



Srednja šola za kemijo,
elektrotehniko in računalništvo

RAZISKOVALNA NALOGA

INDUKCIJSKI GRELNIK

Tematsko področje:
ELEKTROTEHNIKA

Avtor: Jakob Zimšek

Mentor: Gregor Kramer, u.d.i.e

Mestna občina Celje, Mladi za Celje

april, 2024

IZJAVA*

Mentor/-ica Gregor Kramer v skladu z 20. členom Pravilnika o organizaciji mladinske raziskovalne dejavnosti »Mladi za Celje« Mestne občine Celje, zagotavljam, da je v raziskovalni nalogi z naslovom Indukcijski grelnik, katere avtor/-ica je Jakob Zimšek:

- besedilo v tiskani in elektronski obliki istovetno,
- pri raziskovanju uporabljeno gradivo navedeno v seznamu uporabljeni literature,
- da je za objavo fotografij v nalogi pridobljeno avtorjevo dovoljenje in je hranjeno v šolskem arhivu,
- da sme Osrednja knjižnica Celje objaviti raziskovalno nalošo v polnem besedilu na knjižničnih portalih z navedbo, da je raziskovalna nalogasta v okviru projekta Mladi za Celje,
- da je raziskovalno nalošo dovoljeno uporabiti za izobraževalne in raziskovalne namene s povzemanjem misli, idej, konceptov oziroma besedil iz naloge ob upoštevanju avtorstva in korektnem citiranju,
- da smo seznanjeni z razpisni pogoji projekta Mladi za Celje.

Celje, 10.4.2024



Podpis mentorja

Podpis odgovorne osebe
ZA ANITA LAZNIK

*

POJASNILO

V skladu z 20. členom Pravilnika raziskovalne dejavnosti »Mladi za Celje« Mestne občine Celje je potrebno podpisano izjavo mentorja (-ice) in odgovorne osebe šole vključiti v izvod za knjižnico, dovoljenje za objavo avtorja (-ice) fotografskega gradiva, katerega ni avtor (-ica) raziskovalne naloge, pa hrani šola v svojem arhivu.

Zahvala

Naloga je bila uspešno opravljena.

Posebna zahvala gre mentorju gospodu Gregorju Kramerju, ki me je usmerjal in vodil.

Zahvalujem pa se tudi gospe Tjaši Verdev za lektoriranje raziskovalne naloge.

Povzetek

Za raziskovalno nalogo sem se odločil narediti indukcijski grelnik, saj me zanimata indukcija in magnetno polje ter preučevanje teh pojavov. Indukcijo uporabljam v vsakdanjem življenju, zato teh principov ni slabo poznati. Naloga je od mene zahtevala znanje čiste elektronike in programiranja.

S potrditvijo vseh hipotez sem dosegel cilj, z maketo lahko prikažem indukcijo v dobri luči.

Ključne besede: Edijev tok, elektromagnetizem, indukcija, ZVS.

Summary

I decided to make an induction heater for my research project, because I am interested in induction, magnetic field and the study of these phenomena. We use induction in our everyday life, so it is not bad to know something about that topic. The task required me to know pure electronics and programming.

By confirming all the hypotheses, I reached the goal. Now, with working circuit I can represent the induction in a good light with the model.

Keywords: Eddy current, electromagnetism, induction, ZVS.

Kazalo vsebine

Zahvala	III
Povzetek	IV
1 UVOD	9
1.1 Predstavitev problema	9
1.2 Hipoteze	9
1.3 Opis raziskovalnih metod.....	9
2 IZDELAVA VEZJA	10
2.1 Izdelava in delovanje.....	10
3 Opis elementov.....	11
3.1 Tranzistorji	11
3.2 Kondenzator	13
3.3 Tuljava – toroidna in zračna	14
3.4 Zračna tuljava.....	15
3.5 Diode	16
3.6 Upori.....	18
3.7 Eksperimentalna plošča.....	19
3.8 Ventilator in hladilna rebra	19
3.9 Hladilna pasta	20
4 NADZORNI DEL PROJEKTA.....	20
4.1 Testna plošča – »breadboard«	20
4.2 Arduino MEGA.....	21
4.3 LCD-zaslon	22
4.4 Temperaturni senzor Dallas.....	23
5 IZVEDBA OSNOVNIH MERITEV IN DELOVANJE VEZJA	24
5.1 Frekvenca pri delovanju vezja.....	24

5.2	Zamenjava tuljave	25
5.3	LC prehodni pojav brez MOSFET-ov	26
6	MERJENJE TEMPERATURE RAZLIČNIH MATERIALOV	27
6.1	Prvi material – bakrena cev	27
6.2	Drugi material – jeklo	28
6.3	Tretji material – aluminij.....	29
7	IZDELAVA PROJEKTA	30
8	RAZPRAVA	31
9	ZAKLJUČEK.....	32
10	VIRI.....	33

Kazalo slik

<u>slika 1- Shema, po kateri sem izvedel vezavo.</u>	6
<u>slika 2- Fizična slika in simbol MOSFET-a</u>	7
<u>slika 3- Priključki na MOSFET-u</u>	7
<u>slika 4- simbola BJT tranzistorjev</u>	8
<u>slika 5- Slika uporabljenih kondenzatorjev</u>	9
<u>slika 6- kondenzatorji elektroliti</u>	9
<u>slika 7-ponazoritev poteka silnic, trenutna slika pojava</u>	10
<u>slika 8- Domača izvedba tuljave</u>	10
<u>slika 9- nazorna slika, kako se ustvari Edijev tok v materialu</u>	11
<u>slika 10- Zračna tuljava, prvotno uporabljena v mojem vezju, 10 ovojev</u>	11
<u>slika 11- Karakteristika diode UF 4007- kolensko napetost je mogoče razbrati</u>	12
<u>slika 12- Izgled diod UF 4007</u>	12
<u>slika 13- Simbol Zenerjeve diode</u>	12
<u>slika 14- Karakteristika- jasno berljiva zaporna karakteristika, ki je legendarna lastnost te diode</u>	13
<u>slika 15- Ogljenoplastni upor</u>	14
<u>slika 16- Žični upor</u>	14
<u>slika 17- Primer eksperimentalnih plošč</u>	15
<u>slika 18- Ventilator, 12VDC</u>	15

<u>slika 19- Hladilna pasta v embalaži</u>	16
<u>slika 20- Testna plošča (breadboard)</u>	16
<u>slika 21- Arduino Mega</u>	17
<u>slika 22- Realni izgled LCD zaslona</u>	18
<u>slika 23- Vezava in priključitev LCD zaslona na Arduino</u>	18
<u>slika 24- Vezava Dallas senzorja na Arduino, plus oznaka priključkov</u>	19
<u>slika 25- Frekvenca osciliranja na vratih MOSFET-a pri prvotni tuljavi z desetimi ovoji in napetosti 6,5V; 46,09kHz</u>	20
<u>slika 26-Temperatura MOSFET-ov je prikazana na LCD zaslonu, gredo po vrsti od leve proti desni (prvi, drugi)</u>	20
<u>slika 27- Osciliranje pri tuljavi s pet ovoji</u>	21
<u>slika 28- Prikaz temperatur MOSFET-ov pri menjavi tuljave in enaki napetosti, to je 6,5V</u> ..	21
<u>slika 29- Prikaz prehodnega poj ava, na vhodu 0,7VDC, skoči na 1,2V; frekvenca vezja je 50KHz</u>	22
<u>slika 30- Meritev pri segrevanju bakra</u>	23
<u>slika 31- Zagrevanje jekla, v tem primeru pa sem meril z multimetrom,</u>	24
<u>slika 32- Zagrevanje aluminija</u>	25
<u>slika 33- izgled makete</u>	26

1 UVOD

1.1 Predstavitev problema

Problem raziskovalne naloge je izdelava indukcijskega grelnika. Projekt sem si izbral, saj me zanima elektromagnetizem in aplikativnost projekta v vsakdanjem življenju. Večina posameznikov se ne zaveda, da se elektromagnetni pojavi izrabljajo v vsakdanjem življenju, na primer v kuhinji, tj. indukcijska plošča, indukcijski gelnik vode; poznamo brezžično polnjenje, v livarnah uporabljajo indukcijske peči za topljenje železa. Cilj je prikazati moč in efektivnost indukcije – čeprav vezje glede porabe ni idealno, vseeno vidimo moč indukcije.

1.2 Hipoteze

1. Spreminjanje tuljav drastično vpliva na frekvenco osciliranja.
2. Vezje lahko zagreje različne kovine, glede na material bolj ali manj.
3. Jeklo je mogoče s tem specifičnim gelnikom razzareti.
4. Vezje deluje.

1.3 Opis raziskovalnih metod

Raziskovanje sem začel preko YouTube-a in interneta. Pogledal sem par primerov takšnega vezja z različnimi izvedbami. Lastno izvedbo pa sem naredil tako, kot jo je naredil Mehdi Sadahdar, bolje poznan kot »Electro Boom«. Vzel sem podobne komponente, točno enakih nisem našel, in naredil vezje.

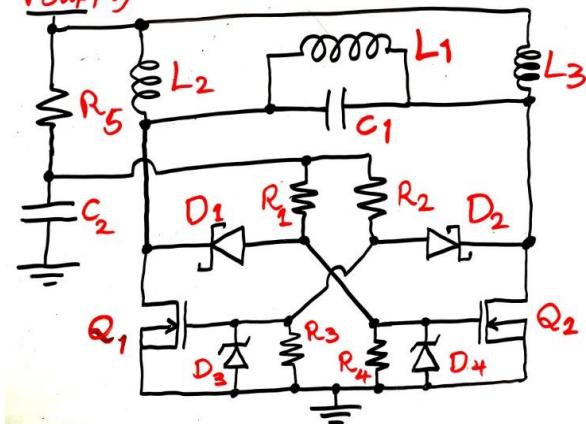
2 IZDELAVA VEZJA

2.1 Izdelava in delovanje

Poglavlje predstavlja ojačevalno vezje ZVS.. Sestavni elementi so kondenzatorji, tranzistorja, tuljave, ravna, toroidne. Sama indukcija deluje na princip magnetnega polja, to pomeni, da mora obvezno vsebovati izmenični signal in visoka frekvenca. Izhod je v bistvu ravna tuljava, ko pa vstavimo vanjo feromagnetni material, se silnice hitro zgostijo, ustvari se močen Edijev tok in predmet se zgreje. Predstavil bom različico, ki sem jo naredil doma; grelnik se napaja na 12V enosmerne napetosti. Seveda moramo to napetost pretvoriti in ojačati, da dobimo izmenično napetost s frekvenco okoli 20 kHz. Za preizkušanje in samo zaščito sem ga večino časa napajal na 6 V–8 V, realna frekvenca je bila okoli 50 kHz, natančneje v nadaljevanju. Na sliki spodaj imamo vezje za izvedbo indukcijskega grelnika. L2 in L3 predstavljata toroidne tuljave, katerih naloga je filtriranje. Pri izmenični napetosti se tuljava obnaša podobno kot upor. L1 je navitje oziroma smisel vezja, to je namreč izhodna tuljava, v katero lahko damo feromagnetni material in ga zgrejemo. Načeloma bo tuljava sama po sebi minimalno temperirana ob priklopu zaradi lastne indukcije in neidealnosti. To vezje je za eksperimentiranje, ni za proizvodnjo, ker je rahlo nestabilno in ni robustno. Napajal sem ga iz laboratorijskega napajjalnika zaradi tokovne omejitve – to vezje je precej občutljivo. Je pa vezje dovolj močno, da razžari kovino, lahko pa ga uporabimo za napajanje generatorjev visoke napetosti, na primer Marxov generator. V nadaljevanju bom vsak element posebej razložil in objasnil njegov smisel.

Za izdelavo sem porabil kar dosti časa, vezje je narejeno na eksperimentalni plošči. Celotno vezje sem dal na leseno ploščo, kamor sem dal tudi priključne sponke za napajanje ter izhodne sponke, ki omogočajo spremembo tuljav. Dodal sem tudi stikalo in ventilator, ki poleg hladilnikov ter termo paste dodatno ohlaja MOSFET-e. Za samo varnost vezja pa je bil dodan tudi Arduino, ki preko Dallas senzorjev nadzoruje temperaturo MOSFET-ov in s tem omogoča jasen pregled. Temperatura je v realnem času prikazana na LCD-ekranu. V prilogi 1 je narisana

V_{supply}



shema še v programu LT spice.

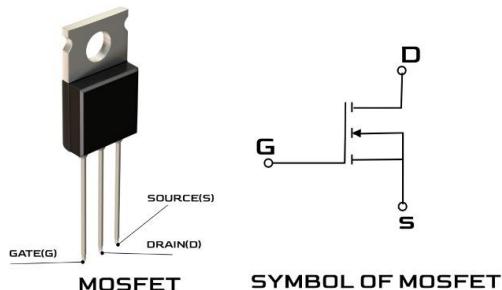
Slika 1: Shema, po kateri sem izvedel vezavo

3 Opis elementov

3.1 Tranzistorji

Tranzistorji so polprevodniški elektronski elementi s tremi priključki, ki se uporabljajo za ojačevanje, preklapljanje, uravnavanje napetosti, modulacijo signalov kot stikalo, itn. Moderne elektronike brez tranzistorjev ni. Zaradi svoje pomembnosti ga veliko ljudi uvršča med najpomembnejše dosežke 20. stoletja. Poznamo več vrst tranzistorjev.

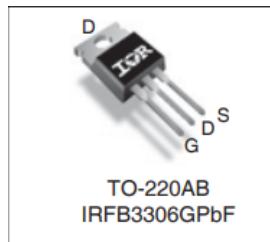
a) MOSFET (metal–oxide–semiconductor)



Slika 2: Fizična slika in simbol MOSFET-a

MOSFET je tip tranzistorja, t. i. field effect, kar pomeni, da je odvisen od električnega polja. Proizveden je z oksidacijo silicija, ki je pogosto uporabljen material v industriji elektronike. Ima t. i. izolirana vrata, večja kot je napetost, višja je prevodnost MOSFET-a. Ta efekt se izrablja za preklapljanje in ojačenje, kar je pomembno za moj primer izdelave. MOSFET ne zahteva vhodnega toka za krmiljenje, kot npr. BJT-tranzistorji. Moramo pa biti pozorni pri priključitvi, saj je na začetku zelo občutljiv na spremembe napetosti na vratih, lahko se hitro uniči. Paziti moramo, da se na začetku ne zgodi iskrenje ozziroma nenaden vklop in izklop. MOSFET-i imajo tri priključke: drain (D), gate (G) in source (S).

V mojem primeru sem uporabil MOSFET IRFB3306. Ima inducirani n-kanal. Ima vhodno upornost $3,3 \text{ m}\Omega$ do maksimalno $4,2 \text{ m}\Omega$. Zdrži tok do 120 A. Ta element se zelo segreva, zato sem uporabil termalno pasto in hladilnik. V takšnih primerih je v vezju priporočljivo dati MOSFET na nogice, da se ga enostavno zamenja, če se uniči. Poznamo pa tudi MOSFET-e z induciranim p-kanalom, kjer je puščica obrnjena.



Slika 3: Priklučki na MOSFET-u

b) BJT-tranzistorji (Bipolar junction transistor)

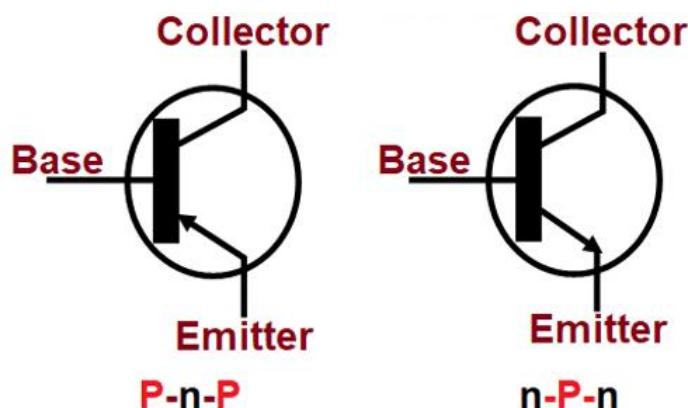
Le-ti imajo priključke emitor, kolektor, baza. Poznamo NPN in PNP tipe teh tranzistorjev. Tranzistor v bistvu deluje kot nekakšen ventil, ki ga z veličino toka na bazi uravnavamo, torej potrebujemo tok za uporabo tranzistorja.

Prednosti MOSFET-a so:

- visoka vhodna impedanca – zahteva manj toka,
- potrebuje manj moči zaradi manjšega toka, kar je bolje za takšna majhna vezja,
- ima večje hitrosti preklapljanja kot BJT tranzistorji,
- večja kompatibilnost z digitalnimi vezji, ker so vrata napetostno nadzirana.

Ima pa tudi BJT tranzistor svoje prednosti, vendar za moje vezje ni optimalen, kot so:

- so odpornejši na nestabilno napetost na kakšne prenihaje ipd.,
- lahko preklapljajo večje tokove z bistveno manjšo napetostjo.



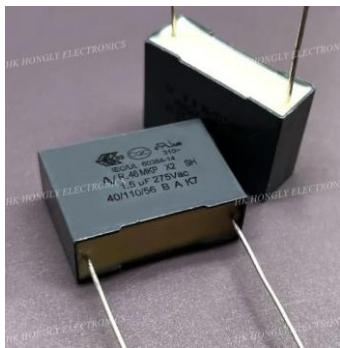
Slika 4: Simbola BJT-tranzistorjev

3.2 Kondenzator

Kondenzator je elektronski element, ki svojo energijo shranjuje v obliki električnega polja. Količina hranjene energije je odvisna od njegove kapacitivnosti, ki se meri v faradih (F). V vezjih ima več različnih funkcij, na primer: glajenje napetosti, množenje napetosti, filtriranje signala v kombinaciji s tuljavami, električna oscilacija in resonance – to je predvsem funkcija pri tem vezju. Poznamo polarne in nepolarne kondenzatorje. Polarnim rečemo tudi elektroliti, nepolarnih pa je več vrst:

- filmski,
- keramični,
- polikarbonatni (visoka natančnost).

Pri teh vrstah kondenzatorjev ni potrebno paziti na polariteto priključitve. V mojem vezju sem uporabil 4 kondenzatorje velikost $1,5 \mu\text{F}$, ki sem jih vezal vzporedno, da sem dobil skupno kapacitivnost $6 \mu\text{F}$. Narejen je za napetost do 275 VAC. Točna oznaka tega kondenzatorja je »mfp x2 sh«.



Slika 5: Slika uporabljenih kondenzatorjev

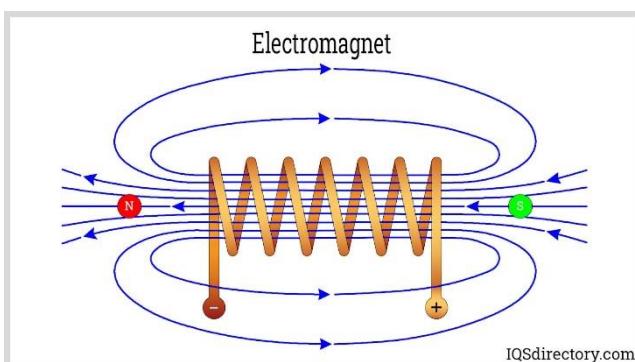
V drugo skupino pa spadajo t. i. kondenzatorji elektroliti. Ti se predvsem uporabljajo tam, kjer je enosmerna napetost – polariteta je pomembna. Imajo naravno večje kapacitivnosti kot nepolarni kondenzatorji. Uporabljajo se za kakšno glajenje napetosti in podobno, definitivno niso primerni za LC-krog, ki je v mojem vezju.



Slika 6: Kondenzatorji elektroliti

3.3 Tuljava – toroidna in zračna

Tuljava je elektronski element, ki shranjuje električno energijo v obliki magnetnega polja. Po naravi se upira spremembam. Ko tok steče čez njo, dobimo kontra fluks, ki zavira tok. Pri enosmerni napetosti se to zgodi samo enkrat, potem tuljava postane kratek stik, pri izmenični napetosti pa lahko ta pojav dejansko izrabimo. Tam se tuljava začne obnašati kot nekakšen upor. V mojem primeru mi služi kot filter (toroidna) in kot ključna komponenta za zagrevanje (zračna). Za razumevanje delovanja tuljav je potrebno poznati pravilo desne roke – palec kaže smer toka, prsti smer silnic.



Slika 7: Ponazoritev poteka silnic, trenutna slika pojava

Toroidna tuljava

Je vrsta tuljave, kjer je žica navita okoli feritnega jedra. Uporablja se za filtre v vezju. V mojem primeru poveča induktivnost. Pri takšnih tuljavah je lahko problem, da se le-ta nasiči. Do nasičenja pa pride, ko se jedro popolnoma namagneti, tako da ni več uporabno za magnetni pretok. Zaradi tega sem na vsaki strani vezal dve toroidni tuljavi zaporedno s tremi ovoji, da ne moti delovanja vezja. Za boljšo tokovno zmogljivost sem uporabil dvojno žico.



Slika 8: Domača izvedba tuljave

3.4 Zračna tuljava

Gre za tuljavo, ki je v bistvu navita žica, nima nobenega jedra. V vezju je to L1, ki je izhodna tuljava. Ko vstavimo feromagnetno snov v to tuljavo, se tok zelo poveča, odvisno od vrste materiala, na primer za železo se bo tok veliko bolj povečal, kot pa za aluminij. Ta pojav se zgodi zaradi t. i. Edijevega toka. Gre za tok, ki se ustvari v vsakem prevodniku, kjer je prisotno spremenljajoče se magnetno polje. Ti tokovi naredijo katerikoli prevodnik magneten. $E = \Delta\varphi * \Delta t$ (napetost). Tukaj gre za t. i. vrtinčne tokove v prevodniku. Boljši kot je prevodnik, torej manjšo kot ima upornost, močnejši tok se ustvari – pomembno pri indukcijskem grelniku. Lahko si pogledamo primer indukcijske plošče, ki je že danes skoraj v vsakem modernem domu. Tam gre za poleg vezja za močno navitje, kjer se ustvari močno magnetno polje.

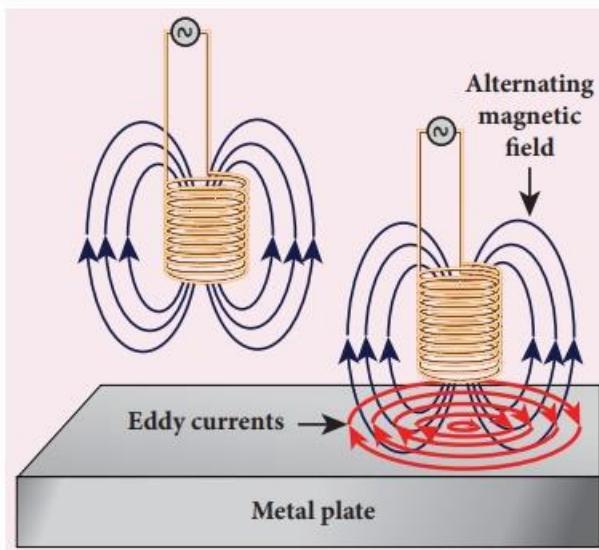


Figure 4.11 Eddy currents

Slika 9: Nazorna slika, kako se ustvari Edijev tok v materialu



Slika 10: Zračna tuljava, prvotno uporabljena v mojem vezju, 10 ovojev

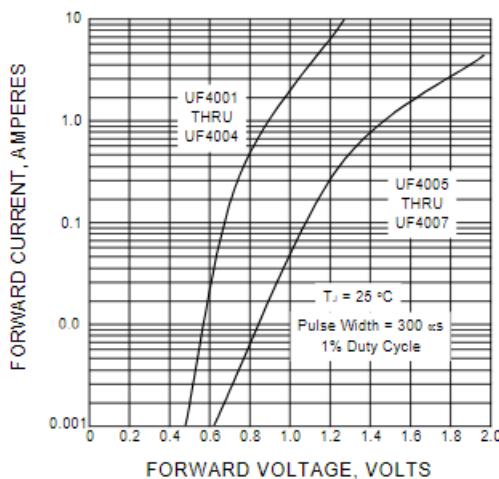
V mojem primeru ima tuljava 10 navojev. Na velikost induktivnosti vpliva število navojev in razmik ter tudi presek kabla. V tem primeru sem uporabil lakiran kabel preseka 6 mm^2 . Dolžine je okoli 5 cm, širine pa 4 cm. Za večjo optimalnost je priporočljiv manjši razmak med navoji.

3.5 Diode

Dioda je polprevodniški element v vezju. V bistvu gre za PN spoj, ki potrebuje neko napetost, da začne prevajati. Dioda prevaja samo v eno smer, za doseg tega pa je potrebno doseči kolensko napetost, ki omogoči premik elektronov in s tem prevodnost. Lahko je to 0,7 V (silicij), 0,3 V (galij) itn. Pozitivni priključek na diodi je anoda, negativni pa katoda. Uporablja se za veliko namenov:

- za usmerjanje, na primer mostični polno valjni usmernik;
- za zaščito pred nenadnimi napetostnimi sunki (flyback dioda);
- za hitro razelekturenje (uporabljeno v tem primeru).

Diod je ogromno, za to vezje pa sem uporabil znano diodo UF 4007, ki je bila alternativa Shotkijevi diodi. Ta je znana, da je hitra in odzivna. Ta dioda ima tudi visoke tokovne zmogljivosti, v vezju se je obnašala zelo dobro. Spodnja slika prikazuje karakteristiko te diode.



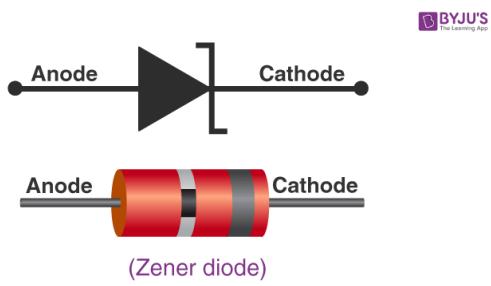
Slika 11: Karakteristika diode UF 4007, kolensko napetost je mogoče razbrati



Slika 12: Izgled diod UF 4007

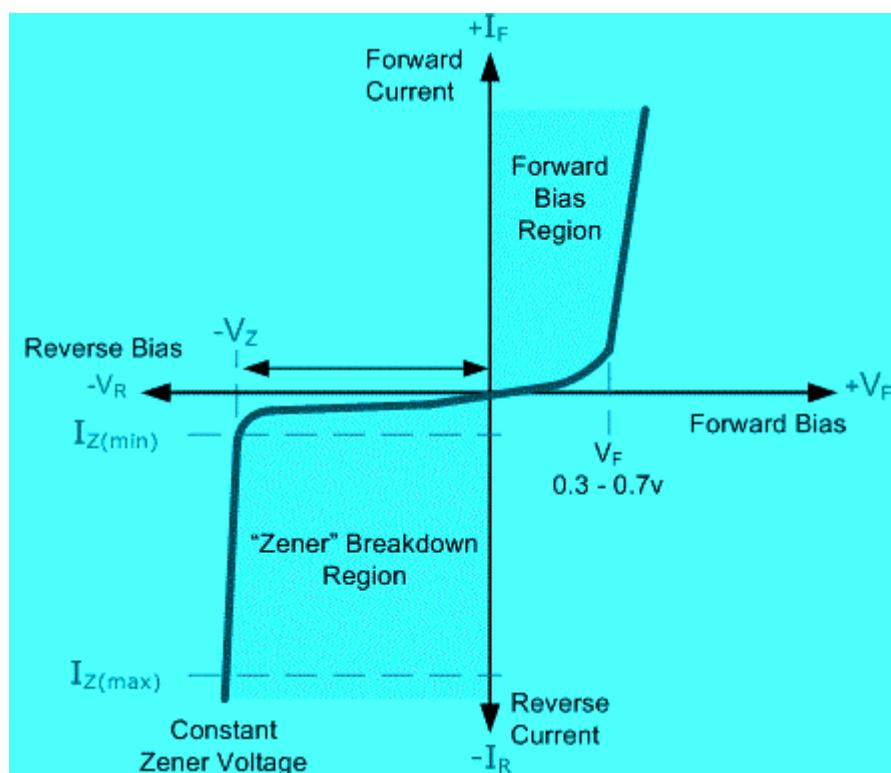
Zenerjeva dioda

Zenerjeva dioda je specifična. Gre za diodo, ki skrbi za napetostno zaščito. V vezju le-ta skrbi, da ni prevelike napetosti na vratih MOSFET-a. Deluje tako, da se pri nazivni napetosti odpre in začne prevajati, s povečevanjem se tok veča, napetost pa z majhnimi odstopanji ostane enaka. Torej večja kot je vhodna napetost, večji bo tok čez diodo. Priključimo jo v zaporni smeri. Ima tudi specifičen simbol.



Slika 13: Simbol Zenerjeve diode

Karakteristika Zenerjeve diode:



Slika 14: Karakteristika, jasno berljiva zaporna karakteristika, ki je legendarna lastnost te diode

Vidimo, da se na zaporni smeri pri določeni napetosti V_z ustvari velik zaporni tok, napetost pa ostaja ista z majhnimi odstopanjimi.

3.6 Upori

Upor je eden najpomembnejših in najpogosteje uporabljenih elementov v elektroniki. Poznam je tudi kot »resistor«. Za idealne upore velja stalna upornost, kar pa v praksi ni izvedljivo, večja kot je upornost, večji je pogrešek. Zanj velja Ohmov zakon: $R = \frac{U}{I}$. Tako za upor kot za ostala ohmska bremena velja, da je pri izračunu $\cos \Phi = 1$.

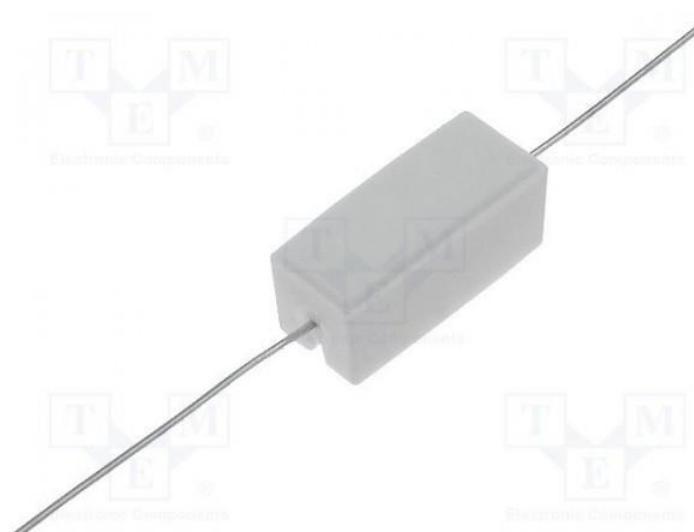
Poznamo:

- masne upore, ki so zgrajeni iz telesa v obliki valja, najpogosteje iz ogljenega praha, njihove upornosti segajo od nekaj $m\Omega$ do nekaj $M\Omega$;
- žične upore – uporovna žica navita na izolacijsko telo;
- plastni upori – več plasti, uporovna plast je oglje ali pa kovinski oksid, poimenovani so po materialu, iz katerega so narejeni (kovino plastni, ogljenoplastni).

Upori se uporabljajo za omejevanje toka, za doseg pravilne napetosti (zaporedna vezava).



Slika 15: Ogljenoplastni upor



Slika 16: Žični upor

3.7 Eksperimentalna plošča

To je plošča, ki ima pripravljene luknje za spajkanje, povezave pa moraš narediti sam. Uporabna je za eksperimentalna vezja in za učenje. Elementi se lahko razporedijo po poljubnem redu, veliko je fleksibilnosti.



 ChipEK

Slika 17: Primer eksperimentalnih plošč

3.8 Ventilator in hladilna rebra

Za samo hlajenje tranzistorjev sem uporabil hladilna rebra, termo pasto in ventilator. Ta ventilator je 12 V in je primarno namenjen za hlajenje računalniških komponent, vendar je primeren za mojo naloge.



Slika 18: Ventilator, 12 VDC

3.9 Hladilna pasta

To je snov, ki se uporablja v elektroniki za mazanje elementov in se s tem omogoča boljše prehajanje toplote, posledično boljše hlajenje. Uporabljena je bila na tranzistorjih in ni prevodnik.

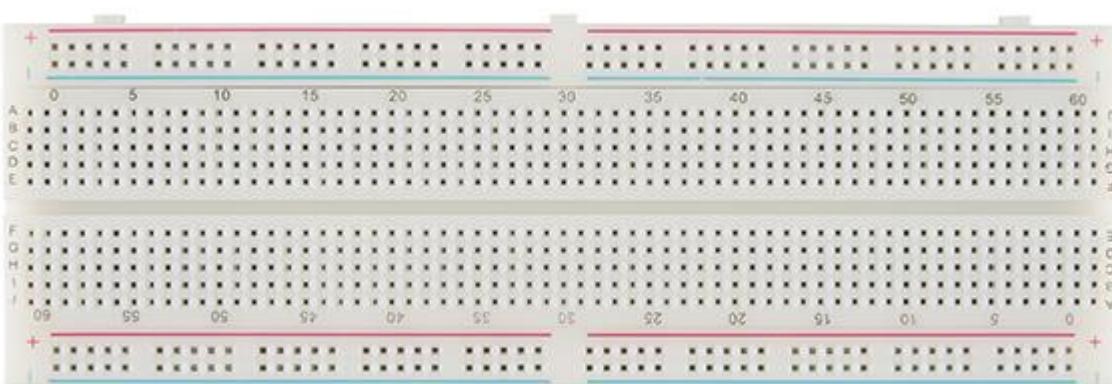


Slika 19: Hladilna pasta v embalaži

4 NADZORNI DEL PROJEKTA

4.1 Testna plošča – »breadboard«

Testna plošča je plošča, ki se uporablja za nazorno in enostavno povezovanje. Uporabil sem jo za vezavo LCD-zaslona in ostalih stvari povezanih z Arduinom.

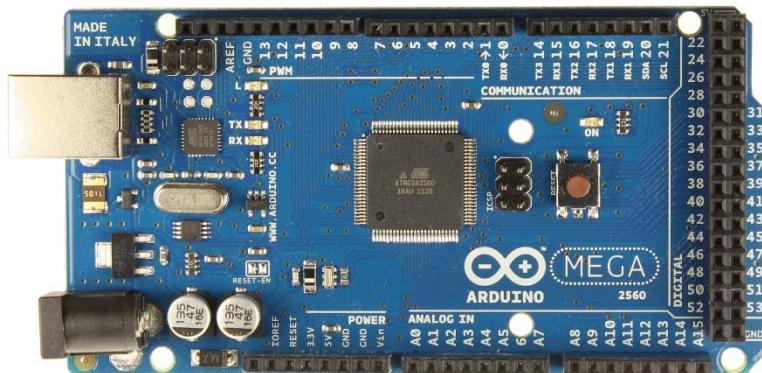


Slika 20: Testna plošča (breadboard)

4.2 Arduino MEGA

Arduino MEGA je mikrokrmlnik na matični plošči, ki naredi svet elektronike dostopnejši. Programira se v jeziku C++. Ima tako digitalne kot analogne vhode ter izhode. Srce mikrokrmlnika je njegov procesor AT Mega 2560, ki ima frekvenco delovanja 16 MHz, kar je dovolj za veliko večino aplikacij. Arduino se lahko uporablja za preproste aplikacije, kot je na primer prižiganje LED-diod, lahko pa za zahtevnejše stvari, na primer merjenje temperature, vklapljanje, izklopiljanje močnostne elektronike, uporaben je tudi za regulacije. Omogoča tudi povezovanje z LCD-zasloni, preko katerih lahko prikazujemo podatki, če pa le-tega nimamo, je v programske opremi serijski monitor, ki prikazuje podatke znotraj programa.

V mojem primeru sem ga uporabil za nadzor temperature MOSFET-ov preko temperaturnega senzorja Dallas in LCD-zaslona. V tem primeru ima funkcijo varovanja, da imam jasen nadzor, kar zmanjša možnosti za uničenje MOSFET-a.



Slika 21: Arduino Mega

Specifikacije

Mikroprocesor: ATMega2560

Frekvenca delovanja: 16 MHz

Napetost (izhodna): 3,3 V; 5 V

Vhodna napetost: 7 V–12 V

Digitalni vhodno/izhodni pini: 54, od tega 14 s PWM

Analogni pini: 16

Priključki: USB, ICSP

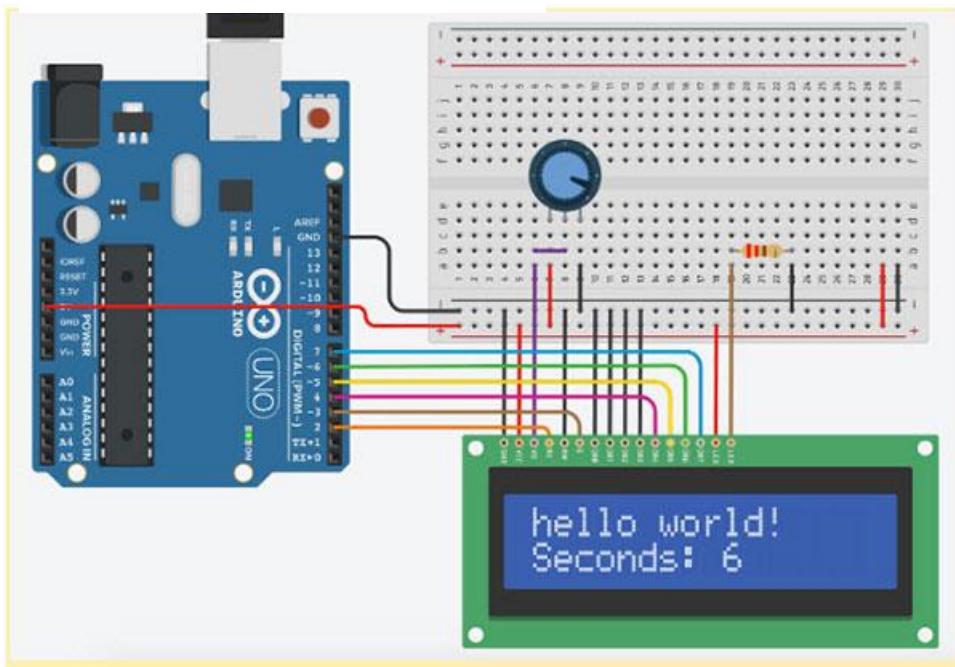
DC tok na vhodno/izhodnih pinih: 40 mA

4.3 LCD-zaslon

Znan tudi kot »Liquid crystal display« je prikazovalnik, ki omogoča izpis črk, številk in ostalih simbolov. Uporabil sem dvovrstični LCD-prikazovalnik 2x16. Takšen zaslon je varčen in dosti enostaven za uporabo. Deluje na napetosti 5 V, jasnost zaslona pa lahko upravljamo s potenciometrom ali pa preko fotoupora in s PWM. V mojem projektu mi omogoča jasen prikaz temperature, brez potrebe za serijski vmesnik, lahko rečemo, da podatki z LCD-jem oživijo.



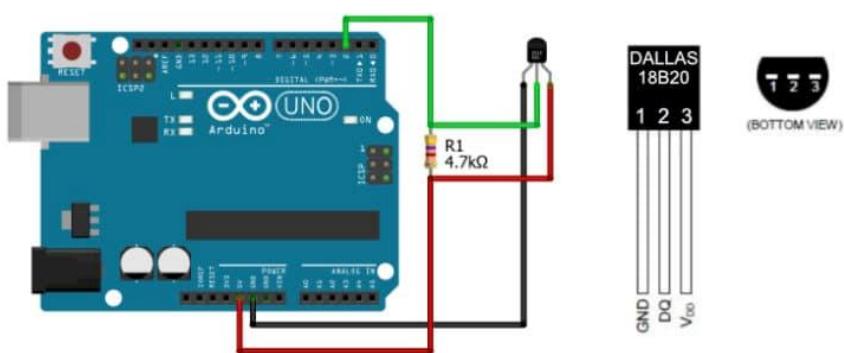
Slika 22: Realni izgled LCD-zaslona



Slika 23: Vezava in priključitev LCD-zaslona na Arduino

4.4 Temperaturni senzor Dallas

Gre za digitalni senzor temperature, znan tudi kot DS18B20 ali DS18SB20. Imajo digitalni izhod, komunicirajo preko digitalnih pinov. Ima veliko natančnost merjenja v razponu od -10° do 80°C . Ima odstopanja v rangu $+ - 0.5^{\circ}\text{C}$. Za komunikacijo potrebuje samo en pin na Arduinu. Ta senzor je energetsko zelo učinkovit.

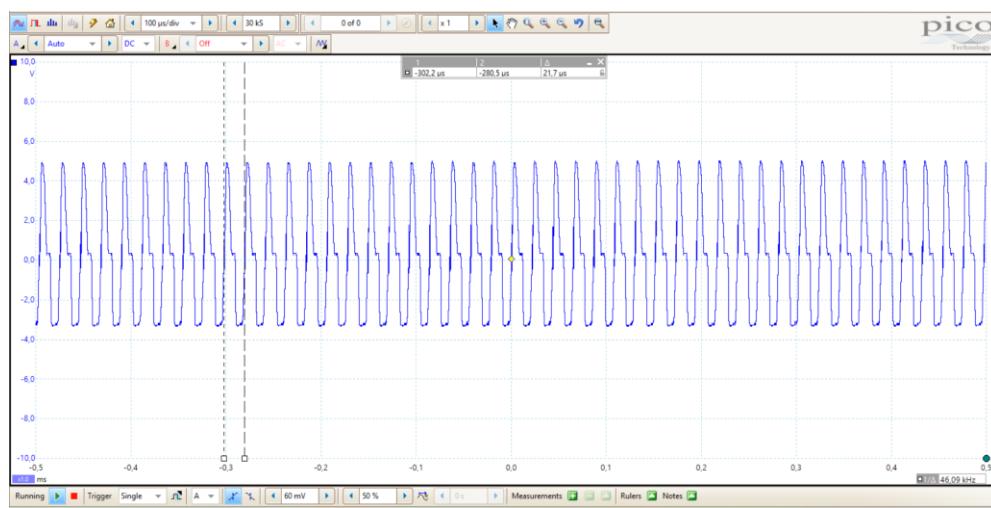


Slika 24: Vezava Dallas senzorja na Arduino in oznaka priključkov

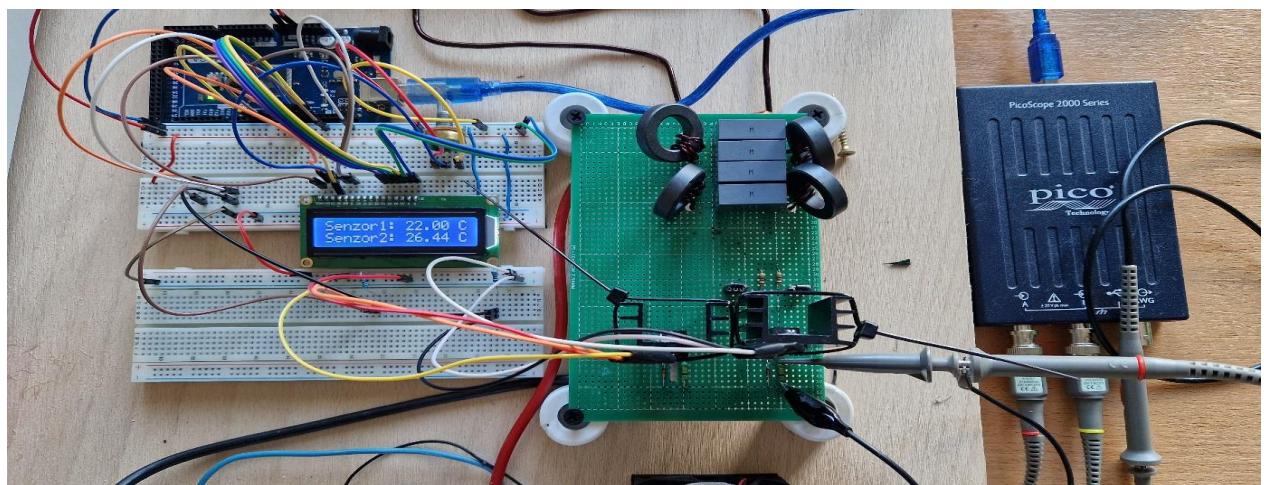
5 IZVEDBA OSNOVNIH MERITEV IN DELOVANJE VEZJA

5.1 Frekvenca pri delovanju vezja

Tukaj sem izmeril frekvenco delovanja vezja, meril sem na vratih MOSFET-a. Meritev sem izvedel pri 6,5 V s tuljavami, kot sem jih navedel zgoraj kot prvotne. Meritev se izvaja pri 6,5 V zaradi varnosti vezja, s tem ga ne preobremenimo. Napajal sem ga z laboratorijskim napajalnikom, meril pa s Pico scopom. Napajalni tok je bil 2,51 A. V primeru, da napetost zvišamo na 7,5 V, je frekvenca enaka, tok pa gre na 3 A. Minimalna napetost, da vezje začne nihati, je 4,7 V.



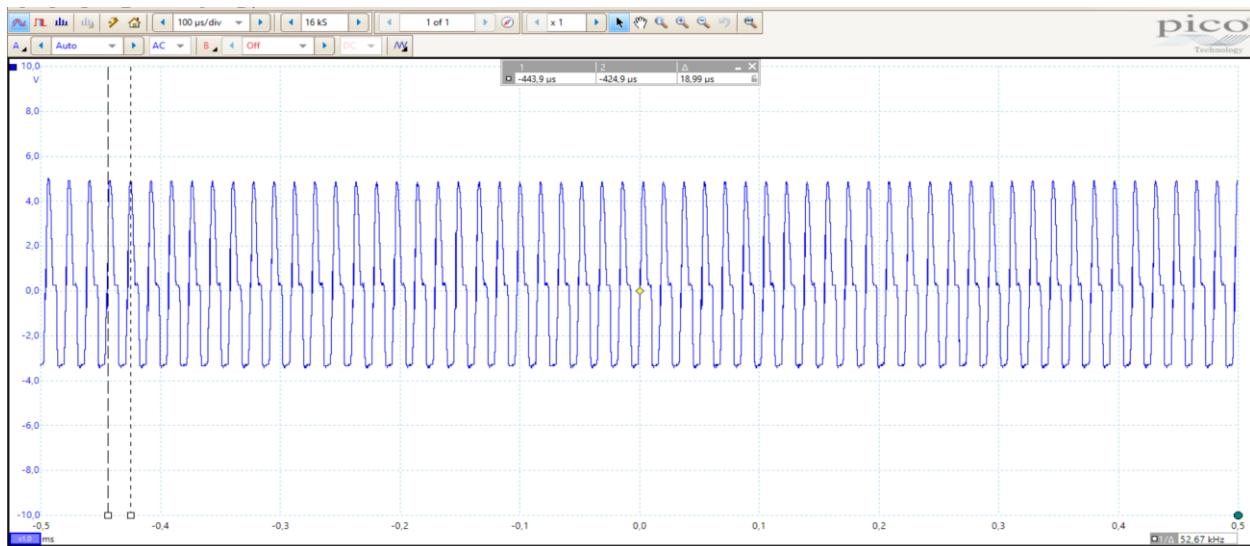
Slika 25: Frekvenca osciliranja na vratih MOSFET-a pri prvotni tuljavi z desetimi ovoji in napetosti 6,5V; 46,09kHz



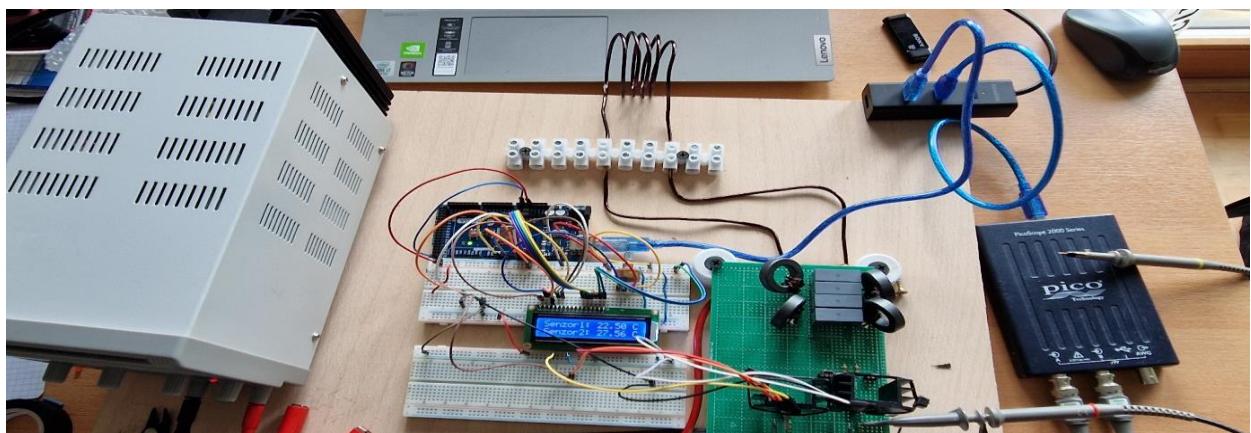
Slika 26: Temperatura MOSFET-ov je prikazana na LCD-zaslonu, gredo po vrsti od leve proti desni (prvi, drugi)

5.2 Zamenjava tuljave

Za preizkus sem na izhodu zamenjal tuljavo, ki je imela 10 ovojev, s tuljavo, ki jih ima 5. Frekvenca naraste, rezultati so očitni. Graf se zgosti, frekvenca pa se posledično poviša na 52,67 kHz.



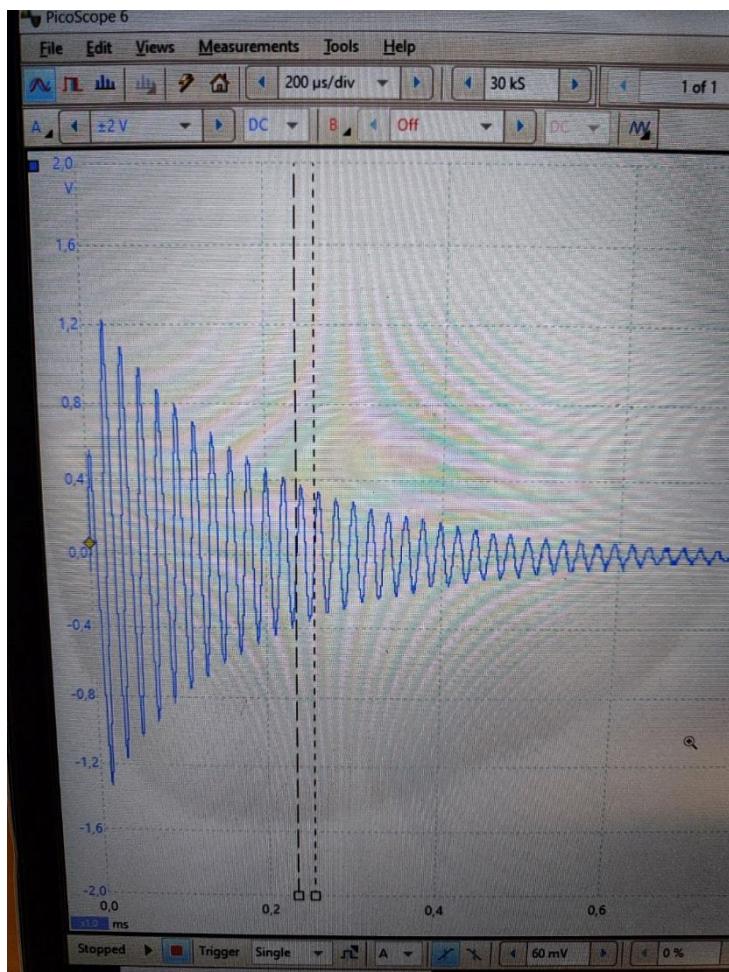
Slika 27: Osciliranje pri tuljavi s pet ovoji



Slika 28: Prikaz temperatur MOSFET-ov pri menjavi tuljave in enaki napetosti, to je 6,5V

5.3 LC prehodni pojav brez MOSFET-ov

Zanimiv del tega vezja je že sama LC-vezava brez MOSFET-ov. Brez MOSFET-ov dosežemo klasični prehodni pojav, ki se zgodi, ko DC-napetost priključimo na LC-vezje. Torej, kot sem že prej napisal, se tuljava upira spremembam, kondenzator pa hrani energijo v obliki električnega polja. Ob priključitvi dobimo v tuljavi kontra fluks, kondenzator pa se napolni. Tako po prehodnem pojavi postane tuljava kratek stik, kondenzator pa odprte sponke. V tem primeru povezana skupaj nam dasta momentno resonanco, zanihata.



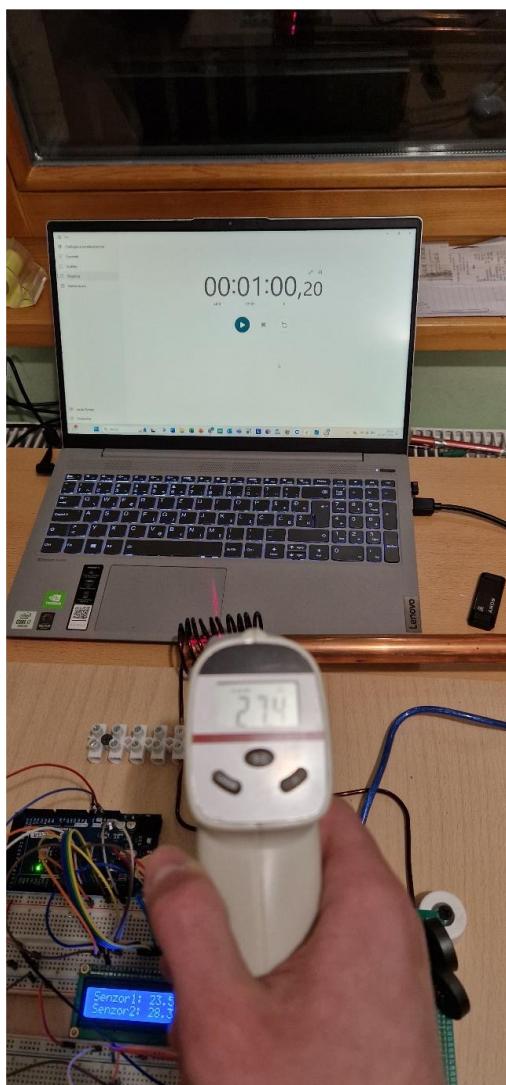
Slika 29: Prikaz prehodnega pojava, na vhodu 0,7 VDC, skoči na 1,2 V; frekvenca vezja je 50kHz

6 MERJENJE TEMPERATURE RAZLIČNIH MATERIALOV

Osnovni namen indukcijskega grelnika je gretje. Zato sem tudi izvedel meritve treh različnih materialov pri osnovni tuljavi z 10 navoji, 6,5 V napajanja in časovni interval 1 minute. Moramo se zavedati, da to ni največja moč tega vezja. Maksimalne moči nisem preizkušal zaradi nevarnosti uničenja stikalnih elementov. Poleg tega je že pri omejenem toku in tej napetosti zelo močan.

6.1 Prvi material – bakrena cev

Baker ni feromagneten, zato se slabo zgreje, v eni minuti komaj na 27,4 °C. Temperatura okolice pa je bila okoli 20 °C.



Slika 30: Meritev pri segrevanju bakra

6.2 Drugi material – jeklo

Jeklo je feromagnetni material, zato se je tudi zagrel bistveno bolj kot zgornja obdelovanca. Za obdelovanec sem si izbral jeklo mase 151 g in ga zagreval pri napajalni napetosti 6,5 V DC. Maksimalna temperatura obdelovanca je bila 63 °C, višje pri tej napetosti ni šlo. Potrebno se je zavedati, da jeklo v tem primeru deluje kot velik hladilnik in toplota zelo disipira v okolico. Za maksimalno temperaturo sem naredil tudi teoretični izračun, v koliko časa bi se naj obdelovanec zagrel, če bi bili pogoji idealni. V mojem primeru so daleč od tega, zato imajo rezultati veliko odstopanje od idealne vrednosti.

- Izračun: $W_E = m \cdot c \cdot \Delta T = 0,151\text{kg} \cdot 460 \cdot 41 \text{ }^{\circ}\text{C} = 2847,86\text{J}$
- To je okoli 95 s, v realnosti pa je ta temperatura bila dosežena po 17 minutah.



Slika 31: Zagrevanje jekla, graf temperature v odvisnosti od časa

6.3 Tretji material – aluminij

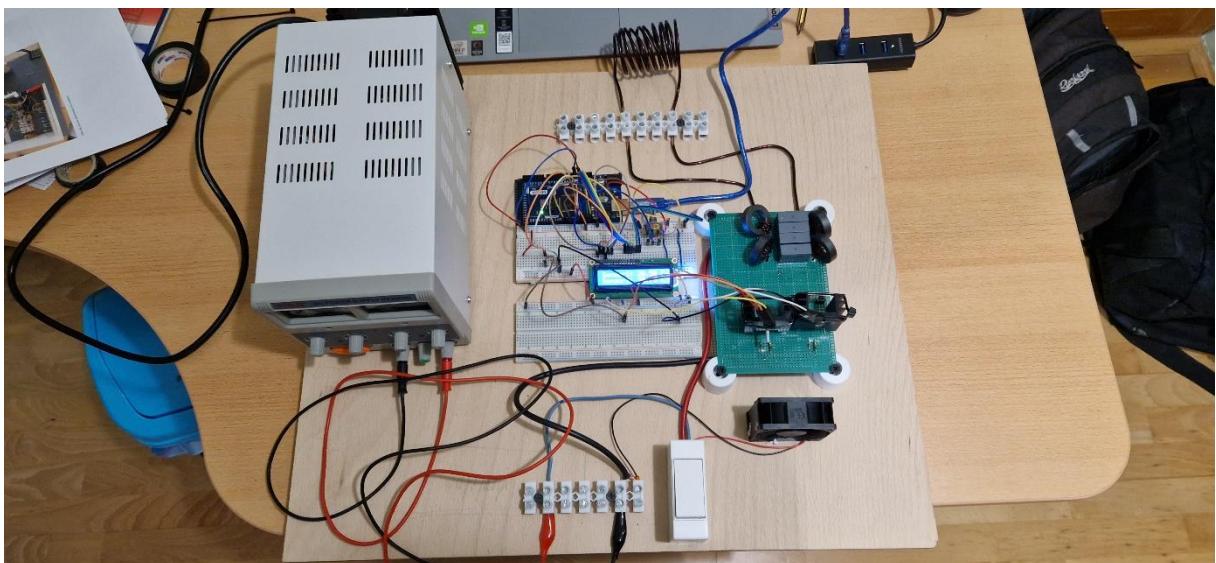
Aluminij tudi ni feromagneten, zato se je segrel samo na 30 °C v eni minuti. Zanimivo dejstvo je, da ima aluminij visoko topotno prevodnost in je uporaben pri steklokeramiki, ko kuhamo. Zato imamo aluminijaste posode. Postane pa popolnoma neuporabna, če jo želimo uporabiti na indukcijski plošči.



Slika 32: Zagrevanje aluminija

7 IZDELAVA PROJEKTA

Najprej sem izdelal vezje na eksperimentalni plošči. Kasneje sem ga namestil na ploščo in dal pod njega gumijaste podstavke, da ni stisnjen, s tem preprečimo, da pride do morebitnega kratkega stika. Vezju sem dodal 12 V ventilator, da hladi MOSFET-e in še posledično LC-vezje. Poleg glavnega dela sem sprogramiral še Arduina in dva senzorja Dallas za nadzor temperature MOSFET. Ta del pa sem kar povezal na testni plošči, senzorje pa sem z vezicami namestil na hladilnike. Vse skupaj sem dal na leseno ploščo. Vezje se vklaplja in izklaplja s stikalom, napajanje ter izhod pa sta vezana preko klasičnih sponk. To nam omogoča spremembo tuljav itd. Arduino ima tokrat napajanje kar iz računalnika, možnost je tudi menjava na 9 V baterijo.



Slika 33: Izgled makete

8 RAZPRAVA

Med raziskovanjem sem naletel na nekaj težav, predvsem pri razumevanju vsega in zbiranju elementov, saj ni bilo mogoče kupiti čisto enakih, kot so bili uporabljeni. Najbolj zamudna je bila priprava tuljav in samo spajkanje. Ob zaključku pa sem dodal še Arduina in dva Dallas senzorja za nadzor temperature MOSFET-ov, da se jih ne uniči. Samo programiranje mi ni povzročilo strašnih preglavic. Projekt sem uspešno zaključil in s tem potrdil vse štiri hipoteze. Pri drugi hipotezi pa še podajam podatke o temperaturi tališča materiala in podobno za možnost implementacije, kaj sem s tem vezjem dosegel.

1. Spreminjanje tuljav drastično vpliva na frekvenco osciliranja – hipoteza je pravilna, razviden je narast frekvenca pri spremembi tuljave iz 10 na 5 ovojev.
2. Vezje lahko zagreje različne kovine, glede na material bolj ali manj – hipoteza drži, razvidna je velika razlika v temperaturi med različnimi kovinami. Implementacija v realnost. Sicer tukaj je temperatura jekla relativno nizka zaradi večje mase obdelovanca. Vendar je kljub temu razvidno, da se je bistveno bolj zagrel iz zgornjih podatkov.

Kovina	Tališče (°C)	Vrelišče (°C)	Temperatura po 1 minuti (°C)
Jeklo	1370	2750	29
Baker	1083	2567	27.6
Aluminij	660	2519	30

Vidimo, da bi bil potreben še veliko močnejši grelec za doseg takšnih temperatur.

1. Jeklo je mogoče s tem specifičnim grelnikom razžareti, po daljšem času mi je rezilo od olfa noža uspelo razžareti.
2. Vezje deluje, hipoteza drži, drugače vse te meritve ne bi bile mogoče. Ob pritisku na stikalo se ventilator vklopi in vezje začne delovati. Ob dodatku napajanja Arduino začnejo delati tudi senzorji in LCD-prikazovalnik.

9 ZAKLJUČEK

S projektom sem zelo zadovoljen. Res, da je vzel veliko časa, vendar je bilo vredno. Indukcija ima svoj poseben čar v elektrotehniki in tudi v vsakdanjem življenju. Vsak si raje peče hrano na indukciji, ker je hitrejša. Tudi Arduino in senzorja sta bila narejena uspešno. Naučil sem se veliko novega in pridobil veliko novih kompetenc. Vezje je zelo univerzalno in uporabno za potencialne visokonapetostne aplikacije v prihodnosti, na primer Marxov generator, Teslino navitje, ipd.

Zelo pomembno je, da se pri takšnih projektih ne obupa, ker je načelo elektronike, da praviloma nič ne dela, zato pa je zaradi tega toliko bolje, ko dela.

10 VIRI

Indukcijski grelnik- video in dodatni članek od Electro Booma:

Video: https://www.youtube.com/watch?v=hFJeIt_JcEc (25.2.2024)

Članek: <https://www.electroboom.com/?p=1198> (25.2.2024)

Tranzistorji: <https://en.wikipedia.org/wiki/Transistor> (5.3.2024)

Dallas senzor Arduino: <https://projecthub.arduino.cc/Robiuri/read-temperature-1-8-sensors-dt18b20-on-lcd-display-732d79> (10.3.2024)

Žalar Zdravko: Osnove elektrotehnike 1 Tehniška založba Ljubljana 2007

Žalar Zdravko: Osnove elektrotehnike 2 Tehniška založba Ljubljana 2007

Priloga 1:

- Shema, po kateri sem vezal:

