

Středoškolská odborná činnost 2007/2008

Obor 10 – elektrotechnika, elektronika a telekomunikace

Teslův transformátor

Autoři:

Roman Heidler, Martin Švarc

4. ročník

VOŠ a SPŠ Varnsdorf

Mariánská 1100

Varnsdorf 407 47

Konzultant práce:

Ing. David Furka

(VOŠ a SPŠ Varnsdorf)

Zadavatel práce:

Varnsdorf, 2008

PROHLÁŠENÍ

Prohlašujeme tímto, že jsme předloženou práci vypracovali samostatně za pomoci konzultanta Ing. Davida Furky a dokumentačních materiálů, které jsme v rámci zpracování středoškolské odborné činnosti získali a jsou uvedeny v závěru práce.

Ve Varnsdorfu dne:

vlastnoruční podpisy autorů

PODĚKOVÁNÍ

Rádi bychom poděkovali našemu konzultantovi panu Ing. Davidu Furkovi za poskytnutí rad, připomínek, materiálu a za jeho obětavost a za celkový přístup. Dále pak naše díky patří panu Jaroslavu Potůčkovi za nezištné poskytnutí materiálu i vlastních vědomostí. Samozřejmě pak také děkujeme škole VOŠ a SPŠ Varnsdorf za financování celého projektu a poskytnutí potřebných prostor pro stavbu a ověření funkčnosti Teslova transformátoru.

ANOTACE

Tato práce se zabývá tématem Teslova transformátoru. Klasický Teslův transformátor vynalezl na konci 19. století chorvatský fyzik Nikola Tesla. Teslův transformátor je tvořen dvěma vzduchovými cívkami, které mají řádově odlišný počet závitů. Teslův transformátor je vysokofrekvenční transformátor generující velmi vysoké napětí a původně měl sloužit k přenosu elektrické energie vzduchem na velké vzdálenosti. Vzhledem k malé účinnosti tohoto zařízení však nebylo dále zdokonalováno a v praxi nebylo nikdy použito. Problematika Teslova transformátoru je vděčným tématem studentských prací, či projektů nadšenců. Teslův transformátor tedy může sloužit například jako přípravek pro měření v silnoproudé laboratoři. Pomocí Teslova transformátoru můžeme zkoušet elektrickou pevnost vzduchu nebo sledovat velmi zajímavé světelné a zvukové efekty. Nevýhodou je silné rušení radiového přenosu a obtížné směrování energie ke spotřebiči. Vlastní projekt se zabývá konstrukcí klasického Teslova transformátoru.

Our work is focused on problems of Tesla coil. This transformer was invented by Croatian scientist Nikola TESLA, in 19 the century. Tesla coil is a high-frequency, high-voltage transformer. Tesla coil has been invited to transfer electrical energy for a long distance. This transformer has not been used in practice. This electrical device could be use as a helpful preparation for a laboratory measurement. Tesla coil may be used for exhibition flashovers and associated sound effect. Big disadvantages of Tesla coil are strong electromagnetic disturbance and a poor efficiency of the electrical energy transfer. Own project put mind to construction of Tesla coil. The subject of Tesla coil is favourite topic of students' scientific work.

OBSAH

1. POPIS JEDNOTLIVÝCH PROVEDENÍ TC	6
1.1 VÝČET JEDNOTLIVÝCH PROVEDENÍ.....	6
1.2 PODROBNĚJŠÍ POPIS JEDNOTLIVÝCH PROVEDENÍ.....	6
1.2.1 Klasický Teslův transformátor	6
1.2.2 SSTC - Teslův transformátor s polovodičovým budičem.....	6
1.2.3 VTTC - Teslův transformátor s elektronkovým budičem.....	7
1.2.4 ISTTC - SSTC s přerušovaným buzením.....	7
1.2.5 OLTC - Klasický Teslův transformátor bez jiskřiště	8
1.2.6 DRSSSTC - SSTC s laděným primárním obvodem.....	8
1.3 POROVNÁNÍ JEDNOTLIVÝCH TYPŮ.....	9
2. KLASICKÝ TESLŮV TRANSFORMÁTOR	9
2.1 PODROBNĚJŠÍ POPIS TC.....	9
2.1.1 Primární cívka	9
2.1.2 Sekundární cívka	10
2.1.3 Napájení TC	11
2.1.4 Tlumivka	12
2.1.5 Jiskřiště.....	13
2.1.5 Kondenzátor	14
2.1.6 Toroid.....	15
2.1.7 Ladění.....	17
2.2 VÝPOČTOVÉ VZORCE.....	17
2.3 ZÁVĚR KE KLASICKÉMU TESLOVU TRANSFORMÁTORU	18
3. VLASTNÍ PROJEKT – KONSTRUKCE TC	18
3.1 ÚVOD.....	18
3.2 PŘÍPRAVA PROJEKTU.....	18
3.3 ROZVRŽENÍ ČINNOSTÍ.....	19
3.4 VÝROBA JEDNOTLIVÝCH KOMPONENT TC.....	19
3.4.1 ELEKTRICKÉ SCHÉMA NÁMI VÝRÁBĚNÉHO TESLOVA TRANSFORMÁTORU.....	19
3.4.2 NAPÁJENÍ TESLOVA TRANSFORMÁTORU	20
3.4.3 PRIMÁRNÍ VINUTÍ.....	22
3.4.4 SEKUNDÁRNÍ VINUTÍ	25
3.4.5 TLUMIVKA.....	27
3.4.6 JISKŘIŠTĚ.....	29
3.4.7 KONDENZÁTOR.....	30
3.4.8 TOROID.....	33
3.5 KOMPLETACE CELÉHO ZAŘÍZENÍ	34
3.6 LADĚNÍ.....	35
3.7 ODPOROVÉ DĚLIČE.....	36
3.8 DOSAŽENÉ VÝSLEDKY.....	39
3.9 ZHODNOCENÍ PROJEKTU (ZÁVĚR).....	40
4.0 POUŽITÉ ZDROJE INFORMACÍ	41

1. POPIS JEDNOTLIVÝCH PROVEDENÍ TC

1.1 VÝČET JEDNOTLIVÝCH PROVEDENÍ

- Klasický Teslův transformátor
- Teslův transformátor s polovodičovým budičem
- Teslův transformátor buzený elektronkovým budičem
- Teslův transformátor s přerušovaným buzením
- Klasický Teslův transformátor bez jiskřiště
- Teslův transformátor s laděným primárním obvodem

1.2 PODROBNĚJŠÍ POPIS JEDNOTLIVÝCH PROVEDENÍ

1.2.1 Klasický Teslův transformátor

Jak jsem již zevrubně uvedl v úvodní anotaci, Teslův transformátor (=TC) je to vzduchový transformátor pracující na svém vlastním rezonančním kmitočtu, sloužící k výrobě velmi vysokého napětí. Primární vinutí tvoří několik závitů drátu s velkým průřezem, sekundární vinutí se skládá z několika stovek až tisíc závitů tenkého drátu v jedné vrstvě na válcové kostře. Jedná se vlastně o dva induktivně vázané rezonanční obvody. Sekundární cívka se svou vlastní indukčností a mezizávitovou kapacitou (+ případně kapacitou toroidu) určuje pracovní rezonanční kmitočet. Aby docházelo k maximálnímu přenosu energie z primárního obvodu do sekundárního, je třeba primární obvod naladit na tentýž kmitočet jako sekundární. Protože však mezizávitová kapacita primárního vinutí je nepatrná, je nutno připojit vnější kapacitu.

Z vysokonapěťového transformátoru napájeného ze sítě se začne nabíjet kondenzátor a když napětí překročí elektrickou pevnost vzduchu v jiskřišti přeskóčí jiskra, která na okamžik připojí kondenzátor k primární cívce a energie elektrického pole se přemění na magnetické pole okolo primárního vinutí. Při zániku magnetického pole se část energie "přelije" do sekundárního obvodu a část se vrátí zpět do kondenzátoru. Na sekundárním vinutím potom vznikají tlumené kmity. Pokud je indukované napětí dostatečné dochází k sršení do vzduchu.

1.2.2 SSTC - Teslův transformátor s polovodičovým budičem

Na zahraničních stránkách je možné toto provedení Teslova transformátoru nalézt pod označením SSTC, což je zkratka anglického Solid State Tesla Coil.

Používají se dva základní druhy. Jednodušší z těchto dvou možností je principiálně velmi podobný VTTC, tedy zpětnovazební, avšak pro buzení je místo elektronky použit bipolární nebo případně i unipolární tranzistor. Podstatně složitější, ale mnohem výkonnější je můstkové zapojení. Používá se buď poloviční můstek, kde protější stranu tvoří kapacitní dělič nebo plné můstkové zapojení, kde je na obou stranách komplementární dvojice unipolárních

tranzistorů MOSFET, pracující v protifázi. K napájení se používá přímo usměrněná síť, takže potřeba VN transformátoru odpadá. U obou verzí se volí co nejtěsnější vazba mezi primární a sekundární cívkou. Používá se proto válcová primární cívka. Sekundární cívka musí být vinuta silnější vodičem, jinak by se díky vysokému střednímu výkonu zahřívala.

1.2.3 VTTC - Teslův transformátor s elektronkovým budičem

Na zahraničních stránkách ho naleznete pod zkratkou VTTC neboli Vacuum Tube Tesla Coil. Primární cívka je v tomto případě buzena elektronkou zapojenou ve zpětnovazebním režimu. Zpětnovazební napětí se odebírá z další pomocné cívky. U výkonnějších VTTC se používá i několik elektronek zapojených paralelně. K napájení obvykle slouží MOT (=transformátor z mikrovlnné trouby) nebo jiné VN transformátor s výstupním napětím řádově kV.

Usměrněné napětí se nevyhlazuje kondenzátorem, takže VTTC produkuje 50 případně 100 výbojů za vteřinu. Anoda elektronky se však značně zahřívá, takže se naopak konstruuje různé regulátory, které propouští jen třeba každou druhou půlperiodu sítě do napájení elektronky. Výboje jsou pak sice přerušované, ale průměrný ztrátový výkon na elektronece je menší. Výboje vypadají narozdíl od klasického Teslova transformátoru mohutněji, jsou podstatně tišší, mají vyšší teplotu a příliš se nevětví. Nízká hlučnost je způsobena postupným nárůstem délky výboje (prodlužuje se se stoupajícím napájecím napětím), narozdíl od klasického Teslova transformátoru, kde dochází po přeskočení v jiskřišti k okamžitému nárůstu délky. U VTTC se volí co nejtěsnější vazba mezi primární a sekundární cívkou. Používá se proto válcová primární cívka. Například s dvojicí masivních elektronek lze dosáhnout až 90cm dlouhé výboje. Výhodou VTTC je, že jde o poměrně jednoduché zapojení. Další výhodou je, že elektronka se dá krátkodobě přetížit a nezničí se napěťovými špičkami. Tato metoda má však úskalí v sehnání potřebných součástí.

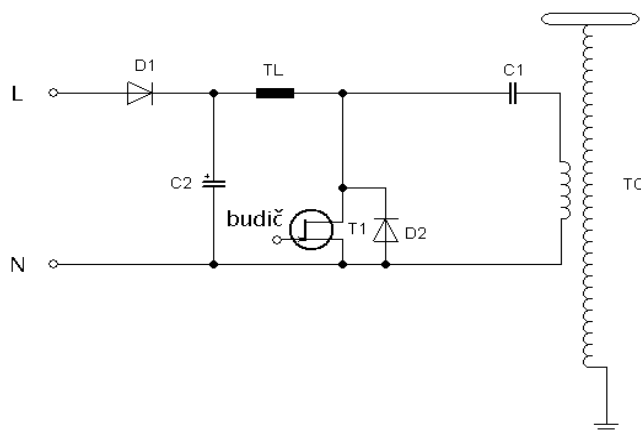
1.2.4 ISTTC - SSTC s přerušovaným buzením

Zkratka ISSTC znamená Interrupted Solid State Tesla Coil. Principiálně jde o stejné zapojení jako SSTC, ale u této verze není buzení trvalé. Nastavuje se zde poměr mezi dobou buzení a dobou bez buzení koncového stupně (střední výkon) a dále ještě opakovací frekvence tohoto cyklu. Cílem je dosáhnout nízký střední výkon, aby bylo možné do primárního vinutí krátkodobě dodávat vysoký špičkový výkon a tím zvětšit délku výbojů. Vlastní výboje se díky přerušovanému buzení chovají jako u klasického TC, tedy jsou větvené, oproti SSTC poměrně studené a hodně hlučné.

Primární vinutí se pro zvýšení středního výkonu zapojuje do série s rezonančním kondenzátorem, který zvyšuje rozkmit napětí na primární cívce. Koncový stupeň se napájí z vyhlazeného napětí. Zapojení koncového stupně může být buď úplně identické se SSTC, ale je možné i použití IGBT tranzistorů.

1.2.5 OLTC - Klasický Teslův transformátor bez jiskřiště

V principu jde o stejné zapojení jako klasický TC, ale jiskřiště je zde nahrazeno vhodným polovodičem. Výborně se zde hodí tranzistory IGBT. Tyto prvky se vyrábí na napětí více než 1kV a proudy až stovky ampérů. K napájení se používá přímo usměrněná síť, takže vypadá obtížně sehnatelný transformátor. Primární cívka mívá obvykle jen jeden závit a někdy dokonce několik takových závitů paralelně. Nízká indukčnost primárního vinutí dovoluje použít velkou kapacitu C1, což je při nízkém napětí výhodné. Na kondenzátor C1 jsou v OLTC kladeny velmi vysoké nároky. Musí to být paralelní kombinace impulsních metalizovaných kondenzátorů. Filtrační kondenzátor C2 se nabije síťovým napětím na zhruba 300V. Přes tlumivku TL s vhodnou indukčností a primární vinutí L1 se nabije rezonanční kondenzátor C1. Po sepnutí tranzistoru T1 se rezonanční obvod C1, L1 uzavře a začne kmitat. Při jedné půl periodě oscilací teče proud přes T1 a při druhé přes paralelní diodu D2. Tlumivka TL zabraňuje vybití C2 přes sepnutý T1. Tranzistor je v jednodušším případě spínán volnoběžným generátorem impulsů. Frekvence impulsů určuje počet přeskoků za vteřinu a volí se do asi 5kHz. Délka pulsů by měla být taková, aby nepřesahovala dobu trvání tlumených kmitů. Složitější budiče detekují zaniknutí kmitů a ukončí impuls automaticky.



Obr. 1: Schéma OLTC

1.2.6 DRSSTC - SSTC s laděným primárním obvodem

Zkratka DRSSTC znamená Dual Resonant Solid State Tesla Coil neboli SSTC, kde je primární obvod naladěný na frekvenci sekundárního vinutí. Principiálně jde zase o stejné zapojení jako SSTC, ale primární cívka je připojena přes takovou kapacitu, aby spolu s indukčností primárního vinutí vznikl rezonanční obvod laděný na frekvenci sekundárního vinutí. Podobně jako v radiotechnice navázáním dvou rezonančních obvodů dojde k rozdělení rezonanční frekvence na dvě, které jsou symetricky vzdálené od původního kmitočtu. Vzdálenost je tím větší, čím silnější je vazba mezi primárním a sekundárním vinutím. V praxi to tedy znamená, že cívka s rezonancí na 240 kHz může v tomto režimu rezonovat třeba na 210 kHz a 270 kHz. Výhodou tohoto zapojení je, že v sériovém rezonančním obvodu je na cívkách větší napětí, než na celém rez. obvodu, takže se v sekundární cívkách indukuje větší napětí. Rezanční kondenzátor je namáhán poměrně velkými proudy a změnami napětí, takže musí být složen z více menších. Nezřídka musí být výsledná kombinace kondenzátorů dimenzována na několik kV. Díky této metodě je možné dosáhnout až 400mm výbojů i s

obyčejným polomostem. V plném můstku už by byl odběr příliš velký, takže se používá v režimu ISSTC a výboje mohou mít přes 15000 mm.

1.3 POROVNÁNÍ JEDNOTLIVÝCH TYPŮ

Porovnat jednotlivé typy, či spíše provedení Teslova transformátoru je prakticky nemožné. Každé provedení má sice podobný a tím dost možná i porovnatelný výsledek, ale zcela jinou cestu k tomuto výsledku vedoucí. Nemůžeme jednotlivé typy srovnávat jen například podle délky elektrických výbojů. Každé z výše uvedených typů má zcela jinak řešení buzení nebo napájení primární cívky. My osobně jsme se kromě klasického Teslova transformátoru, který jsme sami vyráběli (viz. VLASTNÍ PROJEKT níže), se žádným z ostatních typů nesetkali. Nemůžeme tedy objektivně porovnat ani osobní dojmy z průběhu Teslova jevu. Jak jsem již zmínili, s našim týmem jsme se zabývali pouze konstrukcí Klasického Teslova transformátoru, a proto se dále v této práci zabýváme hlouběji pouze touto typem. Výše uvedený výčet je spíše jakýsi seznam provedení tohoto zařízení. Nevylučujeme, že existuje ještě několik nebo mnoho dalších provedení Teslova transformátoru. Možnosti konstrukce a principu nejsou sice bezbřehé, ale je jich jistě velké množství.

2. KLASICKÝ TESLŮV TRANSFORMÁTOR

2.1 PODROBNĚJŠÍ POPIS TC

2.1.1 Primární cívka

Teslův transformátor tvoří 2 souose uložené vzduchové cívky, z nichž každá je součástí rezonančního obvodu naladěného na shodnou frekvenci. Primární vinutí má obvykle malý počet závitů (většinou max. 20 závitů) drátu s větším průřezem. Primární cívka může být konstruována a uložena různými způsoby. Primární vinutí může mít tvar plošné cívky, kónicky stoupající tvar nebo klasický válcový tvar. Válcovou cívku pro klasický TC lze použít pouze v případě malého provedení Teslova transformátoru, kde nejsou tak vysoká napětí. U TC vyšších hodnot napětí toto provedení nelze použít, protože by mohly vznikat přeskoky jisker z primární cívky na sekundární a nezabránila by tomu žádná izolace. Vždy by měla být primární cívka umístěna u paty sekundárního vinutí, protože je spodní konec sekundární cívky uzemněn. Cívku je dobré zhotovit z co možná nejsilnějšího drátu, z důvodu uplatnění skin-efektu. Může být použita i trubka nebo pásek. Tvarem a velikostí se primární cívky chceme dosáhnout co možná nejvyšší magnetickou vazbu mezi primárním a sekundárním vinutím. Primární cívku je u klasických TC potřeba vyladit do rezonance, a to připojením kondenzátoru s potřebnou kapacitou a zkusmým připojováním odbočky na jednotlivé závity.

Na obrázcích Obr. 2, 3 a 4 si můžeme prohlédnout různá provedení primárních vinutí.



Obr. 2: *Plošné provedení*



Obr. 3: *Válcové provedení*



Obr. 4: *Plošné provedení*

2.1.2 Sekundární cívka

Sekundární cívka je tvořena mnoha (řádově tisíce) závity většinou tenkého drátu, na jednom konci je uzemněna a na druhém konci je zakončena toroidem, koulí či kapacitním kloboukem. Závity se vinou buď těsně vedle sebe nebo mohou mít mezi sebou mezerou, která je potřebná k dosažení vhodné mezizávitové kapacity pro určitý rezonanční kmitočet. Ideální je drát s teflonovou izolací. Teflonová izolace vyniká nejen svou mechanickou, ale i elektrickou odolností. Lze použít i smaltovaný drát. Při použití smaltovaného drátu ale musíme zajistit, aby smalt nebyl v žádném případě popraskaný. Nejlépe tedy pořídit nový, protože popraskaný smalt může při napětí několika set voltů na závit už působit vážné problémy. Výrobě sekundárního vinutí je třeba věnovat trochu času, úsilí a pozornosti. Jednotlivé závity je třeba klást vedle sebe velmi opatrně. Jednotlivé závity se v žádném případě se nesmí křížit. Pro výrobu takového vinutí je velmi nevhodné použít neizolovaný vodič. Navinutý vodič musíme nalakovat například izolačním lakem na plošné spoje, který zafixuje jednotlivé závity ke kostře. U menších cívek se obvykle jako kostra používá PVC trubka. Pro velké sekundární vinutí se používá kostra složená z dřevěných nebo plastových dílů. Rezonanční kmitočet sekundárního je dán jeho vlastní indukčností a součtem mezizávitové a případně také zakončovací kapacity. Programy pro návrh sekundárního vinutí

je možné najít také na internetových stránkách. Rezonanční kmitočet hotové cívky se dá zjistit pomocí generátoru a dvou LED diod. Výstup generátoru se připojí přes dvě anti-paralelně zapojené diody na spodní konec sekundární cívky. LED diody by měly být nízkopříkonové. Na generátoru se nastaví max. amplituda a kmitočet se přeladuje, dokud se diody nerozsvítí, což znamená že je cívka v rezonanci. Výslednou frekvenci lze také změřit čítačem nebo osciloskopem. Má-li být sekundární cívka provozována s toroidem, musí k ní být při měření připojen. K primárnímu vinutí vzhledem k jeho mnohonásobně menší mezizávitové kapacitě a zároveň i indukčnosti je potřeba připojit kondenzátor takové kapacity, aby bylo primární i sekundární vinutí naladěno na stejný rezonanční kmitočet.

Na obrázku Obr. 5 můžeme vidět klasickou sekundární cívku, na obrázku Obr. 6 pak přípravek pro její navíjení.



Obr. 5: *Klasické provedení*



Obr. 6: *Přípravek pro navíjení*

2.1.3 Napájení TC

Napájecí obvod je důležitý, především z hlediska správného chodu TESEL. Pokud bude poddimenzovaný, může se stát, že shoří. V opačném případě to naopak může odnést VN transformátor s dalšími podpůrnými obvody. Velký Teslův transformátor, jak tedy z předchozího textu vyplývá můžeme napájet z normální sítě (230 V/ 50Hz). Pro zvýšení vstupní napětí primárního vinutí použijeme VN transformátor. Vysokonapěťový transformátor má za úkol zvětšit síťové napětí na takovou hodnotu, při které už přeskakují jiskry, což je alespoň 4 kV. Pro Teslovy transformátory vyšších výkonů se používá běžně i více než 20 kV VN transformátory. Výstupní proudy se většinou pohybují v desítkách až stovkách miliampérů. Tyto požadavky nejlépe splňují rozptylové transformátory pro napájení neonových trubic (často se používá zkratka NST - Neon Sign Transformer). NST mají tu výhodu, že napětí na jeho výstupu není tak tvrdé. Díky tomu se jiskřiště tolik nezahřívá a nemá tendenci mezi elektrodami vytahovat oblouk. Tyto transformátory navíc při zkratu dodávají takový proud, že se nezničí. Malé NST, zhruba na 100W, se vyskytují v kopírkách, kde slouží jako zdroj elektrostatického náboje. Nové NST pak stojí tisíce korun a v „šuplíkových“ zásobách se obvykle bohužel nevyskytuje. Jejich použití tedy téměř nepřipadá

v úvahu. Obdobou NST je tzv. OBIT (Oil Burner Ignition Transformer), což je zapalovací transformátor pro olejová topení. S úspěchem se ale také používá například VN trafo z mikrovlnné trouby, dále už jen MOT (MOT - Microwave Oven Transformer). MOT však nemá limitaci výstupního proudu, takže se při delším zkratu zničí a navíc jsou obvykle poddimenzované, protože nejsou určeny k trvalému provozu. Další problém je, že napětí MOTu je jen asi 2 kV, a to skoro nestačí k přeskočení jiskry. Pro zvýšení napětí se používají různé násobiče napětí. K napájení je také možné použít distribuční transformátory v angličtině někdy označované "pole pig" transformers. Tyto transformátory se vyrábějí i v 3-fázovém provedení. Jejich výkon je často v řádu desítek kW a manipulace s nimi je nejen proto velmi nebezpečná. Tento druh transformátorů rovněž nemá omezen zkratový proud. Problém s většími transformátory (nad 25kW) může nastat už při připojení k síti, protože už jejich magnetizační proud (naprázdno) může vyhodit pojistky.

Napájení primárního vinutí je také možno řešit zapojením více menších transformátorů. Pokud je k dispozici několik stejných menších transformátorů, lze je zapojit různě sério-paralelně. Zde je však nutné, dát si pozor na propojování. Některé transformátory mají jeden konec nebo střed vinutí spojen s kostrou!

Poslední možností je použití různých improvizovaných měničů napětí s feritovými jádry na vyšších frekvencích. Případně i zapalovací cívky. Napětí těchto měničů se musí usměrnit. Výkon se pohybuje asi do 100W (výkonnější se amatérsky realizují dost složitě), takže jde o spíše provizorní zdroje. Nebo konstrukce vlastního VN transformátoru podle vlastních požadavků.



Obr. 7: *originální VN transformátory*



Obr. 8: *vyrobený VN transformátor*

2.1.4 Tlumivka

Tlumivku je nutné zapojit do série s napájecím VN transformátorem. Takto zapojenou tlumivkou totiž ochráníme obvod před zkratovým proudem napájecího transformátoru. Indukčnost tlumivky se volí podle požadovaného nabíjecího proudu, podle vzorců pro induktivní odpor (reaktanci). Cívka tlumivky musí být provedena tak, aby izolace drátu odolala příslušnému napětí. U stejnosměrně napájených TC nebo TC napájených zdrojem bez limitace proudu musí být indukčnost opravdu velká (až desítky H). Lze použít třeba několik tlumivek s ocelovým jádrem v sérii. Na pozici tlumivky můžeme použít originální výrobek, který je možné vymontovat například z klasické zářivky. V případě standardních „zářivkových“ tlumivek jich právě musíme zapojit více společně do série. Můžeme také tlumivku s potřebnými parametry sami vyrobit. Vhodnou metodou je třeba koupit celou cívku

instalačního drátu a rovnou ho na ní nechat. Pouze je nutno dostat ven vnitřní konec drátu a případně odvíjením drátu upravit indukčnost.

Důležitou vlastností tlumivek je také to, že se spolu s jiskřištěm chovají jako zvyšující měnič napětí. To se sice může hodit třeba u MOTů, ale pokud si to správně a včas neuvědomíme, můžeme přijít o kondenzátory. Proto také není od věci vybavit kondenzátory ochranným jiskřištěm.



Obr. 9: Klasická “zářivková” tlumivka



Obr. 10: Různá provedení tlumivek

2.1.5 Jiskřiště

Nejjednodušší je tzv. statické jiskřiště. Takové jiskřiště tvoří dvě elektrody (například kuličky) upevněné na izolantu a mezi nimi přeskakují jiskry. Jejich vzdálenost je možno nastavit na vzdálenost potřebnou k přeskočení jiskry. Nesmí se však zároveň zapálit elektrický oblouk. Toto řešení se dá použít jen pro menší výkony, protože se elektrody při jiskření dosti zahřívají.

Jinou variantou statického jiskřiště je, taková konstrukce, kde se jiskra rozdělí na

několik menších jisker v sérii. Takové jiskřiště je často řešeno několika měděnými trubkami umístěnými vedle sebe, přičemž napětí se připojuje na ty krajní. Velká plocha trubek se pak dá snadno chladit. U statických jiskřišť je doba i rychlost přeskoků více méně náhodná.

Pro větší výkony je lepší použít rotační jiskřiště. Tento typ jiskřiště se pak dělí na dvě základní skupiny a to je synchronní a asynchronní jiskřiště. V obou případech může být konstrukce následující. Na hřídel motoru je izolovaně nasazen vodivý kotouč s několika páry elektrod. Na konstrukci, ke které je připevněn motor, jsou izolovaně připevněny další dvě elektrody. Ty jsou umístěny tak, že při určitém natočení hřídele je příslušný pár elektrod na kotouči naproti nim. Přeskočí jiskra a po krátkou dobu jsou statické elektrody výbojem přes kotouč spojeny. Vzdálenost mezi elektrodami má být co nejmenší. Výhodou rotačního jiskřiště je, že se nemůže vytáhnout oblouk, resp. nezůstane trvale hořet.

V souvislosti s jiskřišti se používá zkratka BPS (Breaks Per Second), která udává počet přeskoků za vteřinu.

Synchronním rotačním jiskřištěm se myslí, že jeho otáčky i okamžitý úhel natočení hřídele je spjat s frekvencí sítě. K tomuto účelu se používají synchronní motory, které tuto podmínku splňují. U synchronního jiskřiště se počítá s tím, že k přeskoku dojde vždy ve stejnou chvíli. Místo synchronního motoru lze použít i klasický stejnosměrný motor s regulátorem otáček udržujícím otáčky v synchronismu se sítí. Mezi nevýhody synchronního jiskřiště patří těžko sehnatelný motor a nutnost seřízení vzájemného postavení statických a rotujících elektrod.

Asynchronní jiskřiště naproti synchronnímu může mít libovolný asynchronní nebo komutátorový motor. Lze je sice použít i pro střídavě napájený Teslův transformátor, ale především jsou vhodné pro stejnosměrné napájení. Při použití ve střídavě napájeném TC může nastat situace, kdy k přeskokům dochází při minimálním napětí nebo k nim nedojde vůbec, takže je jiskření nepravidelné. Při střídavém napětí se dá použít prakticky jen pro vyšší BPS. Při použití ve stejnosměrném TC lze otáčkami motoru plynule řídit počet přeskoků za vteřinu a tím i regulovat příkon.



Obr. 11: Jiskřiště s regulovatelným odskokem



Obr. 12: Neregulovatelné trubkové jiskřiště

2.1.5 Kondenzátor

Sehnat vysokonapěťový kondenzátor není zrovna snadné. Na tento prvek, zapojený v rezonančním obvodu TC, jsou kladeny asi největší nároky. Kondenzátor musí snášet velké

změny napětí za velmi krátkou dobu, tzn. mít velký činitel dU/dt . Například při frekvenci 500 kHz a stejnosměrném napětí 10 kV se musí při rezonanci napětí na kondenzátoru změnit o $20\text{ kV}/\mu\text{s}$. Takový kondenzátor je pak velmi obtížné sehnat. Při překročení tohoto parametru se pak mnohonásobně zkracuje jeho životnost. V praxi to tedy znamená, že kondenzátor na napětí 1000V DC lze bezpečně a dlouhodobě provozovat třeba jen při 100V AC. Další důležitý parametr kondenzátorů je takzvaný činitel $tg\ \delta$, který musí být rovněž co nejnižší.

Nejlépeších výsledků lze dosáhnout s polypropylenovými impulsními kondenzátory, jejichž cena je ale celkem vysoká (47 nF, 1000 V DC, 1000 V/ μs za asi 30 Kč). Pro dosažení potřebné kapacity a napětí se musí použít různé sério-paralelní zapojení z několika, případně několika desítek nebo i stovek kondenzátorů. Tomuto uspořádání se říká MMC neboli Multi Mini Capacitor.

Vysokonapěťový kondenzátor však lze našťastí poměrně snadno vyrobit, a to mnoha způsoby. Parametry jsou sice podstatně horší a výsledek slabší, ale v nouzi nezbyvá jiné řešení. Osvědčenou metodou je například skleněná nebo PET láhev naplněná slanou vodou. Vnitřní elektroda (slaná voda) je vyvedena na šroub ve vršku. Vnější elektroda může být vytvořena ponořením láhve do další nádoby se slanou vodou nebo obalením láhve alobalem. První varianta má díky vlhkosti větší svodový odpor. Problém tohoto druhu kondenzátorů spočívá v ne zrovna malém odporu slané vody, díky kterému je omezen maximální proud a výrazně se zhoršuje ztrátový činitel $tg\ \delta$ (delta).

Další možností je použít pásy alobalu prokládané sklem. Vznikne tak docela rozměrný kondenzátor s nevelkou kapacitou a ani dielektrikum není zrovna nejlepší. Mnohem lepších výsledků lze dosáhnout s dnes běžně dostupnými plastovými fóliemi. V případě použití fólie se to nakonec celé může svinout a vložit do trubky.

Je možné vyrobit požadovaný kondenzátor z klasické a hlavně levné fólie z materiálu LD-PE.

Na obrázcích Obr. 13 a 14 jsou ukázky některých takovýchto kondenzátorů. Výpočty vztahující se ke kondenzátorům nalezne níže pod označením [2.1.1] až [2.1.7].



Obr. 13: Kondenzátor vyráběný z linolea



Obr. 14: VN kondenzátor

2.1.6 Toroid

Vyrábí se obvykle z plechového husího krku stočeného do kruhu. Případně lze použít i toroid plastový, který se obalí alobalem, případně pak ještě vodivým tmelem. Toroid případně

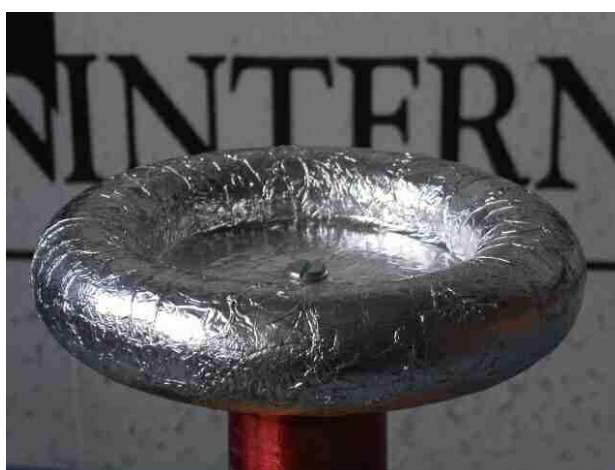
koule svou kapacitou vůči okolí snižuje rezonanční kmitočet sekundární cívky. Dále se díky němu také mírně prodlouží výboje. Souvisí to s jiným rozložením elektrického pole. Jeho kapacita lze spočítat podle docela složitého vzorce. Největší kapacity se dosáhne jen při určitém poměru rozměrů d a D (d = průměr trubky, D = průměr celého toroidu). Konkrétně je to $d = 30\% D$.

Za zmínku stojí také to, že kapacita toroidu se pro výpočet rezonance nedá pouze sečíst s parazitní kapacitou sekundárního vinutí. Výsledná kapacita je vlivem vzájemného ovlivňování sekundárního vinutí s toroidem asi o 20% nižší, viz. vzorec [2.2.1].

Nejčastěji se setkáme s toroidy, které mají kostru z polystyrenových věnců, protože může být někdy obtížné sehnat vložku do komína (husí krk) takovou, aby svými rozměry obvodu vyhovovala. Na kostru se pak například ve dvou vrstvách přilepí pásy alobalu. Střed toroidu se vystřihne z použitého plošného spoje a rovněž obalí alobalem. Nevýhodou polystyrenu je, že se tažením oblouku roztaví a zmenší, takže někde na toroidu musí být hrot, ze kterého budou sršet výboje.



Obr. 15: *Nejpoužívanější tvar*



Obr. 16: *Toroid na sekundární m vinutí*

2.1.7 Ladění

Pro nejdelší výboje je třeba naladit primární rezonanční obvod na stejnou frekvenci, na které rezonuje sekundární cívka. Nejprve se změří, případně spočítá, rezonanční kmitočet sekundárního vinutí. Z tohoto kmitočtu a z indukčnosti primární cívky se určí přibližná hodnota primárního kondenzátoru. Jemné ladění se pak provádí zkusmým připojováním odbočky na primární cívce, případně změnou kapacity kondenzátoru (různé sério-paralelní kombinace).

Pokud je použita malá sekundární cívka a výboje jsou hodně dlouhé (třeba stejně jako vlastní cívka), vyskytuje se následující problém. Výboj je vodivý a tudíž přidává k parazitní kapacitě sekundárního vinutí další kapacitu a snižuje tak její rezonanční kmitočet. Díky tomu se sekundární cívka výbojem odlaďuje na nižší frekvenci než primární obvod a výboj se zkracuje. Poměrně značného zlepšení se dosáhne naladěním primárního obvodu mírně pod rezonanční kmitočet sekundární cívky. Výbojem se pak sekundární vinutí doladí do rezonance a výboje se prodlouží asi až o 25%. Vzorce potřebné pro výpočet indukčnosti, kapacity, či rezonančního kmitočtu naleznete níže, pod označením [2.3.1] až [2.3.3].

2.2 VÝPOČTOVÉ VZORCE

Následuje soupis několika vzorců a vztahů, které byly pro nás při návrhu a konstrukci klasického Teslova transformátoru nepostradatelné.

Kondenzátor

$$f_r = \frac{1}{2\pi \cdot \sqrt{L \cdot C}} \quad [2.1.1]$$

$$Q = C_x \cdot U_{\max} \quad [2.1.2]$$

$$C = \frac{1}{L \cdot \left(2\pi \cdot f_r\right)^2} \quad [2.1.3]$$

$$U_c = \frac{Q}{C_i} \quad [2.1.4]$$

$$U_c = \frac{C_x \cdot U_{\max}}{C_i} \quad [2.1.5]$$

$$C_x = \frac{1}{\sum_{i=1}^n \frac{1}{C_i}} \quad [2.1.6]$$

$$U_{\max} = \sqrt{2} \cdot U_{ef} \quad [2.1.7]$$

Toroid

$$C = 0,556 \cdot \left(1,2781 - \frac{d}{D}\right) \cdot \sqrt{\pi \cdot d \cdot \left(\frac{D}{d} - 1\right)} \quad [2.2.1]$$

Ladění

$$f_r = \frac{1}{2\pi \cdot \sqrt{L \cdot C}} \quad [2.3.1]$$

$$C = \frac{1}{4\pi^2 \cdot f^2 \cdot L} \quad [2.3.2]$$

$$L = \frac{1}{4\pi^2 \cdot f^2 \cdot C} \quad [2.3.3]$$

2.3 ZÁVĚR KE KLASICKÉMU TESLOVU TRANSFORMÁTORU

Klasický Teslův transformátor je poměrně složité zařízení, na kterém dochází k mnoha jevům a dějům. Všechny části jeho obvodu musí do sebe svými vlastnostmi a parametry zcela přesně zapadat. V praxi se sice nepoužívá se přímo klasický Teslův transformátor, ale jiné přístroje fungující na podobné bázi své uplatnění našli. Přístroje podobné Teslovu transformátoru můžeme najít všude tam, kde je za potřebí testovat povrch a kvalitu materiálu. Příkladem je třeba továrna na tašky kde se pomocí VVN generátoru testuje zda se v taškách neobjevují praskliny, pokud se zde nějaká vyskytne, okamžitě dochází k průrazu dielektrika, kterým je v tomto případě taška, vnikne tak jiskra či elektrický oblouk, který tuto chybu odhalí. I když v továrně mají asi o něco menší a jednodušší stroj, princip je stejný.

3. VLASTNÍ PROJEKT – KONSTRUKCE TC

3.1 ÚVOD

Prvotním impulsem k započetí projektu byla zhotovená, impozantně veliká cívka v Silnoproudé laboratoři. Tato cívka byla našimi předchůdci vyráběna za účelem použití na místě sekundárního vinutí Teslova transformátoru. Vyrobena byla již i toroid, také poměrně velkých rozměrů a polotovaru podstavce pro primární vinutí. Pobídnutí našeho pozdějšího konzultanta pana Ing. Davida Furky, zkonstruovat a uvést do provozu Teslův transformátor za účelem účasti ve Středoškolské odborné činnosti bylo pro nás výzvou. S příslibem pomoci výše zmíněného pedagoga a finanční pomoci naší školy, jsme začali s přípravou celého projektu.

3.2 PŘÍPRAVA PROJEKTU

Naše příprava spočívala především v získání pokud možno co nejvíce informací o Teslovu transformátoru, protože jsme se měli s podobným zařízením setkat vůbec poprvé.

Jelikož se Teslův transformátor jako takový v praxi nikdy nevyužíval, není o něm mnoho zmíněno v nám dostupné odborné literatuře a proto byl hlavním zdrojem všech informací o Teslovu transformátoru Internet. Stačilo nám zadat pouze “Teslův transformátor” do vyhledávání českých stránek a bylo nám nabídnuto velké množství materiálů o této problematice. Tím více informací jsme pak mohli získat na stránkách zahraničních. Jak jsem již zmínil v anotaci, Teslův transformátor je velmi vděčným tématem pro nadšence elektroniky nebo studenty. Díky tomuto faktu je na internetu k vidění skutečně mnoho různých provedení Teslova transformátoru i s podrobnými popisy, jak všeobecnými a teoretickými, tak i praktickými radami vyplývající z vlastní zkušenosti.

Dalším bodem celé přípravy našeho projektu byl celkový návrh přístroje. Od toho se pak odvíjelo následné kompletování materiálu, shánění ostatních prostředků aj.

3.3 ROZVRŽENÍ ČINNOSTÍ

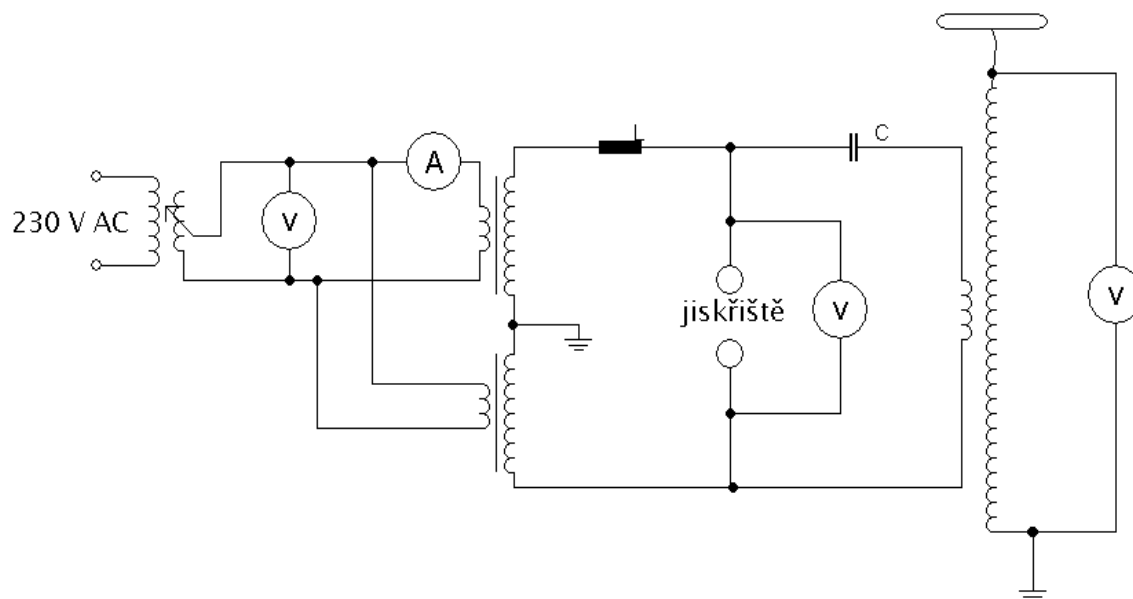
V našem týmu jsme celkem dva. Dohlížel na nás pan Inženýr David Furka, který pro nás nebyl pouze konzultantem, ale spíše členem týmu. A to tím hlavním. Prostory pro naše bádání nám poskytla naše škola a to to nejlepší možné místo – v Laboratoři silnoproudu. Veškerá práce se dělila mezi jednotlivé členy. A práce nebylo málo. V první řadě šlo o sehnání materiálu, například plexiskla pro dokončení podstavce, materiál na primární vinutí, silové vodiče pro přívod a mnoho dalšího. Materiál se ale sháněl postupně tak, jak postupovaly práce na projektu.

Časové rozvržení všech prací jsme si nestanovovali. Možná i kvůli tomu, že jsme nevěděli přesně do čeho se chystáme pustit a nemohli jsme tedy odhadnout, co nám zabere kolik času. Toto se nám také později potvrdilo. Řada námi vyráběných komponent se musela často buď jen upravovat, ale také i úplně předělávat. V průběhu práce jsme poměrně často měnili podobu konstrukce nebo provedení jednotlivých částí.

3.4 VÝROBA JEDNOTLIVÝCH KOMPONENT TC

3.4.1 ELEKTRICKÉ SCHÉMA NÁMI VÝRÁBĚNÉHO TESLOVA TRANSFORMÁTORU

Vzhledem k dostupným prostředkům jsme zvolili napájení pomocí dvou MOT (vysoko napětěové transformátory z mikrovlnné trouby), která jsou spolu propojena a jejich vstupní napětí je možné díky autotransformátoru regulovat.



Obr. 17: Schéma zapojení Teslova transformátoru

Obvod dále obsahuje:

- PRIMÁRNÍ CÍVKU
- SEKUNDÁRNÍ CÍVKU
- TLUMIVKU (resp. sadu tlumivek)
- JISKŘIŠTĚ
- KONDENZÁTOR (resp. kondenzátorovou baterii)
- TOROID

Obvod je samozřejmě také vybaven několika měřícími, jejichž pomocí je možno sledovat průběh činnosti jednotlivých částí přístroje.

3.4.2 NAPÁJENÍ TESLOVA TRANSFORMÁTORU

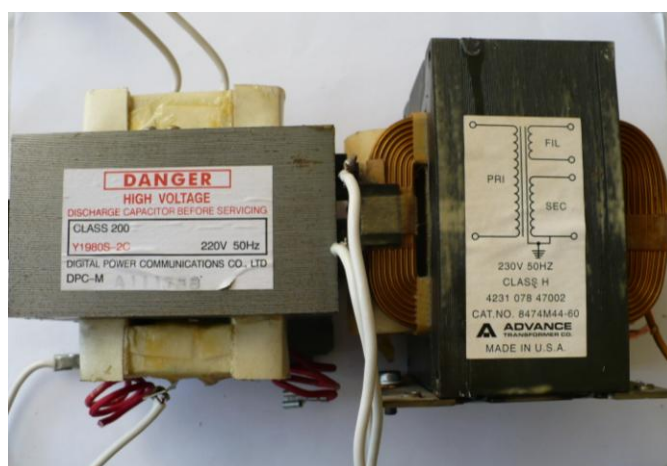
Náš Teslův transformátor je napájen dvěma vysokonapětovými transformátory. Jak je zmíněno výše, oba tyto transformátory pocházejí z mikrovlnné trouby (Obr.:18). Jejich vstupní napětí je síťová hodnota 230V a výstupní napětí každého z nich činí 2300 V. Abychom dosáhli pokud možno co nejvyššího výstupního napětí, propojili jsme primární vinutí obou transformátorů paralelně, tak totiž budou pracovat na jmenovitém pracovním napětí. Sekundární vinutí obou transformátorů jsou pak spojena sériově. Při zapojování jsme však museli dát pozor na správné propojení jednotlivých vinutí. Vždy jeden konec sekundárního vinutí transformátoru je veden na kostru. Kostry obou transformátorů jsou uzemněny.

Díky takovému zapojení se budou sčítat napětí na sekundárních vinutích obou transformátorů a my tak můžeme získat celkové výstupní napětí až +- 4600 V.

Oba tyto transformátory jsou pak uloženy bezpečném pouzdře (Obr.: 20, 21), které je také vybaveno větrací mezerou.



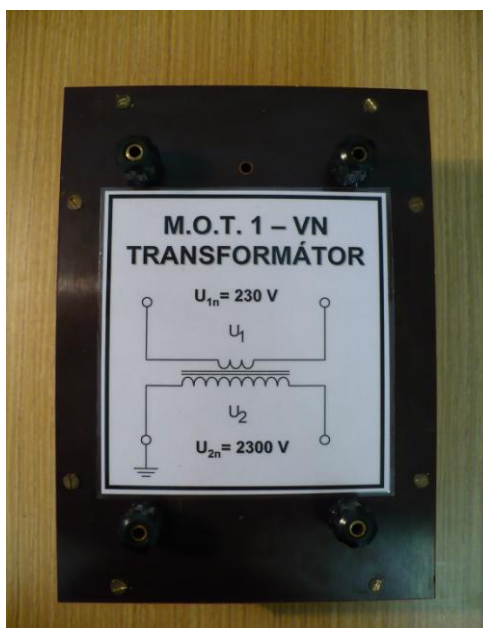
Obr. 18: Detail štítiku na napájecím transformátoru M.O.T.1



Obr. 19: Oba MOT transformátory



Obr. 20: Napájecí transformátor M.O.T. 2



Obr. 21: MOT 1 – krabičkové provedení

3.4.3 PRIMÁRNÍ VINUTÍ

Primární vinutí našeho Teslova transformátoru je cívka kónického tvaru. Je zhotovena z měděné trubky (Obr.: 22) o průměru 6mm, má 20 závitů, průměr horního závitu je 670 mm, průměr spodního závitu je 350 mm a celková výška tohoto primárního vinutí je 150 mm. Stoupání je 5 mm na závit, což je podle všeho dostatečná vzdálenost vzhledem k napětí mezi jednotlivými závity.

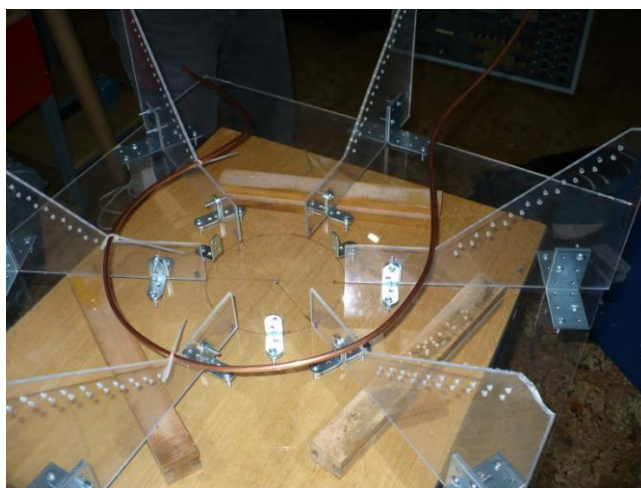
Takto řešená cívka plní požadavek minimálního odporu, vzhledem k uplatnění tzv. skinefektu.

Celé vinutí je uchyceno k plexisklové konstrukci (Obr.:23). Tato konstrukce se skládá z podložné desky (700 x 700 mm) a šesti svislých profilů, taktéž z plexiskla. Tyto profily jsou s podložnou deskou spojeny pravoúhlými, kovovými profily, šrouby a maticemi (+ pojistné podložky). Kovové spoje jsme si mohli dovolit vzhledem k jejich dostatečné vzdálenosti od částí, které jsou pod napětím. Pro připevnění trubky primární cívky jsme museli vyvrtat u krajů svislých profilů dírky, jejichž velikost odpovídá klasickým stahovacím elektropáskám. Fixace měděné trubky těmito páskami byla shledána dostatečnou a nemuseli jsme proto hloubit do krajů svislých profilů zářezy. Tato konstrukce je až překvapivě pevná a zaručuje bezpečnou stabilitu primárního vinutí.

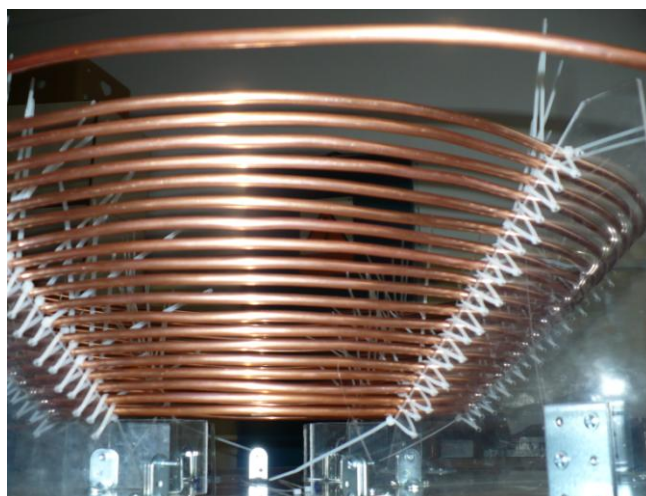
Oba konce primárního vinutí jsou připojeny k dostatečně velkým svorkám umístěným taktéž na podložce (Obr.:25). Jeden konec je připevněn přímo na svorku, konec druhý končí ve vzduchu a je na něm přes posuvnou konstrukci připevněn měděný svazkový vodič, který tento konec spojuje s druhou svorkou. To nám umožňuje rychle a bez problémů měnit počet závitů a tím regulovat indukčnost celého vinutí. (obr.: 26). To oceníme především při ladění celého obvodu na rezonanční kmitočet.



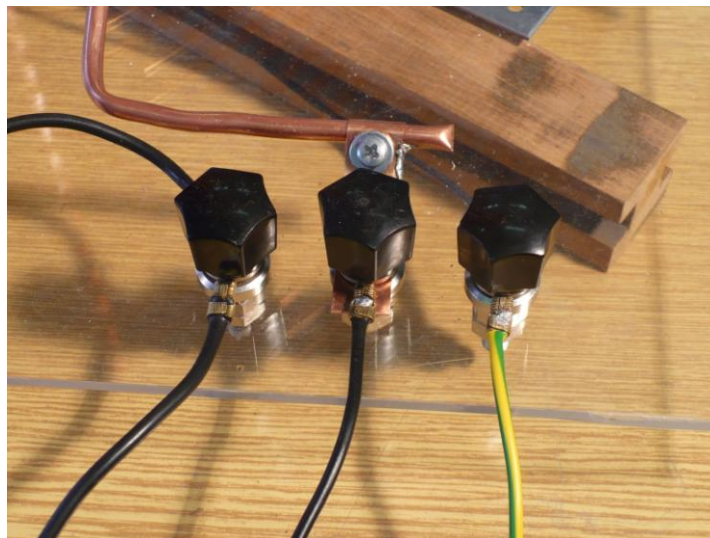
Obr 22: *Použitá měděná trubka*



Obr. 23: *Nosná konstrukce primárního vinutí*



Obr. 24: *Přípevnění primárního vinutí*



Obr. 25: *Svorkovnice*

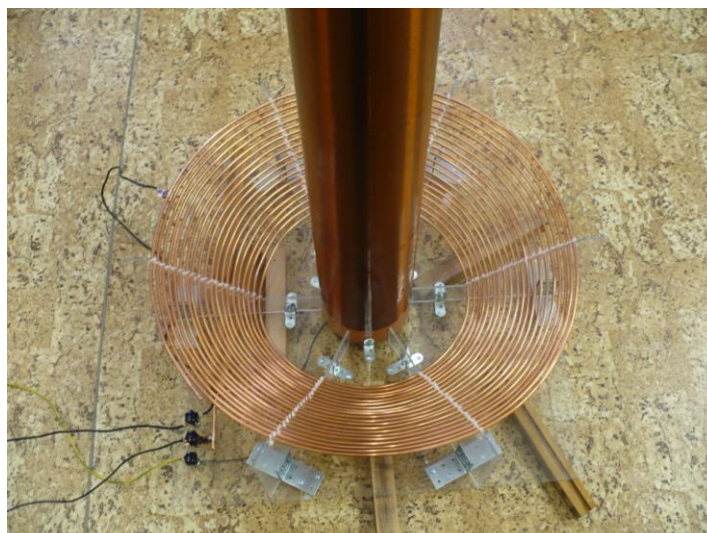


Obr. 26: *Propojení svorkovnice a primárního vinutí*

A právě k nastavení primární části našeho Teslova transformátoru na rezonanční kmitočet bylo zapotřebí změřit indukčnost této primární cívky. K jejímu zjištění jsme použili elektronkový přístroj Tesla BM 366 (Obr.: 27). Naměřili jsme hodnotu indukčnosti 215 μH . Provedené měření však nebylo zcela přesné, tedy spíše informativní, leč potřebné k tomu, abychom mohli alespoň řádově zvolit hodnotu kapacity.



Obr. 27: *Měřič LC TESLA BM 366*



Obr. 28: *Hotové primární vinutí*

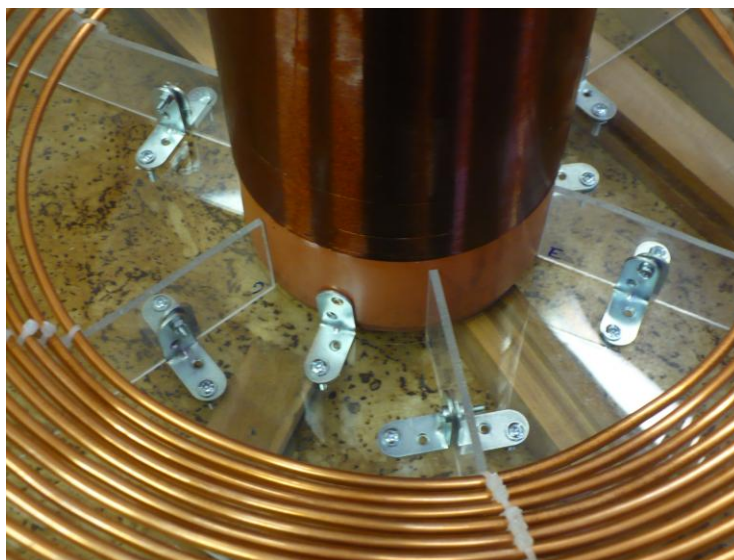
3.4.4 SEKUNDÁRNÍ VINUTÍ

Jak je uvedeno v úvodu, sekundární vinutí jsme nevyrobili my, ale naši předchůdci. Tato cívka má 3334 závitů měděného vodiče o průměru 0,35 mm (průřez 0,1 mm²). Celá cívka je navinutá na PVC trubce používané například pro vodoinstalace. Průměr této trubky je 150 mm a celková výška je 1800 mm.

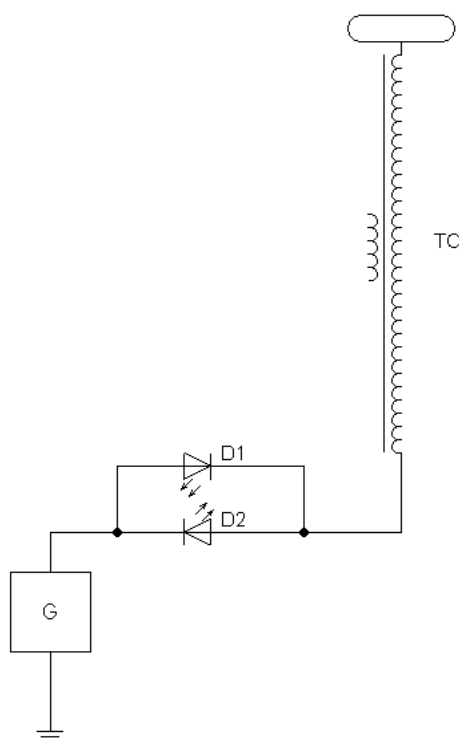
Cívka je k našemu štěstí vyrobena poměrně precizně a bez “kazů”. Jednotlivé závitů sekundární cívky se totiž vzhledem k mezizávitovému napětí na takovémto vinutí nesmí v žádném případě překrývat. Mezizávitové napětí je zde řádově stovky voltů. Při nesprávném vedení tohoto vodiče by mohlo snadno dojít k průrazu izolace mezi sousedními vodiči. Vinutí je také celé přelakované. Celá cívka stojí na podložce v ose primárního vinutí. K této podložce je sekundární cívka připevněna pravoúhlými kovovými profily a vruty (Obr.:29).

Vprostřed podložky je díra, kterou je protáhnutý vodič, který tak propojuje jeden konec sekundární cívky se svorkovnicí.

Rezonanční kmitočet sekundárního vinutí jsme změřili pomocí generátoru sinusového signálu, typ generátoru: 8204A (Obr: 31) a dvou nízkopříkonových LED diod, které jsme zapojili antiparalelně. Jeden konec sekundární cívky je spojen s Toroidem druhý pak vede na LED diody, které druhým koncem připojeny ke generátoru (Obr. 30). Výstupní signál jsme nastavily na maximální amplitudu a postupně jsme na generátoru zvyšovali kmitočet. Cílem bylo rozsvícení obou diod současně. To se stalo při frekvenci 65 kHz, 125 kHz a 140 kHz.



Obr. 29: Upevnění sekundární cívky k podložce



Obr. 30: Obvod pro informativní měření rezonančního kmitočtu



Obr.31: Použitý audio generátor 8204A

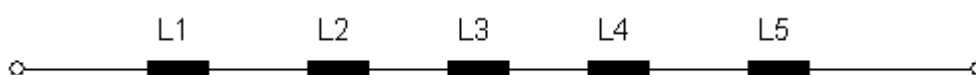


Obr. 32: Sekundární vinutí s toroidem

3.4.5 TLUMIVKA

Do série se sekundárním vinutím napájecího transformátoru je za pojena tlumivka. Takto zapojená tlumivka omezuje zkratový proud napájecího transformátoru a tím chrání celý

obvod. Napájecí transformátory z mikrovlnné trouby jsou totiž poddimenzované a to z důvodu, že se při jejich výrobě neuvažuje možnost, že by mohli být trvale zatíženy. Tlumivka nám tedy omezuje proud, protékající napájecími transformátory. Tím prodlužuje jejich životnost. Bylo zapotřebí spojit sériově (Obr. 33) několik tlumivek s menší indukčností, protože jsme nesehnali jednu větší. Použité tlumivky byly vymontovány z klasických zářivek a každá z nich má maximální výkon 40 W. Použili jsme celkem pět takovýchto tlumivek (Obr. 34). Všechny mají stejné parametry a tak i stejné rozložení napětí. Tlumivky jsme spojili měděným svazkovým vodičem a umístili do krabičky, jejíž víko je opatřeno svorkami, kam jsme přivedli oba konce tlumivkové baterie. Kryt této krabičky je samozřejmě také opatřen popisovým štítkem, na kterém je schéma propojení (Obr. 35).



Obr. 33: Schéma zapojení tlumivek



Obr. 34: sériově propojené tlumivky



Obr. 35: krabičkové provedení

3.4.6 JISKŘIŠTĚ

Pro náš Teslův transformátor jsme zvolili klasické statické jiskřiště. Dvě elektrody jsou umístěny v otevřené porcelánové nádobě takovým způsobem, že lze regulovat jejich vzájemnou vzdálenost. Právě možnost regulace vzájemné vzdálenosti obou elektrod je velmi důležitá. Lze tím totiž snadno regulovat napětí, při kterém dojde k proražení vzduchové izolace mezi oběma elektrodami a následnému vzniku jiskry (Obr.: 36, 37). Při přeskoku jiskry mezi elektrodami dojde k sepnutí rezonančního obvodu.

Možnost regulace tohoto napětí nám umožnila zkoušet funkčnost celého obvodu při sníženém napětí.

Museli jsme ale také dát pozor, aby mezi elektrodami nevznikl oblouk. Musejí pouze přeskakovat jiskry. Při jiskření také dochází k ionizaci vzduchu, je tedy dobré, mít zajištěno dostatečné odvětrání prostoru, kde pokus provádíme. Při jiskření se okolí elektrod otepluje a následně se pak snižuje hodnota napětí, při které k přeskoku dochází. Zároveň také dochází k opalování povrchu elektrod – napalování různých nečistot, které zvyšují povrchový elektrický odpor těchto elektrod. Je nezbytné elektrody po každém pokusu řádně očistit, nejlépe jemným brusným papírem.



Obr. 36: *Jiskřiště nastavené na největší vzdálenost elektrod*



Obr. 37: *Jiskřiště nastavené na nejmenší vzdálenost elektrod*

3.4.7 KONDENZÁTOR

Kondenzátor je v obvodu Teslova transformátoru je velmi důležitá součást, jak je již popsáno v teoretické části o klasickém Teslovu transformátoru.

Kapacita kondenzátoru spolu s indukčností primárního vinutí určuje totiž rezonanční kmitočet primární části obvodu. A pokud chceme dosáhnout co nejvyššího výkonu musíme naladit rezonanční kmitočet primárního vinutí na stejnou hodnotu jako je rezonanční kmitočet sekundárního vinutí. Pomocí kondenzátoru provádíme „hrubé“ ladění primární části celého obvodu na rezonanční kmitočet. Tento kondenzátor musíme do obvodu zapojit do série s primárním vinutím, protože mezizávitová kapacita tohoto vinutí je velmi malá.

Kapacitu kondenzátoru, který jsme pro náš obvod potřebovali je 31,6 nF. Tato kapacita lze spočítat z rezonančního kmitočtu sekundárního vinutí [3.4.7.1-6]. Vysokonapěťové kondenzátory s touto kapacitou však bohužel nejsou lehce sehnatelným zbožím a proto, bylo zapotřebí dosáhnout této kapacity propojením více kondenzátorů. Měli jsme díky zásobám poměrně velký výběr kondenzátorů různých hodnot i provedení. Nakonec jsme zvolili sériové propojení osmi stejných kondenzátorů. Všechny použité kondenzátory jsou vyrobeny z metalizovaného papíru a jejich kapacita je 0,25 μF, jejich tolerance je ± 20% a maximální pracovní napětí je 1000V (Obr. 38). Výsledná kapacita tohoto spojení je dána vztahem, který je uveden v teoretické části. Výpočet konkrétní hodnoty viz. [3.4.7.7-9]. Jednotlivé kondenzátory jsme propojili měděným jádrovým vodičem o průřezu 1,5 mm². Spoje jsou zajištěny klasickým pájením (Obr. 40). V této sériové kombinaci (Obr. 39) našich osmi kondenzátorů se celkové napětí dělí na osm stejných dílů. To nám umožnilo jejich použití i při napětí 4600V. Výpočet napětí na jednotlivých kondenzátorech jsem již popsal v teoretické části. Konkrétně pro náš kondenzátor pak viz. [3.4.7.12-15]. Vychází se z pravidla, že při sériovém propojení kondenzátorů na každém kondenzátoru stejný elektrický náboj. Maximální napětí na jednom kondenzátoru je 813,2V. Všechny kondenzátory jsme umístili, jako i ostatní součásti podobného provedení, do dřevěné krabičky, přičemž jsou oba konce zakončeny svorkami. Tyto svorky jsou pak vyvedeny na kryt krabičky. Tento kryt je také samozřejmě opatřen popisovým štítkem (Obr.: 41).

Výpočet požadované kapacity kondenzátoru:

$$f_R = 61 \text{ kHz} \quad [3.4.7.1]$$

$$L = 215 \cdot 10^{-6} \text{ H} \quad [3.4.7.2]$$

$$f_R = \frac{1}{2\pi \cdot \sqrt{L \cdot C}} \quad [3.4.7.3]$$

$$C = \frac{1}{L \cdot \left(2\pi \cdot f_R\right)^2} \quad [3.4.7.4]$$

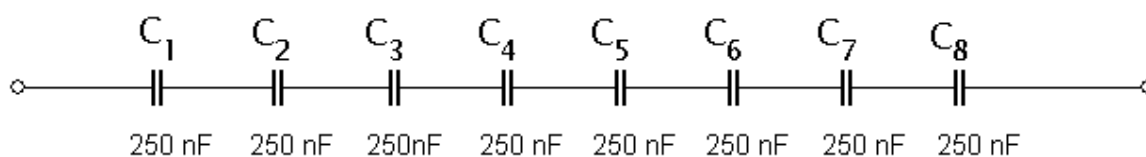
$$C = \frac{1}{215 \cdot 10^{-6} \cdot \left(2\pi \cdot 61 \cdot 10^3\right)^2} \quad [3.4.7.5]$$

$$C = 3,16 \cdot 10^{-8} = \underline{31,6 \text{ nF}} \quad [3.4.7.6]$$

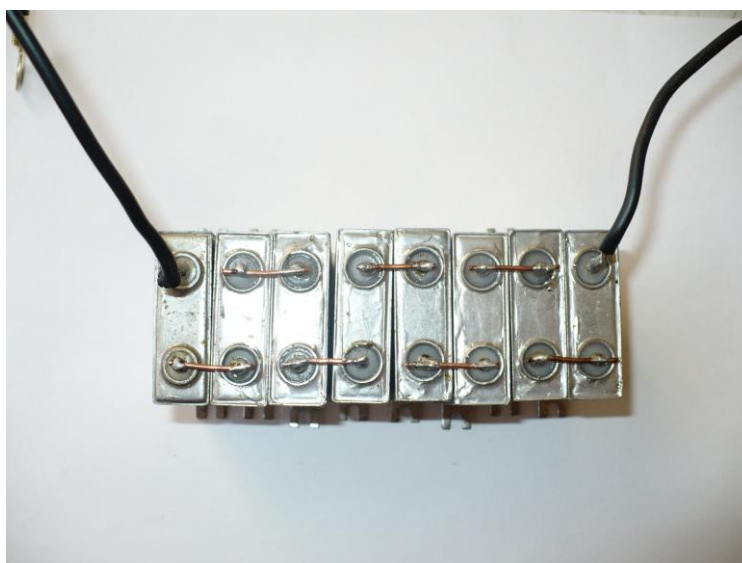
f_R ... rezonanční kmitočet
 C ... požadovaná kapacita



Obr. 38: Použitý kondenzátor TESLA TC 487 M25 0,25µF



Obr. 39: Schéma zapojení kondenzátorů



Obr. 40: sériově propojené kondenzátory



Obr. 41: krabičkové provedení kondenzátorů

Výsledná kapacita sériové kombinace kondenzátorů:

$$\frac{1}{C_x} = \sum_{i=1}^n \frac{1}{C_i} \quad [3.4.7.7]$$

$$C_x = \frac{1}{\sum_{i=1}^n \frac{1}{C_i}} \quad [3.4.7.8]$$

$$C_x = \sum_{i=1}^8 \frac{1}{0,25 \cdot 10^{-6}} = 31,25 \text{ nF} \quad [3.4.7.9]$$

C_x ... výsledná kapacita
 C_i ... kapacita jednoho kondenzátoru

Maximální hodnota napětí:

$$U_{\max} = \sqrt{2} \cdot U_{ef} \quad [3.4.7.10]$$

$$U_{\max} = \sqrt{2} \cdot 4600 = 6505,4 \text{ V} \quad [3.4.7.11]$$

U_{\max} ... maximální hodnota napětí zdroje
 U_{ef} ... efektivní hodnota napětí zdroje

Výpočet napětí na jednotlivých kondenzátorech:

$$Q = C_x \cdot U_{\max} \quad [3.4.7.12]$$

$$U_c = \frac{Q}{C_i} \quad [3.4.7.13]$$

$$U_c = \frac{C_x \cdot U_{\max}}{C_i} \quad [3.4.7.14]$$

$$U_c = \frac{3,125 \cdot 10^{-8} \cdot 6505,4}{0,25 \cdot 10^{-6}} = \underline{\underline{813,2V}} \quad [3.4.7.15]$$

Q ... elektrický náboj

U_c ... napětí na jednom kondenzátoru

3.4.8 TOROID

Toroid na našem Teslovu transformátoru byl vytvořen z hliníkové vložky do komína, či trubky pro vzduchotechniku. Oba konce jsou k sobě připojeny pomocí letování. Střed celého toroidu tvoří hliníkový kruh o průměru 180 mm, vnější průměr toroidu je 500 mm. Středový kruh je k hliníkové trubce přichycen ALU páskou. Se sekundárním vinutím je toroid spojen svazkovým, měděným vodičem, který je zespodu přichycen pomocí očka ke středovému kruhu. Mechanické spojení toroidu s vrcholem sekundární cívky pak zajišťují tři vruty menších rozměrů.



Obr. 42: Toroid

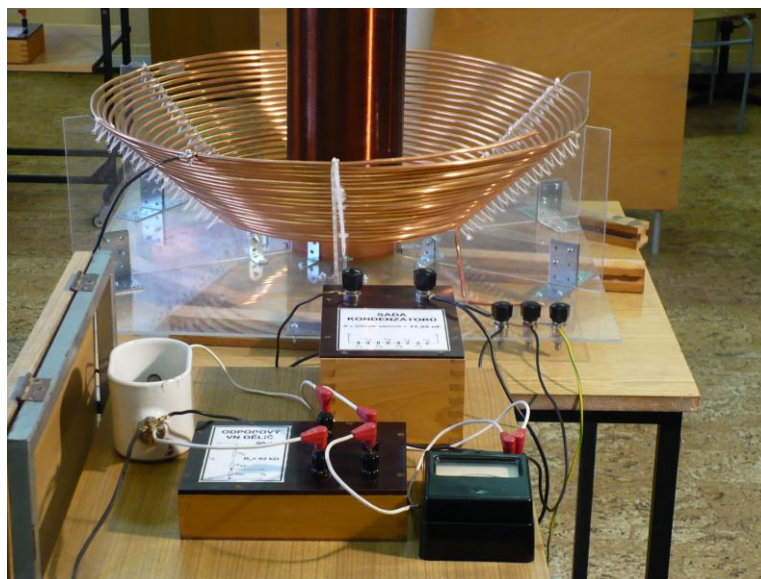
3.5 KOMPLETACE CELÉHO ZAŘÍZENÍ

Všechny výše uvedené komponenty zapojíme do obvodu, podle daného schématu (viz. Obr. 17). Správné zapojení je potřeba vzhledem k hodnotám napětí na tomto přístroji řádně překontrolovat. Kvůli předpisu o dodržení bezpečnosti práce s přístroji tohoto typu, jsme samotné tělo Teslova transformátoru, tedy podstavec s primární a sekundární cívkou a toroidem (Obr. 45) spolu s jiskřištěm, kondenzátorem a voltmetrem (Obr. 44) umístili do jiné místnosti, než ostatní části celého obvodu a především pak spouštěcí panel a autotransformátor umožňující regulaci vstupního napětí VN transformátorů (Obr. 43). Všechny části našeho obvodu jsme pro přehlednost umístili na jeden stolek opatřený kolečky, což nám zaručilo flexibilitu jeho umístění a zároveň jsme tak snížilo riziko poškození jednotlivých kontaktů nebo spojů jednotlivých součástí.

K propojení těchto částí jsme použili většinou měděné svazkové vodiče o průřezu 2,5 mm². Propojení mezi našimi dvěma místnostmi zajišťovali taktéž měděné svazkové vodiče o průřezu 2,5 mm². Vzhledem k vysokému napětí mezi jednotlivými vodiči jsme nemohli použít jeden vícežilový vodič k propojení obou místností, ale museli jsme použít dva samostatné kabely, z nichž každý využívá pouze jeden vodič. Zvláště je pak také veden zemnicí vodič, který spojuje svorku na podložce primárního vinutí přímo se zemním potenciálem rozvodové skříně.



Obr. 43: Řídící část – autotransformátor, spínač, MOT1 a2, sada tlumivek, měřící přístroje



Obr. 44: Jiskřiště, kondenzátor, odporový dělič s voltmetrem



Obr. 45: Teslův transformátor

3.6 LADĚNÍ

Ladění je u Teslova transformátoru nezbytnou součástí finálních procedur. Při správném naladění celého přístroje dosahuje nejdelších výbojů na toroidu.

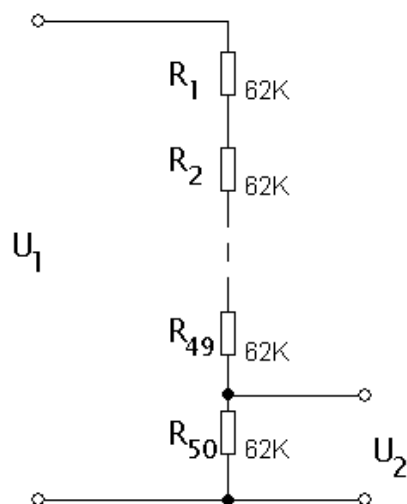
Několikrát je v této práci zmíněna potřeba dosažení rovnosti rezonančního kmitočtu na obou částech obvodu Teslova transformátoru. Hrubou úroveň ladění zajistíme správnou hodnotou kapacity kondenzátoru. Jemnější ladění se následně provádí postupným přizpůsobováním indukčnosti primárního vinutí. Díky dobré volbě způsobu konstrukce primárního vinutí a zakončení jednoho jeho konce, bylo pro nás toto ladění poměrně pohodlné a rychlé. Indukčnost jsme mohli ladit nejen v rozmezí jednoho závitu, ale vzhledem ke snadnému snímání druhého konce toho vinutí pro nás nebyl problém přeskakovat i mezi jednotlivými závity. Začali jsme na maximální délce, potažmo maximální indukčnosti a postupně jsme tyto hodnoty snižovali. Podle provedených pokusů je nejlepších výsledků dosaženo při ubrání cca 1/6 délky jednoho závitu z maximální délky celého vinutí.

3.7 ODPOROVÉ DĚLIČE

Abychom mohli měřit a sledovat průběhy napětí na sekundárním vinutí a na jiskřišti za chodu Teslova transformátoru, museli jsme sestavit odporové děliče, které nám umožní měřit napětí na těchto zařízeních normálním multimetrem. Stačil nám potom pouze klasický voltmetr s rozsahem 700V.

Pro měření napětí na jiskřišti jsme museli vyrobit odporový dělič 50:1 (Obr. 47) To znamenalo sériově spájet 50 rezistorů o celkovém odporu 3,1 M Ω . Odpor jednoho rezistoru je tedy 62 k Ω a jeho maximální výkon je 0,6 W. Spájené rezistory jsme také museli opatřit izolací, to jsme vyřešili PVC izolací o větším průměru tak, že jsme ji na tyto rezistory navlékli. Tato izolace byla nezbytná vzhledem k tomu, že jsme všechny rezistory umístili opět do dřevěné krabičky. Na svorky umístěné na krytu krabičky jsme vyvedli nejen konce krajních rezistoru, ale musí zde být i svorky, na které jsou přivedeny oba konce posledního rezistoru (Obr. 46). K těmto svorkám jsme poté mohli bez obav připojit multimetr s odpovídajícím rozsahem.

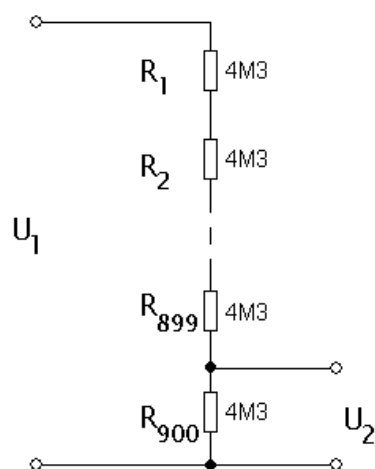
Pro měření napětí na sekundárním vinutí jsme museli použít dělič 900:1 (Obr. 50) s velmi vysokou hodnotou odporu. V tomto případě bylo tedy zapotřebí spájet neuvěřitelných 900 rezistorů. Celková hodnota tohoto děliče je 3,87 G Ω , všechny rezistory jsou typu 4M3 s maximální výkonem 0,6 W (Obr. 49). Výrobce také uvádí, že maximální hodnota napětí na jednom rezistoru je 700 V. I tyto rezistory jsme museli opatřit účinnou izolací. Použili jsme osvědčený způsob – stejný, jako u menšího děliče. Protože bylo toto spojení rezistorů asi 17 metrů dlouhé a nemohli jsme jej uložit do žádné krabičky, museli jsme tyto rezistory namotat na papírovou trubku. Fixaci k papírové trubce zajišťuje plast dodaný tavnou pistolí. Celý dělič má cca 50 závitů. Vzdálenost mezi nejbližšími závity je 15 mm. Proti poškození při manipulaci jsou závity překryty PE fólií. Princip měření je pak stejný, jako u měření napětí na jiskřišti (Obr. 48). Do obvodu jsou pak tyto děliče spolu s měřicími přístroji zapojené podle příslušného schématu (Obr. 51).



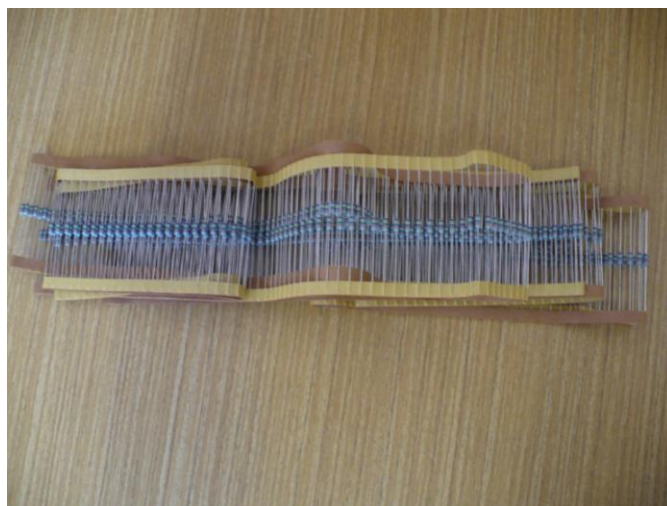
Obr. 46: Schéma odporového děliče 50:1



Obr. 47: Odporový dělič 50:1



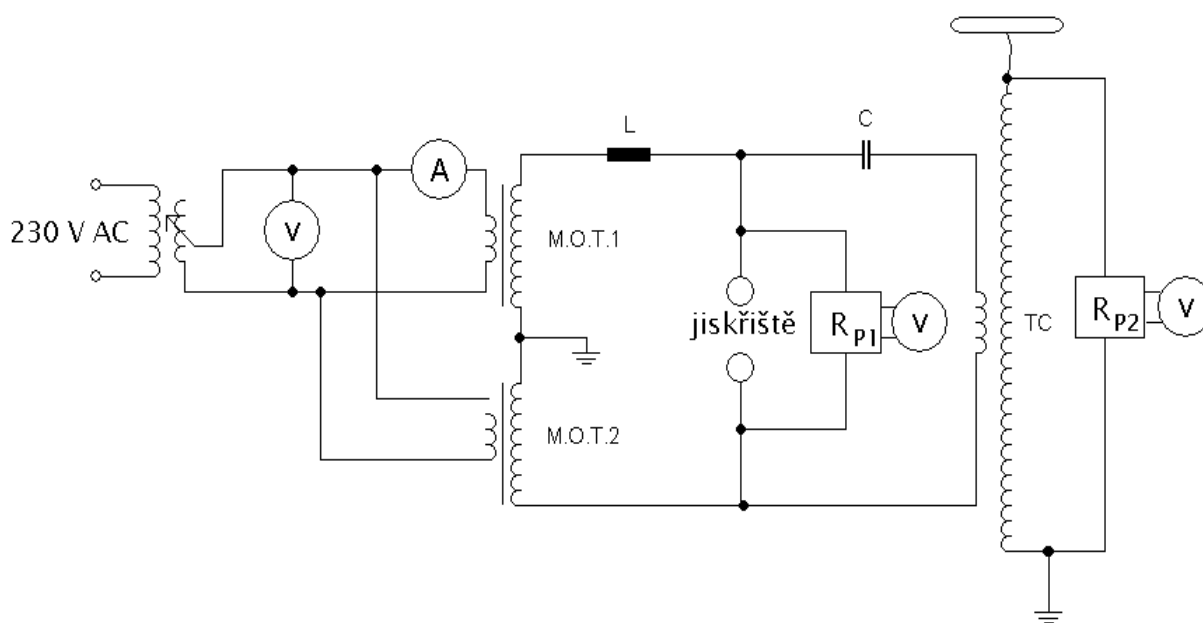
Obr. 48: Schéma odporového děliče 900:1



Obr. 49: Metalizované rezistory RR 4M3 0,6W – 700 ks



Obr. 50: Odporový dělič 900:1



Obr. 51: Schéma zapojení TC odporovými děliči

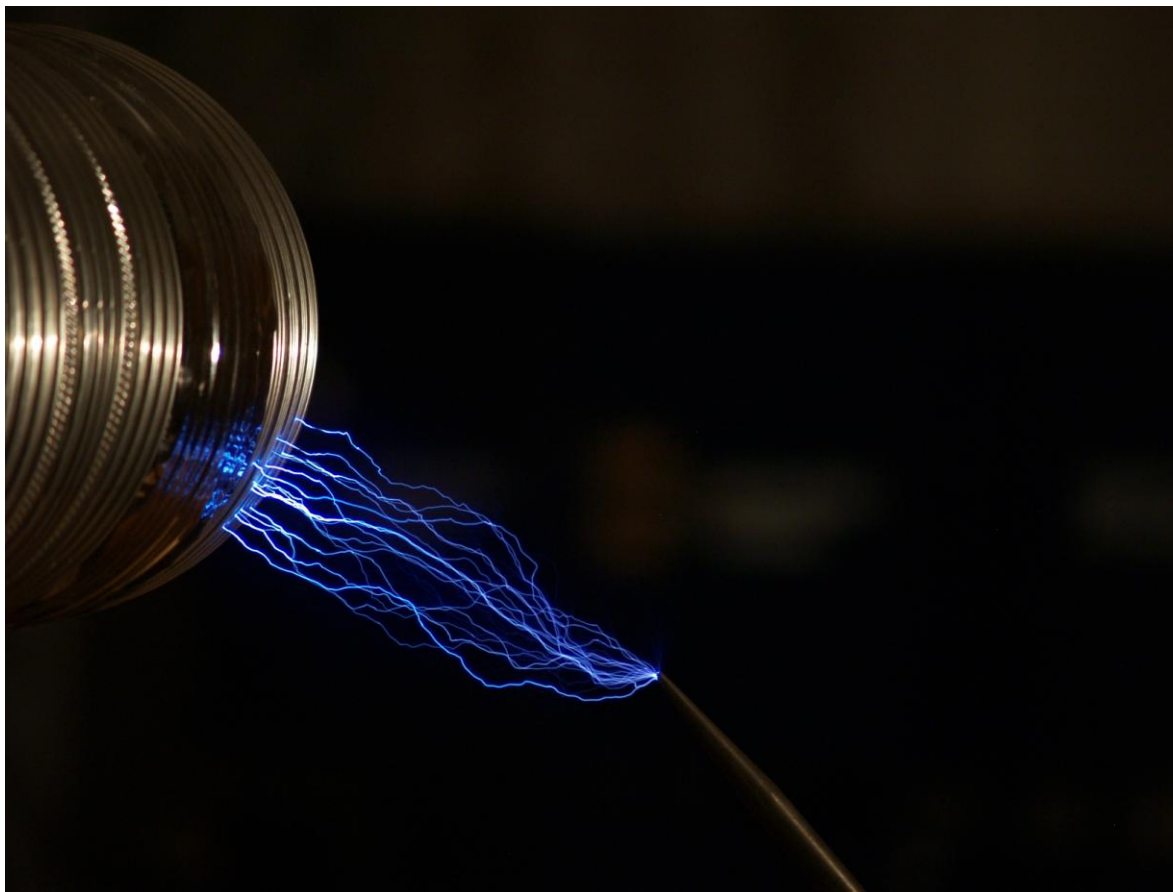
3.8 DOSAŽENÉ VÝSLEDKY

Za kýžený výsledek se dá patrně považovat sršení elektrických výbojů na toroidu. My jsme dosáhli výbojů o délce přibližně 400 mm. Protože jsme však ještě nedosáhli přesné rezonance, byli tyto výboje realizovány proti zemnímu vodiči, který jsme zavěsili shora nad toroid (Obr.: 52) nebo proti uzemněnému hrotu (Obr.: 53). Toto sršení je pak také doprovázeno mocnými zvukovými efekty. Naše sršení je však stále ještě poněkud nestabilní. Hlavní příčinou této nestability je to, že se rezonanční kmitočet našeho obvodu neustále mění a to v závislosti na okolním prostředí. Nejdelších a nejkvalitnějších výbojů jsme dosáhli, když jsem pomocí autotransformátoru zvýšili vstupní napětí VN transformátorů na 200 V a následně jsme ho o několik desítek Voltů opět snížili.

S měřením proudového odběru je však poněkud problém, ampérmetr má totiž dosti neustálenou výchylku. Dá se ale i přesto odhadnout, že se pohybuje okolo 5 – 6 A. Velké problémy nastávaly také při měření napětí na jiskřišti. Je na něm stejné napětí, jako na výstupu napájecích VN transformátorů. Při měření tohoto napětí digitálním multimetrem však často docházelo k velkým výchylkám i k překročení rozsahu. Tento jev byl způsoben vlastností digitálního multimetru v rezonančním obvodu s vysokou frekvencí. Tento jev se už dále neopakoval u měření tohoto napětí analogovým voltmetrem.



Obr. 52: *Výboj z toroidu proti uzemněnému vodiči*



Obr. 53: *Výboj z toroidu proti uzemněnému hrotu*

3.9 ZHODNOCENÍ PROJEKTU (ZÁVĚR)

Našemu týmu se podařilo zkonstruovat a uvést do provozu klasický Teslův transformátor. Kromě samotné konstrukce jsme museli také vyrobit veškeré součásti a články, k této konstrukci potřebné. Podařilo se nám dosáhnout elektrických výbojů o délce cca 400 mm proti zemněnému vodiči nebo hrotu. Na uvedených internetových stránkách uvádějí konstruktéři Teslova transformátoru, že při svých experimentech dosáhli sršení až o délce několik metrů. Prodlužování délky těchto výbojů bude pro nás tématem dalšího ladění a vylepšování celého zařízení. Teslův transformátor by se z důvodu rušení okolních elektronických přístrojů a bezpečnosti práce měl používat jen ve Faradayově kleci.

4.0 POUŽITÉ ZDROJE INFORMACÍ

- [1] <http://elektronika.kvalitne.cz/>
- [2] <http://ok1imj.goo.cz/ether/tesla/tesla.htm>
- [3] <http://www.pokusy.chytrak.cz/pokusy.htm>
- [4] <http://danyk.wz.cz/>
- [5] http://www.volny.cz/milan_spacek/tc.htm
- [6] <http://www.sweb.cz/teslacoil>
- [7] <http://www.meduza.czechian.net/>
- [8] <http://rayer.ic.cz/teslatr>
- [9] <http://elektronika.kvalitne.cz/VN/tesla/tesla.html>
- [10] <http://elektronika.kvalitne.cz/VN/tesla/TCteorie.html>
- [11] <http://danyk.wz.cz/2moty.html>
- [12] http://danyk.wz.cz/tesla_mk.html
- [13] http://danyk.wz.cz/tesla_k.html
- [14] <http://danyk.wz.cz/tesla3.html>
- [15] <http://www.teslacoil.ic.cz/>
- [16] <http://www.teslacoil.ic.cz/vykonny.html>
- [17] www.gme.cz