi, večja kot je njena induktivnost ter njena magnetna upornost, daljši bo tokovni pulz.

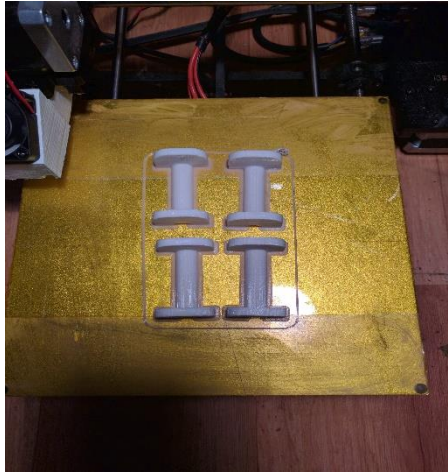


Slika 1: Navijanje tuljave

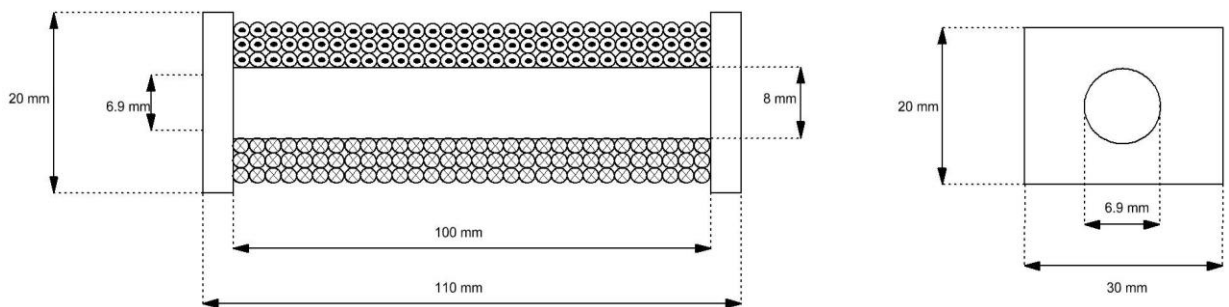
3.2 Izdelava tuljavnika

Tuljavnik je bil izdelan iz treh različnih delov, in sicer iz spodnje in zgornje polovice ter štirih zatičev. Ta način oblikovanja nam je omogočil, da smo lahko tuljavnik brez težav nataknil na

cev. Dele za tuljavnik smo narisali v programu za 3D-modeliranje SolidWorks ter jih nato natisnili s 3D-tiskalnikom.



Slika 2: Tiskanje delov tuljavnika

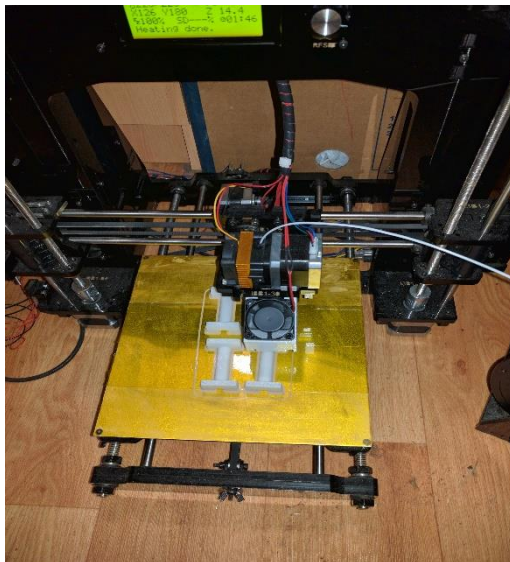


Slika 3: Tehnična risba tuljavnika

3.2.1 3D-printanje

S pomočjo 3D-tiskalnik smo natisnili dele za tuljavnik. Za tiskanje smo uporabili plastiko PLA. Edina slabost tega materiala je, da se lahko deformira zaradi toplote. Ta slabost pa lahko povzroči kar nekaj težav med pospeševanjem projektila. Saj se zaradi toka, ki steče skozi

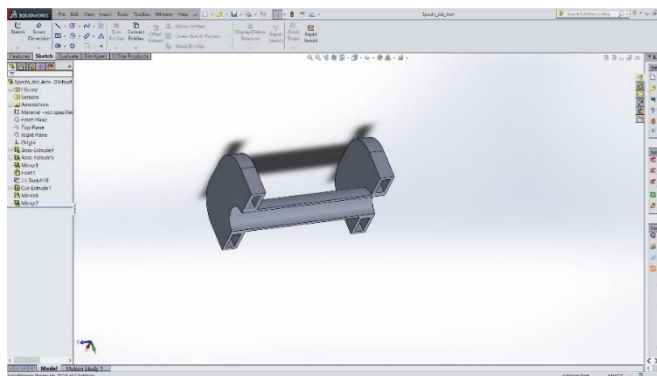
tuljavo, le-ta segreva in lahko zaradi temperature povzroči poškodbe na tuljavniku. 3D-tiskalnik deluje na principu izstiskanja segretega materiala skozi šobo. Giblje se po treh prostorskih oseh x, y, z.



Slika 4: 3D-tiskalnik

3.2.2 Solidworks

SolidWorks je programski paket za računalniško podprto konstruiranje in inženirske analize. Uporablja se tudi pri enostavnejših simulacijah in inženirskih analizah. V osnovi zajema 3D-modelirnik, modul za sestavljanje in modul za izdelavo tehniške dokumentacije. Z mnogimi dodatki je uporaben na različnih tehniških področjih: strojništvo, elektrotehnika, lesarstvo itd.



Slika 5: Solidworks

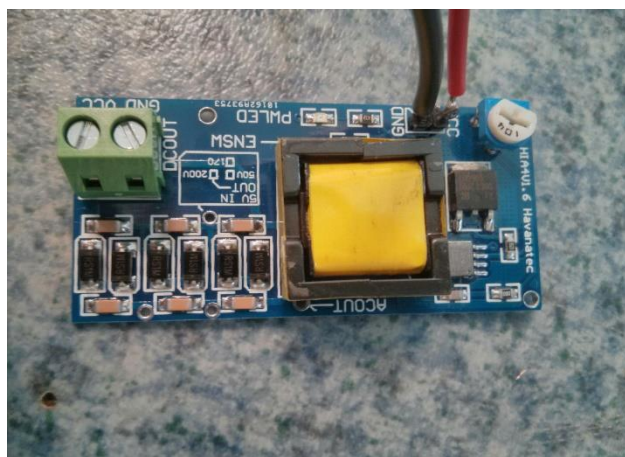
3.3 Način polnjenja kondenzatorjev

Polnjenje kondenzatorjev predstavlja enega izmed večjih problemov pri projektu, in sicer zaradi potrebe po visoki napajalni napetosti (200 V–400 V). Ena izmed ovir je ta, da se enosmernih veličin ne da transformirati. Zato potrebujemo razsmerniško vezje za pretvorbo iz enosmerne v izmenično napetost, transformator za dvig napetosti ter nato usmernik, ki ponovno usmeri izmenično napetost v enosmerno.

Zato smo uporabili dve metodi, in sicer DC-DC-ojačevalnik ter avtotransformator.

3.3.1 Polnjenje z DC-DC-ojačevalnikom

Za polnjenje kondenzatorjev uporabimo visokonapetostni DC-DC-ojačevalni pretvornik. Izhodna napetost tega pretvornika je od 300 V DC do 1200 V DC. Ima pa tudi izhod z manjšo napetostjo 100 V +. S pomočjo pretvornika lahko polnimo 200 V + kondenzatorje z manjšimi napetostmi od 5-12 V. Če želimo polniti kondenzatorje, moramo med plus pol pretvornika in kondenzatorja vezati upor, saj drugače ustvarimo kratek stik. Ta upor je lahko poljubne velikosti. Manjši ko je upor, hitreje se bodo kondenzatorji polnili. Zaradi majhnega izhodnega toka se kondenzatorji polnijo dlje časa.



Slika 6: DC-DC-ojačevalnik

3.3.2 Polnjenje z avtotransformatorjem

Avtotransformator ima na toroidnem jedru navito navitje. Nima ločenega primarnega in sekundarnega navitja. Med priključni sponki priključimo 230 V izmenične napetosti. Z drsnikom drsimo po navitju in s tem nastavljamo željeno vrednost. Glavni namen avtotransformatorja je, da z njim višamo ter nižamo napetost. Omogoča nam tudi dvig napetosti nad napajalno napetost. Na primer, če nanj priključimo napetost 230 V, lahko iz njega dobimo napetosti do 380 V ali več. To dosežemo takrat, ko z drsnikom preidemo na priključno sponko za 230 V.

Ker pa lahko z avtotransformatorjem spreminjamo samo izmenično napetost, potrebujemo še usmernik. Z usmernikom pretvorimo izmenično napetost v enosmerno.

Uporabili smo 3-fazni variak, ki ima enosmerni izhod 0 – 380 V/5 A.



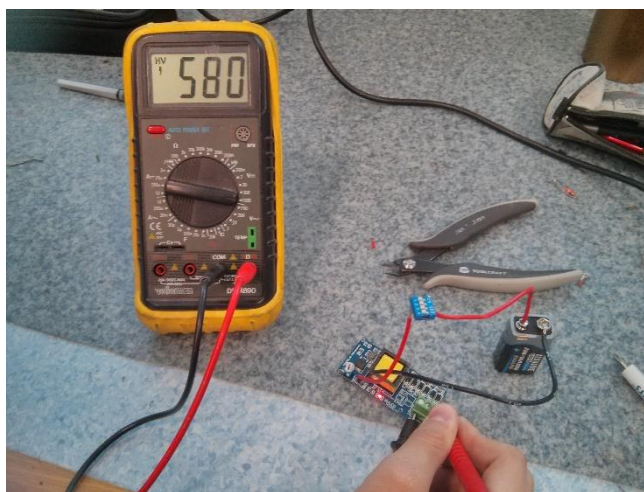
Slika 7: 3-fazni avtotransformator



Slika 8: Modul z vgrajenim avtotransformatorjem

3.3.3 Polnjenje z 9 V baterijo

Eden izmed najlažjih, a ne najbolj učinkovitih, načinov polnjenja kondenzatorjev je kombinacija DC-DC-ojačevalnika ter 9 V baterije. 9 V baterija nam služi kot vir napajanja, s katerim napajamo DC-DC-ojačevalnik. Hkrati pa z ojačevalnikom ojačamo enosmerno napetost, ki jo dobimo iz 9 V baterije. Izhodno napetost lahko poljubno reguliramo s potenciometrom. Z višanjem upornosti na potenciometru se izhodna napetost manjša, z nižanjem upornosti pa se izhodna napetost večja. Izhodno napetost lahko v našem primeru izberemo med 300 V ter do 900 V. V našem primeru smo izbrali 180V, saj so kondenzatorji narejeni za napetost 200V. Med plus pol kondenzatorja ter plus pol izhoda je potrebno vezati upor. Z uporom ustvarimo breme in s tem preprečimo kratek stik, ki bi lahko posledično vplival na delovanje vezja. V našem primeru smo uporabili najmanjši možni upor vrednosti 1 Ω moči 0.25 W.



Slika 9: Merjenje izhodne napetosti ojačevalnika

3.4 Dimenzioniranje projektila

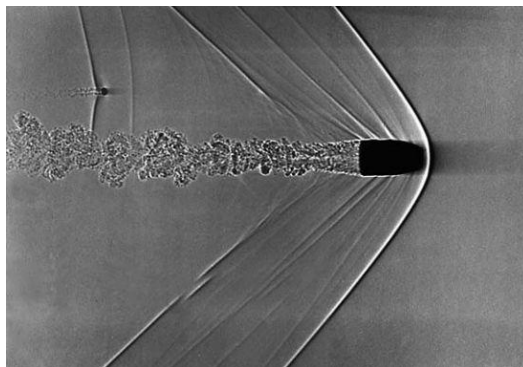
Projektil mora biti dimenzioniran tako, da ustreza širini cevi oziroma je lahko za odtenek manjši. V našem primeru je imela cev notranji premer 7 mm, premer projektila pa je bil 6,5 mm. Vendar moramo paziti, da je zračna reža čim manjša.

3.4.1 Vpliv oblike na projektil

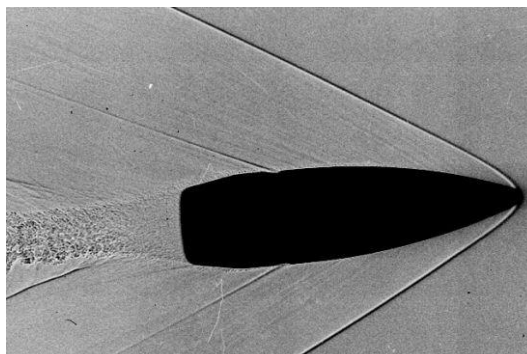
Na spodnjih dveh slikah vidimo, kako vpliva oblika projektila na njegovo pot. Projektil s topo konico ima večji zračni upor, kar posledično vpliva tudi na hitrost projektila. Projektil s koničasto konico ima manjši zračni upor in lahko dosega večje hitrosti.

Zelo pomembna pa je tudi oblika zadnjega dela projektila. Ko izstrelimo projektil, se za njim začne zrak vrtinčiti oziroma začne ustvarjati turbulenco.

Bolj kot je zadek projektila raven, večji je vpliv turbulence na projektil. S povečanjem naklona zadka projektila zmanjšamo vpliv turbulence na projektil, s tem mu izboljšamo stabilnost v letu.



Slika 10: Vpliv oblike na pot projektila z ravnim zadnjim delom [6]



Slika 11: Vpliv oblike na pot projektila z zaobljenim zadnjim delom [6]

3.4.2 Dolžina projektila

S pravilno dolžino dosežemo večjo silo na projektil na njegovi poti čez tuljavo. Če bi imeli projektil, ki je daljši od polovične dolžine tuljave, bi tako dosegli slabšo izhodno hitrost. Ker, ko bi projektil prišel čez polovico tuljave, bi nanj že delovala zavorna sila. Vendar pa lahko to slabost odpravimo s pravočasno prekinitvijo toka.

3.4.3 Material projektila

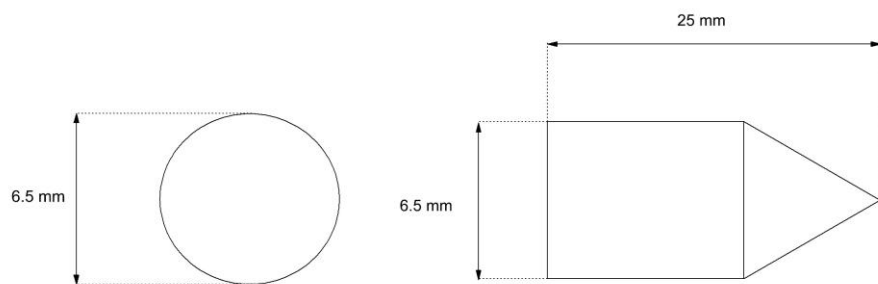
Projektil mora biti iz feromagnetnega materiala. Optimalen material za projektil je neprevoden z močnimi feromagnetnimi lastnostmi. Feromagnetne lastnosti morajo omogočati čim večjo permeabilnost in čim višjo gostoto zasičenja pri čim manjši magnetni poljski jakosti. To pomeni, da se bo pri tokovnem sunku gostota magnetnega pretoka čim bolj povečala. Tako bo tudi sunek sile večji kot pri izstrelku iz drugačnega materiala. Mehko železo je eden izmed najboljših standardnih materialov, saj se hitro namagnetni in razmagnetni ter lahko ga je oblikovati.

3.4.4 Masa projektila

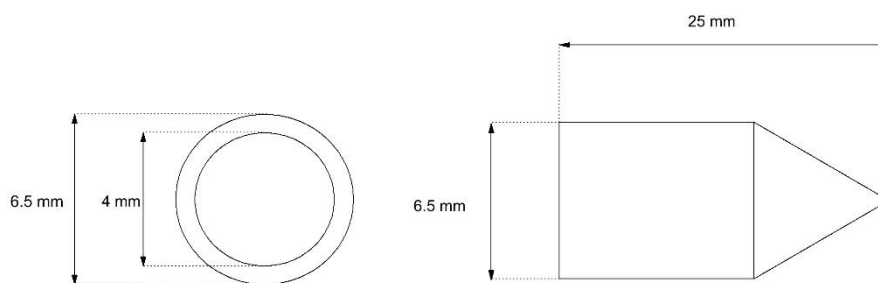
Paziti moramo, da izberemo primerno maso projektila glede na moč magnetnega polja, ki ga proizvede tuljava. Če bomo izbrali pretežak projektil, se s tem posledično zmanjša tudi izhodna hitrost.

To dokazuje enačba: $W_K = \frac{1}{2} * m * v^2$, večja ko je masa, manjša je kinetična energija.

3.4.5 Projektil dimenzij 25 x 6.5 mm

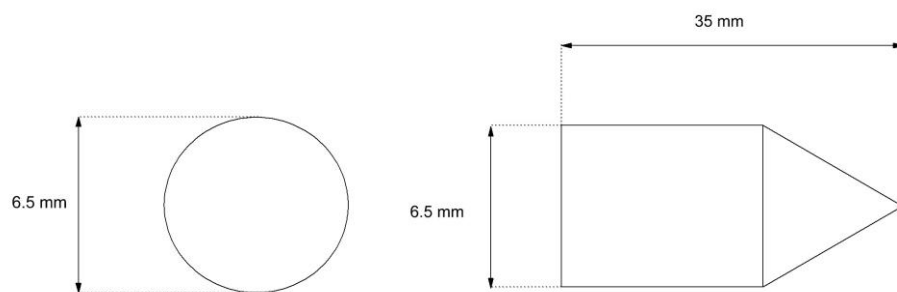


Slika 12: Projektil 25 x 6.5 mm poln

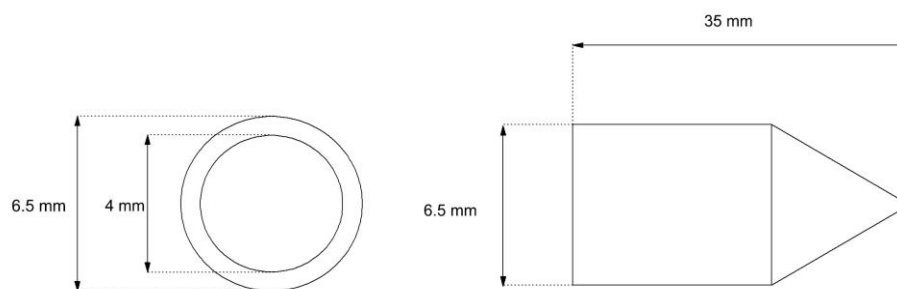


Slika 13: Projektil 25 x 6.5 mm votel

3.4.6 Projektil dimenzij 35 x 6.5 mm

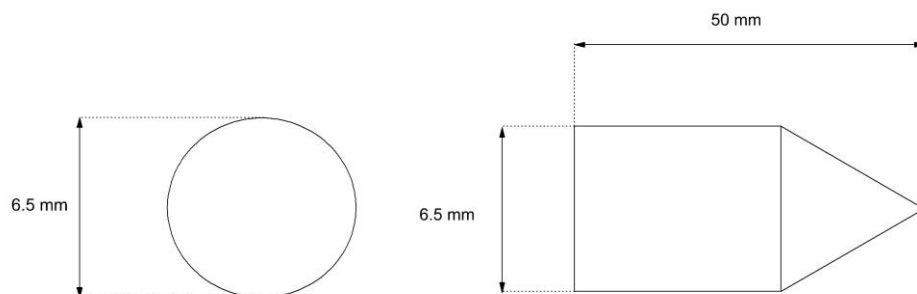


Slika 14: Projektil 35 x 6.5 mm poln

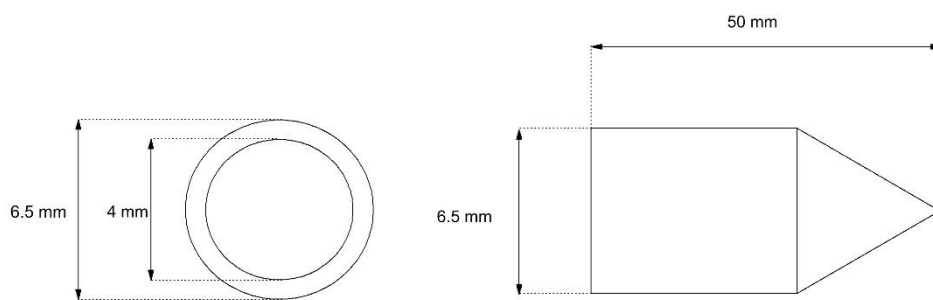


Slika 15: Projektil 35 x 6.5 mm votel

3.4.7 Projektil dimenzij 50 x 6.5 mm



Slika 16: Projektil 50 x 6.5 mm poln



Slika 17: Projektil 50 x 6.5 mm votel

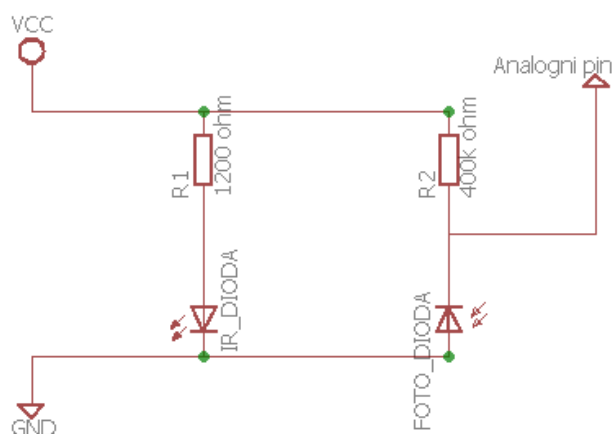
4 MERJENJE HITROSTI

4.1 IR-dioda

IR-dioda oddaja svetlobo v infrardečem spektru. Oddaja valovanje od 700 nm do 1mm. V elektroniki se uporablja predvsem za daljinsko upravljanje televizije in ostalih vezij. Lahko se uporabljajo tudi kot luč, ki pa je nevidna našim očem. Človeško oko ne zazna infrardeče svetlobe zaradi njene valovane dolžine. Njeno delovanje lahko opazujemo preko kamere, saj lahko le tako vidimo, ali dioda deluje.

4.1.1 IR-dioda kot delilnik napetosti

V našem primeru smo IR-diodo uporabili kot senzor za zaznavanje položaja projektila. Na sprejemni diodi smo na katodo zaporedno vezali upor. S tem smo naredili delilnik napetosti. Večja kot je upornost, manjša bo začetna napetost, vendar s tem večamo občutljivost vezja na motnje. Ker različni viri, kot so sonce, žarnice, celo človeško telo, oddajajo infrardečo svetlobo, je potrebno IR-diodo ustrezno zaščititi. Izhodna napetost delilnika je odvisna od upornosti sprejemne diode. Diodo napajamo z napetostjo 5 V. Ko med oddajno ter sprejemno diodi ni nobenega predmeta, se napetost spusti pod 1 V, kar nam zagotovi logično 0. Saj se upornost sprejemne diode poveča, kar povzroči manjši padec napetosti na uporu, ki je vezan zaporedno. Ko pa med sprejemno in oddajano diodo pride predmet, v našem primeru je to projektil, se napetosti dvigne na 4.8 V, kar nam zagotovi logično 1. V tem primeru se



upornost diode zmanjša, kar povzroči, da se padec na uporu poveča.

Slika 18: Vezje senzorja za zaznavanje položaja projektil

4.1.2 Kaj je Arduino?

Arduino je odprtokodni mikrokrmilnik, ki se uporablja za najrazličnejše projekte tako v elektroniki kot v robotiki. Zasnovan je na Atmel tehnologiji. Arduino je sestavljen iz programirljive ploščice ter programske opreme, s katero zapisujemo program na krmilnik. Programska oprema uporablja poenostavljeno različico programskega jezika C++ ali programski jezik C. Sestavljena je iz programskega jezika, zagonskega nalagalnika, ki se izvaja na mikrokrmilniku ter prevajalniku. Ploščica je sestavljena iz komponent, ki skrbijo za delovanje (5 V stabilizator, 18 MHz kristalni oscilator ...) ter iz 8-, 16- ali 32-bitnega AVR-mikrokrmilnika. Najpogostejši tipi teh mikrokrmilnikov so ATmega8, ATmega168, ATmega1280 in ATmega2560. Standardni priključki omogočajo Arduinu priklop vrste različnih senzorjev ter ščitov.

Program za Arduina se lahko napiše v vsakem programskem jeziku v povezavi s pretvornikom v binarni strojni jezik. Integrirano razvojno okolje (IDE) je aplikacija, ki je zapisana v programskem jeziku Java. Program je narejen tako, da nam pomaga med samim programiranjem. Če storimo napako, nam bo obarval vrstico pred napako in s tem olajšal samo programiranje. Program vsebuje tudi prostor, kjer se izpiše besedilo v primeru napake ter ko naložimo program in orodno vrstico z ostalimi funkcijami. Program, napisan z IDE za Arduina, se imenuje skica. V program lahko naknadno vstavimo knjižnice za posamezne senzorje ali ščite. Razvojno okolje si lahko prenesemo z interneta.

Skica oziroma program je sestavljen vsaj iz dveh funkcij:

- Setup(): Ta funkcija se izvede samo na začetku, ko zaženemo program, oziroma vsakič, ko priključimo napajanje. V tej funkciji inicializiramo spremenljivke, definiramo vhode in izhode ter vstavljamo željene knjižnice.
- Loop(): V to funkcijo napišemo glavni program, ponavlja se tako dolgo, dokler ne ugasnemo mikrokrmilnika.

Programska oprema podpira operacijske sisteme:

- Windows
- Linux
- iOS

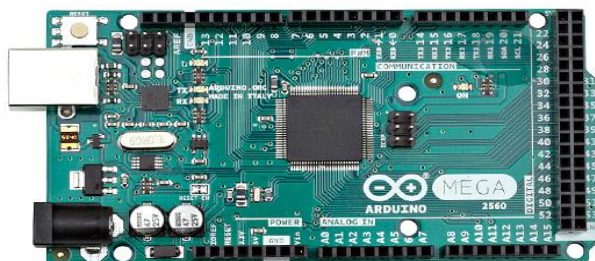
Pred prenosom moramo izbrati razvojno okolje za ustrezen operacijski sistem. Ko razvojno okolje prenesemo in ga namestimo, lahko začnemo s pisanjem programa oziroma skice. Pred prenosom programa na mikrokrmilnik je potrebna izbira ustrezne ploščice. Za nastavitve v orodni vrstici kliknemo na Orodja → Plošča ter izberemo ploščo, ki jo imamo v uporabi. Izbrati moramo tudi vrata, ki nam omogočijo, da program preko USB-ja prenesemo na mikrokrmilnik. V računalnik vklopimo USB-kabel, v orodni vrstici kliknemo na Orodja → Vrata → izberemo vrata, ki nam jih ponudi program (COM 1, COM 3 ...).

Med programiranjem ali po programiranjem lahko preverjamo, ali je s programom vse v redu. V primeru napake nam v prostoru za besedilo izpiše, kaj smo storili narobe ter nam obarva vrstico pred napako. Program nam omogoča tudi spremljanje spremenljivk in drugih veličin s pomočjo serijskega vmesnika. Za serijski vmesnik kliknemo na orodno vrstico Orodja → Serijski vmesnik ter nastavimo ustrezno hitrost prenosa (baud rate).

4.1.3 Zakaj Arduino?

Zaradi razmerja med ceno ter uporabnostjo, saj za zelo malo ceno dobimo mikrokrmilnik, s katerim lahko naredimo praktično vse. Razlog je tudi programsko okolje, ki je zelo prijazno do programerja, saj s svojim naborom funkcij olajša celotno programiranje.

V vezju za meritev hitrosti smo uporabili Arduino Mega 2560. Uporablja ATmelov mikroprocesor ATmega 2560 ter 10-bitni analogno-digitalni pretvornik. Ima 54 digitalnih ter 16 analognih izhodov.

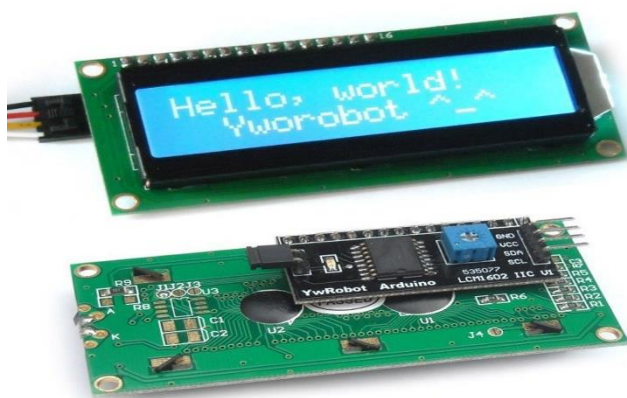


Slika 19: Arduino Mega 2560 [9]

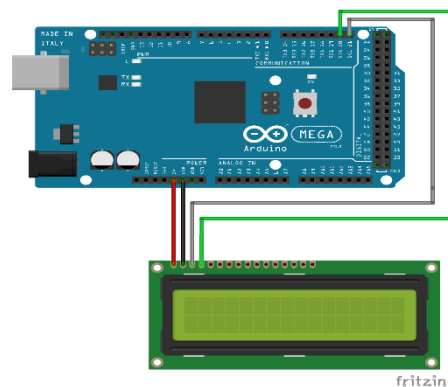
4.1.4 LCD-display

Za izpis hitrosti smo uporabili Arduino 16 x 2 LCD-display. Display uporablja I2C komunikacijo, zato ima samo štiri priključne pine. Pin SRC povežemo na pin SCR na Arduino, pin SDA povežemo na pin SDA na Arduino ter ga priklopimo na napajanje 5 V. V programu napišemo besedilo, ki ga želimo imeti na zaslonu.

Komunikacija po I2C protokolu se uporablja za komunikacijo med integriranimi vezji. Integrirana vezja, ki so vključena v I2C komunikacijo si delijo vodilo, ki je sestavljeno iz dveh aktivnih dvosmernih linij, to sta priključka SCR in SDA. SCR nam služi za določanje hitrosti komunikacije, SDA pa nam služi za prenašanje ukazov in podatkov.



Slika 21: LCD display [8]



Slika 20: Vezava LCD displaya [8]

4.1.5 Meritve

Za meritve izhodne hitrosti smo uporabili dva para IR-diod. Razmak med prvim in drugim parom diod smo nastavili na 0.5 m. Ta razdalja se ne spreminja, saj z njeno pomočjo računamo čas, ki ga projektil potrebuje, da prileti od prvega para diod do drugega. Z dobljenim časom lahko izračunamo hitrost. Hitrosti izračunamo po formuli: $s = v \cdot t \rightarrow$

$$v = \frac{s}{t}.$$

Vežje za merjenje hitrosti smo najprej preizkusili s prostim padom. Cev pospeševalnika skupaj s senzorji smo postavili navpično navzgor. Senzorja smo razmaknili na točno določeno razdaljo zato, da je bila pri vsaki meritvi enaka razdalja. Projektil smo spustili skozi cev in odčitali čas, ki ga je projektil potreboval za opravljeno pot. Za končen izračun hitrosti smo uporabili enačbo:

$$v = g \cdot t.$$

Kasnejše meritve izhodne hitrosti smo naredili s pomočjo Arduina ter IR-diod. Na analogne priključke Arduina smo pripeljali vrednosti delilnika napetosti iz sprejemne strani senzorja za zaznavanje položaja projektila. Uporabili smo dva senzorja za zaznavanje položaja projektila, ki sta bila razmaknjena na razdaljo 0,5 m. S pomočjo teh dveh senzorjev ter programa smo lahko določili čas, ki ga je projektil potreboval od prvega do drugega senzorja ter na podlagi tega izračunali izstopno hitrost.

4.2 Odzivni čas mikrokrmilnika Arduino

Odzivni čas je čas, ki ga krmilnik potrebuje, da obdela sprejeti signal, izvede program ter pošlje signal oziroma vklopi določen izhod. Na primer, imamo tipko, ki je vezana na vhod krmilnika ter lučko, ki je vezana na izhod krmilnika. Ko pritisnemo tipko, krmilnik sprejeti signal obdela, izvede program ter prižge lučko.

4.2.1 Spominski osciloskop

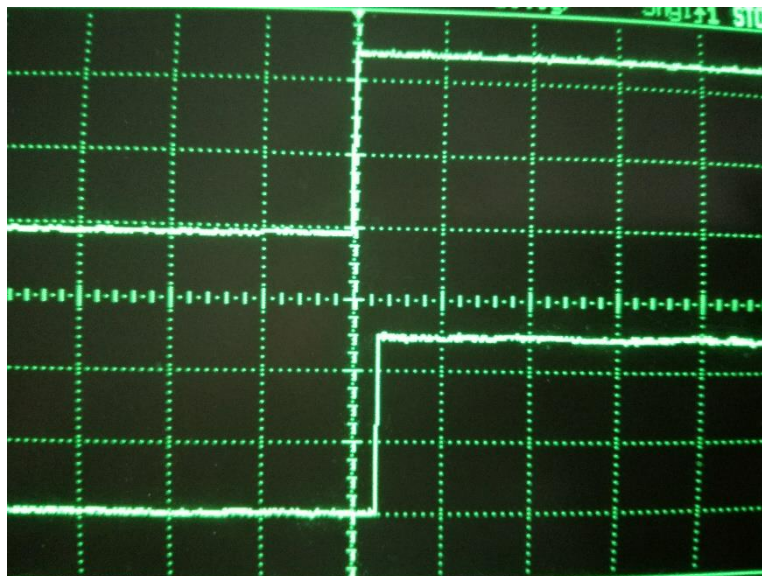
Digitalni osciloskop je postal bistven del opreme tehnikov in inženirjev v razvoju, proizvodnji in vzdrževanju. Omogoča opazovanje časovnega poteka različnih analognih in digitalnih signalov.

Uporabili smo 2-kanalni digitalni spominski osciloskop HP 56410 500MHz. Ta osciloskop nam omogoča merjenje zelo kratkih časovnih intervalov. Omogoča tudi merjenje razlike časa med dvema signaloma. Ker je osciloskop spominski, nam merjena veličina ostane prikazana na zaslonu dokler je ne izbrišemo. S tem lahko zelo natančno razberemo vrednost merjene veličine.

4.2.2 Meritev odzivnega časa

Odzivni čas Arduina smo izmerili s pomočjo 500MHz spominskega osciloskopa. Pri tem uporabimo dva kanala na spominskem osciloskopu. Na prvi kanal povežemo tipko, ki je hkrati vezana na vhod Arduina. Drugi kanal pa povežemo s pinom, ki smo ga definirali kot izhod.

Na osciloskopu smo nastavili čas na 50 μ S na delec.



Slika 22: Meritev odzivnega časa Arduina

Zgornja črta na sliki nam predstavlja prvi kanal osciloskopa, na katerega smo povezali vhodni signal. Spodnja črta nam predstavlja izhodni signal Arduina. Čas, ki ga je Arduino potreboval, da je vhodni signal sprejel ter izvedel program je znašal 13 μ S, kar je zanemarljivo malo.

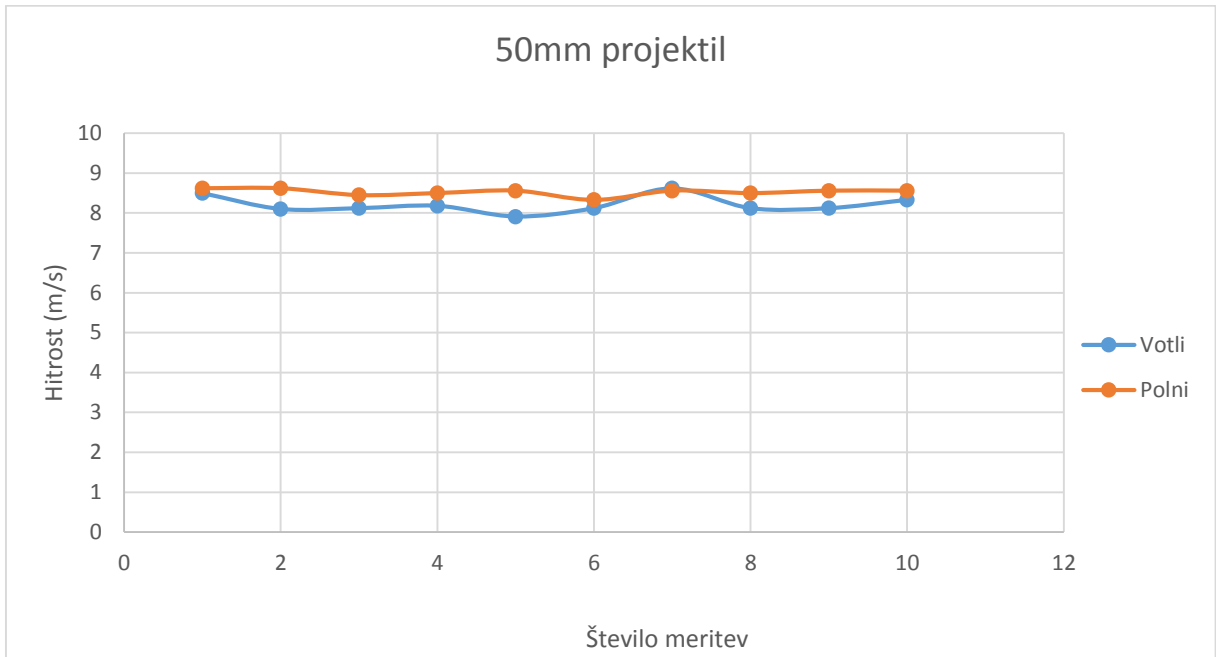
5 REZULTATI

Opravili smo meritve izstopne hitrosti projektila pri pospeševanju z magnetnim pospeševalnikom, pri kateri smo želeli ugotoviti, kako velikost projektila vpliva na izhodno hitrost. Uporabili smo šest različnih projektilov, ki so imeli različne dolžine, trije so bili votli in trije polni, kar je posledično vplivalo na maso vsakega projektila. Za vsak projektil smo naredili po 10 meritev ter nato izračunali povprečno hitrost. S tem smo tudi ugotovili, kakšen projektil bi bil najbolj optimalen za pospeševalnik. Vse meritve so bile opravljene s kapacitivnostjo 1410 uF ter eno tuljavo.

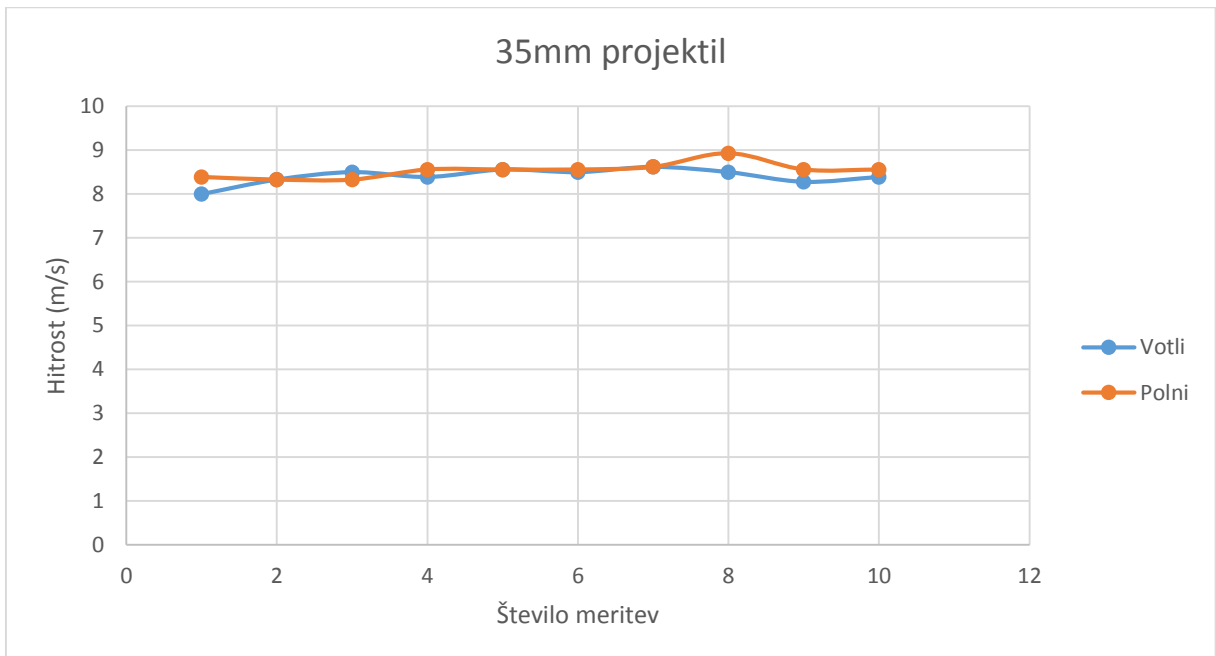
Tabela 1: Rezultati meritev hitrosti

Meritve	Votli projektil			Polni projektil		
	50 mm	35 mm	25 mm	50 mm	35 mm	25 mm
1.	8,50 m/s	8,00 m/s	8,93 m/s	8,62 m/s	8,39 m/s	8,33 m/s
2.	8,10 m/s	8,33 m/s	8,80 m/s	8,62 m/s	8,33 m/s	8,56 m/s
3.	8,12 m/s	8,50 m/s	8,80 m/s	8,45 m/s	8,33 m/s	8,33 m/s
4.	8,18 m/s	8,39 m/s	8,80 m/s	8,50 m/s	8,56 m/s	8,39 m/s
5.	7,91 m/s	8,56 m/s	8,87 m/s	8,56 m/s	8,56 m/s	8,39 m/s
6.	8,12 m/s	8,50 m/s	8,40 m/s	8,33 m/s	8,56 m/s	8,28 m/s
7.	8,62 m/s	8,62 m/s	8,87 m/s	8,56 m/s	8,62 m/s	8,33 m/s
8.	8,12 m/s	8,50 m/s	8,87 m/s	8,50 m/s	8,93 m/s	8,56 m/s
9.	8,12 m/s	8,28 m/s	8,56 m/s	8,56 m/s	8,56 m/s	8,33 m/s
10.	8,33 m/s	8,39 m/s	8,80 m/s	8,56 m/s	8,56 m/s	8,33 m/s
Povprečje	8,21 m/s	8,41 m/s	8,77 m/s	8,53 m/s	8,54 m/s	8,38 m/s

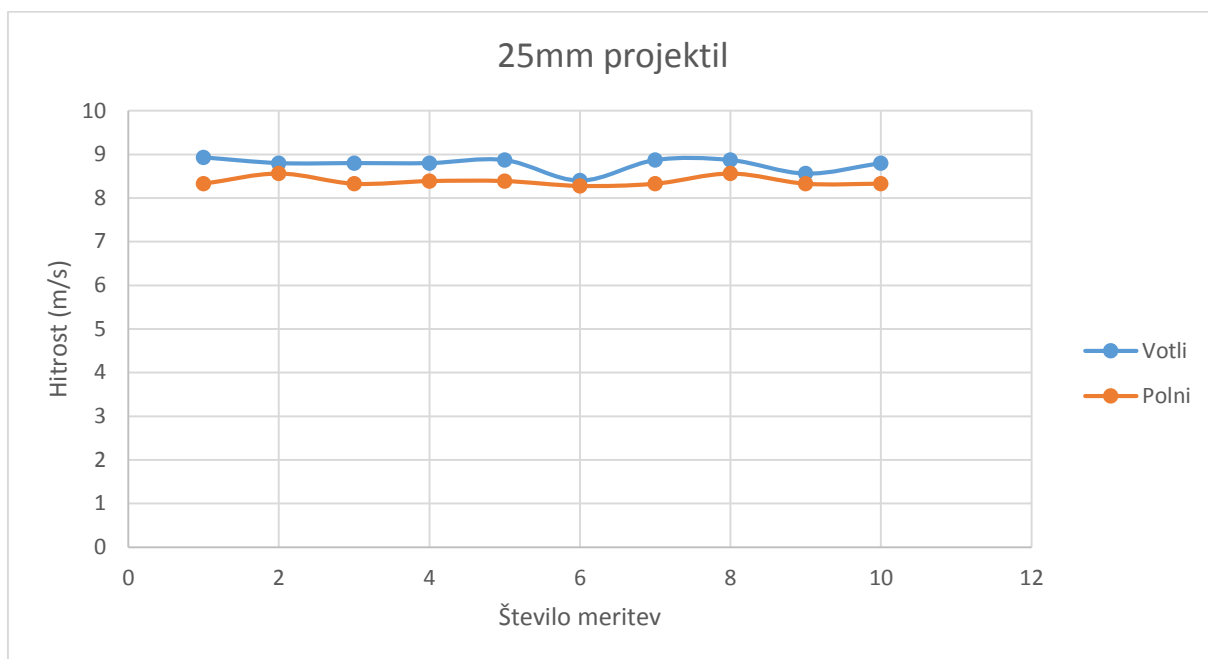
Po izvedenih 10 meritvah za vsak projektil smo ugotovili, da v danem primeru največjo izhodno hitrosti doseže votli 25 mm projektil. Rezultate smo primerjali v spodnjih grafih.



Graf 1: Primerjava hitrosti votlega in polnega 50mm projektila



Graf 2: Primerjava hitrosti votlega in polnega 35mm projektila



Graf 3: Primerjava hitrosti votlega in polnega 25mm projektila

6 DISKUSIJA IN ZAKLJUČEK

S to raziskovalno nalogo sva se naučila kar nekaj stvari, od magnetizma do oblikovanja projektilov. Spoznala sva, kako se lotili izdelave takšnega projektila od začetka do končnega izdelka ter kako reševati nastale težave, ki nastanejo med samo izdelavo. V izdelavo takšnega projekta je potrebno vložiti veliko ur truda in tudi nekaj denarja.

Zato sva si pred začetkom izdelave postavila hipotezo: Cena izdelave linearnega pospeševalnika ne presega 100 €. To hipotezo sva potrdila, saj sva za celoten projekt porabila okoli 40 €. S tem zneskom nisva preseгла začrtanega. Največji strošek so nama predstavljali kondenzatorji, saj sva ji potrebovala kar nekaj, da sva lahko preizkušala različne kapacitivnosti. Velik strošek lahko predstavlja napajanje kondenzatorjev, saj potrebujemo napajalnik, ki zmore 200 V, takšni napajalniki pa so lahko zelo dragi.

Celoten projekt zahteva kar dobro poznavanje elektrotehnike, zato sva naslednjo hipotezo ovrgla: Linearni pospeševalnik lahko izdelamo z osnovnim znanjem o elektrotehnik. Veliko je bilo potrebno vedeti o tem, kako magnetno polje nastane, kako se obnaša ter kako ga najbolje izkoristiti. Morala sva prebrati tudi nekaj literature, da sva lahko izdelala tuljavo primernih dimenzij. Kljub temu sva z osnovnim elektrotehničkim znanjem naletela na meje najinega razumevanja problemov in zmožnosti, zato sva morala v najino raziskavo vključiti tudi druge vede, kot na primer balistiko. Potrebna je bila za izdelavo projektilov, ki sva jih kasneje uporabila pri testiranju.

Od tega, kako je projektil zasnovan, je zelo odvisna izhodna hitrost. Tako sva si zastavila naslednjo hipotezo: Lastnosti projektila vplivajo na izhodno hitrost. To hipotezo sva potrdila, saj je iz tabele z meritvami razvidno, kakšne hitrosti so dosegali različni projektil. Do največje hitrosti je prišel 25 mm votel projektil. Iz tega rezultata sklepava, da je predvsem masa izstrelka tista, ki vpliva na izhodno hitrost, saj je bil ta projektil najlažji izmed šestih. Morda bi lahko ta projektil še izboljšala, če bi se poglobila v balistiko. Ker sva opravila za vsak projektil po 10 meritev pod istimi pogoji (napetost, kapacitivnost), bi morala biti ponovljivost meritev zelo dobra. Ampak pri nama so se pojavila kar velika odstopanja med istimi meritvami. Zato sva morala poiskati vse spremenljivke, ki so vplivale na rezultate meritev. Prva izmed spremenljivk je bila pozicija projektila. Ta je zelo pomembna, saj je najbolj vplivala na izhodno hitrost, zato sva morala tudi ugotoviti, katera pozicija je za kateri projektil najbolj optimalna. Na hitrost je vplivala tudi dolžina vklopnega impulza. Ker pa sva

uporabljala navadno dvopolno močnostno stikalo, tudi nisva mogla natančno določiti točne dolžine vsakega vklopnega pulza. To metodo proženja bi lahko izboljšala z elektroniko oziroma natančneje z MOSFET-om. S tem elementom bi dosegla, da bi bil vsak vklopni pulz enako dolg.

Pri linearnem pospeševalniku je seveda zelo pomembna izhodna hitrost, zato sva si postavila naslednjo hipotezo: Izhodna hitrosti je primerljiva z malokalibrskimi puškami. Tudi to hipotezo sva morala ovreči. Malokalibrska puška je zelo širok pojem, saj se izhodna hitrost od puške do puške razlikuje, zato bi se morali osredotočiti na določeno puško in ne na splošen pojem malo kalibrske puške. Na izhodno hitrost pri malokalibrskih puškah vpliva tudi vrsta naboja, in ker poznamo veliko vrst nabojev, bi morala tudi tukaj izbrati določeno vrsto. Vendar kljub vsemu najin pospeševalnik ni dosegel niti 10 % hitrosti, ki jih dosegajo te puške. Najin pospeševalnik pa je dosegal hitrosti okoli 10 m/s.

Polnjenje kondenzatorjev je pri tem projektu morda najbolj zahtevno, saj potrebujemo izvor z izhodno napetostjo vsaj 200 V. Vendar obstajajo tudi druge alternative polnjenja, zato sva si postavila hipotezo: Polnjenje kondenzatorjev z 9 V baterijo bo enako učinkovito kot polnjenje iz omrežnega vira. To hipotezo sva delno potrdila. Polnjenje je bilo uspešno, ampak je bilo zaradi hitrosti polnjenja skoraj nefunkcionalno. Za polnitev 200 V kondenzatorjev sva s tem vezjem potrebovala okoli 2 minuti. Kar pa lahko predstavlja težavo predvsem, če imamo več kondenzatorjev. Polnjenje bi lahko izboljšala s tem, da bi poizkušala povečati vir napetosti. Namesto navadne 9 V baterije bi uporabila 10 V ali 12 V računalniško baterijo. Te baterije imajo tudi večji izhodni tok, ki bi bistveno vplival na hitrosti polnjenja kondenzatorjev. Tako bi lahko iz 2 minut polnjenja prešla le na pol minute ali pa še manj, kar pa bi tudi bistveno izboljšalo funkcionalnost pospeševalnika. Preizkusila sva tudi polnjenje kondenzatorjev iz omrežnega vira s pomočjo avtotransformatorja, kar se je izkazalo za zelo uspešno metodo. Saj se kondenzatorji v trenutku napolnijo do željene napetosti. Zato sva to metodo tudi najbolj uporabljala, ker nama je omogočila, da sva v krajšem času naredila večje število meritev.

Linearni pospeševalnik se je izkazal za zelo zanimiv projekt, vendar pa sama izdelava zahteva kar veliko tehničnega znanja. Izdelek pušča še veliko prostora za nadgradnje in izboljšave.

7 POVZETEK

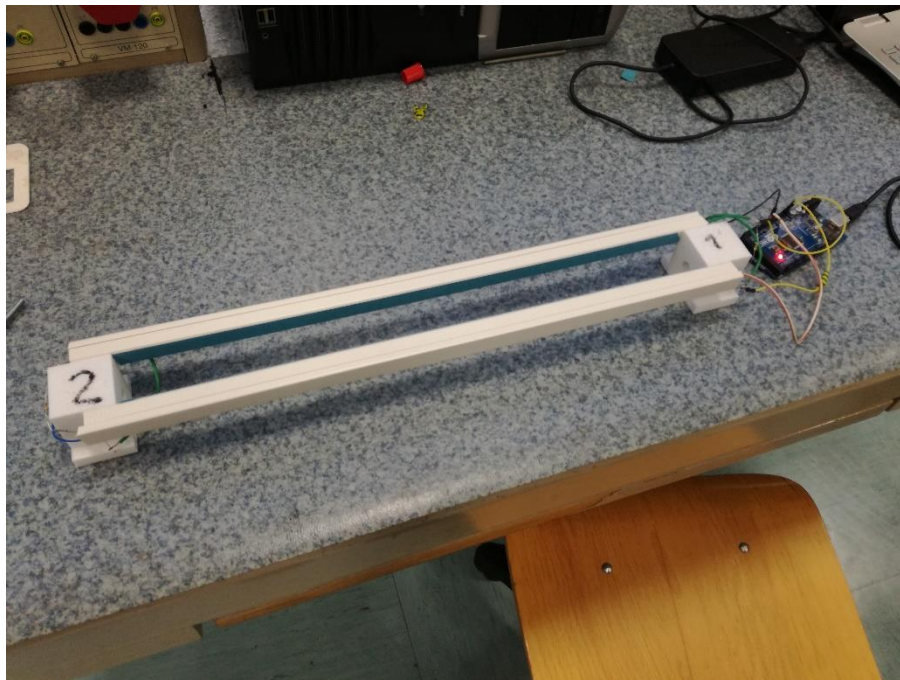
Človek že od nekdaj uporablja različne vire energije za pogon raznovrstnih strojev in stvari. V današnjem času napredkov in čiste energije je to električna. Zakaj torej ne bi učinki električne energije zamenjali zastareli smodnik ali gorivo, ki ga potrebujemo za izstrelitev rakete. Namen najine raziskovalne naloge je bil zasnovati in izdelati delujoč linearni pospeševalnik. Izdelala sva tudi lastni merilnik hitrosti ter ga skalibrirala. Skozi testiranja in meritve sva merilnik izboljšala do te mere, da sva lahko merila tudi večje hitrosti. Linearni pospeševalnik deluje na principu magnetnega polja, za delovanje potrebuje električno energijo. To magnetno polje ustvari električni tok, ki steče skozi bakren vodnik tuljave. Tok, ki steče skozi vodnik, mora biti čim večji, da ustvari čim gostejše magnetno polje, ki potem požene projektil. Raziskati sva morala, kako velikost kapacitivnosti vpliva na izhodno hitrost. Nato sva na podlagi meritev in izračunov izbrala kapacitivnost kondenzatorjev, ki požene projektil do največje hitrosti. Velik del časa sva namenila načinu polnjenja kondenzatorjev. Nato sva skozi poskuse ugotovila, kateri način je najbolj primeren za polnjenje kondenzatorjev. Skozi celotno raziskovalno nalogo sva spoznala, kako pospeševalnik deluje ter kako se obnaša pod različnimi pogoji.

8 ZAHVALA

Rada bi se zahvalila najinima mentorjema gospodu Matjažu Žeraku ter gospodu Klemnu Hlebu, ki sta nama pomagala ter svetovala pri izdelavi linearnega pospeševalnika. Zahvalila bi se tudi gospe Lidiji Šuster za lektoriranje povzetka ter raziskovalne naloge. Zahvala gre tudi gospodu Zvonetu Cencnu za strokovno pomoč ter vsem drugim, ki so pomagali pri nastajanju tega izdelka.

9 PRILOGE

Priloga 1: Merilnik hitrosti



Priloga 2: Navijanje tuljave



Priloga 3: Program za merjenje hitrosti

```
test_hitrosti | Arduino 1.6.7
Datoteka Uradi Škica Orodja Pomoč

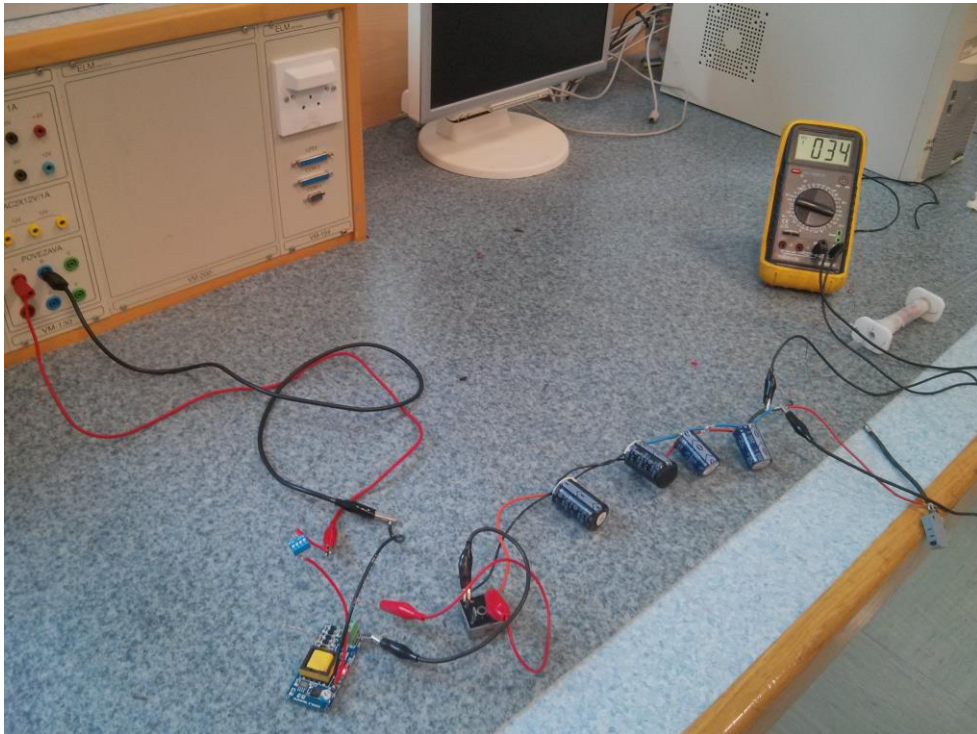
int Senzor1 = 11; //Definiramo pin za senzor za začetek merjenja časa
int Senzor2 = 10; //Definiramo pin za senzor za konec merjenja časa
int vrednost1; //Izhodna vrednost prvega senzoja
int vrednost2; //Izhodna vrednost drugega senzoja
float mps; //Hitrost podana v metrih na sekundo
float cas; //Cas med prvima in drugim senzorjem
int a = 0; //spremenljivka za pomoč pri programiranju
int LED = 53; //Led dioda za prikaz sprožitve merjenja časa

void setup() {
  Serial.begin(250000);
  pinMode(Senzor1, INPUT); //Senzor1 definiramo kot vhod
  pinMode(Senzor2, INPUT); //Senzor2 definiramo kot vhod
  pinMode(LED, OUTPUT); //LED diodo definiramo kot izhod
}

void loop() {
  vrednost1 = digitalRead(Senzor1); //Arduino prebere stanje na prvem senzorju in ga pretvori v digitalno obliko
  vrednost2 = digitalRead(Senzor2); //Arduino prebere stanje na drugem senzorju in ga pretvori v digitalno obliko

  if (vrednost1 == HIGH) { //Ko je vrednost1 v logičnem stanju 1 se spremenljivka a postavi v stanje 1
    a = 1;
    cas = 0;
    digitalWrite(LED, HIGH); //LED dioda se vklopi
  }
  if (a == 1) { //Ko je vrednost spremenljivke a v stanju 1 se prične šteti čas
    cas++; //vsako ms +1
    vrednost2 = digitalRead(Senzor2); //vrednost2 je enaka vrednosti, ki jo Arduino prebere iz digitalnega vhoda
  }
  if (vrednost2 == HIGH) { //Ko se vrednost2 postavi v stanje 1 se konča merjenje časa
    a = 0; //Spremenljivka a se postavi v stanje 0
    mps = 625/cas; //Izračuna hitrost, pot deli z izmerjenim časom
    Serial.print("hitrost = ");
    Serial.print(mps); //Izpiše hitrost
    Serial.println(" m/s");
    digitalWrite(LED, LOW);
  }
}
```

Priloga 4: Polnjenje kondenzatorjev



10 VIRI

- [1]Wikipedija – coil gun [online]. Dostopna na:
<https://en.wikipedia.org/wiki/Coilgun> [19. 12. 2016]
- [2] Kondenzatorji [online]. Dostopno na:
<https://sl.wikipedia.org/wiki/Kondenzator> [19. 12. 2016]
- [3] 3D printanje [online]. Dostopno na:
<https://sl.wikipedia.org/wiki/3D-tiskanje> [19. 12. 2016]
- [4] Solidworks [online]. Dostopno na:
<https://sl.wikipedia.org/wiki/SolidWorks> [27. 12. 2016]
- [5] Mikljavec D. Jereb P. Električni stroji, temeljna znanja
- [6] Opis projektila in slike [online]. Dostopno na:
<http://www.instructables.com/id/Coil-Gun-Projectiles/> [9. 1. 2017]
- [7] Opis Arduino[online]. Dostopno na:
<https://www.arduino.cc/> [11. 1. 2017]
- [8] LCD display [online]. Dostopno na:
<http://www.instructables.com/id/How-to-use-an-LCD-displays-Arduino-Tutorial/> [11. 1. 2017]
- [9]Arduino Mega 2560 [online]. Dostopno na:
<https://www.arduino.cc/en/Main/arduinoBoardMega2560> [15. 1. 2017]
- [10]Spominski digitalni osciloskop [online]. Dostopno na:
<http://www.rigol.si/Produkti/Osciloskopi/osciloskopi.html> [16.1.2017]
- [11]IR dioda [online]. Dostopno na:
<http://www.futureelectronics.com/en/optoelectronics/infrared-emitters.aspx> [16. 1. 2017]