

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

MLADI RAZISKOVALCI ZA RAZVOJ ŠALEŠKE DOLINE

RAZISKOVALNA NALOGA

LINEARNI MAGNETNI POSPEŠEVALNIK S FEROMAGNETNIM PROJEKTILOM

Tematsko področje: ELEKTROTEHNIKA, ELEKTRONIKA IN ROBOTIKA

Avtorja:

Leon Ocepek, 4. ET

Aljaž Dobnik, 4. ET

Mentor:

Klemen Hleb, dipl. inž. elektrotehnike (UN)

Somentor:

Matjaž Žerak, univ. dipl. inž. elektrotehnike

Velenje 2017

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

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

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

Datum predstavitve:

KLJUČNA DOKUMENTACIJSKA INFORMACIJA

ŠD ŠC Velenje, šolsko leto 2016/17

KG elektrotehnika, magnetni pospeševalnik, magnetika

AV OCEPEK, Leon/DOBNIK, Aljaž

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 **LINEARNI MAGNETNI POSPEŠEVALNIK S FEROMAGNETNIM
PROJEKTILOM**

TD Raziskovalna naloga

OP VI, 34 s., 4 tab., 5 graf., 18 sl.

IJ SL

JI sl/en

AI Z raziskavo smo testirali vplive kapacitivnost in napetosti na hitrost projektila. Testirali smo tudi kako število tuljav pripomore k večanju hitrosti. Meritve smo opravili pri različnih kapacitivnostih, napetosti, različnem številu tuljav in ugotovili optimalno napetost ter kapacitivnost. Rezultate smo analizirali in obrazložili. Na podlagi dobljenih rezultatov smo potrdili oz. zavrnili podane hipoteze in to obrazložili.

KEY WORDS DOCUMENTATION

ND ŠC Velenje, 2016/17

CX electrotehnic, magnetic accelerator, magnetics

AU OCEPEK, Leon/DOBNIK, Aljaž

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 MAGNETIC ACCELERATOR OF FERROMAGNETIC
PROJECTILES**

DT Research work

NO VI, 34 s., 4 tab., 5 graf., 18 pic.

LA SL

AL sl/en

AB With this research we tried to discover the effect that capacitance and current causes on speed of projectile. We also tested how does number of coils effect the speed of projectile. Several measurements were made at different capacitance, current and number of coils to determine optimal capacitance and current. The results were analyzed and discussed. On the base of the obtained results the hypothesis has been approved or rejected. Everything has been explained.

KAZALO VSEBINE

1 UVOD	1
1.1 HIPOTEZE	1
2 PREGLED OBJAV	2
2.1 MAGNETNA PUŠKA, Klemen Hleb, Lovro Brdnik	2
2.2 KAKO DELUJE MAGNETNI POSPEŠEVALNIK?	4
2.2.1 Pospeševanje feromagnetnega projektila	5
2.2.2 Vklapljanje tuljav	6
2.3 OPIS POMEMBNEJŠIH ELEMENTOV	7
2.3.1 MOSFET	7
2.3.2 Tiristor	8
2.3.3 Operacijski ojačevalnik - LM324N	9
2.3.4 Kondenzator	10
3 MATERIAL IN METODE	14
3.1 IZDELAVA SISTEMA ZA PROŽENJE TULJAV	14
4 REZULTATI IN MERITVE	15
4.1 MERITEV ODVISNOSTI HITROSTI PROJEKTILA OD KAPACITIVNOSTI KONDENZATORJEV	15
4.2 MERITEV ODVISNOSTI HITROSTI PROJEKTILA OD NAPETOSTI KONDEZATORJEV	18
4.3 MERITEV HITROSTI VEČSTOPENSKEGA MAGNETNEGA POSPEŠEVALNIKA	20
4.3.1 Meritev hitrosti dvostopenjskega pospeševalnika	20
4.3.2 Meritev hitrosti tristopenjskega pospeševalnika	23
5 DISKUSIJA IN INTERPERTACIJA REZULTATOV	26
5.1 VPLIV KAPACITIVNOSTI NA HITROST PROJEKTILA	26
5.2 VPLIV NAPETOSTI NA HITROST PROJEKTILA	27
5.3 DVOSTOPENSKO IN TRISTOPENSKO POSPEŠEVANJE	28
6 ZAKLJUČEK	29
7 POVZETEK	31
8 ZAHVALA	32
9 PRILOGE	33
10 VIRI IN LITERATURA	34

KAZALO SLIK

Slika 1: Delovanje magnetnega pospeševalnika [7].....	4
Slika 2: Prerez tuljave [13].....	5
Slika 3: Večstopenjski pospeševalnik [7].....	6
Slika 4: Shema MOSFET [9]	7
Slika 5: Mosfet	8
Slika 6: Shema Tiristorja [11]	8
Slika 7: Tiristor [12].....	9
Slika 8: Operacijski ojačevalnik LM324N [10]	9
Slika 9: Kondenzator.....	10
Slika 10: Razdelitev elektrine pri zaporedni vezavi kondenzatorjev [8].....	12
Slika 11: Zaporedna vezava kondenzatorjev [8]	13
Slika 12: Meritev vpliva kapacitivnosti na hitrost projektila	15
Slika 13: Blokovna shema enostopenjskega pospeševalnika	16
Slika 14: Vezava kondenzatorjev	18
Slika 15: Meritev hitrosti projektila pri dvostopenjskem pospeševanju	20
Slika 16: Blokovna shema dvostopenjskega pospeševalnika.....	21
Slika 17: Meritev hitrosti projektila pri tristopenjskem pospeševanju.....	23
Slika 18: Blokovna shema tristopenjskega pospeševalnika	24

KAZALO TABEL

Tabela 1: Vpliv kapacitivnosti na hitrost projektila pri enostopenjskem pospeševanju.....	16
Tabela 2: Odvisnost hitrosti projektila od napetosti.....	19
Tabela 3: Vpliv kapacitivnosti na hitrost projektila pri dvostopenjskem pospeševanju	21
Tabela 4: Vpliv kapacitivnosti na hitrost projektila pri tristopenjskem pospeševanju.....	24

KAZALO GRAFOV

Graf 1: Odvisnost sile na položaj projektila v tuljavi [1].....	2
Graf 2: Vpliv kapacitivnosti na hitrost projektila pri enostopenjskem pospeševanju	17
Graf 3: Odvisnost hitrosti projektila od napetosti	19
Graf 4: Vpliv kapacitivnosti na hitrost projektila pri dvostopenjskem pospeševanju.....	22
Graf 5: Vpliv kapacitivnosti na hitrost projektila pri tristopenjskem pospeševanju	25

KAZALO PRILOG

Priloga 1: Shema vezja z MOSFETom	33
Priloga 2: Shema vezja s Tiristorjem	33

SEZNAM OKRAJŠAV IN SIMBOLOV

FEMM	Finite Element Method Magnetics (Metoda končnih elementov Magnetike)
MOSFET	Metal–oxide–semiconductor field-effect transistor

I_m	Tok ob trenutku vklopa
U_s	Skupna napetost kondenzatorjev
R_t	Upornost navitja tuljave
W_e	Energija električnega polja kondenzatorja
C	Kapacitivnost
U	Napetost
C_n	Nadomestna kapacitivnost
Q	Elektrina

1 UVOD

Ker sta se sošolca odločila izdelati magnetni pospeševalnik oziroma raziskati vpliv različnih tuljav na hitrost projektila, sva se jima tudi midva pridružila pri tem projektu. Odločila sva se izdelati način vključevanja tuljav, da bi te ob vklopu omogočile maksimalen pospešek feromagnetnega projektila. Ta del projekta se nama je zdel zanimiv predvsem zaradi vpliva na hitrost in moč projektila, ki ga pravočasen vklop in izklop tuljav povzroči. Za pospeševanje projektila je potrebno imeti na voljo veliko energije, ki se lahko sprosti v kratkem času. Element, ki sodi temu vpisu, je kondenzator, zato sva del raziskovalne naloge namenila načinom vezave le-tega.

1.1 HIPOTEZE

- Vezje, ki bi glede na položaj projektila vklapljalo tuljave, lahko izdelamo z osnovnim znanjem elektronike.
- Skupna kapacitivnost kondenzatorjev bo vplivala na hitrost feromagnetnega projektila.
- Hitrost feromagnetnega projektila je sorazmerna z napetostjo.
- Izhodna hitrost feromagnetnega projektila bo presegla hitrost 30 m/s.

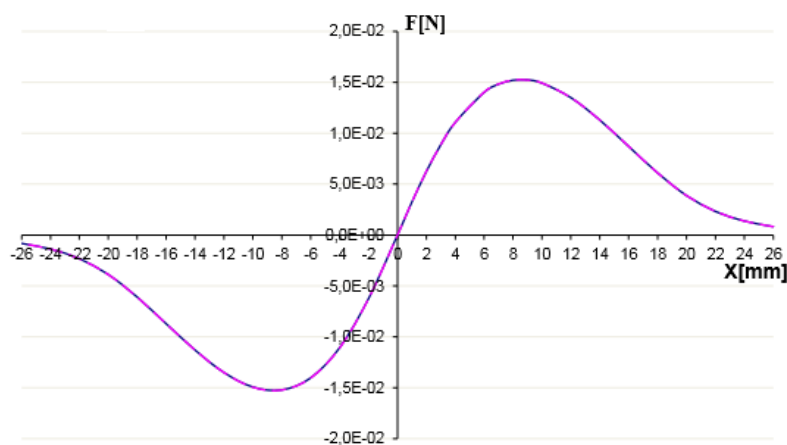
2 PREGLED OBJAV

2.1 MAGNETNA PUŠKA, Klemen Hleb, Lovro Brdnik

V preteklosti j že bila izdelana Raziskovalna naloga v Gibanju mladi raziskovalci za razvoj Šaleške doline z naslovom Magnetna puška. Ta raziskovalna temelji na simulacijah izvedenih z računalniškim programskim orodjem FEMM in je bila osnova za izdelavo naše naloge, s katero želimo te rezultate preveriti na realnem primeru linearnega magnetnega pospeševalnika.

V raziskovalni nalogi je bila ugotovljena pomembna ugotovitev, da v času vklopa toka skozi tuljavo sile, ki delujejo na telo, pričnejo naraščati. Z bližanjem samega telesa oz. izstrelka proti središču tuljave sila, ki deluje na telo, narašča.

V raziskavi je bila najšibkejša sila na izstrelak pri največji oddaljenosti, od središča tuljave, to je 26 mm in najmočnejša sila pri 8 mm oddaljenosti od središča tuljave pri konstantnem toku 1 A. S pomikom izstrelka še bližje središču se je sila zopet pričela zmanjševati in v središču tuljave dosegla nič. V meritvah so uporabili tuljavo dolžine 20 mm in višine 8 mm [1].



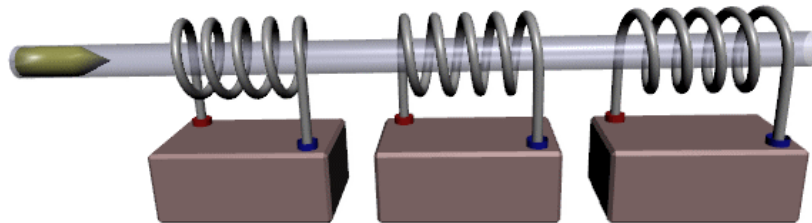
Graf 1: Odvisnost sile na položaj projektila v tuljavi [1]

Ta ugotovitev jih je privedla do spoznanja:

- V primeru, da toka ne bi prekinili pravočasno, se pravi, ko je izstrelek nekje pri 8 mm oz. blizu središča tuljave, bi ob prehodu čez središče tuljave tok oz. sila na izstrelek pričela delovati zaviralno. To bi lahko povzročilo, da se telo zaustavi in ne zapusti cevi, ter da se telo ustavi v sredini tuljave, kjer so sile, ki delujejo na telo enake nič oz. da se energija, ki jo vsebuje izstrelek, toliko izniči, da je izstopna hitrost izstrelka zelo majhna oz. skorajda brez energije [1].

2.2 KAKO DELUJE MAGNETNI POSPEŠEVALNIK?

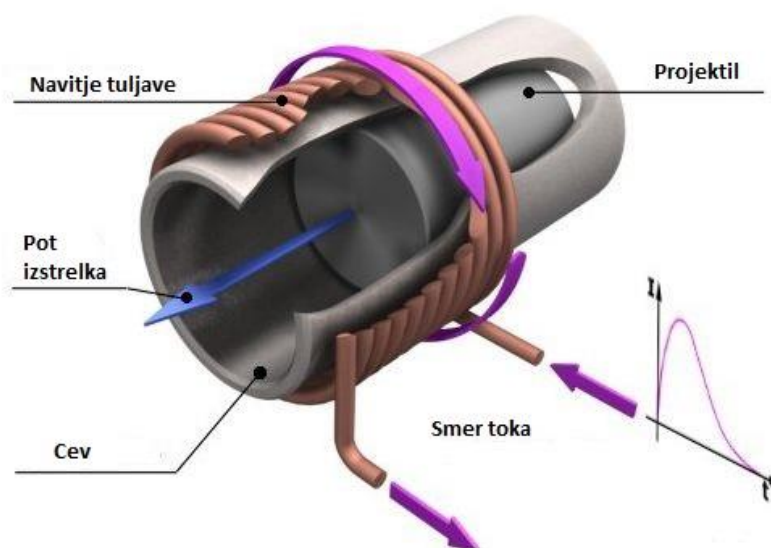
Magnetni pospeševalnik je vrsta pospeševalnika, ki je sestavljen iz ene ali več tuljav. Tuljave so uporabljene kot elektromagnet, ki pospeši feromagnetni projektil do velikih hitrosti. Tuljave so razporejene vzdolž cevi, tako da je projektil večstopenjsko pospešen. Tuljave se vklaplajo in izklaplajo v točno določenem zaporedju.



Slika 1: Delovanje magnetnega pospeševalnika [7]

2.2.1 Pospeševanje feromagnetnega projektila

Projektil je postavljen na začetku tuljave. Velik tok ki steče skozi navitje tuljave, povzroči magnetno polje, ki vleče projektil proti sredini tuljave. Ko se izstrelek bliža tej točki, je potrebno izklopiti tok skozi tuljavo, s tem preprečimo, da bi na projektil začela delovati zaviralna sila. Pri večstopenjskih pospeševalnikih se ta postopek ponovi, in tako povečujemo hitrost projektilu. Za pripravo velikega tokovnega sunka se uporabljajo visokonapetostni kondenzatorji, ki so namenjeni za hitro dovajanje energije. Pri tem so tudi zelo pomembne polprevodniške diode, ki skrbijo za zaščito občutljivih sestavnih komponent (kot so krmilno vezje in elektrolitski kondenzatorji) pred poškodbami zaradi inducirane napetosti, ki nastane v tuljavi po izklopu.



Slika 2: Prerez tuljave [13]

2.2.2 Vklapljanje tuljav

Glavni problem pri izdelavi magnetnega pospeševalnika je pravočasno vklapljanje tuljav, saj imamo opravka z zelo velikimi tokovi. Za krmiljenje teh tokov obstaja več možnosti. Prva možnost so IGBT ali MOSFET tranzistorji, ki jih lahko vklopimo in izklopimo v poljubnem trenutku. Druga možnost je tiristor, ki se izklopi sam ko mu zmanjka energije. Prvo tuljavo pa lahko vklopimo s stikali oz. tipkami.



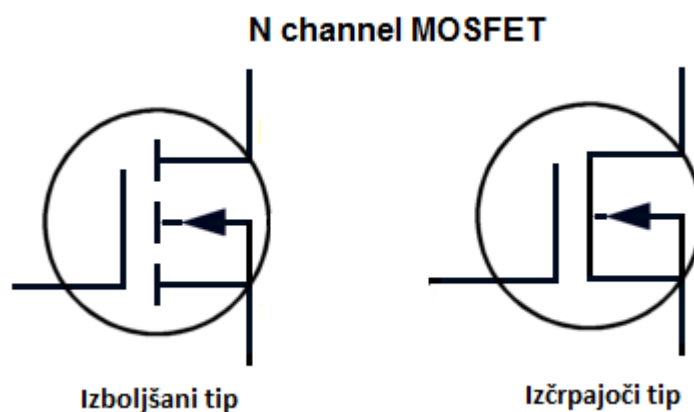
Slika 3: Večstopenjski pospeševalnik [7]

2.3 OPIS POMEMBNEJŠIH ELEMENTOV

2.3.1 MOSFET

MOSFET je vrsta tranzistorja, ki se uporablja za ojačanje in vklopjanje večjih tokov. MOSFET spada v skupino unipolarnih tranzistorjev. Ima tri priključke: izvora (S), odtok (D) in vrat (G) [2]. V naši raziskovalni nalogi smo uporabili N-channel MOSFET. Poznamo dve vrsti N-channel MOSFETA:

- Izboljšani tip MOSFETA: ta tip prevaja napetost med izvorom in odtokom, kadar je napetost na vratih večja od 0 V in se zapre kadar je napetost enaka 0 V.
- Izčrpajoči tip MOSFETA: ta napetost prevaja, kadar sta si napetosti med vrati in izvorom enaki. Prevodnost tega tipa začnemo manjšati z večanjem napetosti na vratih, to povzroča večanje MOSFETove upornosti. Ko je napetost na vratih dovolj visoka, bo MOSFET zaradi velike upornosti prenehal prevajati napetost med izvorom in odtokom.



Slika 4: Shema MOSFET [9]

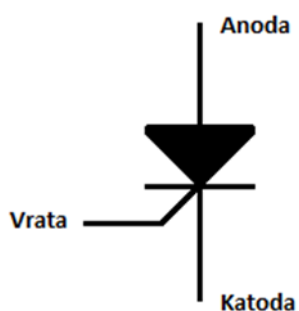
V raziskovalni nalogi smo uporabili N-channel MOSFETE, ki so narejeni za 200 V in 20 A trajnega toka ter 50 A kratkostičnega toka.



Slika 5: Mosfet

2.3.2 Tiristor

Tiristor je krmiljeni polprevodniški element. Glede na krmiljenje ločimo N-P-N in P-N-P tiristorje. Tiristor začne prevajati električni tok od anode proti katodi, ko se na vratih pojavi napetost in prevaja, dokler je med anodo in katodo napetost oziroma dokler se napetost med njima ne obrne. Tiristor lahko samo prožimo oz. odpiramo z impulzom napetosti, ne moremo ga pa sami zapirati [4].



Slika 6: Shema Tiristorja [11]



Slika 7: Tiristor [12]

2.3.3 Operacijski ojačevalnik - LM324N

LM324N je integrirano vezje, ki je sestavljeno iz štirih samostojnih operacijskih ojačevalnikov. Vezje ima štirinajst priključnih nogic. Dve sta za napajanje samega vezja, ostale so vhodi in izhodi operacijskih ojačevalnikov. OP-a je zgrajen iz dveh vhodov, ki sta označena z + in -. Glavna naloga ojačevalnika je ojačenje enosmernih in izmeničnih signalov, uporablja pa se še tudi kot primerjalnik oz. komparator. Kot primerjalnik smo ga uporabili tudi mi v našem vezju [2].



Slika 8: Operacijski ojačevalnik LM324N [10]

2.3.4 Kondenzator

Kondenzator je elektrotehniški element, ki lahko shranjuje energijo v obliki električnega polja. Osnovna lastnost kondenzatorja je [C], katere enote so Faradi [F] [5].



Slika 9: Kondenzator

Energija električnega polja kondenzatorja je odvisna od kapacitivnosti in napetosti na kondenzatorju.

To opiše enačba:

$$W_e = \frac{C * U}{2}$$

V enosmernem električnem krogu s kondenzatorjem lahko steče le kratkotrajni tok polnjena ali praznjenja kondenzatorja z elektrino. Napolnjen kondenzator predstavlja v enosmernem električnem krogu neskončno upornost [8].

In prav ta kratkotrajni tok praznjenja kondenzatorja izkoriščamo pri linearnem magnetnem pospeševalniku. Saj se v zelo kratkem času sprosti veliko energije v obliki enosmerne toka, ki v tuljavi ustvari magnetno polje, ki tvori silo na feromagnetni projektil.

- Vzporedna vezava

Vzporedna vezava kondenzatorjev pomeni povečevanje plošč kondenzatorja. Kapacitivnost vzporednih kondenzatorjev se seštevata.

To nam predstavlja naslednja enačba:

$$C_n = C_1 + C_2 + \dots + C_n$$

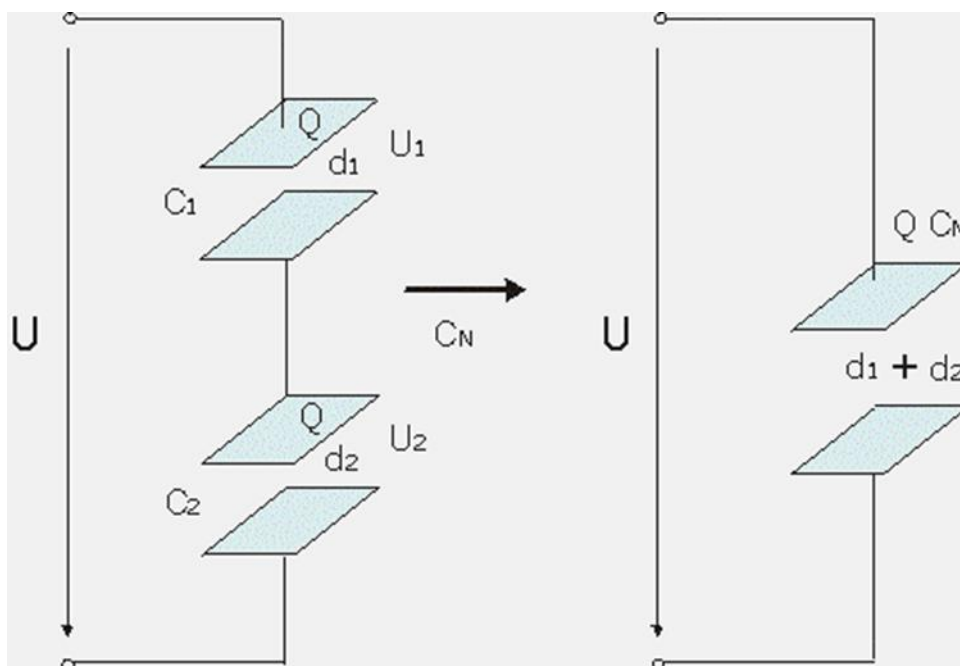
Vzporedna vezava kondenzatorjev nam tudi razdeli elektrino premo sorazmerno s kapacitivnostjo. To pomeni, da je elektrina na ploščah kondenzatorja sorazmerna s kapacitivnostjo kondenzatorja, vezanega vzporedno.

To opisuje enačba [6]:

$$\frac{Q_1}{Q_2} = \frac{C_1}{C_2}$$

- Zaporedna vezava

Zaporedna vezava kondenzatorjev sprejme manj elektrine kot kondenzator z najmanjšo kapacitivnostjo. Kapacitivnost zaporedne vezave kondenzatorjev je manjša od kapacitivnosti najmanjšega zaporedno vezanega kondenzatorja.



Slika 10: Razdelitev elektrine pri zaporedni vezavi kondenzatorjev [8]

Obratna vrednost kapacitivnosti zaporedno vezanih kondenzatorjev je enaka vsoti obratnih vrednosti kapacitivnosti posameznih kondenzatorjev.

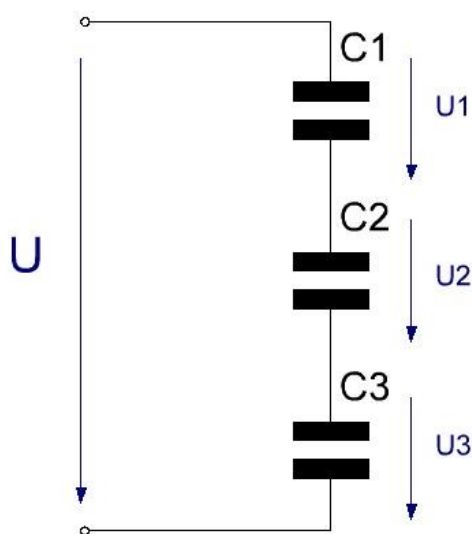
To potrjuje enačba:

$$\frac{1}{C_N} = \frac{1}{C_1} + \frac{1}{C_2} + \dots + \frac{1}{C_n}$$

Pri zaporedni vezavi kondenzatorjev so vsi kondenzatorji, ne glede na kapacitivnost, naelektreni z enako elektrino.

$$\frac{U_1}{U_2} = \frac{C_2}{C_1}$$

Zaporedno vezavo kondenzatorjev uporabljamo tudi kot delilnik napetosti, še posebej, kadar zaradi visokih napetosti v električnem tokokrogu obstaja nevarnost preboja enega samega kondenzatorja. Zato je ta vezava uporabljena ob prisotnostih večjih napetosti [8].



Slika 11: Zaporedna vezava kondenzatorjev [8]

3 MATERIAL IN METODE

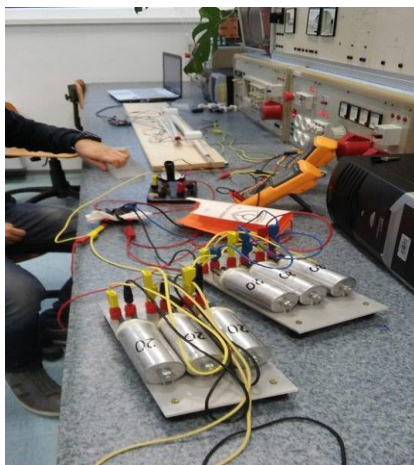
3.1 IZDELAVA SISTEMA ZA PROŽENJE TULJAV

Po pregledu objav in do sedaj že izdelanih magnetnih pospeševalnikov smo se odločili, da bomo prvo tuljavo prožili direktno s tipko, drugo in tretjo tuljavo pa bo sprožilo vezje, ki ga bomo izdelali. Za proženje prve tuljave smo uporabili tipko, ki je zmožna vklapljati velike tokove. Izdelave vezja smo se lotili tako, da smo najprej začeli raziskovati načine, s katerimi bi lahko zaznali položaj projektila v cevi. Po začetnem raziskovanju na spletu smo ugotovili, da je najboljši način uporaba IR-diod. Te diode oddajajo ultravijolično svetlobo, ki je s prostim očesom ne moremo zaznati. Na nasprotno stran cevi pospeševalnika pa smo namestili IR Photo diodo, njena lastnost spreminja upornost glede na jakost ultravijolične svetlobe. Diode smo namestili pred tuljavo z namenom, da lahko zaznamo čas, ko projektil vstopa v tuljavo. Ko projektil prekine ultravijolične žarke med IR-dido in IR Photo diodo, se zgodi padec napetosti, ki jo zazna operacijski ojačevalnik. Osrednji element vezja je že omenjeni operacijski ojačevalnik, ki opravlja nalogo komparatorja oz. primerjalnika. Uporabili smo integrirano vezje LM324N, ki je sestavljeno iz štirih ojačevalnikov. Operacijski ojačevalnik primerja napetost, ki prihaja iz IR Photo diode, ta je del delilnika napetosti z uporabo $10\text{ k}\Omega$. Potenciometer omogoča nastavitve meje preklopa. Ojačevalnik da nato signal polprevodniškemu elementu, ki vklopi tuljavo. Za vklop tuljave smo uporabili dva različna polprevodniška elementa, ki se uporabljata za vklope velikih tokov. To sta MOSFET in Tiristor. Za zagotovitev dovolj velikega toka in energije pa smo uporabili elektrolitske kondenzatorje.

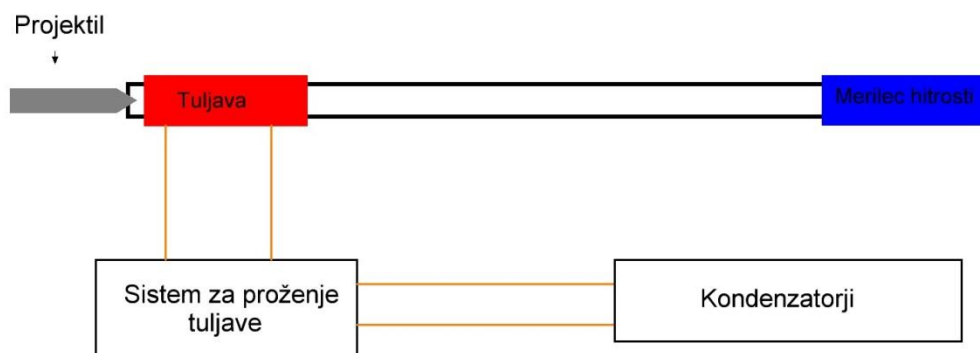
4 REZULTATI IN MERITVE

4.1 MERITEV ODVISNOSTI HITROSTI PROJEKTILA OD KAPACITIVNOSTI KONDENZATORJEV

Meritev je poteka tako, da smo projektil pospeševali z eno tuljavo, pri tem pa smo pri konstantni napetosti 200 V postopoma povečevali skupno kapacitivnost, tako da smo kondenzatorje vezali vzporedno. V začetku meritve je bil korak višanja kapacitivnosti 470 μF . Ko pa smo opazili, da se hitrost projektila manjša kljub višanju kapacitivnosti, smo korak povečevanja zmanjšali na 60 μF . Tako smo lahko bolj točno določili oz. izmerili optimalno kapacitivnost, pri kateri je projektil dosegel maksimalno hitrost. Pri meritvah smo uporabili projektil dolžine 50 mm, kar je polovica dolžine tuljave. V tabeli 1 in grafu 1 je razvidno, da je projektil dosegel najvišjo hitrost pri kapacitivnosti 1410 μF . Pri vsaki kapacitivnosti smo naredili 10 meritev hitrosti ter nato izračunali povprečno hitrost. Hitrost smo pri vseh meritvah merili s posebej narejenim sistemom, ki sta ga izdelala sošolca v sklopu svoje raziskovalne naloge.



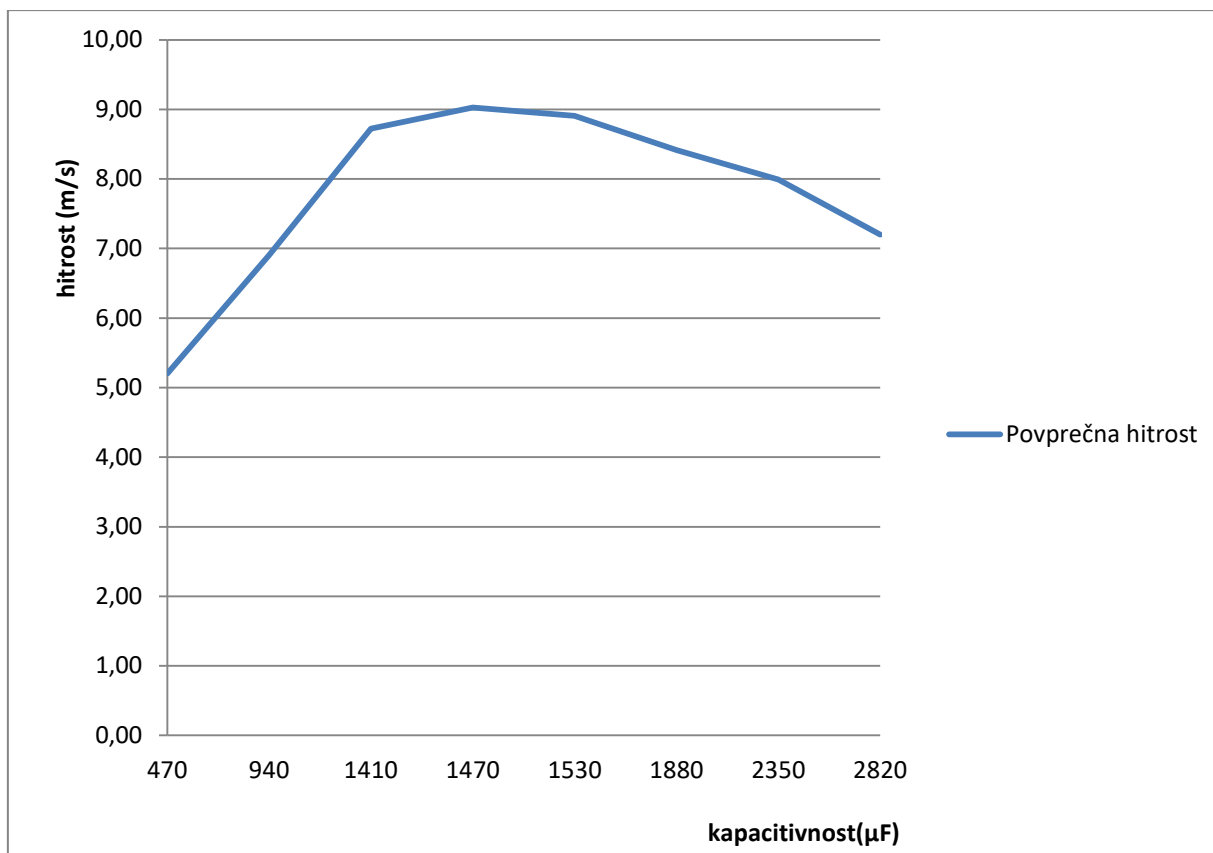
Slika 12: Meritev vpliva kapacitivnosti na hitrost projektila



Slika 13: Blokovna shema enostopenjskega pospeševalnika

Tabela 1: Vpliv kapacitivnosti na hitrost projektila pri enostopenjskem pospeševanju

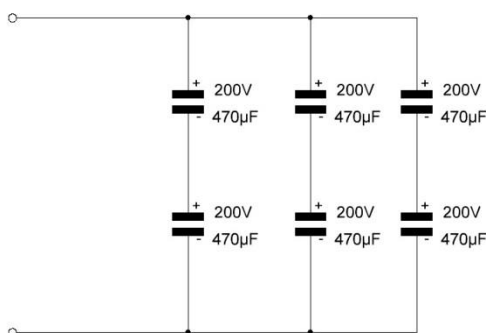
Kapacitivnost (μF)	470	940	1410	1470	1530	1880	2350	2820
Hitrost projektila (m/s)								
1.	5,26	6,67	8,80	9,33	8,56	8,22	8,12	7,28
2.	5,26	6,67	8,39	9,06	8,80	8,39	7,91	6,72
3.	5,26	7,14	8,80	8,80	8,68	8,39	7,91	7,31
4.	5,26	6,67	8,87	9,80	8,93	8,45	8,01	7,23
5.	5,00	6,67	8,74	8,45	9,06	8,28	8,06	7,40
6.	5,56	7,14	8,87	8,68	9,33	8,45	7,86	7,40
7.	5,88	7,14	8,68	9,19	8,93	8,22	7,76	7,44
8.	4,76	7,14	8,74	9,33	8,93	8,50	8,22	7,14
9.	4,76	6,67	8,68	8,93	9,06	8,62	8,06	7,02
10.	5,00	7,14	8,68	8,68	8,80	8,62	8,01	7,06
Povprečna hitrost (m/s)	5,20	6,91	8,73	9,025	8,91	8,41	7,99	7,20



Graf 2: Vpliv kapacitivnosti na hitrost projektila pri enostopenjskem pospeševanju

4.2 MERITEV ODVISNOSTI HITROSTI PROJEKTILA OD NAPETOSTI KONDEZATORJEV

Meritev je potekala tako, da smo projektil pospeševali z eno tuljavo, pri tem pa smo pri konstantni kapacitivnosti postopoma povečevali napetost. Uporabili smo kondenzatorje 200 V/470 μ F. Odvisnost hitrosti projektila od napetosti smo želeli raziskati vsaj do napetosti 400 V. Zaradi prenizke prebojne napetosti kondenzatorjev smo vezali dva zaporedno. Tako smo dosegli dvakrat večjo prebojno napetost. Zaradi zmanjšane kapacitivnosti zaporedno povezanih kondenzatorjev smo več vej zaporedno vezanih kondenzatorjev povezali vzporedno in tako povečali kapacitivnost na željeno vrednost. Vezava kondenzatorjev je prikazana na spodnji sliki (slika 24).

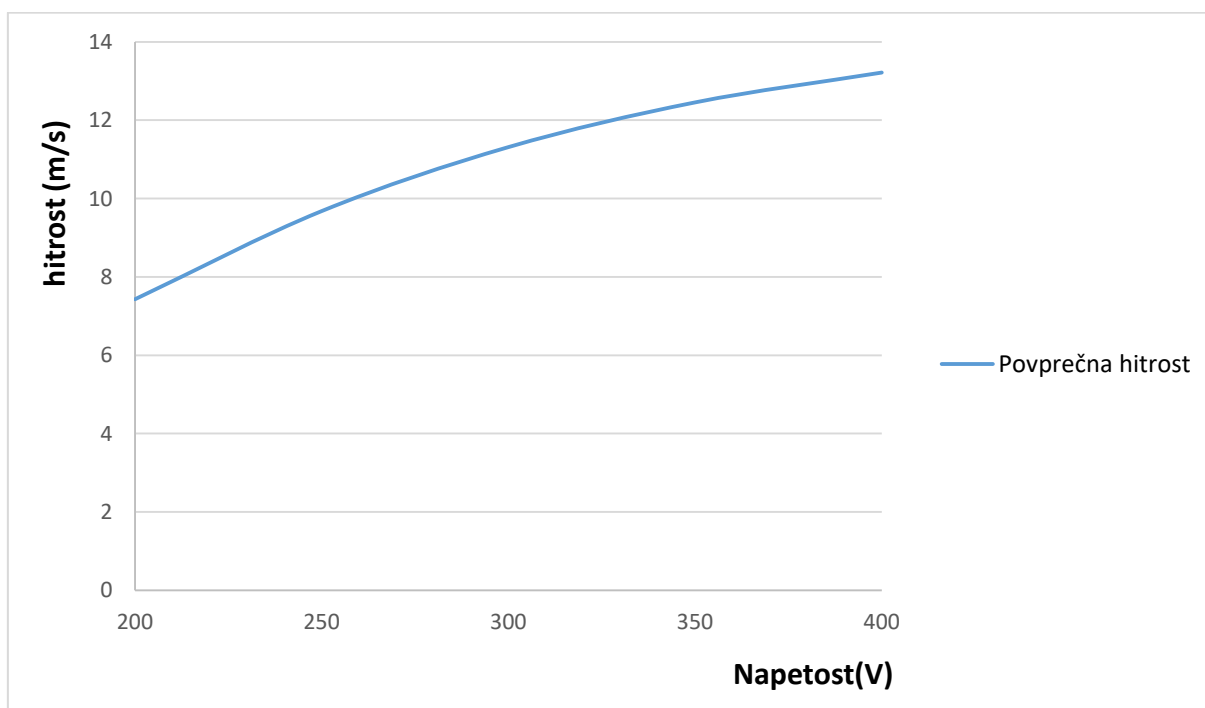


Slika 14: Vezava kondenzatorjev

Meritve hitrosti izstrelka smo začeli z napetostjo 200 V, saj pri manjši napetosti projektil ni zapustil cevi pospeševalnika. Napetost smo višali za 50 V ter pri vsaki napetosti ponovili meritev desetkrat. Izračunali smo povprečno hitrost. Napetost smo povečevali do 400 V, kar je maksimalna napetost, ki je dovoljena pri tej vezavi kondenzatorjev.

Tabela 2: Odvisnost hitrosti projektila od napetosti

Napetost (V)	200	250	300	350	400
Hitrost projektila (m/s)					
1.	7,44	9,62	11,36	12,5	13,3
2.	7,53	9,92	11,36	12,5	13,3
3.	7,91	9,62	11,36	12,5	13,02
4.	7,53	9,77	11,16	12,02	13,3
5.	7,44	9,62	11,36	12,76	13,3
6.	7,1	9,77	11,16	12,76	13,3
7.	7,27	9,47	11,16	12,5	13,02
8.	7,02	9,62	11,06	12,25	13,3
9.	7,53	9,77	11,79	12,25	13,02
10.	7,53	9,62	11,36	12,5	13,3
Povprečna hitrost (m/s)	7,43	9,68	11,313	12,454	13,216

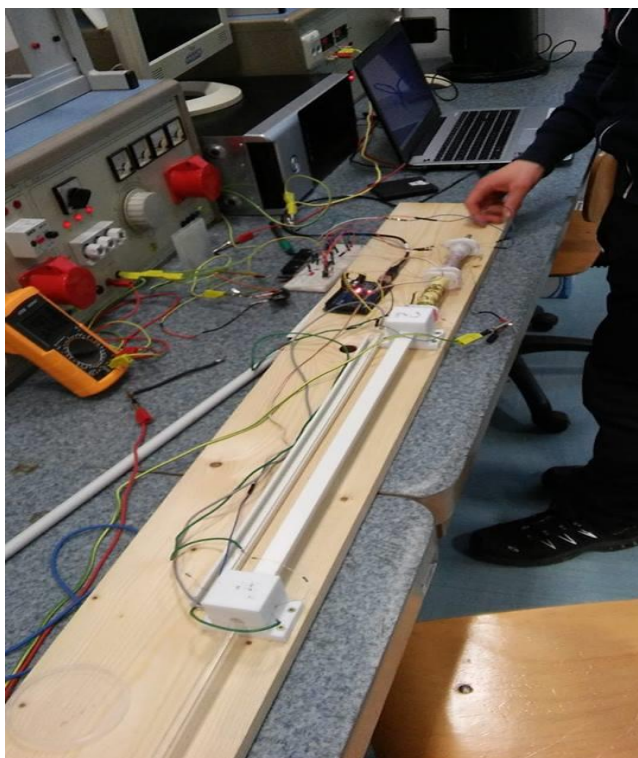


Graf 3: Odvisnost hitrosti projektila od napetosti

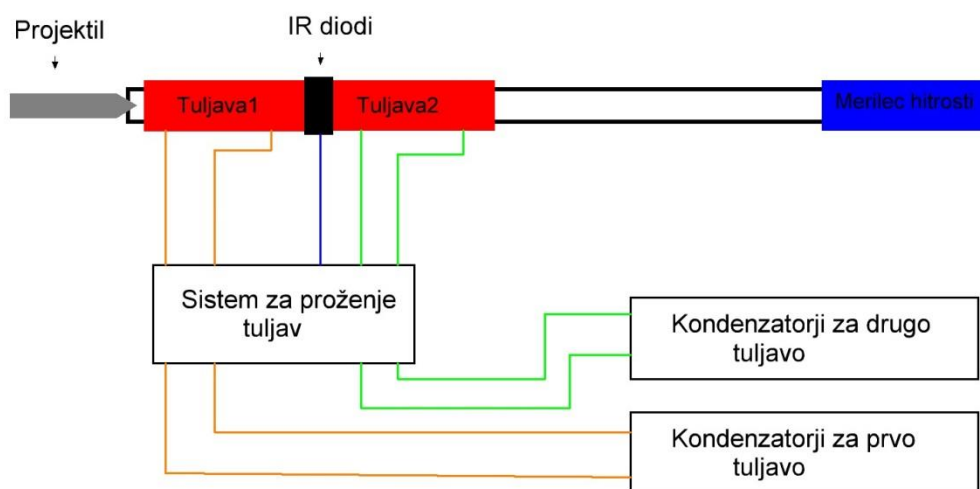
4.3 MERITEV HITROSTI VEČSTOPENSKEGA MAGNETNEGA POSPEŠEVALNIKA

4.3.1 Meritev hitrosti dvostopenjskega pospeševalnika

Pri tej meritvi smo merili hitrost projektila, pospešenega z dvema tuljavama. Prvo tuljavo smo vklapljala s tipko, skupna kapacitivnost prve stopnje pospeševalnika pa je bila skozi celotno meritev enaka ($1410 \mu\text{F}$). Drugo tuljavo smo vklapljali z vezjem in MOSFETom. Skupno kapacitivnost druge skupine kondenzatorjev smo spreminjali s korakom $470 \mu\text{F}$. Pri vsakem koraku smo opravili 10 meritev in izračunali povprečno hitrost. Meritve smo opravljali pri konstantni napetosti 200 V , saj je to ob enem nazivna napetost kondenzatorjev, v vzporedni vezavi pa tudi skupna napetost.



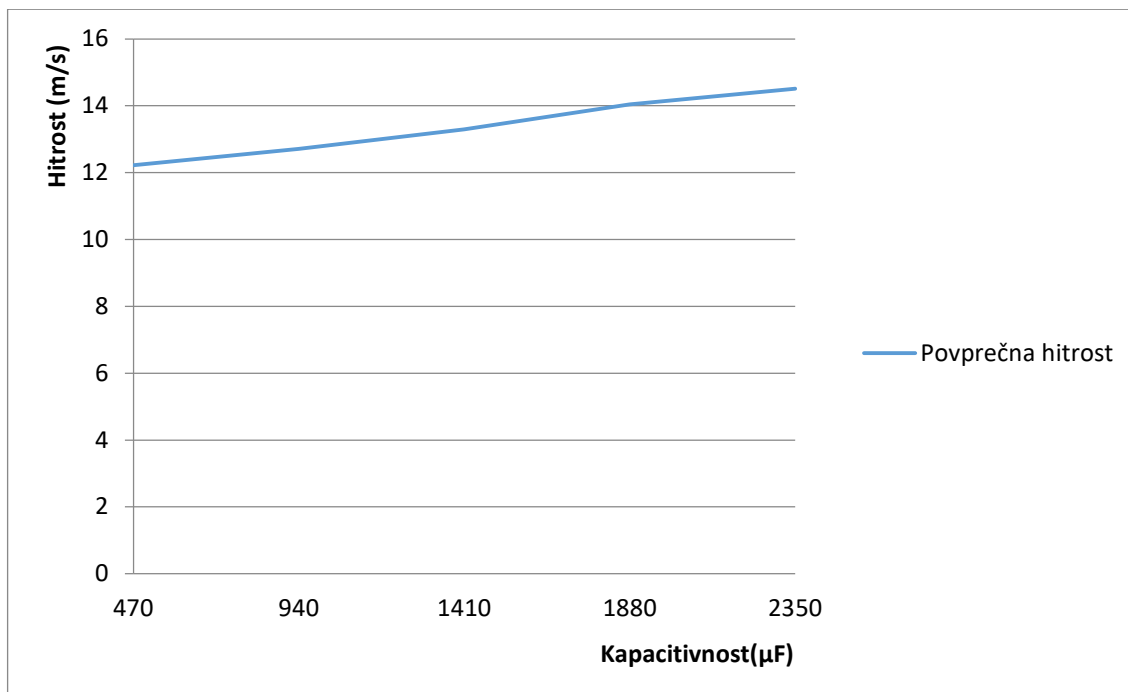
Slika 15: Meritev hitrosti projektila pri dvostopenjskem pospeševanju



Slika 16: Blokovna shema dvostopenjskega pospeševalnika

Tabela 3: Vpliv kapacitivnosti na hitrost projektila pri dvostopenjskem pospeševanju

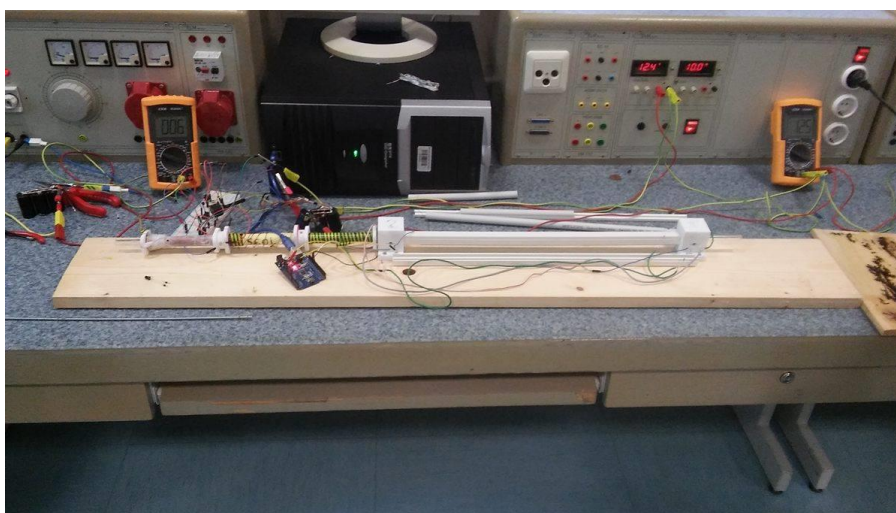
Kapacitivnost (μF)	470	940	1410	1470	1530
Hitrost projektila (m/s)					
1.	12,25	12,26	13,54	14,13	14,77
2.	12,25	13,00	13,54	14,13	14,44
3.	12,11	13,05	13,27	13,83	14,44
4.	12,11	12,75	13,54	14,13	14,77
5.	12,35	12,75	13,00	14,13	14,44
6.	12,25	12,75	13,27	13,83	14,77
7.	12,35	12,75	13,27	14,13	14,44
8.	12,35	12,75	13,27	14,13	14,44
9.	12,11	12,26	13,27	14,13	14,13
10.	12,11	12,75	13,00	13,83	14,44
Povprečna hitrost (m/s)	12,224	12,707	13,297	14,04	14,508



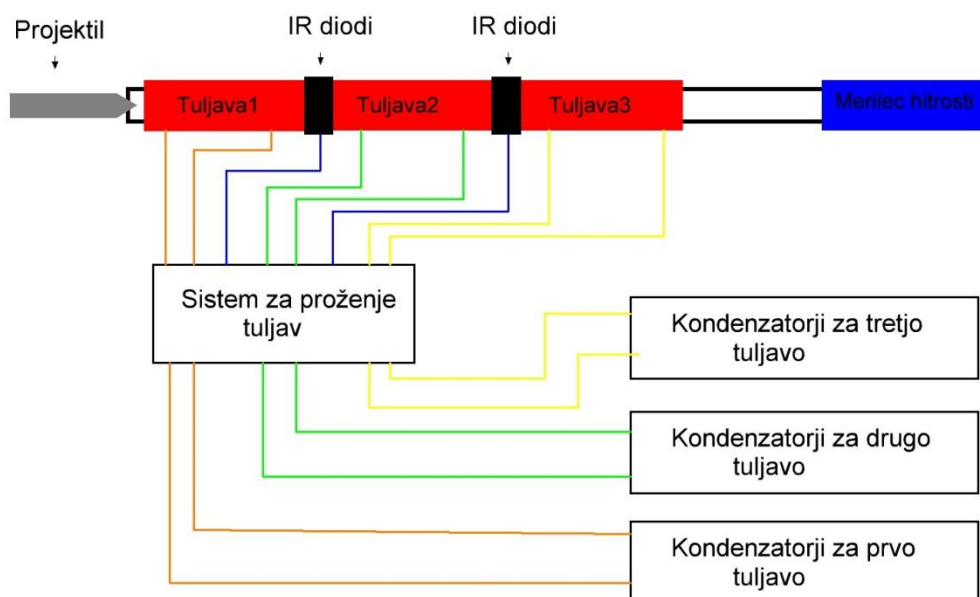
Graf 4: Vpliv kapacitivnosti na hitrost projektila pri dvostopenjskem pospeševanju

4.3.2 Meritev hitrosti tristopenjskega pospeševalnika

Pri tej meritvi smo merili hitrost projektila, pospešenega s tremi tuljavami. Prvo tuljavo smo vklapljala s tipko, skupna kapacitivnost prve stopnje pospeševalnika je bila skozi celotno meritev enaka ($1410 \mu\text{F}$). Drugo in tretjo tuljavo smo vklapljali z vezjem in MOSFETom. Skupno kapacitivnost druge stopnje pospeševalnika je bila skozi celotno meritev enaka ($1530 \mu\text{F}$). Skupno kapacitivnost pri tretji stopnji pospeševanja smo spreminjali s korakom $470 \mu\text{F}$. Pri vsakem koraku smo opravili 10 meritev in izračunali povprečno hitrost. Meritve smo opravljali pri konstantni napetosti 200 V , saj je to ob enem nazivna napetost kondenzatorjev, v vzporedni vezavi pa tudi skupna napetost.



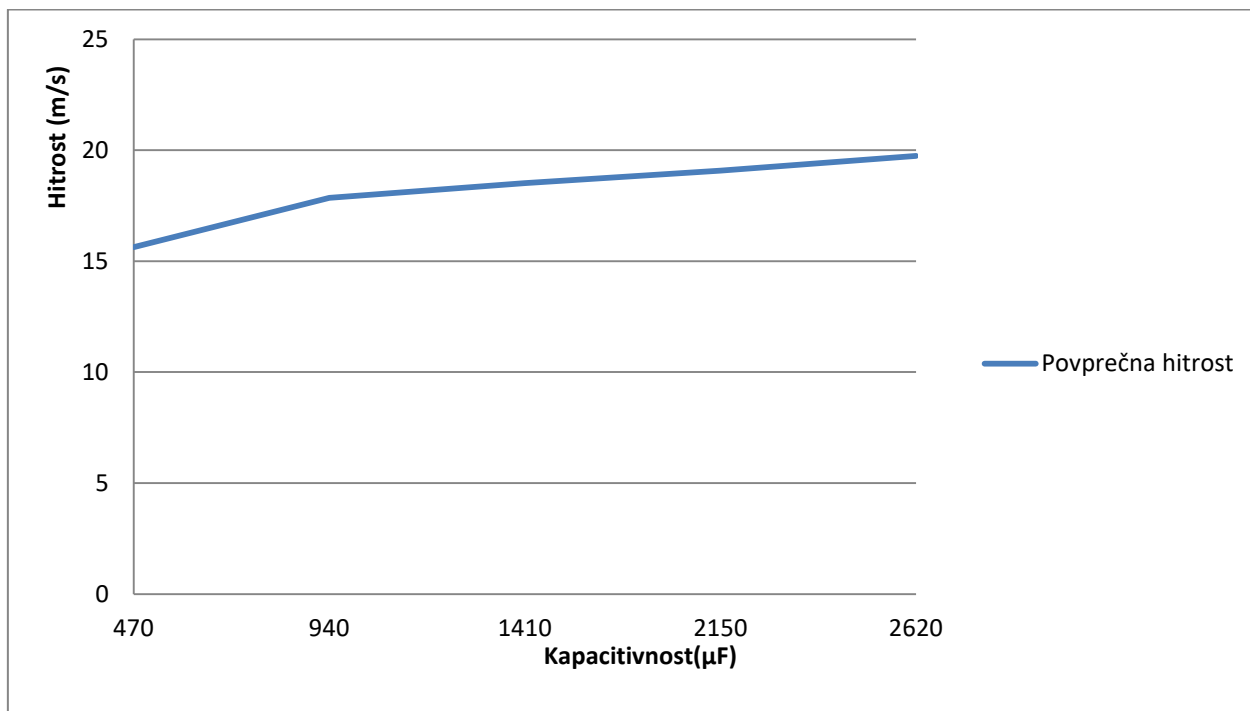
Slika 17: Meritev hitrosti projektila pri tristopenjskem pospeševanju



Slika 18: Blokovna shema tristopenjskega pospeševalnika

Tabela 4: Vpliv kapacitivnosti na hitrost projektila pri tristopenjskem pospeševanju

Kapacitivnost (μF)	470	940	1410	2150	2620
Hitrost projektila (m/s)					
1.	15,63	17,86	18,57	19,12	19,7
2.	15,63	17,86	19,12	19,12	19,7
3.	15,63	17,86	18,57	19,12	20,01
4.	15,63	17,86	18,57	19,12	19,65
5.	15,63	17,86	18,57	19,14	19,5
6.	15,63	17,86	18,06	19,12	19,7
7.	15,63	17,86	18,06	19,12	19,7
8.	15,63	17,86	18,57	19,12	20,07
9.	15,63	17,86	18,57	18,75	19,7
10.	15,63	17,86	18,57	19,12	19,7
Povprečna hitrost (m/s)	15,63	17,86	18,523	19,085	19,743



Graf 5: Vpliv kapacitivnosti na hitrost projektila pri tristopenjskem pospeševanju

5 DISKUSIJA IN INTERPERTACIJA REZULTATOV

5.1 VPLIV KAPACITIVNOSTI NA HITROST PROJEKTILA

Proženje prve tuljave smo si zamislili direktno s tipko. Ta način se nam je zdel najbolj preprost, zanesljiv in zelo uporaben. Pri meritvah smo kar hitro ugotovili, da ima ta način proženja veliko pomanjkljivost. Kondenzatorji se, ne glede na njihovo kapacitivnost, v času vklopa spraznijo. Razlog za to je počasna sklenitev in razklenitev tokokroga. Ugotovili smo, da mehansko ni možno doseči dovolj hitrega vklopa in izklopa tokokroga prve tuljave. Zaradi te ugotovitve kapacitivnosti ne moremo povečevati v neskončnost, saj bi tako povečali čas praznjenja kondenzatorjev, kar bi povzročilo zavorno silo na izstrelek v drugi polovici tuljave. Iz grafa številka 1 lahko vidimo, da se hitrost projektila glede na skupno kapacitivnost najprej povečuje, nato pa začne počasi padati. Maksimalna povprečna hitrost projektila je pri skupni kapacitivnosti 1470 μF , in sicer 9,024 m/s. Že prej omenjeni padec hitrosti se je pričel pri 1530 μF , kar je razvidno v tabeli 1. Razlog za to je prevelika kapacitivnost kondenzatorjev. Zaradi zgoraj že opisane ugotovitve se kondenzatorji praznijo predolgo, posledično projektil preleti prvo polovico tuljave (trenutek, v katerem projektil pospešuje) in preide v drugo polovico tuljave še preden se kondenzator izprazni, zato na projektil deluje zavorna sila.

5.2 VPLIV NAPETOSTI NA HITROST PROJEKTILA

Ugotovili smo, da je zaporedna vezava kondenzatorjev možna samo pri prvi tuljavi, ki jo prožimo ročno s tipko. Ker je upornost tuljave za enosmerni tok zelo majhna (zgolj ohmska upornost žice), lahko rečemo, da skozi njo steče tok kratkega stika. Ker smo kondenzatorje vezali zaporedno, smo dosegli skupno napetost 400 V, ki je bistveno večja od napetosti kondenzatorjev v vzporedni vezavi (200 V), ki smo jo uporabili na drugi in tretji tuljavi. Polprevodniški elementi, uporabljeni za vkapljanje druge in tretje tuljave, takšnega toka ne bi prenesli, posledično bi jih hitro uničili.

To lahko dokažemo z ohmovim zakonom:

$$I_m = \frac{U_s}{R_t} = \frac{400 \text{ V}}{6,54 \Omega} = 61,16 \text{ A}$$

Rezultati meritev so nam pokazali neprekinjeno naraščanje hitrosti, sorazmerno z napetostjo. Naraščanje hitrosti projektila je pri nizkih napetostih zelo velika (med 200 V in 250 V je hitrost narastla za 2,25 m/s), s povečevanjem napetosti pa je naraščanje začelo padati. Iz tabele lahko razberemo, da je razlika med povprečno hitrostjo pri 350 V in 400 V zgolj 0,76 m/s. Zaradi te ugotovitve smo prišli do sklepa, tudi če bi imeli možnost višati napetost, to ne bi bilo smiselno. Nesorazmerno višanje hitrosti projektila z napetostjo si razlagamo z magnetno lastnostjo feromagnetnega materiala izstrelka. Pri visokih poljskih jakostih feromagnetni materiali preidejo v nasičenje zato se gostota magnetnega pretoka ne viša sorazmerno z magnetno poljsko jakostjo. Z nadaljnjim višanjem napetosti, bi feromagnetni projektil prej kot slej prišel v nasičenje, hitrost pa bi se višala neznatno ali pa bi se ustalila. Ta pojav nam onemogoča, da bi lahko projektil z eno tuljavo pospeševali v nedogled.

5.3 DVOSTOPENSKO IN TRISTOPENSKO POSPEŠEVANJE

Proženje druge in tretje tuljave smo izvedli z MOSFETom, saj Tiristorja sami ne moremo izklopiti, ampak se izklopi sam, ko mu zmanjka energije med anodo in katodo. Ker smo imeli pri drugi in tretji stopnji pospeševanja narejen izklop tuljave, se je hitrost pri povečevanju kapacitivnosti povečevala. Ko je projektil prišel do sredine tuljave, kar je zaznala IR dioda (projektil je bil v prvi polovici tuljave) je MOSFET izklopil tok, ki teče skozi tuljavo, in s tem onemogočil zaviralno silo na feromagnetni projektil. Vpliv kapacitivnosti na hitrost projektila pri dvostopenjskem in tristopenjskem pospeševanju lahko razberemo iz Grafa 4 in 5.

6 ZAKLJUČEK

Pri izdelavi raziskovalne naloge sva se naučila, kako se obnaša feromagnetni projektil v tuljavi, lastnosti kondenzatorjev, veliko sva spoznala s področja elektronike. Skozi nalogo sva spoznala, načine raziskovalnega dela, od postavljanja hipotez pa vse do njenega zaključka.

Potrjevanje postavljenih hipotez.

1. Hipoteza:

- Vezje, ki bi glede na položaj projektila vklapljal tuljave, lahko izdelamo z osnovnim znanjem elektronike.

Prvo hipotezo lahko delno potrdiva, saj sva pri izdelavi vezja za vklapljanje tuljav imel nekaj težav, predvsem s priklopom MOSFETA in Tiristorja, (Zaradi različnih modelov MOSFET-a, sva prvo kupila MOSFET, ki po delovanju ni ustrezal najinemu vezju. Pri Tiristorju pa je bil problem v tem, da sva morala dodatno ojačiti tok iz Operacijskega ojačevalnika, zaradi zelo male upornosti med vrati in katodo Tiristorja.) ki jih s svojim znanjem elektronike in elektrotehnike nisva mogla rešiti. Zato sva potrebovala strokovno pomoč učiteljev iz te stroke.

2. Hipoteza:

- Skupna kapacitivnost kondenzatorjev bo vplivala na hitrost feromagnetnega projektila.

Drugo hipotezo sva potrdila. Skupna kapacitivnost ima zelo velik vpliv na hitrost projektila. Če ne zagotovimo izklopa tuljave, ko projektil preide njeno sredino, bo pri določeni kapacitivnosti na tuljavo začela delovati zavorna sila. Kondenzatorji se ne spraznejo popolnoma, ko projektil že preide sredino tuljave. V primeru, da imamo izklop zagotovljen, pa se bo pri povečevanju kapacitivnosti hitrost projektila samo še povečevala.

3. Hipoteza:

- Hitrost feromagnetnega projektila je sorazmerna z napetostjo.

Tretjo hipotezo sva zavrgla, kar je bilo za naju veliko presenečenje. Skozi meritev sva ugotovila, da pri povečevanju napetosti pride feromagnetni projektil v nasičenje. Karakteristika hitrosti napetosti, kar lahko vidimo iz grafa 3, je nelinearna zaradi magnetilne karakteristike železa, ki je nelinearna.

4. Hipoteza:

- Izhodna hitrost feromagnetnega projektila bo preseгла hitrost 30 m/s.

Tudi zadnjo hipotezo sva zavrgla, saj sva pred izdelavo magnetnega pospeševalnika imela prevelika pričakovanja glede izhodne hitrosti projektila. Povprečna hitrost projektila pri izstopu iz tuljave je 19,7 m/s, dosegli pa smo tudi hitrost 20,07 m/s.

Pri linearnem magnetnem pospeševalniku je še veliko odprtih možnosti glede raziskovanja in izboljšav. Hitrost 30 m/s, ki sva si jo postavila za hipotezo, bi bilo možno doseči oz. tudi preseči, vendar bi bilo potrebno uporabiti MOSFETe, ki so narejeni za večje tokove. V tem primeru bi lahko za dovajanje energije uporabili kondenzatorje, ki so narejeni za večjo napetost, ali pa bi kondenzatorje vezali zaporedno in s tem omogočili priklop na višjo napetost. Večjo izhodno hitrost projektila bi bilo možno doseči s povečanjem števila tuljav oz. s povečanjem stopenj pospeševanja. Pri proženju prve tuljave imamo možnost uporabe polprevodniškega elementa namesto tipke, posledično bi bilo potrebno izdelati sistem polnjena, ki bi projektil pravočasno vstavil v tuljavo. Tudi samo vezje proženja tuljav ima možnosti nadaljnega razvoja. Na trgu je že kar nekaj časa prisoten cenovno precej ugoden mikrokontroler Arduino, ki nam omogoča precej širok spekter možnosti. Kontroler bi zamenjal del dosedanjega vezja. Z njim bi lahko časovno določili, kdaj se katera tuljava vključi in kdaj izključi. Tukaj se nam je porodilo vprašanje "Ali je kontroler sposoben vklopiti in izklopiti tuljave v zelo kratkem času?" Da bi lahko odgovorili na to vprašanje, bi bilo potrebno narediti še nekaj dodatnih raziskav.

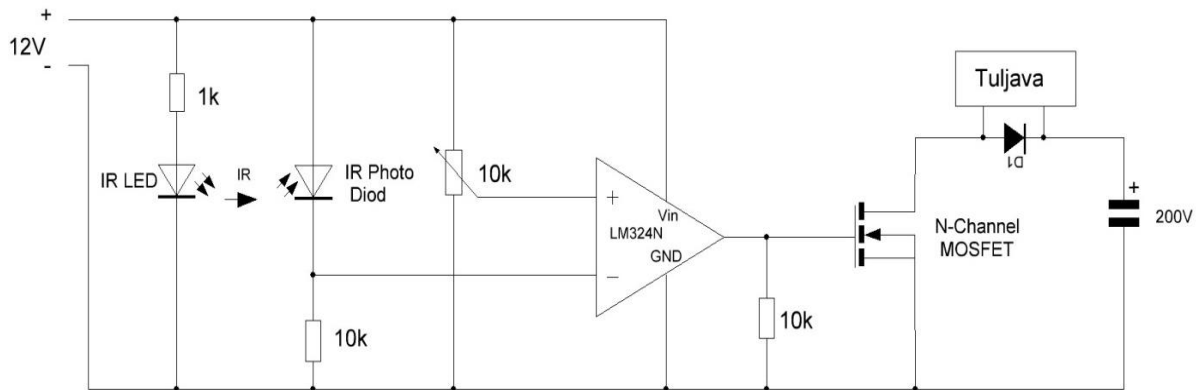
7 POVZETEK

Namen najine raziskovalne naloge je bil izdelati sistem za optimalen način vklapljanja in izklapljanja tuljav, da bi bila hitrost projektila pri izstopu iz cevi pospeševalnika najhitrejša. Največji izziv pri izdelavi linearnega magnetnega pospeševalnika nama je predstavljal pravočasen vklop in izklop tuljav. Tuljava mora biti vklopljena, ko projektil potuje od začetka tuljave pa do njene sredine. Če zamudimo z vklopom, na projektil deluje sila krajši čas in projektil ne doseže hitrosti, ki bi jo sicer. Enako je z izklopom tuljave. Če zamudimo pri izklopu, začne na projektil delovati zavorna sila in hitrost se bistveno zmanjša. Na hitrost projektila močno vplivajo tudi kondenzatorji, ki so vir energije za vklapljanje tuljav. V nalogi so raziskani tudi različni načini vezav, od vzporedne do zaporedne, ter samo število kondenzatorjev in kako ti vplivajo na hitrost projektila. Linearni magnetni pospeševalnik je tristopenjski, saj se projektil pospešuje s tremi tuljavami.

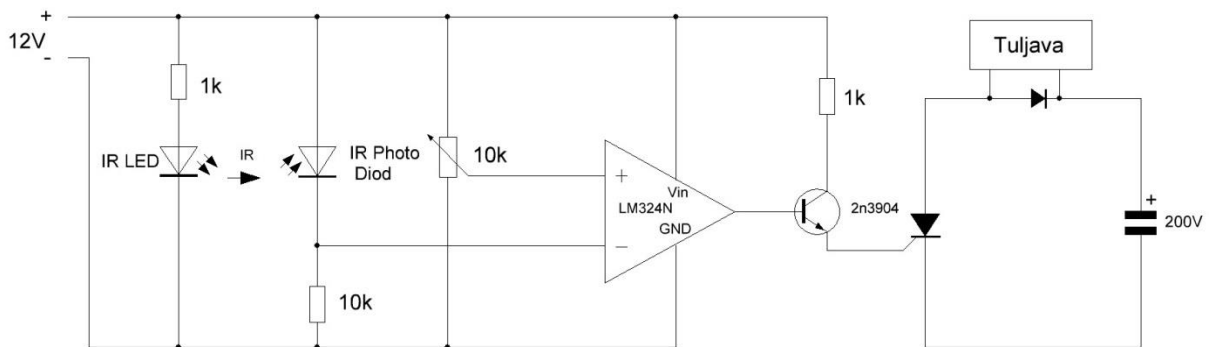
8 ZAHVALA

Rada bi se zahvalila predvsem mentorju gospodu Klemnu Hlebu in somentorju gospodu Matjažu Žeraku za trud, usmerjanje in pomoč pri izdelavi dokumentacije. Zahvalila bi se tudi gospe Lidiji Šuster za lektoriranje raziskovalne naloge in gospodu Zvonetu Cencnu za strokovno pomoč. Zahvale gre tudi Elektro in računalniški šoli, staršem in vsem, ki so nama kakorkoli pomagali pri izdelavi naloge.

9 PRILOGE



Priloga 1: Shema vezja z MOSFETom



Priloga 2: Shema vezja s Tiristorjem

10 VIRI IN LITERATURA

- [1] Hleb, K., Brdnik, L.: Magnetna puška, Šolski center Velenje, Velenje, 2011.
- [2] Lorencon R.: Elektronski elementi in vezja, Studio Maja, Ljubljana, 1996.
- [3] Unipolarni tranzistorji [online].
Dostopno na: <https://goo.gl/iFNUIR> [12. 11. 2016]
- [4] Tiristor [online]. Dostopno na: <https://goo.gl/40etNH> [12. 1. 2017]
- [5] Kondenzator [online]. Dostopno na: <https://goo.gl/mmb830> [26. 1. 2017]
- [6] Vzporedna vezava kondenzatorjev [online].
Dostopno na: <https://goo.gl/3ENuWV> [26. 1. 2017]
- [7] Magnetna puška [online]. Dostopno na: <https://goo.gl/vAWdvG> [29. 1. 2017]
- [8] Zaporedna vezava kondenzatorjev [online].
Dostopno na: <https://goo.gl/tvKXDd> [30. 1. 2017]
- [9] Mosfet – shema [online]. Dostopno na: <https://goo.gl/YM4NGs> [3. 2. 2017]
- [10] LM324N-slika [online]. Dostopno na: <https://goo.gl/x6sr5M> [3. 2. 2017]
- [11] Tiristor [online]. Dostopno na : <https://goo.gl/mVHU4Q> [3. 2. 2017]
- [12] Tiristor-slika [online]. Dostopno na: <https://goo.gl/Xn5a9y> [3. 2. 2017]
- [13] Prerez tuljave. Dostopno na: <https://goo.gl/JmmueJ> [3. 2. 2017]