

Državno srečanje mladih raziskovalcev 2024

Raziskava Teslovega transformatorja

Raziskovalna naloga iz področja astronomija ali fizika

Avtor: Timotej Koren

Mentor: Jakob Murko

Škofijska gimnazija Anotna Martina Slomška Maribor

Vrbanska cesta 30, 2000 Maribor

Maribor, 2024

KAZALO VSEBINE

POVZETEK	7
ZAHVALA.....	8
1 UVOD	9
1.1 Nikola Tesla	9
1.2 Zgodovina Teslovega transformatorja	9
1.3 Cilji.....	11
1.4 Hipoteze	11
2 TEORETIČNI DEL.....	11
2.1 Teslov transformator	11
2.2 Kožni efekt.....	12
2.3 Proksimitetni efekt	13
2.4 Resonančni učinki v zaporednih RLC-vezjih	14
3 METODOLOGIJA DELA	16
3.1 Izbira sestavnih delov	16
3.1.1 Ogrodje.....	16
3.1.2 Kondenzatorji	17
3.1.3 Napajalnik.....	18
3.1.4 Iskrišče.....	19
3.1.5 Tuljavi transformatorja	19
3.1.6 Vrhnja obremenitev sekundarne tuljave	21
3.2 Načrtovanje vezja	22
3.2.1 Izdelava napajalnika	22
3.2.2 Izdelava sekundarne tuljave	25
3.2.3 Izdelava primarne tuljave	28
3.2.4 Izdelava MMC.....	31
3.2.5 Izdelava vrhnje obremenitve sekundarne tuljave	33
3.2.6 Načrtovanje in izdelava iskrišča	35
3.2.7 Izdelava upravljalnika	37
3.2.8 Izdelava celotne naprave	39
3.2.9 Težave pri izdelavi in testiranju transformatorja	39

3.3 Meritve in izračuni	40
3.3.1 Resonanca	40
3.3.2 Napetost na sekundarni tuljavi	42
4 EKSPERIMENTIRANJE IN REZULTATI	42
4.1 Iskrišče	42
4.1.1 Diskovni RSG	42
4.1.2 SSG	43
4.1.3 Propelerski RSG	44
4.2 Ozemljitev sekundarne tuljave	44
4.3 Vrhinja obremenitev	45
4.4 Faradayeva rokavica	46
4.5 Brežičen prenos energije	48
4.6 Ostra palica na vrhnji obremenitvi	49
5 DISKUSIJA	51
6 ZAKLJUČEK	52
7 DRUŽBENA ODGOVORNOST	52
8 SEZNAM VIROV IN LITERATURE	53
9 PRILOGA	55

KAZALO SLIK

Slika 1: Porazdelitev toka v cilindričnem prevodniku, prikazano v preseku. (Bienzl, 2008)	12
Slika 2: Proksimitetni efekt, ko je smer toka v obeh prevodnikih enaka. (Chetvorno, 2017)	13
Slika 3: Proksimitetni efekt, ko je smer toka v obeh prevodnikih nasprotna. (Chetvorno, 2023)	14
Slika 4: Prvotna verzija ogrodja.	16
Slika 5: »Leyden Jar«, prva vrsta kondenzatorja. (Houstoun, 2013)	17
Slika 6: Kondenzatorji med procesom izdelave.	18
Slika 7: Mikrovalovne pečice, iz katerih so bili pridobljeni transformatorji.	18
Slika 8: Razrezane bakrene cevi.	19
Slika 9: Bakrena cev s presekom 6 mm.	20
Slika 10: Bakrena žica s presekom 0,4 mm.	20

Slika 11: Raztegljiva aluminijasta cev.	21
Slika 12: Vezje originalnega Teslovega transformatorja. (Chetvorno, 2015).....	22
Slika 13: Dizajn prvega vezja.....	23
Slika 14: Dizajn vezja drugega napajalnika.	24
Slika 15: Dokončno navita sekundarna tuljava.	25
Slika 16: Spodnji del sekundarne tuljave z opornimi palicami.	26
Slika 17: Zgornji del sekundarne tuljave.....	26
Slika 18: Model držala za primarno tuljavo.	28
Slika 19: Dokončana primarna tuljava z udarno tračnico.	29
Slika 20: Ravninska spiralna tuljava – mere. (CIRCUITS.DK, 2010)	30
Slika 21: Končan MMC.	31
Slika 22: MMC-vezje z zaščitnimi upori na vrhu.	32
Slika 23: Prva verzija vrhnje obremenitve v obliki toroida.....	33
Slika 24: Druga verzija vrhnje obremenitve v obliki toroida.....	34
Slika 25: Model toroida.....	35
Slika 26: Statično iskrišče s hladilnim sistemom.	36
Slika 27: Propeler RSG med procesom izdelave še z nepovezanimi elektrodami.....	37
Slika 28: Končani upravljalnik.....	38
Slika 29: Slika upravljalnika, povezanega z vezjem napajalnika.....	38
Slika 30: Pogled na prostor med procesom izdelave.....	39
Slika 31: Nastavitev preizkusne opreme za merjenje resonančne frekvence tuljave. (Tilbury, 2007)	40
Slika 32: Neozemljena sekundarna tuljava proizvaja škodljive strele v dnu sekundarne tuljave. .	45
Slika 33: Končana Faradayeva rokavica.	47
Slika 34: Avtor raziskovalne naloge se dotika strel, prihajajočih iz transformatorja.....	48
Slika 35: Žareče fluorescentne sijalke v okolici Teslovega transformatorja.....	49
Slika 36: Razelektritev brez ostre palice na toroidu.....	50
Slika 37: Razelektritev z ostro palico na toroidu.	51
Slika 38: Prva verzija diskovnega rotacijskega iskrišča.....	55
Slika 39: Brezžičen prenos energije pri prvih testiranjih transformatorja.....	56

Slika 40: Majhne razelektritve pri prvih testiranjih transformatorja.	56
Slika 41: Merjenje lastne frekvence primarnega dela vezja.	57
Slika 42: Dotikanje strel s Faradayevo rokavico (na blizu).	57
Slika 43: Avtor raziskovalne naloge napaja fluorescentne sijalke.	58
Slika 44: Testiranje druge verzije napajalnika.	58
Slika 45: Demonstracija brezžičnega prenosa energije na fluorescentne sijalke in energijskega prenosa skozi fluorescentno sijalko na vrhu toroida.	59
Slika 46: Napajalnik se žge.	60
Slika 47: Nova verzija upravljalnika.	61
Slika 48: Strela je udarila v udarno tirnico.	62
Slika 49: Hladilni sistem v ospredju pred napajalnikom.	63
Slika 50: Faradayeva rokavica med procesom izdelave.	64
Slika 51: Strela, ki izvira iz preblizu nameščene fluorescentne svetilke, povzroča škodo na sekundarni tuljavi.	65
Slika 52: Elektrodi prve verzije zaščitnega iskrišča sta utrpeli termične poškodbe zaradi visokih temperatur, ki so se pojavljale v iskrišču.	66
Slika 53: Prva največja strela, ki se je sprožila med prvimi testi, pri čemer je vidno intenzivno sevanje ultravijolične (UV) svetlobe iz zaščitnega iskrišča.	67
Slika 54: Prilagodljiva sponka, ki omogoča enostavno nastavljanje induktivnosti primarne tuljave.	68

KAZALO GRAFOV

Graf 1: Graf, ki prikazuje frekvenčni odziv zaporednih RLC-vezij. (Tilbury, 2007).....	15
Graf 2: Simulacija, ki prikazuje delovanje vezja s slike 14. Prikazana je napetost napajalnika v odvisnosti od časa.	24
Graf 3: Nastali pulzi v statičnem iskrišču.	41
Graf 4: Lastna frekvenca primarnega dela kjer se vidi tudi dušenje.	41

KAZALO UPORABLJENIH KRATIC

SGTC = Teslov transformator z iskriščem

MMC = glavni kondenzator v Teslovem transformatorju

RSG = rotacijsko iskrišče

SSG = statično iskrišče

BPS = pulzi na sekundo

MOT = mikrovalovni transformator

POVZETEK

Raziskovalna naloga se osredotoča na temeljne principe in delovanje Teslovega transformatorja, izuma Nikola Tesle iz leta 1891. Transformator, ki deluje na osnovi resonančnih principov, omogoča generiranje izjemno visokih napetosti in frekvenc. Raziskava vključuje teoretično analizo Teslovega transformatorja, izdelavo lastne verzije in eksperimente za boljše razumevanje delovanja. Praktični del zajema konstrukcijo transformatorja, eksperimentalni del pa vključuje razna opazovanja, meritve in izračune ter primerjavo rezultatov s teoretičnimi napovedmi. Raziskava poudarja pomen Teslove inovacije pri razvoju elektrotehnike in prinaša vpogled v inženirske izzive ter eksperimentalne pristope pri raziskovanju naprednih elektromagnetnih sistemov.

ZAHVALA

Zahvaljujem se svojemu mentorju za pomoč pri pisanju raziskovalne naloge. Prav tako se zahvaljujem prijatelju Tatu McAluneyu za pomoč pri pridobivanju ustreznih podatkov za projekt in za pomoč pri sami izdelavi Teslovega transformatorja. Hvaležen sem tudi prijatelju Benjaminu Lockheartu za pomoč pri odpravljanju težav pri mojem projektu in za pomoč pri nadgrajevanju naprave. Prav posebna zahvala pa gre gospodu Ernstu Willemu van den Berghu, raziskovalcu na Ethergy BV, za pomoč pri pridobivanju posebne literature, povezane s Teslovimi raziskavami, za pomoč pri razumevanju nekaterih teoretičnih snovi in za zgodovinsko korektne popravke v mojih zapisih o raziskavah Nikole Tesla. Zahvalil bi se še svojemu prijatelju Maju Ankoviču za pomoč pri izdelavi posebnega kabla za napajalnik in za pomoč pri 3D-tiskanju, ko moj 3D-tiskalnik ni bil v obratovanju. Prav tako se zahvaljujem našemu profesorju informatike in svojemu sošolcu za razlago o urejanju raziskovalne naloge ter naši profesorici slovenščine za lektoriranje raziskovalne naloge.

1 UVOD

1.1 Nikola Tesla

Nikola Tesla je bil eden izmed najbolj znanih izumiteljev v zgodovini. Rojen je bil v Smiljanu (danes na Hrvaškem) in se je kasneje preselil v Združene države Amerike. Znan je po tem, da je igral ključno vlogo pri razvoju izmeničnega toka (AC), ki ga danes poznamo kot standard za transport električne energije. Med njegove najbolj znanane izume sodijo indukcijski motor, Teslov transformator oz. Teslova tuljava, radio, Teslova turbina, neonske luči ... Znan je tudi po svojem projektu, tako imenovanem »Wardenclyffe Tower«, s katerim je želel doseči brezžičen svetovni prenos energije, vendar projekt ni bil nikoli dokončan zaradi finančnih težav. Pred izdelavo tega stolpa je eksperimentiral na prototipu v svojem laboratoriju v mestu Colorado Springs. Tam je tudi izvajal svoje najbolj znane eksperimente, ki so mu prinesli sloves. Eksperimenti, ki so mu verjetno najbolj prinesli sloves, so bili eksperimenti s kasnejšo verzijo Teslovega transformatorja, ki se je imenovala »Magnifying Transmitter«. Tesla je svojo prvotno verzijo transformatorja patentiral leta 1891. Znan je bil po tem, da je oddajal spektakularne električne efekte, kot so strele in brezžičen prenos energije.

1.2 Zgodovina Teslovega transformatorja

Naša zgodba se začne v začetku 19. stoletja leta 1826, ko je William Sturgeon izumil prvi elektromagnet. Šest let kasneje v letu 1831 se je Michael Faraday spraševal, če lahko naredi elektriko s pomočjo magnetov. Zaradi slabih magnetov v tistem času se je odločil, da bo v svoji raziskavi uporabil elektromagnete. Okoli železnega obroča je ovil 2 ločeni tuljavi. Ko je dovedel tok skozi prvo tuljavo, je pri žici sekundarne tuljave, pod katero je imel kompas, opazil, da se igla kompasa odmakne s svojega položaja. Ko je izključil baterijo, je opazil odmik kompasa v nasprotno smer. Faraday je prišel do ideje, da spreminjanje magnetnega polja v tuljavi inducira napetost v njej. Bil je razočaran, saj nikoli ni mogel čutiti električnega pulza, ki ga je ustvaril. Nekaj let kasneje se je irski duhovnik in amaterski znanstvenik po imenu Nicholas Callan spraševal, če lahko preuredi Faradayevo napravo, da bi lahko naredil nekaj, kar bi lahko dovedlo dober električni šok. Okoli železnega jedra je ovil primarno tuljavo z manj ovoji in sekundarno tuljavo z več ovoji. Callan je sedaj lahko čutil električne pulze, ki so se inducirali v sekundarni tuljavi. Spoznal je tudi, da se učinkovitost njegove naprave izboljša, če je žica primarne tuljave debelejša in žica sekundarne

tuljave tanjša ter navita okoli železnega jedra tolikokrat, kolikor je možno. Callan je pravkar izumil indukcijsko tuljavo. Poročilo o opazovanjih je poslal svojemu prijatelju Sturgeonu (izumitelju elektromagneta), ki je izboljšal njegovo napravo. Indukcijska tuljava je postala zelo popularna, predvsem v medicini, kjer so trdili, da lahko s to napravo pozdravijo skoraj vse probleme in bolezni, kar so jih ljudje imeli. Do sedaj so morali za uporabo transformatorja ročno vrteti poseben del, ki je vklapljal in izklapljal baterijo. Kasneje so želeli doseči hitrejšo in bolj konstantno električno šoke. Kmalu so ugotovili, da lahko uporabijo jedro indukcijske tuljave za doseganje tega. V napravo so dodali premikajoči se del, ki se je premaknil k železnemu jedru, ko je skozi primarno tuljavo stekel električni tok. Ko se je ta del želel približati nastalemu elektromagnetu, se je odklopil iz napajanja in na ta način izključil napajanje. Zato se je premikajoči del vrnil v prvotno stanje in ponovno vzpostavil kontakt. Na ta način se je naprava lahko vklapljala in izklapljala okoli 20-krat na sekundo. Kljub dobri učinkovitosti je imel premikajoči del težavo. Med njegovim delovanjem se je zelo iskril med kontakti. Francoski fizik Armand Fizeau je odpravil ta problem s tem, ko je k primarnemu delu vezja dodal kondenzator. Ta nadgraditev se ni samo znebila iskrenja med kontakti premikajočega dela, ampak je tudi ustvarila povsem drugo napravo. Nova naprava je uporabljala enosmerni tok in iz njega ustvarjala izbruhe izmeničnega toka. Leta 1886 je znanstvenik Heinrich Hertz dodal anteno in s tem naredil prve človeško narejene radijske valove v zgodovini. Hertz se ni zanimal za svoje odkritje. Sam je trdil, da je njegov eksperiment le pokazatelj tega, da obstajajo radijski valovi. V poletju leta 1889 je Nikola Tesla šel na svetovni sejem v Parizu, kjer je slišal o Hertzovem odkritju. Tukaj je dobil inspiracijo, da začne raziskovati na tem področju. Tesla je v primarnem delu vezja odstranil premikajoči del, ki je vklapljal in izklapljal baterijo, ter ga nadomestil z izmeničnim generatorjem. Tako je tudi spremenil lokacijo kondenzatorja iz primarnega dela v sekundarni del vezja. Kondenzator je tudi naredil nastavljiv. Sedaj je ta naprava proizvajala visokonapetostni in visokofrekvenčni izmenični tok. Če bi sedaj na sekundarni del dodali anteno, bi ta lahko oddajala radijske valove, ki bi bili uglašeni. A Tesla ni bil zainteresiran za brezžično komunikacijo, njega je zanimal brezžičen prenos energije. Napravo je uporabil kot napajalnik, ki mu je dodal še primarno in sekundarno tuljavo. Z nastalo napravo je lahko prižigal luči z eno samo žico. Ugotovil je, da se neonske in fluorescentne luči prižigajo brezžično v sami okolici njegove naprave. Ta je oddajala tudi električne razelektritve, ki jih je želel odstraniti, saj razelektritve porabljajo ogromno energije. Zato je na vrh sekundarne tuljave dodal bakrene krogle

raznih velikosti. Odkril je, da je zelo odvisno, kakšne velikosti krogel uporablja, ker nekatere zmanjšajo razelektritve, nekatere pa povečajo. Tesla je svoj izum patentiral 25. aprila 1891. Tako je nastal prvi Teslov transformator, ki ga poznamo še danes. Danes se najpogosteje uporablja pri demonstracijah električnih razelektritev. (Joseph, 2018)

1.3 Cilji

V okviru raziskovalnega projekta si prizadevam pridobiti vpogled v dinamiko strel iz Teslovega transformatorja. Osnovni cilj raziskave je pridobiti informacije o delovanju Teslovega transformatorja in razumeti celotno delovanje te naprave.

1.4 Hipoteze

1. hipoteza: Z večjo vrhno obremenitvijo Teslovega transformatorja lahko dosežemo večjo učinkovitost transformatorja.
2. hipoteza: Hlajenje iskrišča lahko izboljša učinkovitost transformatorja.
3. hipoteza: Rotacijski dizajn iskrišča poveča velikost strel v primerjavi s statičnim iskriščem.
4. hipoteza: Teslov transformator je zmožen brezžično prenašati energijo v okolici do razdalje največ 4 m.
5. hipoteza: Ostra palica na Teslovem transformatorju bo naredila največje strele.

2 TEORETIČNI DEL

2.1 Teslov transformator

Teslov transformator, ki ga je razvil genialni inženir Nikola Tesla, predstavlja izjemno inovacijo na področju elektrotehnike. Ta resonančni transformator temelji na načelu resonančnega vezja, ki mu omogoča doseči izredno visoke napetosti in frekvence med svojim delovanjem. Njegov originalni namen je bil brezžični prenos električne energije. Sestavljen je iz dveh ključnih delov: primarnega in sekundarnega.

V primarnem delu transformatorja najdemo napajalnik, ki zagotavlja potrebno električno napetost, kondenzator za shranjevanje energije, ki jo kasneje sprosti v iskrišču, ter primarno tuljavo.

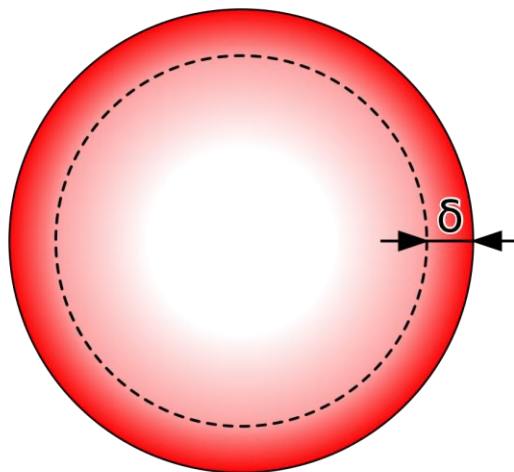
Primarna tuljava deluje kot ključna povezava za prenos energije med primarnim in sekundarnim delom transformatorja.

Sekundarni del transformatorja vključuje ozemljeno sekundarno tuljavo z več ovoji kot primarna tuljava. Dodatno je opremljen z vrhno obremenitvijo, ki je pogosto v obliki toroida. Ta kompleksna struktura omogoča učinkovit prenos in transformacijo električne energije.

Izjemna značilnost Teslovega transformatorja je v sposobnosti ustvarjanja močnih spektakularnih razelektritev in sposobnosti brezžičnega prenosa energije na krajše razdalje.

2.2 Kožni efekt

V elektromagnetizmu je kožni efekt (ang. »skin effect«) pojav, pri katerem se izmenični električni tok (AC) porazdeli znotraj prevodnika tako, da je gostota toka največja blizu površine prevodnika in eksponentno pada v globino. Pojav povzročajo nasprotni vrtinci, ki jih inducira spreminjajoče se magnetno polje iz izmeničnega toka. Električni tok večinoma teče le po površini prevodnika, med zunanjim površjem in nivojem imenovan »globina kože«. Globina kože je odvisna od frekvence izmeničnega toka. S povečanjem frekvence postane tok koncentriran bolj proti površini, kar povzroči manjšo globino kože. Kožni efekt zmanjšuje učinkovito prečno površino prevodnika in s tem povečuje njegovo upornost. Pri 60 Hz je v bakru globina kože približno 8,5 mm. Pri višjih frekvencah pa globina kože postane veliko tanjša. (Costant314, 2024)



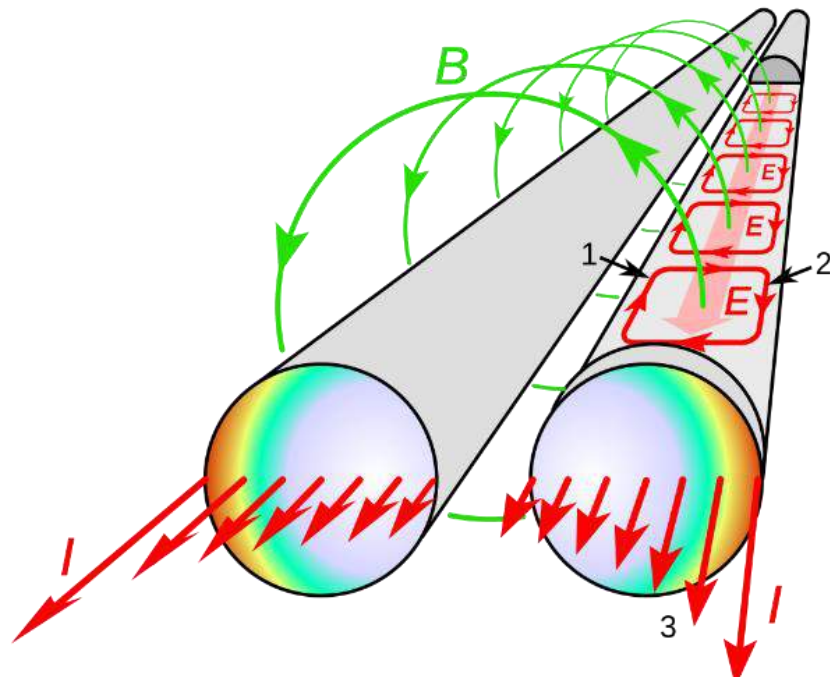
Slika 1: Porazdelitev toka v cilindričnem prevodniku, prikazano v preseku. (Bienzl, 2008)

2.3 Proksimitetni efekt

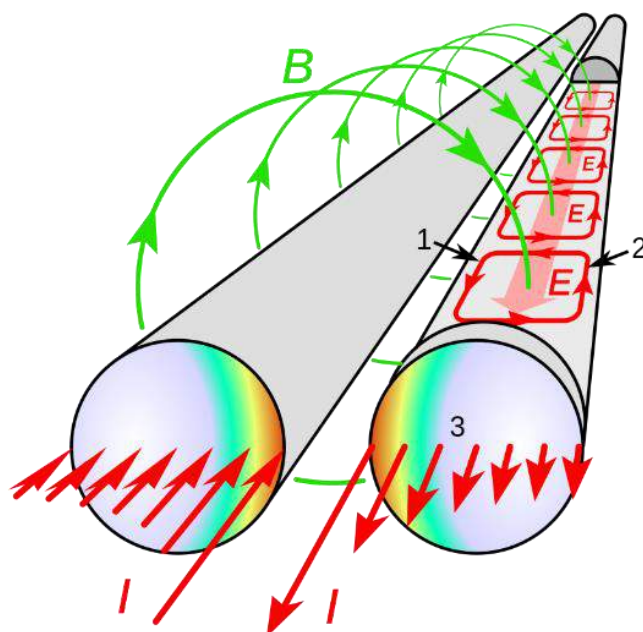
V elektromagnetizmu je proksimitetni efekt (ang. »proximity effect«) preusmeritev električnega toka, ki se pojavlja v bližnjih vzporednih električnih prevodnikih, ki prenaša izmenični tok (AC), in je posledica magnetnih učinkov. V sosednjih prevodnikih, ki prenašajo izmenični tok v isti smeri, povzroči, da se tok v prevodniku koncentrira na stran, ki je vstran od bližnjega prevodnika. V prevodnikih, ki prenašajo AC-tok v nasprotni smeri, povzroči, da se tok v prevodniku koncentrira na stran, ki je sosednja z najbližjim prevodnikom.

Proksimitetni efekt se zgodi zaradi Eddyjevih tokov, ki se inducirajo znotraj prevodnika z naraščajočim magnetnim poljem drugega prevodnika, z elektromagnetno indukcijo.

Koncentracija električnega toka na strani se poveča s povečevanjem frekvence, zaradi tega bodo torej imeli sosednji prevodniki pri višjih frekvencah višjo upornost, saj tok ne bo potoval po celotnem prevodniku. (Chetvorno, 2023)



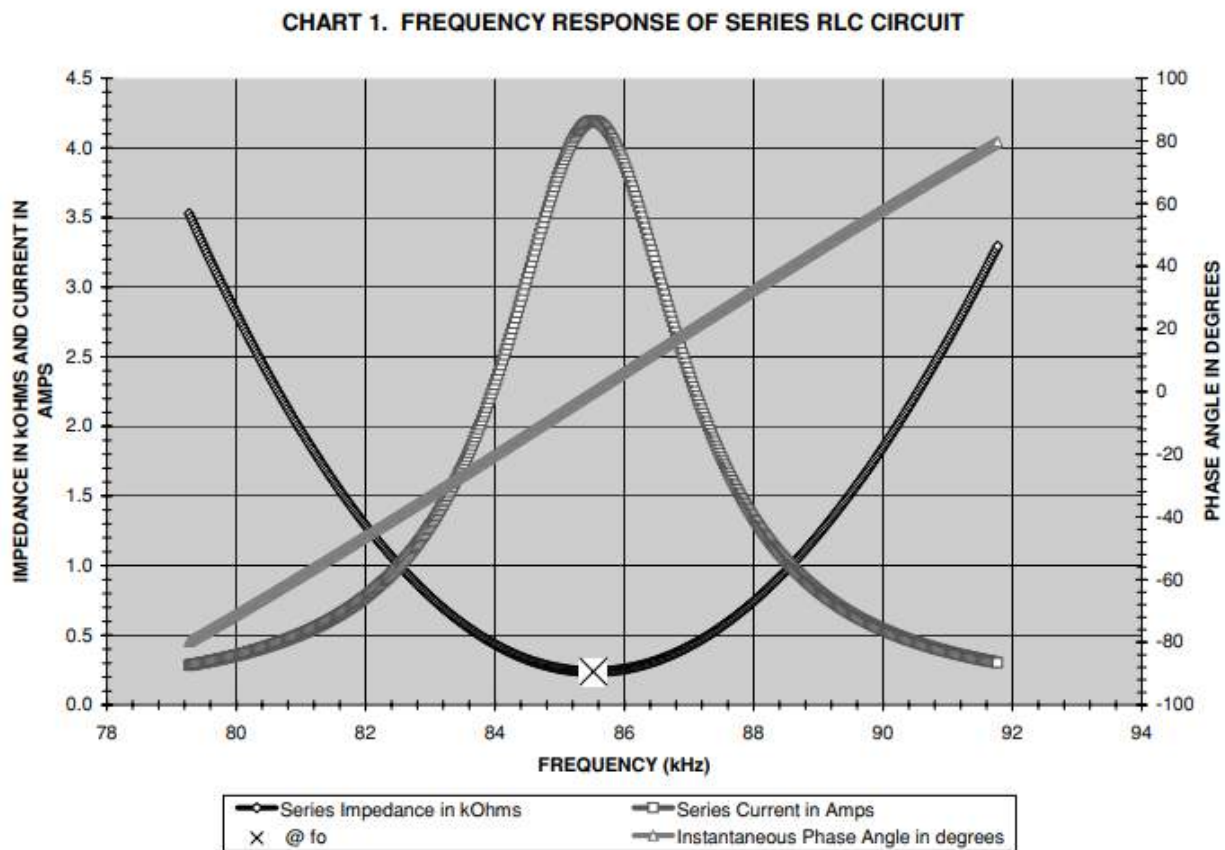
Slika 2: Proksimitetni efekt, ko je smer toka v obeh prevodnikih enaka. (Chetvorno, 2017)



Slika 3: Proksimitetni efekt, ko je smer toka v obeh prevodnikih nasprotna. (Chetvorno, 2023)

2.4 Resonančni učinki v zaporednih RLC-vezjih

Kratica RLC predstavlja kratico R, ki ponazarja upornost, kratica L predstavlja induktivnost in kratica C kapacitivnost. Resonančni odziv na serijsko RLC-vezje, oblikovano z dodatnim navitjem, je prikazan na **Grafu 1**. Tukaj je potrebno opozoriti, da gre le za navitje in da so izpuščeni kožni ter proksimitetni efekt ter terminalna kapacitivnost. Pri resonančni frekvenci vezja (na grafu označeno z znakom X) je impedanca minimalna (na grafu je to sled, označena z likom v obliki kare), tok skozi vezje pa je največji (na grafu je to sled, označena z likom v obliki kvadrata). Pri frekvencah pod resonanco je fazni kot vodilen, kar kaže na prevladujoče kapacitivno vezje. Pri resonanci je fazni kot 0° (na grafu je sled označena z likom v obliki trikotnika). Pri frekvencah nad resonanco je fazni kot zaostren, kar pa kaže na prevladujoče induktivno vezje. Podobni resonančni efekti se pojavljajo tudi v elektroenergetskih sistemih, kjer se korelacija faktorja moči (kapacitivnost) uporablja za odpravo zaostalega faznega kota. (Tilbury, 2007, p. 59)



Graf 1: Graf, ki prikazuje frekvenčni odziv zaporednih RLC-vezij. (Tilbury, 2007)

Sekundarno navitje Teslovega transformatorja je dober primer rahlo dušenega serijskega RLC-resonančnega vezja.

Thomsonova enačba, ki jo je odkril Sir William Thomson oz. bolj poznan pod imenom Lord Kelvin, izhaja kot osnova za izračun resonančne frekvence. Formulo lahko vidimo tukaj:

$$f_0 = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}}$$

f_0 = frekvenca resonance [Hz]

L = induktivnost [H]

C = kapacitivnost [F]

3 METODOLOGIJA DELA

3.1 Izbira sestavnih delov

Izbira pravih materialov je ključna pri izdelavi Teslovega transformatorja, saj neposredno vpliva na njegovo zanesljivost in učinkovitost. Vsak material, ki je uporabljen v izdelavi, nosi svoje specifične lastnosti, ki jih je potrebno ustrezno združiti za doseg želenih rezultatov.

3.1.1 Ogrodje

Pri ogrodju sem se odločil, da bom uporabil lesnati material. V trgovini Mömax sem našel zelo lepo belo štirinožno mizico, ki sem jo sestavil in kasneje pritrdil na spodnji del iz lesa, ki sem ga obdelal doma. Nanj sem tudi privijačil kolesa za lažji transport naprave. Izkazalo se je, da sem se odločil za kolesa, ki niso bila dovolj močna, zato sem jih kasneje zamenjal za kolesa, ki premorejo večji napor.



Slika 4: Prvotna verzija ogrodja.

3.1.2 Kondenzatorji

Kondenzatorji so za Teslov transformator izredno pomemben del, saj omogočajo shranjevanje energije, ki jo lahko kasneje zelo hitro sprostijo. Sprva sem seveda moral ugotoviti najugodnejšo kapaciteto za kondenzatorje. Prišel sem do spoznanja, da bi mi zelo ustrezala kapacitivnost okoli 50 nF. O približku kapacitete govorim, ker se kondenzator nahaja v primarnem delu vezja, ki ga



Slika 5: »Leyden Jar«, prva vrsta kondenzatorja. (Houstoun, 2013)

kasneje lahko prilagodim na ustrezno frekvenco za primarni del. Na začetku sem mislil uporabiti vrsto kondenzatorja, znano pod angleškim imenom »Leyden Jar«, ki jo je uporabljal tudi Nikola Tesla v svojem času. Po kasnejši raziskavi sem ugotovil, da mi ta vrsta kondenzatorja ne ustreza, čeprav jo uporablja veliko ljudi, ki izdelujejo Teslove transformatorje, saj je znan po tem, da ima zelo slabo oceno dV/dt . Ta ocena kondenzatorja je merilo njegove sposobnosti, da se spopade z nenadnimi spremembami napetosti v njem. Zato sem se odločil, da investiram denar v boljše

kondenzatorje, ki sem jih kupil preko spletne trgovine eBay. Kupil sem 100 kondenzatorjev, od katerih je imel vsak kapaciteto 47 nF in so bili primerni za napetost 2kV.



Slika 6: Kondenzatorji med procesom izdelave.

3.1.3 Napajalnik

Seveda je za delovanje Teslovega transformatorja potreben napajalnik. Napajalnik mora dovajati visoko napetost, ki bo polnila kondenzatorje. Napetost napajalnika za ta dizajn Teslovega

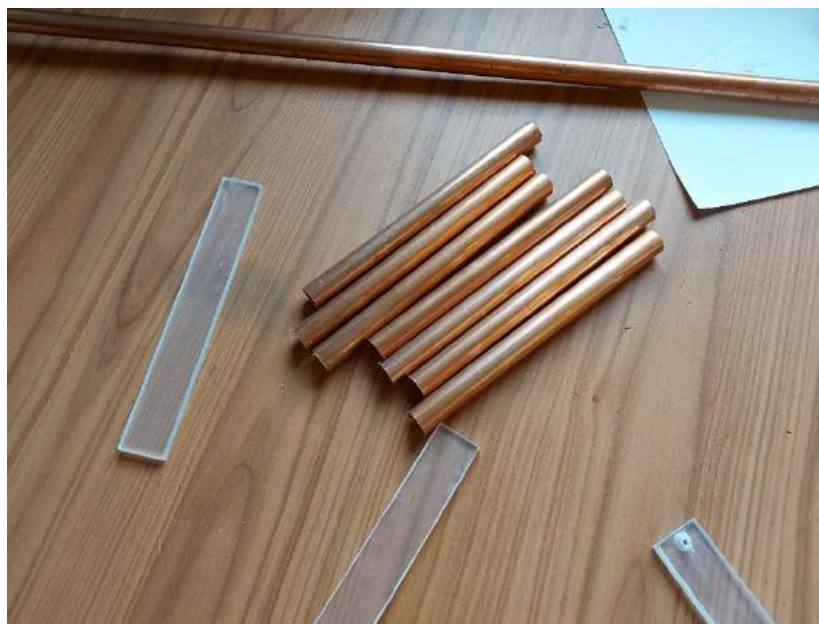


Slika 7: Mikrovalovne pečice, iz katerih so bili pridobljeni transformatorji.

transformatorja se mora nahajati v območju 6–14 kV. Najprej sem razmišljal o uporabi transformatorja za neonske luči, a žal nisem nikjer v svoji okolici našel takšnega napajalnika, zato sem se odločil, da ga bom izdelal sam. Uporabil sem transformatorje, ki sem jih našel v mikrovalovnih pečicah in lahko transformirajo napetost v območju 2 do 2,3 kV. Hkrati sem tam našel tudi visokonapetostne diode in mikrovalovne kondenzatorje. Za mikrovalovne transformatorje se v angleščini večkrat uporabi tudi kratica MOT (ang. »Microwave Oven Transformer«).

3.1.4 Iskrišče

Iskrišče je del Teslovega transformatorja, kjer konstantno preskakujejo strele, ki nosijo relativno visok tok. Pri tem nastajajo tudi visoke temperature. Zato sem se odločil, da bom uporabil bakrene cevi zaradi njihove oblike in njihove dobre prevodnosti. Kasneje sem se zaradi sprememb dizajna odločil za uporabo medeninastih palic.



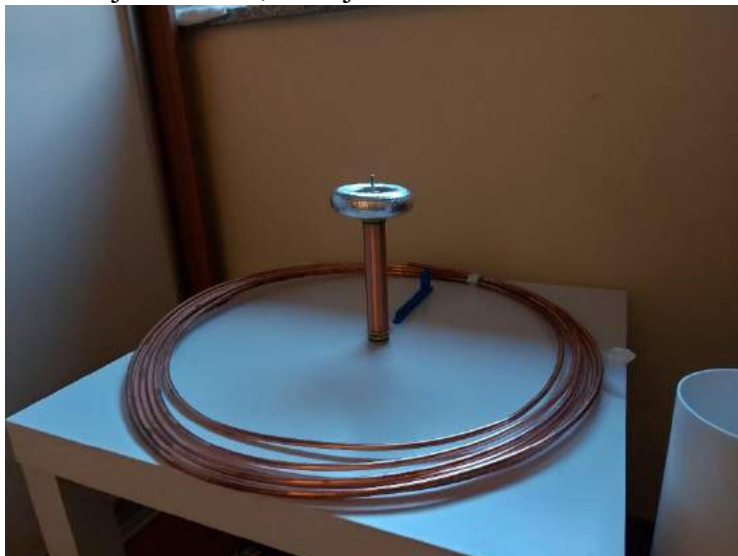
Slika 8: Razrezane bakrene cevi.

3.1.5 Tuljavi transformatorja

Teslov transformator vsebuje 2 tuljavi. Prvo, ki je primarna, in drugo, ki je sekundarna.

Primarna tuljava sodeluje v primarnem vezju. Po njej teče večji tok kot v sekundarni tuljavi, zaradi tega sem tudi potreboval debelejšo žico. Izračunal sem si, da potrebujem 10 m žice s presekom 6

mm. Odločil sem se, da kupim bakreno cev, saj se bo zaradi kožnega in proksimitetnega efekta debelina kože, po kateri tečejo elektroni, zmanjšala.



Slika 9: Bakrena cev s presekom 6 mm.

Sekundarna tuljava na drugi strani pa sodeluje v sekundarnem vezju. Po njej teče manjši tok kot v primarni tuljavi, zato tudi ne potrebuje žice z velikim presekom. Po izračunih sem se odločil za bakreno žico s presekom 0,4 mm.



Slika 10: Bakrena žica s presekom 0,4 mm.

3.1.6 Vrhnja obremenitev sekundarne tuljave

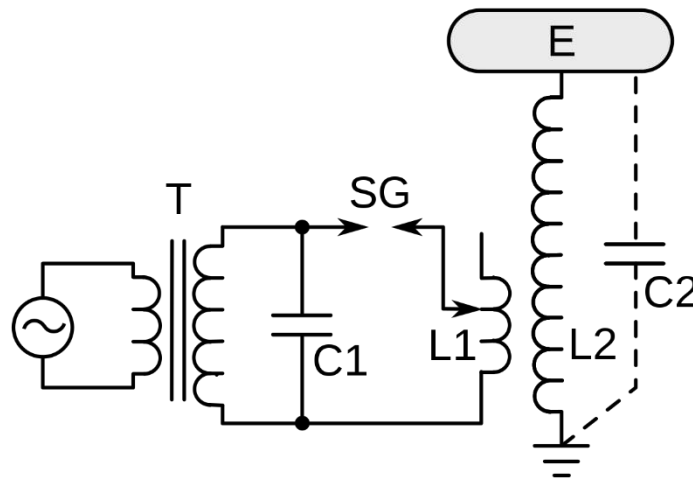
Teslov transformator na vrhu sekundarne tuljave potrebuje prevoden objekt, ki je lahko v obliki krogle, diska ali toroida. Izmed teh oblik je največkrat uporabljen toroid, saj ima zaradi svoje oblike več prednosti pri delovanju transformatorja. Če bi želel kupiti toroid prav za Teslove transformatorje, bi porabil ogromno denarja za nabavo, zato sem se odločil, da ga naredim sam. Zanj sem uporabil raztegljivo aluminijasto cev, katere originalni namen je prezračevanje prostorov.



Slika 11: Raztegljiva aluminijasta cev.

3.2 Načrtovanje vezja

Načrtovanje ustrezno delujočega vezja za Teslov transformator je zelo pomemben korak pri izdelavi same naprave. Pri načrtovanju vezja sem se odločil, da se bom zgledoval po originalnem Teslovem dizajnu, ki je znan tudi pod kratico SGTC oz. »Spark Gap Tesla Coil«. Znan je po tem, da za prenašanje toka iz primarne tuljave na sekundarno tuljavo uporablja poseben del, ki se imenuje iskrišče (ang. »spark gap«). Iskrišče v Teslovem transformatorju omogoča, da se imajo kondenzatorji čas napolniti z energijo, ki jo nato sprostijo skozi iskrišče, ki se nato prenese iz primarne tuljave na sekundarno.



Slika 12: Vezje originalnega Teslovega transformatorja. (Chetvorno, 2015)

T = napajalnik

SG = iskrišče

C = kondenzator

L = tuljava

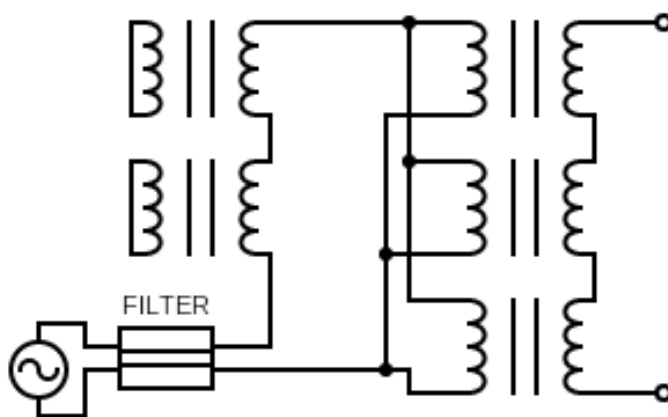
E = toroid

Pri tem vezju sem sam naredil še par modifikacij, kot so razne zaščite, ki zaščitijo vezje pred morebitnimi nevarnostmi.

3.2.1 Izdelava napajalnika

Napajalnik je za Teslov transformator zelo pomemben del, saj mu dovaja visoko napetost, ki jo kasneje transformator transformira še v višjo napetost.

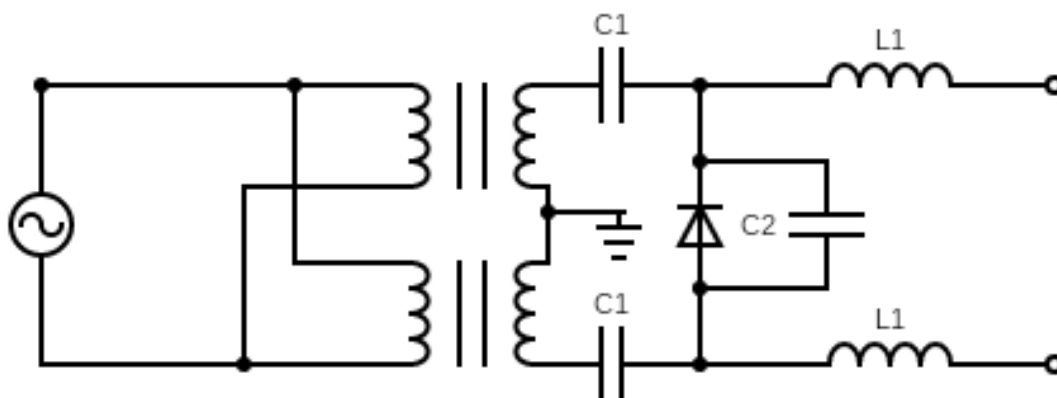
Na začetku sem naredil dizajn napajalnika, kjer sem uporabil 3 MOT, od katerih sem sekundarne tuljave povezal zaporedno. S tem sem iz 220 V napetosti, ki jo dobimo iz vtičnice, transformiral na približno napetost 6–6,6 kV. O približni napetosti govorim zaradi tega, ker na žalost pri MOT nikoli ne moremo zagotovo vedeti, kolikšno napetost dobimo na izhodu, saj je vsak po sebi malenkost drugačen od drugih, sam pa na žalost nisem imel nobenih merilnih inštrumentov, s katerimi bi lahko izmeril tako visoko napetost. Sedaj sem imel ustvarjen napajalnik, s katerim sem lahko naredil dovolj visoko napetost za moj projekt, a je nastal še en problem. Napajalnik, ki sem ga imel, ni mogel kontrolirati toka, ki ga prejme. Če bi ga uporabil, bi najverjetneje vedno izključil moje varovalke, zato sem moral narediti še del vezja, ki bo omejeval tok. Zato sem v primarnem delu vezja vezal zaporedno na vezje primarno tuljavo še dva MOT, pri katerih sem povezal sekundarno tuljavo v kratek stik. S tem sem naredil omejevalec toka. Po prvem testiranju sem opazil, da je moja ideja delovala. Tok je bil omejen pri 220 V na približno 12 A, kar je bilo še previsoko, zato sem še zaporedno vezal še en MOT, ki sem ga modificiral na enak način kot prejšnjega. Sedaj sem po meritvah opazil, da je omejevalec toka omejil tok na 6 A, kar je bilo odlično. Na celotno vezje sem dodal še napetostni filter, ki filtrira signale, ki lahko pridejo iz mojega napajalnika nazaj v napeljavo. S tem sem potencialno zavaroval ostale naprave, ki so priklopljene na isto napeljavo.



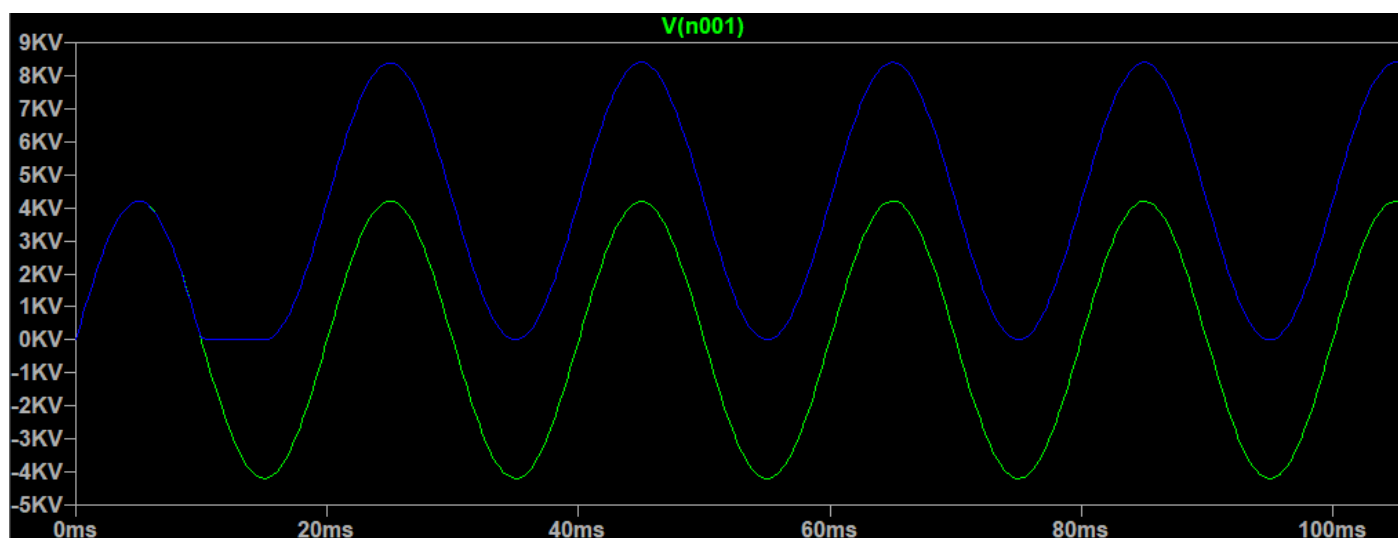
Slika 13: Dizajn prvega vezja.

Po nekaj mesecih obratovanja s tem dizajnom vezja mi je prijatelj Benjamin Lockhart predlagal, naj naredim nov dizajn vezja. Pri tem dizajnu pa sem za transformiranje v visoko napetost potreboval le 2 MOT. Uporabil sem tudi 5 mikrovalovnih diod in 2 mikrovalovna kondenzatorja, enega s kapaciteto 0,92 μF in drugega s kapaciteto 0,98 μF . Kapacitivnost je bila dovolj podobna,

zato sem ju lahko uporabil. Pridobil sem tudi 5 keramičnih kondenzatorjev, primernih za napetost 10 kV, in kapaciteto 10 nF. Izdelal sem vezje, prikazano na **Sliki 14**. To vezje premakne sinusoido izmenične napetosti nad 0 V in s tem doseže višje napetosti, kot je prikazano na **Grafu 2**. Dodal sem tudi 2 dušilki na vezju, označeni z L1, za zaščito vezja.



Slika 14: Dizajn vezja drugega napajalnika.

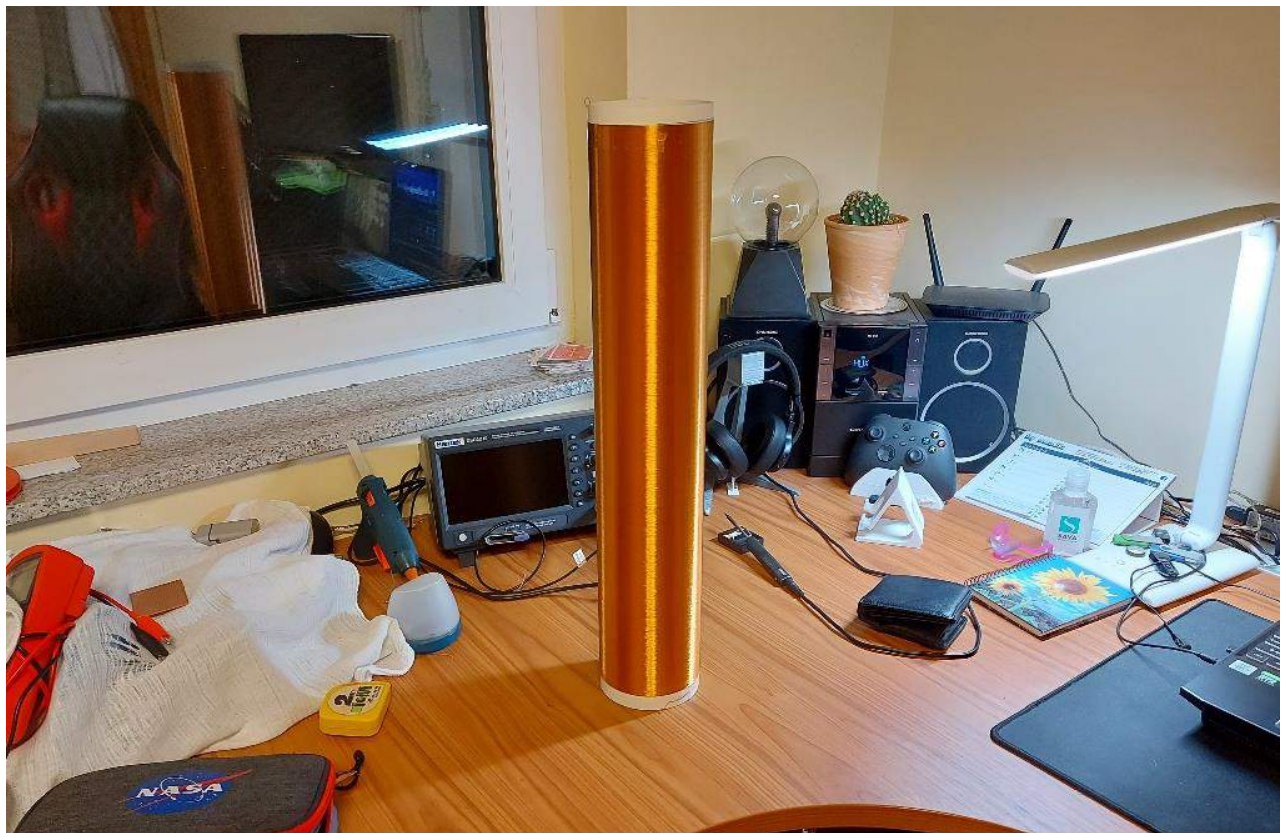


Graf 2: Simulacija, ki prikazuje delovanje vezja s slike 14. Prikazana je napetost napajalnika v odvisnosti od časa.

3.2.2 Izdelava sekundarne tuljave

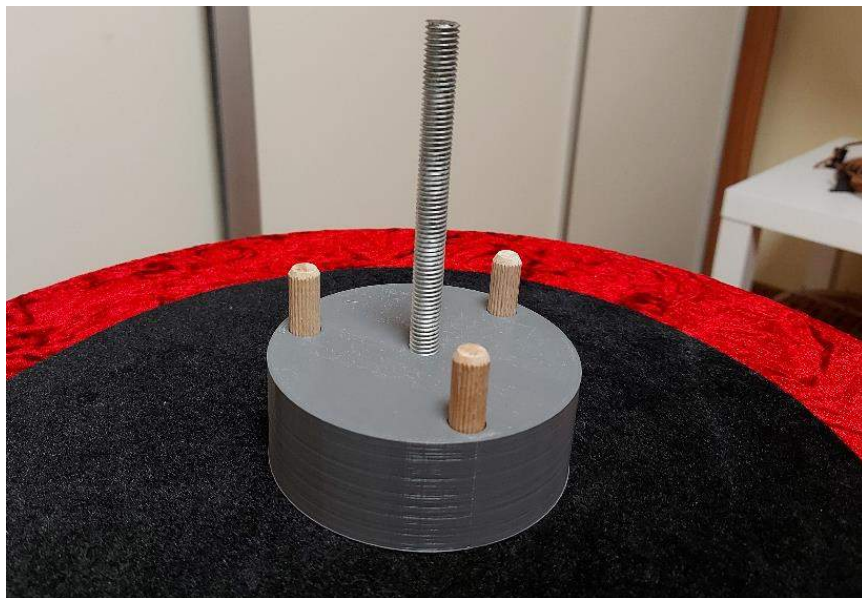
Pri izdelavi sekundarne tuljave za Teslov transformator je ključnega pomena skrbno načrtovanje geometrije, ki vključuje določanje števila ovojjev, premera tuljave in razporeditve ovojjev za doseg želenih električnih lastnosti. Sam postopek navijanja ovojjev zahteva natančnost in potrpežljivost, pri čemer je pomembno enakomerno porazdeliti ovoje za optimalno delovanje tuljave. Po končanem navijanju je potrebno zagotoviti ustrezno električno izolacijo med ovoji s pomočjo dielektričnih materialov, ki preprečujejo preboje in zagotavljajo varno delovanje transformatorja.

Pri moji sekundarni tuljavi sem uporabil belo PVC-cev s presekom 10 cm in z dolžino 55 cm, okoli katere sem ročno ovil 1100 obratov z izolirano bakreno žico s presekom 0,4 mm. Sekundarno tuljavo sem kasneje dvakrat premazal z epoksijem, ki zagotavlja ustrezno električno izolacijo, ki preprečuje preboje, ter služi kot dodatna zaščita tuljave, ki jo varuje pred zunanji vplivi, ki bi lahko tuljavo tudi poškodovali.



Slika 15: Dokončno navita sekundarna tuljava.

Sekundarna tuljava mora tudi stabilno stati na sredini primarne tuljave. Zato sem natisnil 3D-model, ki sem ga zalepil v notranjost PVC-cevi. Ta model je vseboval tudi oporne palice za oporo sekundarne tuljave, da se ne premika, ter prevodno zobčasto palico, na katero je povezan spodnji del sekundarne tuljave. Ta palica gre skozi ogrodje in se na drugi strani ogrodja privijači.



Slika 16: Spodnji del sekundarne tuljave z opornimi palicami.



Slika 17: Zgornji del sekundarne tuljave.

Na vrhu tuljave bo kasneje pritrjen še toroid, zato sem na zgornjem delu tuljave še izdelal 3D-model, ki mi bo to omogočal. Naredil sem podoben model, kot sem ga za spodnji del, ampak tokrat nisem potreboval opornih palic, videnih na prejšnji sliki, saj ne potrebujem podpore. Tudi ta model je vseboval zobčasto prevodno palico. To prevodno palico sem kasneje povezal z vrhno obremenitvijo.

Induktivnost tuljave se izračuna tako:

$$L = \mu_0 \mu_r \cdot \frac{N^2 S}{l}$$

L = induktivnost tuljave [H]

N = število obratov tuljave

μ_0 = induksijska konstanta [$1,26 \cdot 10^{-6} \text{ VsA}^{-1}\text{m}^{-1}$]

μ_r = permeabilnost snovi v jedru tuljave [H/m] (Pri zračnih tipih tuljav je permeabilnost tuljave = 1 H/m)

S = površina preseka tuljave [m^2]

Izračunana induktivnost moje sekundarne tuljave:

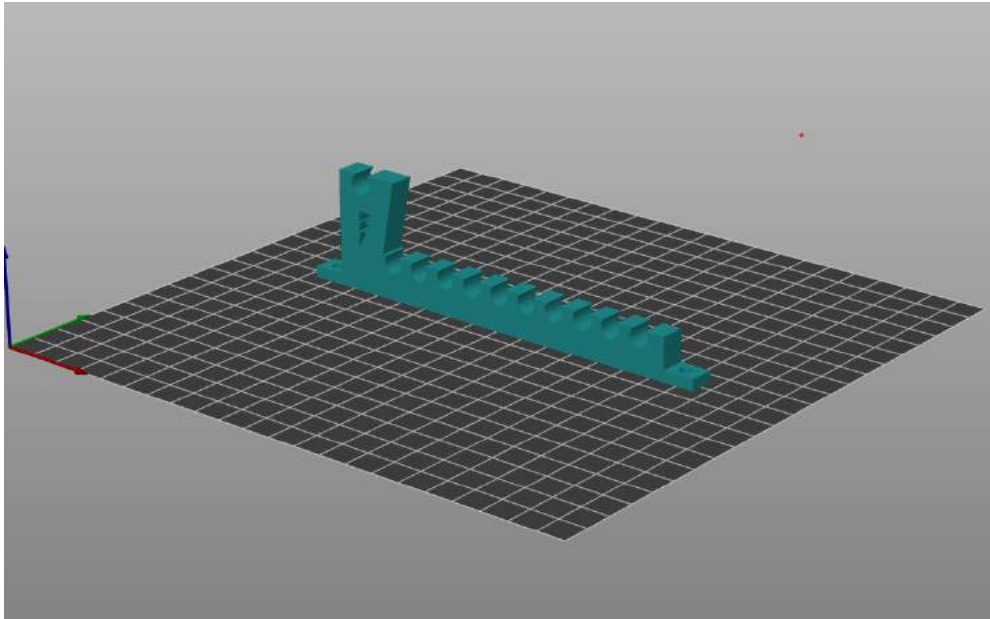
$N = 1100$, $\mu_r = 1 \text{ H/m}$, $S = 0,05 \text{ m}^2$

$$L_{sek.} = 26,89 \text{ mH}$$

(Dufresne, 2016)

3.2.3 Izdelava primarne tuljave

Skozi primarno tuljavo teče tok, ki ima zelo visoko frekvenco. Zaradi kožnega in proksimitetnega efekta elektroni ne tečejo po celotni površini prevodnika, temveč raje po zunanji koži prevodnika.



Slika 18: Model držala za primarno tuljavo.

Zaradi tega sem v izdelavi uporabil bakreno cev s premerom 6 mm. Dober Teslov transformator ima 6–8 ovojev primarne tuljave. Odločil sem se, da naredim primarno tuljavo z 10 ovoji, za vsak primer, če bi potreboval večjo induktivnost. Odločil sem se, da naredim Teslov transformator, ki resonira na 7 ovojih. Na računalniku sem naredil 3D-model, ki sem ga kasneje natisnil na 3D-printerju. Držalo vsebuje 10 lukenj, ki so namenjene držanju bakrenih cevi. Hkrati sem še dodal luknjo na višjem delu držala, ki je namenjena ozemljenemu nesklenjenemu obroču bakrene cevi. Namen te cevi je varovanje Teslovega transformatorja pred morebitnimi strelami iz sekundarnega dela. Temu delu se reče udarna tirnica. Vse skupaj sem izdelal 8 modelov držal, ki sem jih v obliki kroga pritrdil na leseno ogrodje.

Pri postavitvi primarne tuljave sem moral paziti tudi na koeficient sklopitve (ang. »Coupling Coefficient«). Koeficient sklopitve je razmerje, ki predstavlja jakost elektromagnetne sklopitve med primarno in sekundarno tuljavo. Pri izdelavi Teslovih transformatorjev je po navadi vrednost koeficienta med 0,13 in 0,22. Koeficient sklopitve je izključno funkcija geometrije in relativne postavitve primarnih in sekundarnih tuljav. Razlog, da mora biti koeficient nizek, je omejitev napetosti na sekundarni tuljavi. Drugače povedano, visoke vrednosti koeficienta vodijo k večjemu prenosu energije in večjemu napetostnemu stresu, dovolj visokemu, da povzroči električno prebijanje (nezaželene iskre), ki lahko uničijo tuljavo. Premajhna vrednost koeficienta pa privede do premajhnega prenosa energije iz primarne na sekundarno tuljavo. Zaradi tega moramo pri



Slika 19: Dokončana primarna tuljava z udarno tračnico.

načrtovanju primarne tuljave paziti na ta koeficient. Pomagal sem si s pomočjo spletnega simulatorja z imenom JAVATC, ki zelo natančno izračuna koeficient sklopitve. Po izračunih sem videl, da bo moj koeficient sklopitve približno 0,14, kar je zame idealno. (Anderson, 2014)

Ker je primarna tuljava ravninska spiralna tuljava, za njo uporabimo posebno enačbo, ki je eksperimentalno določena. Našel sem samo enačbo, v katero vstavljamo enote v inčih in dobimo rezultat v μH :

$$L_P = \frac{N^2 \cdot A^2}{30 \cdot A - 11 \cdot Di},$$

faktor A pa se izračuna po tej enačbi:

$$A = \frac{Di + N \cdot (w + s)}{2},$$

kjer je:

L_P = induktivnost primarne tuljave [μH]

N = število obratov tuljave

w = premer prevodnika [in]

s = razmik sosednjima ovojem [in]

Di = notranji premer tuljave v [in]

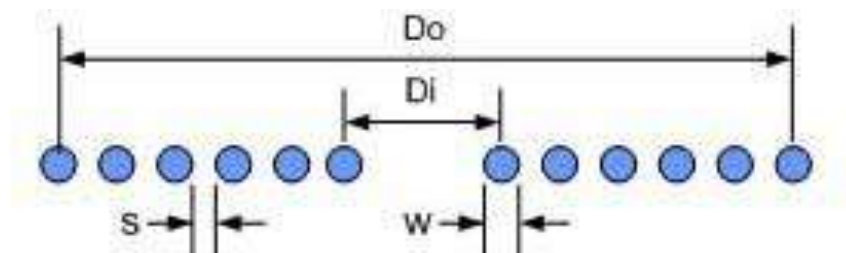
(1 m = 39,3700787 in)

Induktivnost moje primarne tuljave, ko uporabim svoje podatke:

$N = 7$, $w = 0,006$ m, $s = 0,005$ m, $Di = 0,15$ m,

pa je $L_{P(7)} = 14,16 \mu\text{H}$.

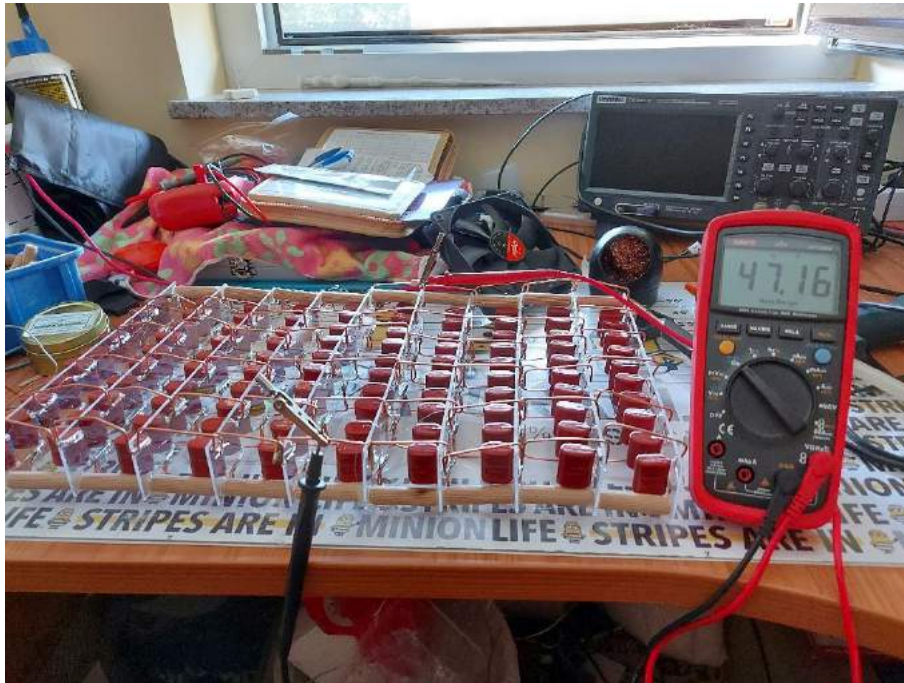
(Bell, Deepfriedneon, 2007)



Slika 20: Ravninska spiralna tuljava – mere. (CIRCUITS.DK, 2010)

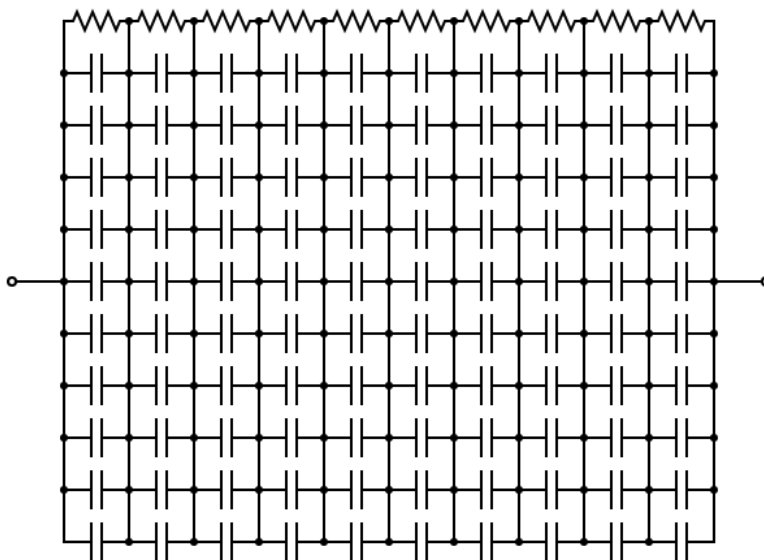
3.2.4 Izdelava MMC

Odločil sem se, da kondenzator naredim sam, čeprav na internetu obstaja veliko kondenzatorjev, ki bi mi ustrezali, ampak bi bila njihova cena tako visoka kot celotni proračun mojega projekta.



Slika 21: Končan MMC.

Za svoj projekt potrebujem kondenzator, ki je zmožen prenesti zelo visoke napetosti, in pri tem še morebiti pripravljen na visokonapetostne sunke, ki se lahko včasih pojavijo in ga s tem prenapolnijo in uničijo. Po svojem izračunu sem ugotovil, da je dobro narediti kondenzator, ki premore vsaj 20 kV. Za kapaciteto 47 nF sem se odločil zato, ker sem želel ustvariti primarno vezje, ki bo resoniralo na lastni frekvenci sekundarne tuljave, za katero sem izmeril lastno frekvenco 189 kHz. Poleg tega sem želel na primarni tuljavi imeti med 6 in 8 ovojev za dober prenos energije na sekundarno tuljavo. Tip kondenzatorja, ki sem ga želel ustvariti se z angleško kratico označi MMC (Multiple Mini Capacitor), ki je velikanski kondenzator sestavljen iz več manjših kondenzatorjev, v mojem primeru sem skupaj vzporedno povezal deset vrst desetih zaporedno vezanih kondenzatorjev. Iz varnostnih razlogov sem se odločil, da kondenzatorje povežem z 1 M Ω 1W upori, ki po končani uporabi v kratkem času razelektrijo kondenzatorje in



Slika 22: MMC-vezje z zaščitnimi upori na vrhu.

me s tem potencialno zavarovarujejo pred morebitnimi električnimi šoki, ki so pri takšni napravi lahko tudi večkrat usodni.

Ker poznam lastno frekvenco sekundarnega dela ($190 \cdot 10^3 \text{ Hz}$), želim, da primarni del vezja enako lastno frekvenco. S pomočjo enačbe za lastno frekvenco RLC nihajnega kroga:

$$f_0 = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}},$$

lahko izrazim želeno kapacitivnost MMC:

$$C = \frac{1}{4\pi^2 f_0^2 L}.$$

Končni izračun kapacitivnosti, ki ga potrebujem za MMC, lahko dobim z meritvami in izračuni iz prejšnjih poglavij: $f_0 = 190 \text{ kHz}$, $L = 14,16 \cdot 10^{-6} \text{ H}$, pri čemer dobim kapacitivnost, ki jo potrebujem za MMC: $C_{MMC} = 49,55 \text{ nF}$

Ker nisem v spletni trgovini, kjer sem kupoval kondenzatorje za MMC, našel kapacitivnosti 50 nF, sem kupil kondenzatorje, ki imajo skoraj enako kapacitivnost: 47 nF.

3.2.5 Izdelava vrhnje obremenitve sekundarne tuljave

Teslov transformator za boljše delovanje potrebuje tako imenovano vrhno obremenitev (ang. »Top Load«). To je gladek prevoden objekt, ki je električno povezan na zgornji del sekundarne tuljave. V večini primerov je narejen iz aluminija, saj je aluminij zelo dobro prevoden material, ki je tudi relativno poceni. Zagotovo ne smemo uporabiti materiala, ki je feromagneten, saj bo vrhnja obremenitev iz tega materiala odvzemala iz sistema ogromno moči, ter s tem zmanjšala učinkovitost transformatorja. Najboljša oblika, kar bi jo za ta projekt lahko uporabil, je oblika toroida, saj omogoča enakomerno kopičenje naboja po njegovi površini in zmanjša nabojne izgube, ki jih lahko opazimo kot manjše razelektritve, večkrat imenovane z imenom ogenj sv. Elija (ang. »St. Elmo's fire« ali »Corona discharge«). Najbolje je, da je premer cevi toroida v velikosti premera sekundarne tuljave, premer celotnega toroida pa je dobro imeti v 3–5-kratni velikosti premera cevi toroida. (McAluney, 2022)



Slika 23: Prva verzija vrhnje obremenitve v obliki toroida.

Vrhnja obremenitev predstavlja del navideznega kondenzatorja, od katerega je drugi del prevodna podlaga, na katero je priklopljen transformator, v mojem primeru je to zemlja.

Prvi dizajn toroida sem naredil z aluminijasto raztegljivo cevjo s presekom 10 cm. Pri tem sem še iz dveh lesenih plošč izrezal 2 kroga s presekom 33 cm, ki sem ju s pomočjo lesenih kosov distanciral narazen. Nato sem ju moral narediti prevodna, zato sem ju oblepil z aluminijastim



Slika 24: Druga verzija vrhnje obremenitve v obliki toroida.

trakom. Okoli ogordja toroida sem napeljal aluminijasto cev. Kasneje naredil nov toroid, a tokrat z večjim premerom aluminjaste cevi: 15 cm. Celoten premer tega novega toroida je izmerjeno 64 cm.

Vrhnja obremenitev služi kot kondenzator, zato nas zanima tudi kapacitivnost tega kondenzatorja. Izračun lahko naredimo po eksperimentalno ugotovljeni enačbi:

$$C = 2,8 \cdot \left(1,2781 - \frac{D2}{D1}\right) \cdot \sqrt{\frac{2\pi^2 \cdot (D1 - D2) \cdot \left(\frac{D2}{2}\right)}{4\pi}},$$

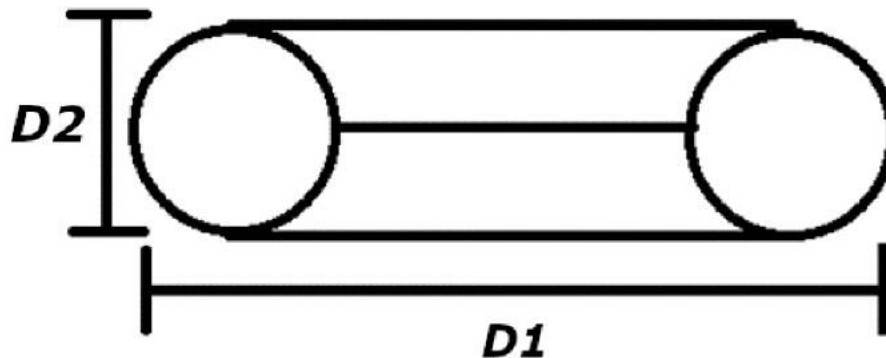
kjer je:

$D2$ = premer cevi toroida v [in]

$D1$ = premer celotnega toroida [in]

C = kapaciteta toroida [pF]

(1 m = 39,3700787 in)



Slika 25: Model toroida.

Z uporabljenimi podatki za moj toroid: $D2 = 0,64$ m, $D1 = 0,15$ m, sem izračunal kapacitivnost:

$$C = 27,64 \text{ pF}$$

(Bell, Deepfiredneon, 2007)

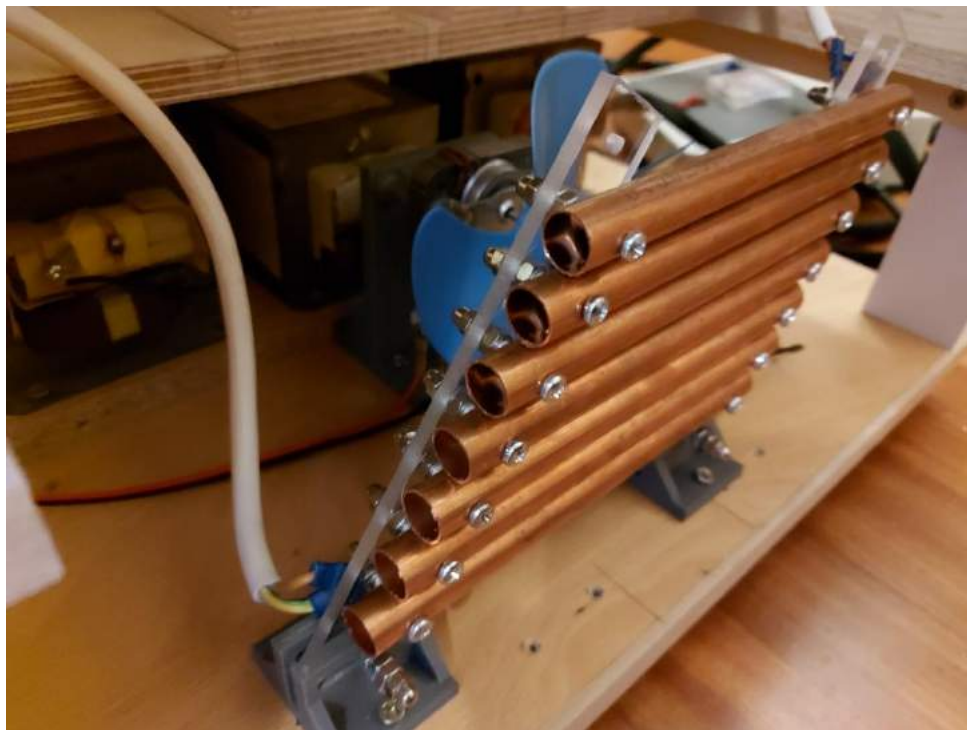
3.2.6 Načrtovanje in izdelava iskrišča

Iskrišča služijo kot stikala, ki se prižigajo in ugašajo ter s tem dajo kondenzatorjem čas, da se napolnijo in spraznijo. V svetu Teslovih transformatorjev poznamo 2 tipa iskrišč, to sta rotacijski in statični tip. Razlika med njima je zelo očitna. Rotacijski tip iskrišča oz. RSG (ang. »Rotary Spark Gap«) uporablja premikajočo se elektrodo, ki regulira BPS (ang. »Breaks per second«) iskrišča oz. koliko pulzov naredi kondenzator preko iskrišča na sekundo. Statični tip iskrišča oz. SSG (ang. »Static Spark Gap«) pa ne uporablja premikajočih se delov za preskakovanje električnih isker, ampak je sestavljen iz statičnih elektrod, med katerimi preskakujejo iskre. Oba imata svoje prednosti in hkrati tudi slabosti. Pri SSG je prednost, da ga ni zahtevno ustvariti, ima pa slabosti med njegovim delovanjem. Zaradi statičnosti elektrod, se ustvarjajo iskre vedno na istem mestu, kar močno segreje zrak, to pa poveča prevodnost zraka. Rezultat je strela, ki ne bo nikoli ugasnila. To posledično privede do problema, da se kondenzatorji ne uspejo napolniti z dovolj velikim

nabojem, zato je take tipe iskrišč potrebno hladiti. Znani so tudi po tem, da imajo relativno nizki BPS (>120).

Na drugi strani pa imamo RSG, ki jih je težje narediti in usposobiti, da delujejo pravilno. Njihova prednosti je v tem, da jih ni potrebno hladiti, saj s tem, ko premikajo elektrodo, samodejno ugasnejo strelice. Znani pa so tudi po tem, da imajo relativno višji BPS (~ 2000). Zato so tudi učinkovitejši kot SSG. RSG se deli še na dva tipa iskrišč. To sta propelerski RSG in diskovni RSG. (Armstrong, 2020)

Ko sem načrtoval, sem najprej želel narediti diskovni RSG, ampak sem ga zaradi težav z njegovim delovanjem opustil. Odločil sem se za SSG. Naredil sem ga iz večjih bakrenih cevi s presekom 15 mm, ki sem jih na vsaki strani povezal s pleksi steklom. Izdelal sem tudi 3D-model stojala, ki sem ga pritrdil v spodnji del lesenega ogrodja. Za iskriščem pa sem zmontiral ventilator, ki sem ga pridobil iz mikrovalovne pečice. Ta ventilator mi je služil kot hladilni sistem, ki je hladil iskrišče in mu s tem povečal učinkovitost.



Slika 26: Statično iskrišče s hladilnim sistemom.

Po nekaj mesecih preizkušanja pa sem se vseeno odločil za rotacijski tip iskrišča, ampak tokrat za propellerski RSG. Za propeler tega iskrišča bi bil najidealnejši material element volfram, ki je znan zaradi svojih visokih termalnih zmogljivosti in dobre električne prevodnosti. A ta element je izredno drag, zato sem sem uporabil medenino, ki ima tudi dobro električno prevodnost. Palico sem pritrdil na teflonski valj, ki sem ga pritrdil na motor. Okoli tega motorja pa sem na pleksi steklo



Slika 27: Propeler RSG med procesom izdelave še z nepovezanimi elektrodami.

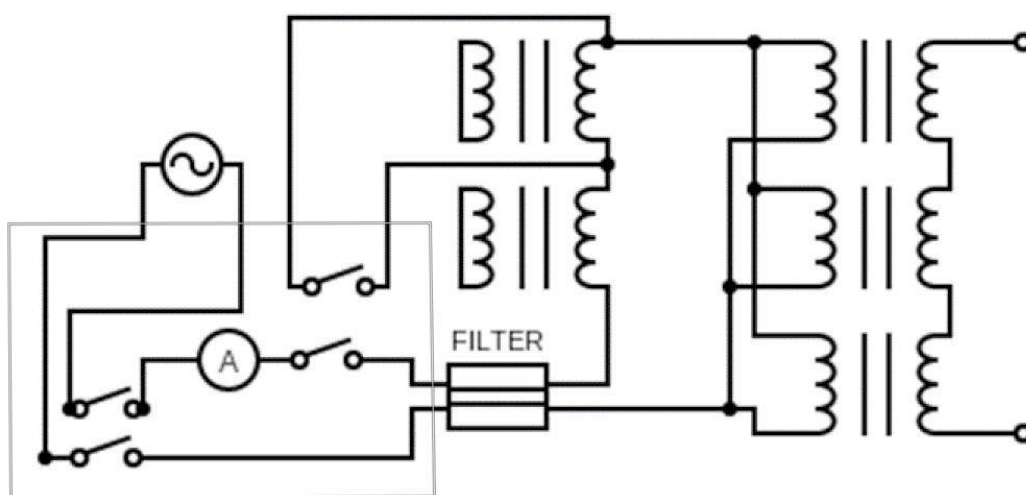
pritrdil 8 elektrod. Prejšnje statično iskrišče pa sem preoblikoval v zaščitno iskrišče (ang. »Safety Spark Gap«), ki ščiti kondenzatorje pred visokonapetostnimi preskoki, ki bi lahko potencialno uničili MMC.

3.2.7 Izdelava upravljalnika

Upravljalnik je naprava, ki omogoča upravljanje transformatorja z varne razdalje. Ima gumb za vklop in izklop, ampermeter, s katerim merim tok v primernem delu vezja, ter posebno stikalo, s katerim lahko vklopim ali izklopim dodatni modificirani MOT in s tem lahko nadziram tok v primernem delu. Iz varnostnih razlogov sem na upravljalnik dodal še varnostni gumb, ki izključi napajanje, ko ga pritisnemo.



Slika 28: Končani upravljalnik.



Slika 29: Slika upravljalnika, povezanega z vezjem napajalnika.

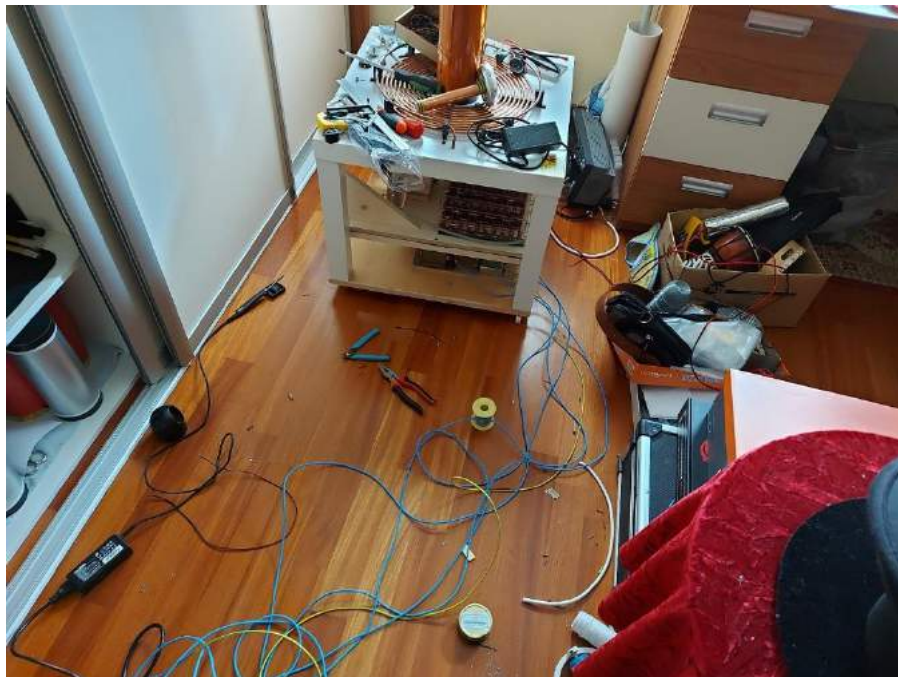
3.2.8 Izdelava celotne naprave

Na vrhu konstrukcije sem najprej sestavil primarno tuljavo, vključno z udarno tirnico. V sredini primarne tuljave sem naredil štiri luknje, ki so sovpadale s spodnjim delom sekundarne tuljave. Sekundarno tuljavo sem nato pritrdil na ustrezno mesto. Prevodno palico, ki se je raztezala iz sekundarne tuljave skozi konstrukcijo, sem pritrdil s pomočjo matic. Na vrh sekundarne tuljave sem namestil toroid. V konstrukcijo sem vgradil majhno polico, na katero sem pritrdil motor, ki poganja rotacijsko iskrišče. Pod polico sem namestil napajalnik, nad njo pa sem vgradil MMC, pod katerega sem kasneje oblepil mehko peno za dodatno blaženje vibracij.

3.2.9 Težave pri izdelavi in testiranju transformatorja

Največ težav sem zagotovo imel pri testiranju in izdelavi iskrišča, posebej rotacijskega. Pri visokih hitrostih iskrišča lahko postanejo nestabilna, zato morajo biti izdelana zelo precizno, kar mi je najblje uspelo s propellerskim tipom iskrišča.

Probleme sem imel tudi pri tem, ko so mi zatajile elektronske komponente, na primer dva 100Ω upora z močjo 100 W. Namen teh dveh uporov je bil zaščititi električne komponente v napajalniku. Na ta način sem ostal brez 5 mikrovalonih diod.



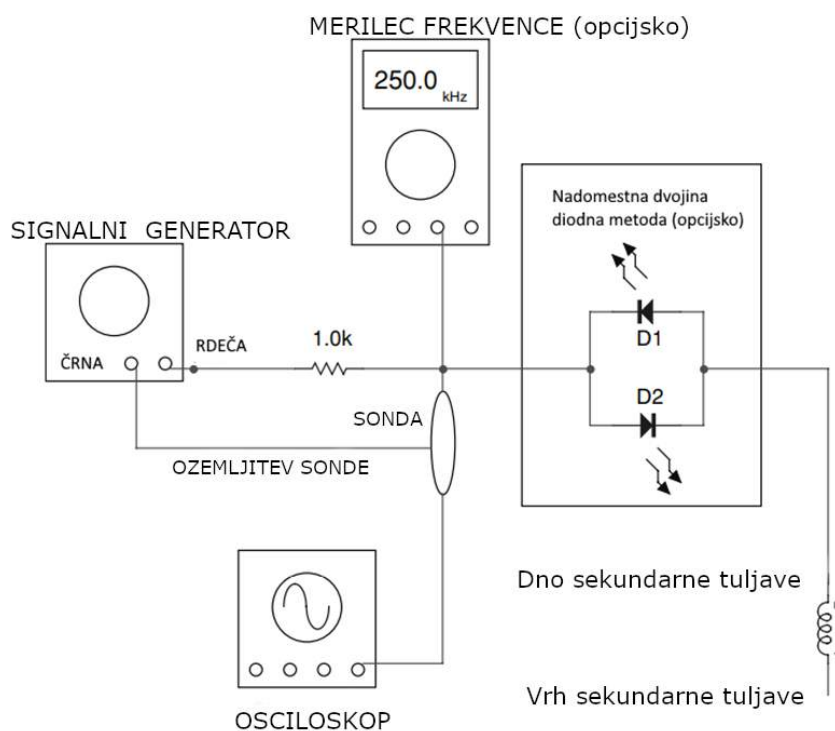
Slika 30: Pogled na prostor med procesom izdelave.

Zgodilo se mi je tudi, da mi se je uničil laboratorijski napajalnik, ki je napajal motor na rotacijskem iskrišču. Komponente v njem so v digitalne, zato jih v okolici Teslovega transformatorja ni najbolje imeti, saj povzročajo močno elektromagnetno polje. Zato sem kupil nastavljivi transformator, ki ga je možno mehansko nastavljati, zato je za takšne naloge najbolj primeren.

3.3 Meritve in izračuni

3.3.1 Resonanca

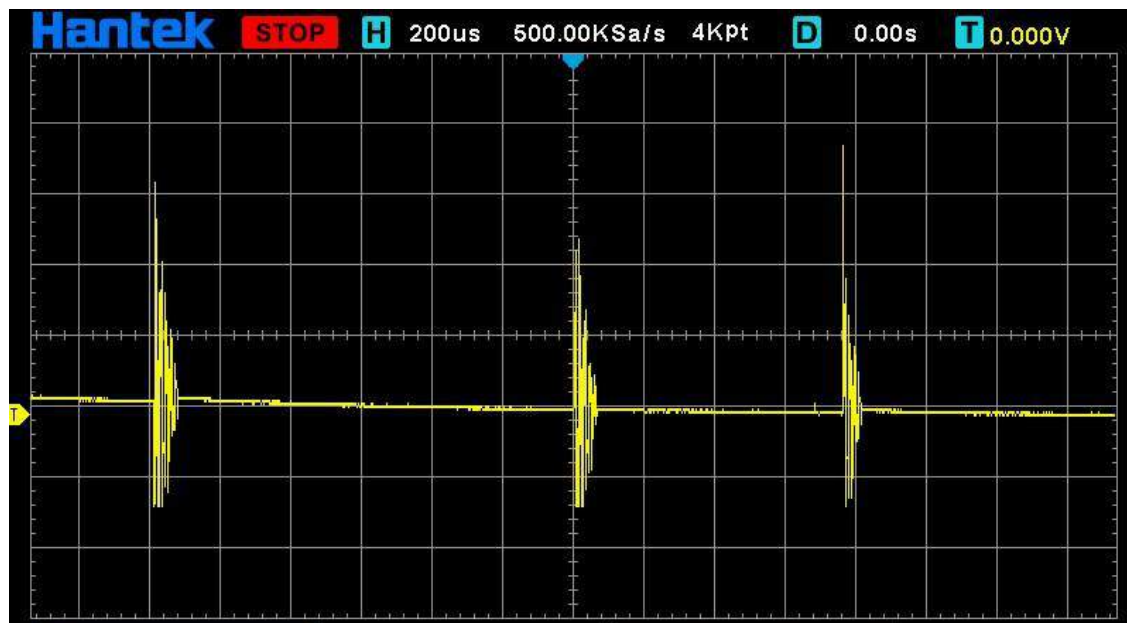
S pomočjo osciloskopa sem izmeril lastno frekvenco sekundarne tuljave transformatorja. Kot je prikazano na **Sliki 31**, sem na svojem osciloskopu povečeval vzbujevalno frekvenco tako dolgo, da sem na grafu osciloskopa dobil najmanjši odziv. Ta se je pojavil pri 190 kHz. Ko sem na sekundarno tuljavo dodal še toroid, sem izmeril frekvenco 170 kHz, kar je zelo blizu izračunane frekvence 174 kHz, ki sem jo izračunal na kalkulatorju JAVATC.



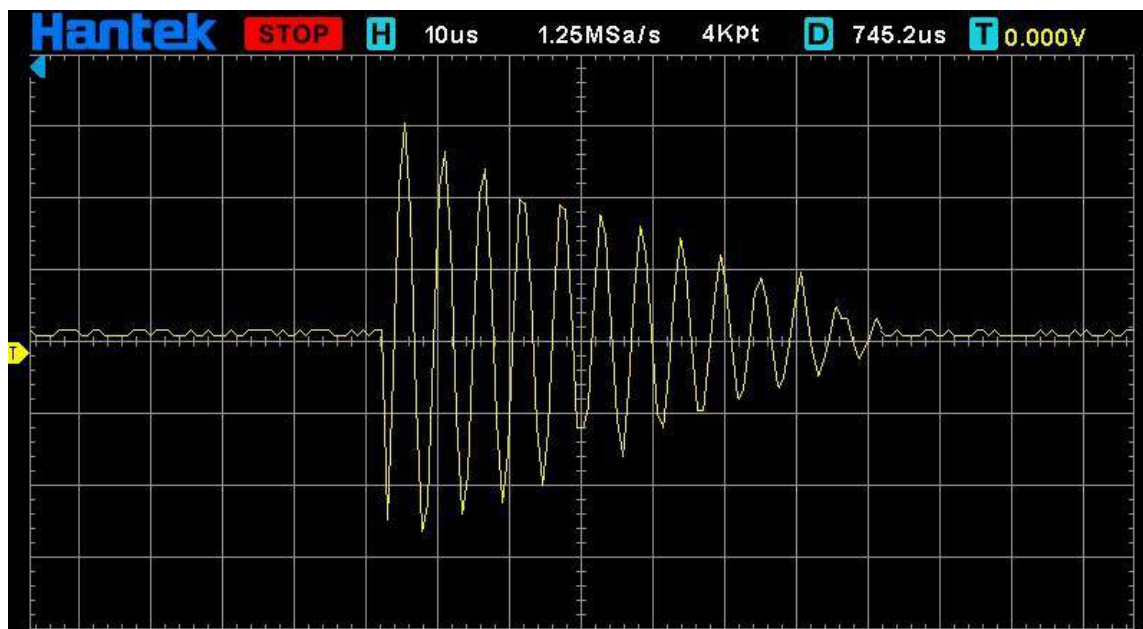
Slika 31: Nastavitev preizkusne opreme za merjenje resonančne frekvence tuljave. (Tilbury, 2007)

Pri merjenju lastne frekvence primarnega dela vezja sem povezal sondo osciloskopa z ozemljitvijo, in s tem ustvaril zanko, ki je lahko zaznavala elektromagnetne valove v svoji okolici. Pri meritvah sem iz Teslovega transformatorja odstranil sekundarno tuljavo. Na osciloskopu sem ujel izjemno

lepe meritve, osciliranje napetosti pri frekvenci resonance primarnega vezja, ki so se pojavile ob vsakem preskoku isker v iskrišču. Zaradi izgub v sistemu pa se je opazilo tudi dušenje.



Graf 3: Nastali pulzi v statičnem iskrišču.



Graf 4: Lastna frekvenca primarnega dela kjer se vidi tudi dušenje.

3.3.2 Napetost na sekundarni tuljavi

Da bi lahko izračunal napetost v sekundarni tuljavi med delovanjem, sem prelistal po originalnih zapiskih Nikole Tesle. Našel sem to formulo:

$$\frac{1}{2} C_p U_p^2 = \frac{1}{2} C_s U_s^2 .$$

Iz tega lahko izpeljemo:

$$U_s = U_p \sqrt{(C_p/C_s)} ,$$

kjer je:

U_s = napetost v sekundarni tuljavi [V]

U_p = napetost v primarni tuljavi [V]

C_s = efektivna shunt kapacitivnost [F] (pridobljena iz spletnega kalkulatorja JAVATC)

C_p = kapacitivnost MMC [F]

Z uporabo podatkov mojega transformatorja: $U_p = 8$ kV, $C_p = 47$ nF, $C_s = 32,046$ pF, izračunam, da lahko doseže zelo visoko napetost $U_s = 306\,374$ V. (Tesla, 1978)

4 EKSPERIMENTIRANJE IN REZULTATI

4.1 Iskrišče

4.1.1 Diskovni RSG

Testi z diskovnim rotacijskim iskriščem (RSG) so pokazali, da je tak tip iskrišča zelo težko narediti, saj mora biti izjemno natančno izdelan. Že samo majhna nenatančnost lahko povzroči izjemno močne vibracije, ki lahko naredijo ta tip iskrišča zelo nestabilen, saj začne s svojim vibriranjem spreminjati oddaljenost diska od elektrod. Med prvim testiranjem se je začelo tresti celotno ogrodje moje naprave do te mere, da so vibracije, ki so prihajale iz iskrišča, prišle v resonanco s sobo, v kateri sem testiral iskrišče. Celotna soba se je začela tresti, kot da bi bil manjši potres.

Zato sem izdelal še dva nova diska, s katerima sem želel odpraviti te težave. Iskrišče sem izboljšal do te mere, da se ga je dalo upravljati pri višjih hitrostih, ampak vseeno nisem mogel testirati maksimalne hitrosti, saj bi vibracije postale preveč nevarne za napravo.

Med prvimi testi sem odkril, da bi elektrode morale biti postavljene bližje zaradi premajhne napetosti v prvotni verziji napajalnika. Ta različica napajalnika ni zmogla ustvariti strele na razdalji, večji od 2 mm, zato sem bil prisiljen zmanjšati razdaljo med elektrodami in diskom na manj kot 1 mm na obeh straneh. Vendar sem se soočil z izzivom, saj se je zaradi nepravilnosti sistema disk, ki se vrti, približeval in oddaljeval od elektrode. Da bi preprečil morebitne poškodbe elektrode, sem moral ohranjati nizke hitrosti vrtenja diska, saj bi višje hitrosti lahko povzročile nestabilnost sistema in vibracije. S tem sem se izognil tveganju trka diska in elektrode, ki bi lahko povzročil nepopravljive poškodbe elektrode. V iskrišču je bil BPS zaradi nepravilnosti narave diska nekonstanten.

Nato pa se je zgodilo nekaj, česar nisem pričakoval. Med delovanjem diskovnega RSG se je sprožilo zaščitno iskrišče, ki je povzročilo najmočnejšo strela doslej, z razponom približno 50 cm. To me je spodbudilo k razmisleku in dobil sem idejo, da bi lahko zamenjal diskovni RSG s SSG. Začasno sem pretvoril zaščitno iskrišče v SSG, kar je prineslo izboljšane rezultate. Število strelav na sekundo (BPS) je postalo konstantno, strele z vrha sekundarne tuljave pa so bile v povprečju daljše od 15 cm.

Med eksperimentiranjem s tem novim iskriščem sem opazil, da njegova učinkovitost začne padati ob daljši uporabi. Iz svojih opazovanj sem ugotovil, da se zrak okoli iskrišča tako močno segreje, da to vpliva na njegovo učinkovitost. Zato sem se odločil, da izdelam nov dizajn SSG, vključno s hladilnim sistemom.

4.1.2 SSG

Moj novi dizajn SSG je bil sestavljen iz 7 bakrenih cevi, ki so ležale vzporedno druga ob drugi. Med njimi so bile majhne odprtine, skozi katere je lahko pihal veter iz ventilatorja za iskriščem. Iskrišču se je dalo spreminjati velikost teh odprtin z naklonom celotnega iskrišča.

Že med prvim preizkusom sem slišal drugačen zvok, kot ga je imelo prejšnje iskrišče. Njegov BPS je bil konstanten. Zaradi svetlosti dneva nisem mogel uzreti nastalih strel iz transformatorja, sem pa opazil nenavadne oblike zraka, ki se je dvigal iz vrha toroida zaradi visoke temperature. Razdaljo med palicami iskrišča sem nastavil na približno 1,5 mm, saj sem pri tej nastavitvi opazil nekatere izmed strel, ki so udarile v udarno tirnico. Ko sem eksperiment izvedel zvečer v temi, sem

opazil strele, ki so bile v povprečju daljše od 60 cm. S tem dizajnom iskrišča sem dobil najboljše rezultate do sedaj.

Približno dva meseca kasneje sem naredil nov dizajn napajalnika. Pri tem napajalniku sem lahko naredil strelco v iskrišču na razdalji, večji od 1 cm. Med novim testiranjem sem zaznal, da se je frekvenca BPS malenkost znižala. Opazil sem strele iz toroida, ki so bile v povprečju daljše od 80 cm. Najdaljše strele so bile dolge tudi do 130 cm. Po nekaj testih sem prišel do idealne razdalje med bakrenimi cevmi v iskrišču na velikost 5 mm. Strele so sedaj v povprečju dosegale dolžino 90 cm.

Moja hipoteza, da hlajenje iskrišča poveča efektivnost Teslovega transformatorja, je potrjena.

4.1.3 Propellerski RSG

Želel sem preizkusiti še en tip iskrišča – propellerski RSG. S podobnim rotacijskim RSG nisem imel najboljših izkušenj, vedel pa sem, da lahko propellerski RSG izboljša delovanje mojega transformatorja.

Že med prvim eksperimentiranjem sem slišal frekvenco preskakovanj strel v iskrišču oziroma BPS. BPS je bil zaradi hitrosti motorja višji kot pri SSG. Strele iz toroida so bile v povprečju dolge 90 cm. Najdaljše opažene strele so bile dolge več kot 140 cm. Velikost strel se je povečevala s povečevanjem hitrosti BPS. Na žalost sem moral eksperimentiranje prekiniti, saj mi je pregorel laboratorijski napajalnik, ki mi je napajal motor.

Zaradi nepredvidenih težav z napajalnikom in kasneje še z uporoma, ki sem ju zamenjal za dušilki, sem moral nadaljnje eksperimentiranje prekiniti. Moja hipoteza, da rotacijsko iskrišče poveča efektivnost transformatorja v primerjavi s statičnim iskriščem, je za sedaj še nedokazana zaradi tehničnih problemov.

4.2 Ozemljitev sekundarne tuljave

Sekundarna tuljava mora biti na Teslovem transformatorju vedno ozemljena, saj ji ozemljitev služi kot en del kondenzatorja. Med mojimi eksperimenti se mi je zgodilo, da sem pozabil ozemljiti sekundarno tuljavo. Na srečo Teslov transformator ni utrpel večje škode, mi pa je ta napaka omogočila vpogled v to, kaj se zgodi, če sekundarna tuljava ni ozemljena.

Med popravilom Teslovega transformatorja sem odstranil sekundarno tuljavo. Ko sem jo ponovno pritrdil na ogrodje, sem jo pozabil priključiti na ozemljitev. Med delovanjem transformatorja sem opazil, da se na dnu sekundarne tuljave proizvaja velika skupina dolgih strel tik ob tuljavi. Takoj, ko sem to opazil, sem izključil napravo. Takšne razelektritve nad tuljavo lahko tuljavo poškodujejo. V svojem primeru sem imel srečo, saj mi je premaz epoksija na tuljavi zaščitil sekundarno tuljavo. Podobna situacija se lahko zgodi, če je primarna tuljava preblizu sekundarne.

Nadalje sem poskrbel, da se mi kaj takega ni več ponovilo. Sem pa zaradi svoje malomarnosti izvedel nov eksperiment, ki ga nisem načrtoval. Eksperiment mi je dal vpogled v to, zakaj moramo ozemljiti sekundarno tuljavo.



Slika 32: Neozemljena sekundarna tuljava proizvaja škodljive strele v dnu sekundarne tuljave.

4.3 Vrhnja obremenitev

Med svojimi raziskavami sem uporabljal dve vrhnji obremenitvi. Prva vrhnja obremenitev je bil aluminijasti toroid s premerom cevi 10 cm. Celoten premer je imel 54 cm. Kasneje sem ga zamenjal z večjim toroidom, ki je imel premer obroča cevi 15 cm in celoten premer 64 cm. Po formuli, opisani v poglavju [3.2.5](#), lahko izračunamo, da je kapacitivnost večjega toroida večja od manjšega toroida (kapacitivnost večjega toroida = 27,64 pF, kapacitivnost manjšega toroida = 22,4 pF). Po

formuli $f_0 = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}}$ lahko vidimo, da se bo ob povečanju kapacitivnosti lastna frekvenca sekundarnega dela zmanjšala. V primarnem delu vezja pa se lahko na spremembe frekvence resonance v sekundarni tuljavi prilagodi primarna tuljava z uporabljenim številom ovojev. Opazimo lahko tudi, da če se frekvenca resonance sekundarnega dela poveča, moramo induktivnost primarni tuljavi zmanjšati, oziroma če se frekvenca resonance sekundarni tuljavi zmanjša, moramo induktivnost primarni tuljavi povečati. Zaradi tega lahko spreminjamo število ovojev na primarni tuljavi in s tem dosežemo resonančno frekvenco.

V svoji hipotezi sem zapisal, da lahko z večjo vrhno obremenitvijo dosežemo večjo učinkovitost transformatorja. Zato sem sedaj svojo hipotezo želel preveriti, tako da sem eksperimentiral z manjšim in večjim toroidom pri enakih pogojih, da sem rezultate lahko primerjal. Kljub temu da sem imel na prvi pogled veliko razliko med velikostjo toroidov, se kapacitivnost med njima ni zelo razlikovala, zato sem v obeh primerih dobil skoraj identične rezultate.

Za svoj eksperiment bi potreboval veliko večjo velikost vrhnje obremenitve, da bi dosegel dokaz svoje hipoteze. Zato ostaja moja hipoteza še vprašljiva.

4.4 Faradayeva rokavica

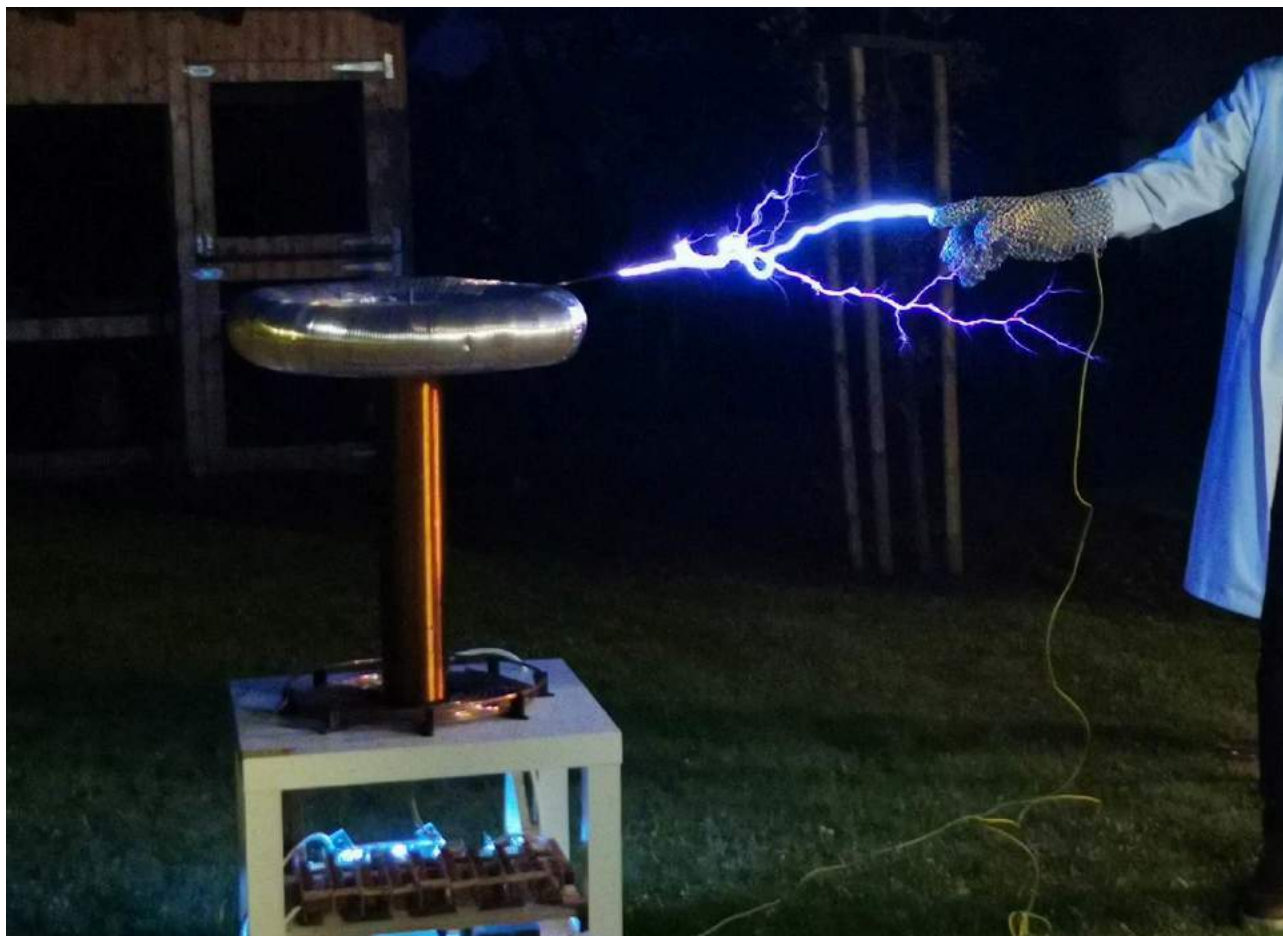
Bolj kot sem opazoval strele, bolj sem si jih želel dotikati. Ampak pri mojem tipu Teslovega transformatorja stik z golo kožo žal ni mogoč brez hujših posledic, kot so hujše opekline ali celo zastoj srca. Na spletu sem opazil, da si veliko ljudi, ki se ukvarjajo s Teslovimi transformatorji, naredi Faradayevo obleko. Deluje po istem principu kot Faradayeva kletka. Seveda si takšne obleke zaradi njene cene ne bi mogel privoščiti. Zato sem porabil 30 ur za izdelovanje Faradayeve rokavice iz koščkov zavite žice.



Slika 33: Končana Faradayeva rokavica.

Eksperiment je potekal v prisotnosti mnogih obiskovalcev, ki so prišli gledat moje demonstracije. Za dodatno zaščito sem se s pomočjo neprevodnih materialov pod svojimi nogami izoliral od podlage. Rokavico sem imel priklopljeno na ozemljitev transformatorja. Moj asistent je vklopil transformator, jaz pa sem se počasi približal strelam, ki sem se jih končno lahko dotaknil. Strele so preskakovale na mojo rokavico, pri tem pa nisem čutil popolnoma nič.

Eksperiment je bil uspešen.



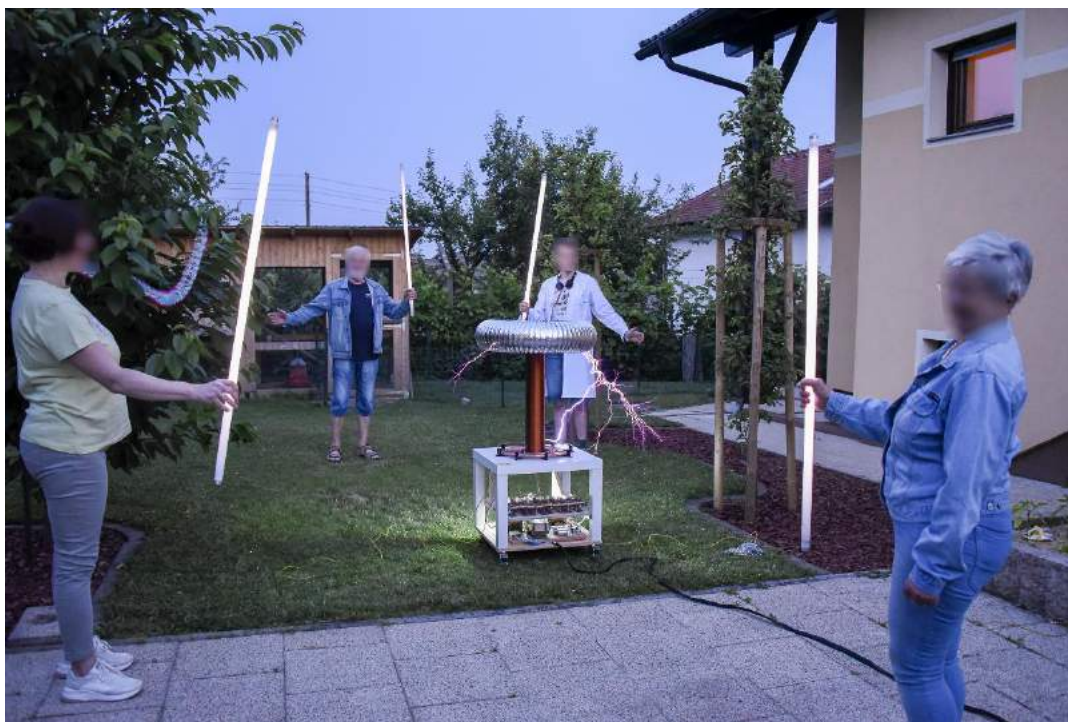
Slika 34: Avtor raziskovalne naloge se dotika strel, prihajajočih iz transformatorja.

4.5 Brezžičen prenos energije

Teslov transformator okoli sebe povzroči močno elektromagnetno polje, s katerim bi lahko potencialno brezžično prenašali energijo na krajših razdaljah. To sem želel dokazati s fluorescentnimi sijalkami. Fluorescentne sijalke vsebujejo kemijske elemente, ki zaradi močnega elektromagnetnega polja preidejo v vzbujeno stanje, ko pa se elektroni vrnejo v osnovno stanje, oddajo svetlobo.

V svoji raziskavi sem sistematično preučeval vpliv različnih razdalj od Teslovega transformatorja na učinkovitost brezžičnega prenosa energije.

V svojem prvem eksperimentu sem preučeval vpliv razdalje na svetlost fluorescenčne sijalke, s fokusom na testiranju hipoteze, da bodo sijalke sposobne oddajati svetlobo le v območju, manjšem od 4 m, merjeno od transformatorja. Med obratovanjem transformatorja sem opazoval, da so se sijalke zasvetile na razdalji, manjši od 3 m, kar je podprlo moje pričakovanje. Zanimivo je bilo opaziti, da so nekatere sijalke svetile celo na razdalji, malo večji od 3 m, če sem se od tuljave



Slika 35: Žareče fluorescentne sijalke v okolici Teslovega transformatorja.

oddaljeval, torej so bile že prižgane. Na koncu sem opazil, da so bile sijalke z največjo oddaljenostjo od transformatorja še vedno oddaljene za manj kot 4 m. S tem sem potrdil svojo hipotezo.

4.6 Ostra palica na vrhnji obremenitvi

V okviru raziskav sem preučeval vpliv ostre palice, nameščene na vrhu Teslovega transformatorja, na oblikovanje strele. Izhajal sem iz hipoteze, da bo prisotnost ostre palice koncentrirala strele in povzročila večje strele. Pri izvajanju eksperimentov sem opazil zanimive rezultate, ki so se razlikovali od pričakovanj.

Ostra palica je dejansko prispevala k močnejšim strelam, kar se je izražalo v njihovi svetlosti in boljši vidljivosti. Vendar pa se ni pojavilo večje število ali obseg strel iz te palice, kot sem sprva predvideval. Nasprotno, ko sem izvajal eksperimente brez ostre palice, le z uporabo toroida, sem dosegel največje razelektritve, ki sem jih kadarkoli opazil.

Razelektritve so v nekaterih primerih segale od vrha toroida vse do tal, dosegle pa so dolžino približno 1,40 m. Zanimivo je bilo opaziti, da je brez ostre palice prišlo do večjega števila razelektritev iz toroida, pri čemer so se pojavile večkratne strele naenkrat. To je v nasprotju z uporabo ostre palice, kjer je bil nadzor nad tem, kam bo udarila strela, nekoliko boljši



Slika 36: Razelektritve brez ostre palice na toroidu.

Kljub možnosti nekoliko boljše kontrole s prisotnostjo ostre palice, sem opazil, da so strele brez nje bolj naključne. V nekaterih primerih so celo segale na območja, kjer se običajno ne bi pričakovalo. Sklepam, da prisotnost ostre palice sicer omogoča nekaj nadzora nad smerjo strele, vendar pa brez nje opazimo večjo spontanost in nepredvidljivost v obnašanju strele iz Teslovega transformatorja. Zato zavračam svojo hipotezo.



Slika 37: Razelektritev z ostro palico na toroidu.

5 DISKUSIJA

Raziskava delovanja Teslovega transformatorja je razkrila izjemne lastnosti tega resonančnega transformatorja. Na osnovi izvedenih eksperimentov in analize rezultatov lahko izpostavim ključne ugotovitve in poudarim njihov pomen.

Eden od ključnih rezultatov moje raziskave je bila potrditev visokih frekvenc (170–190 kHz) in doseženih visokih napetosti (izračunano približno 300 kV) Teslovega transformatorja. Te lastnosti so ključne za razumevanje delovanja transformatorja in potrjujejo Teslove inovacije na področju električnih pojavov.

Glede praktične uporabe Teslovega transformatorja v vsakdanjem življenju sem prišel do ugotovitve, da je njegova praktična aplikacija omejena. Kljub temu ima transformator pomembno vlogo v tehnoloških muzejih in izobraževalnih ustanovah, kjer služi kot poučno sredstvo za boljše razumevanje delovanja električnosti.

Proučevanje različnih parametrov, kot so število ovojev na primarni tuljavi, velikost toroida in prisotnost ostre palice na toroidu, je privedlo do različnih rezultatov. To nakazuje kompleksnost

transformatorjevega delovanja in poudarja pomembnost prilagodljivosti pri raziskavah na tem področju.

Nadaljnji potenciali za raziskovanje Teslovega transformatorja vključujejo razvoj novih vrst transformatorjev, ki bi bili učinkovitejši v svojem delovanju. To vključuje aspekte, kot so večje strele, zanimive oblike strele in izboljšana učinkovitost pri prenosu brezžične energije. Te možnosti odpirajo pot za nadaljnje raziskave in inovacije na področju Teslove tehnologije.

V zaključku lahko rečem, da je Teslov transformator še vedno vir zanimanja in raziskovanja zaradi svoje kompleksnosti in potenciala za inovacije na področju električne energije. Raziskava je pripomogla k boljšemu razumevanju delovanja transformatorja ter poudarila izzive in možnosti za prihodnje raziskave na tem področju.

6 ZAKLJUČEK

Zaključek moje raziskave Teslovega transformatorja prinaša osvetlitev kompleksnega sveta visokofrekvenčnih elektromagnetnih pojavov. Globoko sem se poglobil v delovanje transformatorja, izvajal eksperimente in analiziral rezultate. Kljub temu da v vsakdanjem življenju ne vidim takojšnje praktične uporabe, sem prepoznal njegov pomen v izobraževalne namene, še posebej za boljše razumevanje električnih konceptov. Rezultati eksperimentov so izpostavili vpliv različnih parametrov na delovanje Teslovega transformatorja. Opazil sem tudi nekatere razlike v rezultatih v primerjavi z obstoječo literaturo, kar odpira vrata za nadaljnje raziskave in razvoj na tem področju.

Ta raziskovalna pot predstavlja le začetek, saj se odpirajo nove možnosti za raziskovanje inovativnih Teslovih transformatorjev. Moje delo ne sledi le zaključku trenutnega projekta, temveč predstavlja temelj za nadaljnje odkrivanje elektromagnetnih pojavov. Pridobljeno znanje bo nedvomno vplivalo na moje prihodnje raziskovalne podvige in inženirsko prizadevanje.

7 DRUŽBENA ODGOVORNOST

Pri izvedbi raziskovalne naloge sem se zavezal k spoštovanju družbene odgovornosti. Uporabil sem materiale, ki so ekološko sprejemljivi in skladni z okoljskimi standardi. Vsa oprema, ki sem jo uporabil, je bila namenjena varni uporabi in ni predstavljala tveganja za zdravje ali okolje. Med

raziskavo sem se dosledno držal etičnih smernic in pravil za ravnanje z eksperimentalnimi materiali. Vsi rezultati, predstavljeni v raziskavi, izhajajo iz mojih lastnih prizadevanj in meritev, brez kopiranja ali prirejanja od drugod. Pri citiranju virov sem sledil standardom in se izognil kršenju avtorskih pravic. Zavedam se tudi pomena poštenosti in integritete v raziskovalnem delu ter nisem nameraval povzročiti škode ali užaliti kogar koli s svojim delom. Raziskavo sem izvajal v skladu z vsemi veljavnimi zakoni in predpisi.

Hkrati sem krepil skupnost raziskovalcev s sodelovanjem in pogovori s tujimi strokovnjaki. Ti pogovori so dodatno prispevali k širjenju znanja in izmenjavi idej. S tem sem poglobil povezave v raziskovalni skupnosti, spodbudil dialog in prispeval k skupnemu napredku v razumevanju obravnavane problematike. Vse to je bilo izvedeno z namenom ustvarjanja pozitivnega vpliva na družbo in znanstveno skupnost.

Ob tem bi rad poudaril, da ob vseh navedbah in dosežkih v raziskovalni nalogi bralce opozarjam, naj ne poskušajo izvajati podobnih eksperimentov doma, saj ti lahko predstavljajo resna tveganja in zahtevajo posebno strokovno znanje.

8 SEZNAM VIROV IN LITERATURE

- Anderson, B. B. (2014). *JAVATC*. Pridobljeno 31. januar 2024 iz <https://www.tesla.nu/programs/javatc/javatc.html>
- Armstrong, Z. (28. februar 2020). *YouTube*. Pridobljeno 3. februar 2024 iz <https://www.youtube.com/watch?v=wiaehhgtasM&t=391s>
- Bell, S. (15. september 2007). *Deepfriedneon*. Pridobljeno 6. februar 2024 iz deepfriedneon: https://www.deepfriedneon.com/tesla_frame6.html
- Bell, S. (15. september 2007). *Deepfriedneon*. Pridobljeno 6. februar 2024 iz deepfriedneon: https://www.deepfriedneon.com/tesla_frame6.html
- Bienzl. (27. julij 2008). *Skin effect*. Pridobljeno 16. januar 2024 iz https://en.wikipedia.org/wiki/Skin_effect#/media/File:Skin_depth.svg

Chetvorno. (27. julij 2015). *Wikipedija*. Pridobljeno 30. januar 2024 iz https://en.wikipedia.org/wiki/Tesla_coil#/media/File:Tesla_coil_circuit.svg

Chetvorno. (6. maj 2017). *Proximity effect - current in same direction*. Pridobljeno 16. januar 2024 iz [https://en.wikipedia.org/wiki/Proximity_effect_\(electromagnetism\)#/media/File:Proximity_effect_-_current_in_same_direction.svg](https://en.wikipedia.org/wiki/Proximity_effect_(electromagnetism)#/media/File:Proximity_effect_-_current_in_same_direction.svg)

Chetvorno. (12. julij 2023). *Proximity effect - current in opposite directions*. Pridobljeno 16. januar 2024 iz [https://en.wikipedia.org/wiki/Proximity_effect_\(electromagnetism\)#/media/File:Proximity_effect_-_current_in_opposite_directions.svg](https://en.wikipedia.org/wiki/Proximity_effect_(electromagnetism)#/media/File:Proximity_effect_-_current_in_opposite_directions.svg)

Chetvorno. (5. september 2023). *Proximity effect (electromagnetism)*. Pridobljeno 16. januar 2024 iz [https://en.wikipedia.org/wiki/Proximity_effect_\(electromagnetism\)#](https://en.wikipedia.org/wiki/Proximity_effect_(electromagnetism)#)

CIRCUITS.DK. (10. december 2010). *Circuits.dk*. Pridobljeno 6. februar 2024 iz [circuits.dk: https://www.circuits.dk/img/FlatSpiralCoilDim.jpg](https://www.circuits.dk/img/FlatSpiralCoilDim.jpg)

Costant314. (14. 1 2024). *Wikipedija*. Pridobljeno 16. januar 2024 iz https://en.wikipedia.org/wiki/Skin_effect

Dufresne, S. (22. oktober 2016). *RimStar.org*. Pridobljeno 6. februar 2024 iz [rimstar.org: https://rimstar.org/science_electronics_projects/coil_design_inductance.htm](https://rimstar.org/science_electronics_projects/coil_design_inductance.htm)

Houstoun, R. A. (13. avgust 2013). *Wikipedija*. Pridobljeno 30. januar 2024 iz https://en.wikipedia.org/wiki/Leyden_jar#/media/File:Leyden_jar_engraving.png

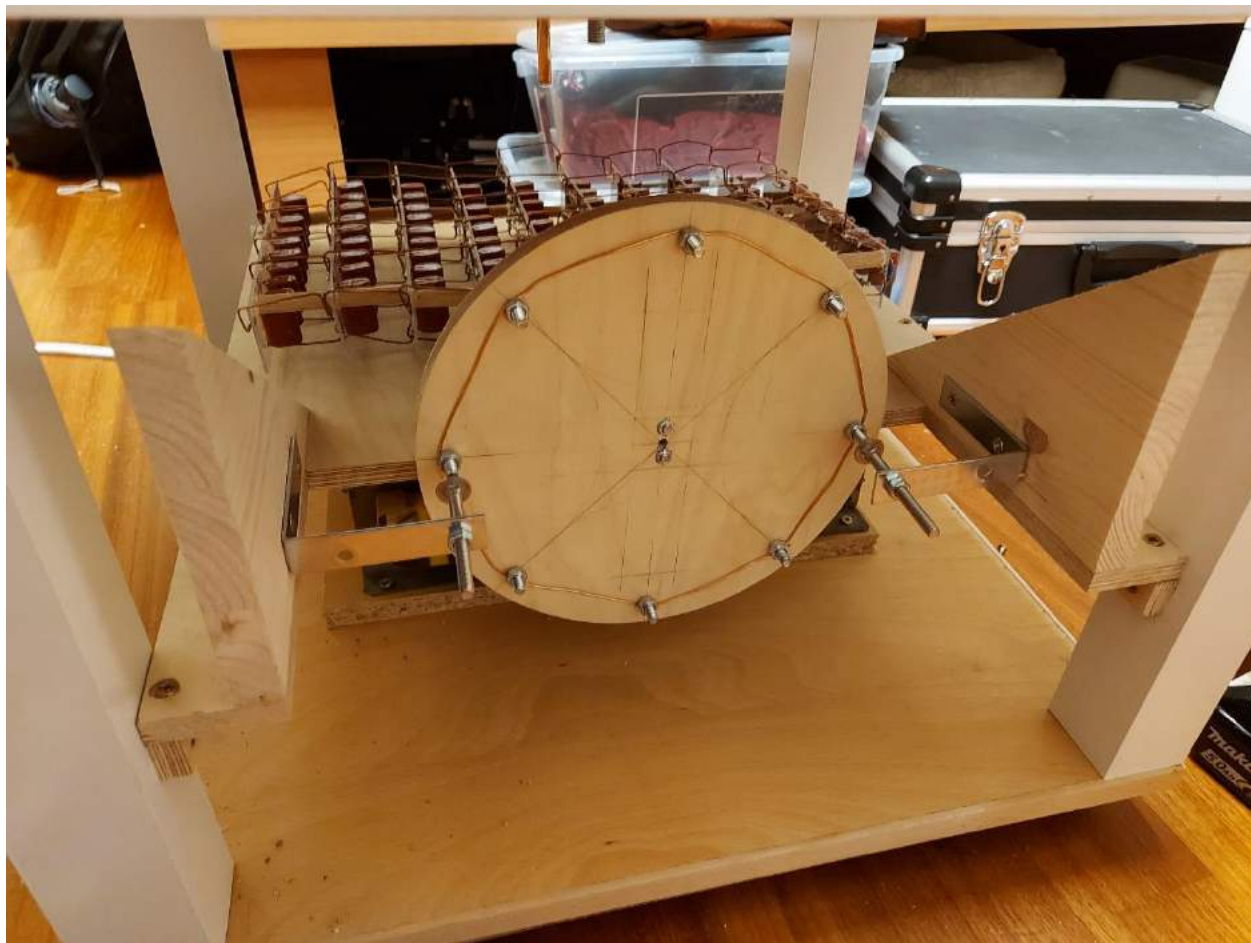
Joseph, K. (9. april 2018). *YouTube*. Pridobljeno 9. februar 2024 iz <https://www.youtube.com/watch?v=IN9jb3fzZd0&t=604s>

McAluney, T. (25. junij 2022). *YouTube*. Pridobljeno 3. februar 2024 iz <https://www.youtube.com/watch?v=KEPB0xfe0r8>

Tesla, N. (1978). *Nikola Tesla Colorado Springs Notes 1899-1900*. Beograd: Nolit.

Tilbury, M. (2007). *The Ultimate Tesla Coil Design and Construction Guide*. New York: The McGraw-Hill Companies.

9 PRILOGA



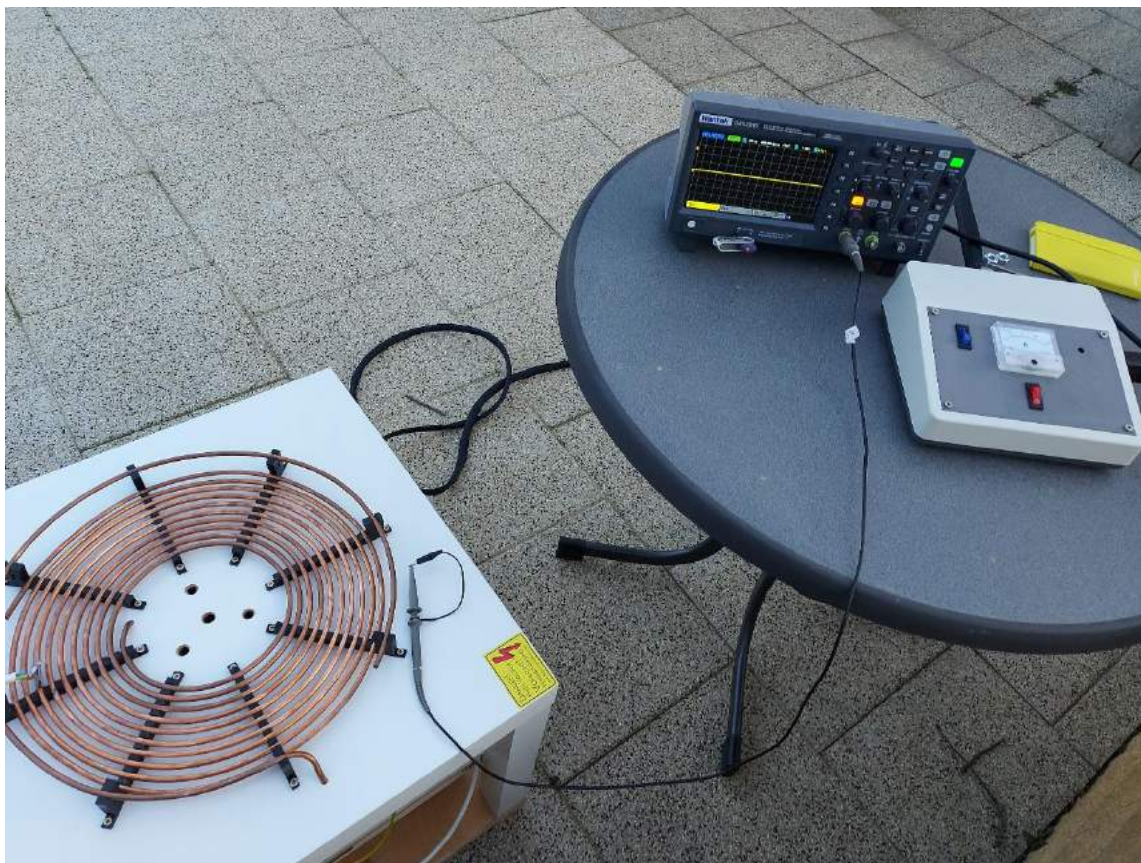
Slika 38: Prva verzija diskovnega rotacijskega iskrišča.



Slika 39: Brezžičen prenos energije pri prvih testiranjih transformatorja.



Slika 40: Majhne razelektritve pri prvih testiranjih transformatorja.



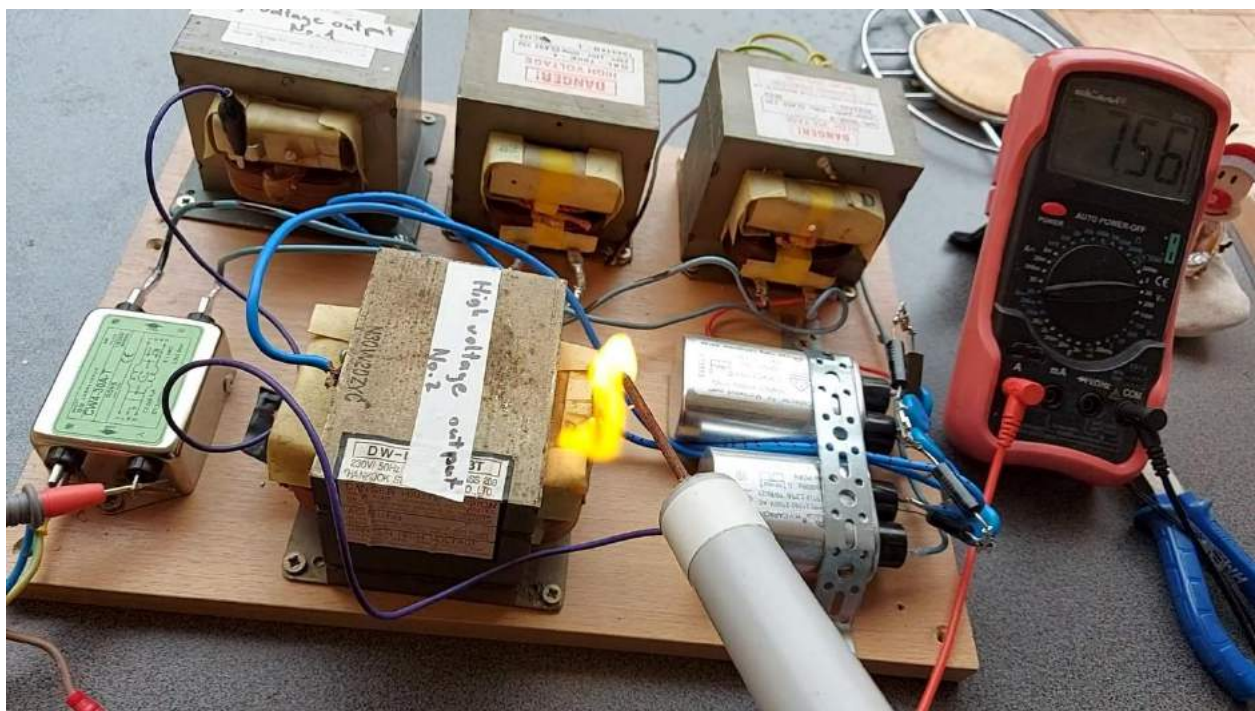
Slika 41: Merjenje lastne frekvence primarnega dela vezja.



Slika 42: Dotikanje strel s Faradayevo rokavico (na blizu).



Slika 43: Avtor raziskovalne naloge napaja fluorescentne sijalke.



Slika 44: Testiranje druge verzije napajalnika.



Slika 45: Demonstracija brezžičnega prenosa energije na fluorescentne sijalke in energijskega prenosa skozi fluorescentno sijalko na vrhu toroida.



Slika 46: Napajalnik se žge.



Slika 47: Nova verzija upravljalnika.



Slika 48: Strela je udarila v udarno tirnico.



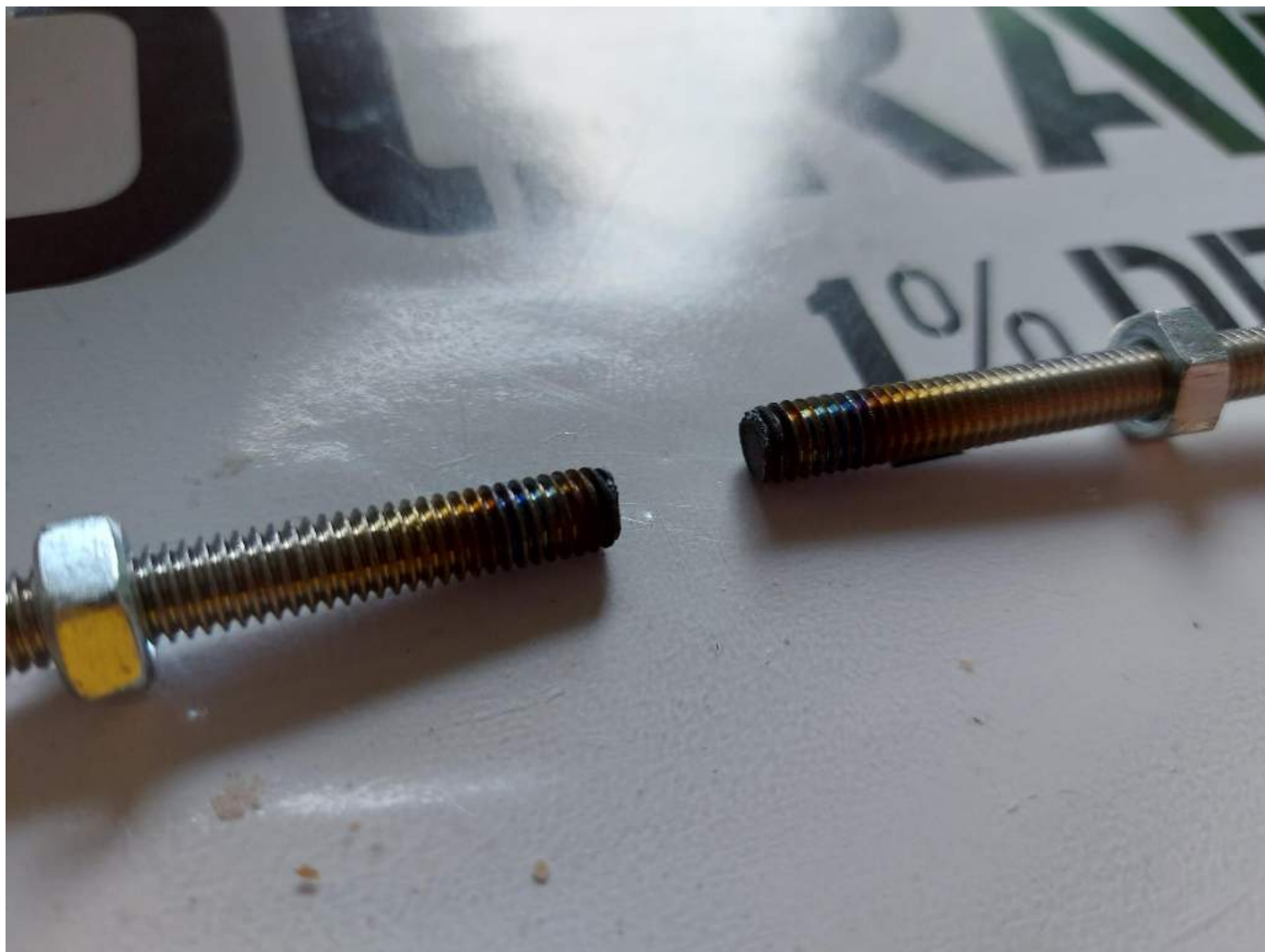
Slika 49: Hladilni sistem v ospredju pred napajalnikom.



Slika 50: Faradayeva rokavica med procesom izdelave.



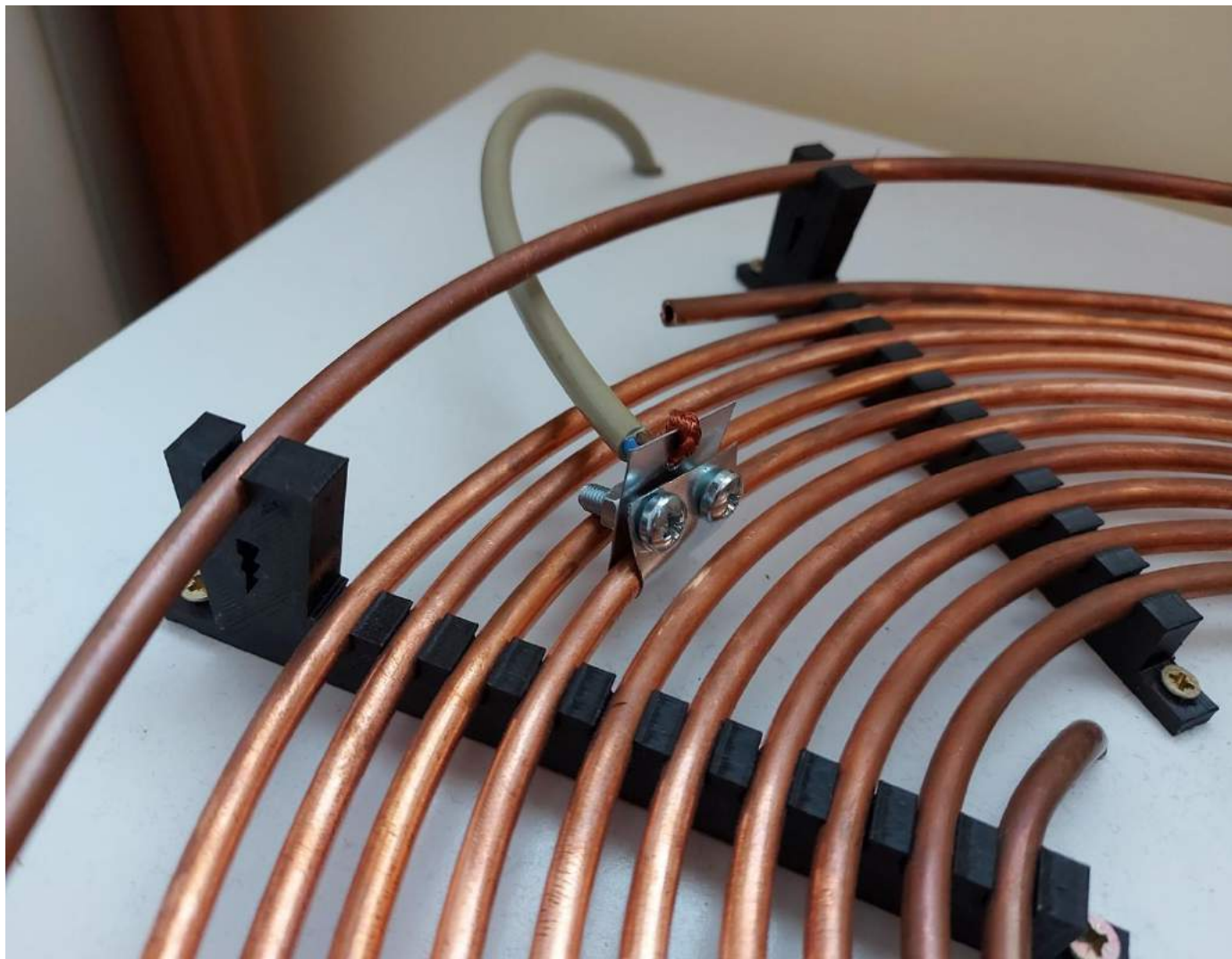
Slika 51: Strela, ki izvira iz preblizu nameščene fluorescentne svetilke, povzroča škodo na sekundarni tuljavi.



Slika 52: Elektrodi prve verzije zaščitnega iskrišča sta utrpeli termične poškodbe zaradi visokih temperatur, ki so se pojavljale v iskrišču.



Slika 53: Prva največja strela, ki se je sprožila med prvimi testi, pri čemer je vidno intenzivno sevanje ultravijolične (UV) svetlobe iz zaščitnega iskrišča.



Slika 54: Prilagodljiva sponka, ki omogoča enostavno nastavljanje induktivnosti primarne tuljave.