

STŘEDOŠKOLSKÁ ODBORNÁ ČINNOST

# **Teslův transformátor s primárním jiskřištěm (Spark Gap Tesla Coil)**

**Tomáš Hurdálek**

OBOR 02 – FYZIKA

GYMNÁZIUM KROMĚŘÍŽ  
ZLÍNSKÝ KRAJ

KROMĚŘÍŽ, BŘEZEN 2017

## **Prohlášení**

Prohlašuji, že jsem svou práci SOČ vypracoval samostatně a použil jsem pouze podklady uvedené v seznamu vloženém v práci SOČ.

Prohlašuji, že tištěná a elektronická verze soutěžní práce SOČ jsou shodné.

Nemám závažný důvod proti zpřístupňování této práce v souladu se zákonem č. 121/2000 Sb. o právu autorském, o právech souvisejících s právem autorským a o změně některých zákonů (autorský zákon) v platném znění.

V Kroměříži dne 21. 3. 2017

Podpis: .....

## Poděkování

Chtěl bych velmi poděkovat svému učiteli fyziky panu RNDr. Tomáši Mikulenkovi, který mi ochotně pomohl s revizí textu a vysvětlil jeho sazbu v systému  $\text{\LaTeX}$ . Dále bych chtěl ještě poděkovat svému dědovi Vladimírovi Glajchovi, který mi poskytl některé materiály na vytvoření zařízení a také stroje, které mi usnadnily výrobu určitých komponentů.

## **Anotace**

Cílem práce bylo vytvořit svépomocí a s minimalizací nákladů ( $\leq 100$  Kč) vybraný druh vysokofrekvenčního transformátoru pracujícího na rezonančním principu, který by poskytoval vysoké napětí. Po zkonstruování tohoto zařízení a jeho optimálním vyladění bylo možné pozorovat efekty spojené se sršením náboje do prostoru. Dalšími dílčími úkoly bylo ověření Teslovy konstrukce, vznik světelných jevů a testování skin efektu u vysokofrekvenčních proudů.

## **Klíčová slova**

Teslův transformátor, Tesla, vysoké napětí, světelné efekty, transformátory, cívky, skin efekt, vysokofrekvenční proudy

## **Annotation**

The aim of this work was to create on a self-help basis and with minimum costs ( $\leq 100$  CZK) a chosen kind of high frequency transformer working on resonance principle, which would provide high voltage. After construction of this device and its optimal tuning, it was possible to observe effects connected with sparks flowing all directions. Other sectional tasks were to check Tesla coil construction, creation of lights effects and testing skin effect.

## **Key words**

Tesla coil, Tesla, hight voltage, light effects, transformers, coils, skin effect, hight frequency currents

## Úvod

Moje práce se zabývá různými druhy Teslova transformátoru a jejich funkcí. Především se soustředím na Teslův transformátor s primárním jiskřištěm SGTC (Spark Gap Tesla Coil) a jeho příslušenství. Jedná se o původní konstrukci. Pro vytvoření tohoto transformátoru jsem se rozhodl, protože rád pracuji s elektronikou, dále kvůli ověření funkčnosti a vytvoření světelných efektů velmi vysokým napětím. Zároveň bych chtěl poukázat na Nikolu Teslu, který svými zařízeními předběhl svou dobu. S jeho vynálezy nebo věcmi, které jsou postaveny na principech jím vymyšlených, se setkáváme několikrát denně, a přesto spousta lidí neví, co tento muž dokázal.

# Obsah

<b>1</b>	<b>Nikola Tesla</b>	<b>9</b>
<b>2</b>	<b>Základní součástky</b>	<b>12</b>
2.1	Cívky . . . . .	12
2.2	Transformátor . . . . .	13
2.3	Cívka a kondenzátor . . . . .	15
<b>3</b>	<b>Teslův transformátor</b>	<b>16</b>
3.1	Princip funkce . . . . .	16
3.2	Skin efekt . . . . .	16
3.3	Druhy Teslova transformátoru . . . . .	17
3.3.1	Teslův transformátor s primárním jiskřišťem SGTC (Spark Gap Tesla Coil) . . . . .	18
3.3.2	Elektronkou buzený Teslův transformátor VTTC (Vacum Tube Tesla Coil) . . . . .	18
3.3.3	Polovodičově buzený Teslův transformátor SSTC (Solid State Tesla Coil) . . . . .	18
3.3.4	Teslův transformátor buzený výkonovým tranzistorem OLTC (Off Line Tesla Coil) . . . . .	18
<b>4</b>	<b>Teslův transformátor s primárním jiskřišťem SGTC (Spark Gap Tesla Coil)</b>	<b>19</b>
4.1	Důvody výběru . . . . .	19
4.2	Základní předpoklady . . . . .	19
4.3	Rizika . . . . .	20
4.4	Sekundární cívka . . . . .	20
4.5	Primární cívka . . . . .	26
4.6	Primární kondenzátor . . . . .	31
4.6.1	Ztrátový činitel $\text{tg}\Delta$ . . . . .	31

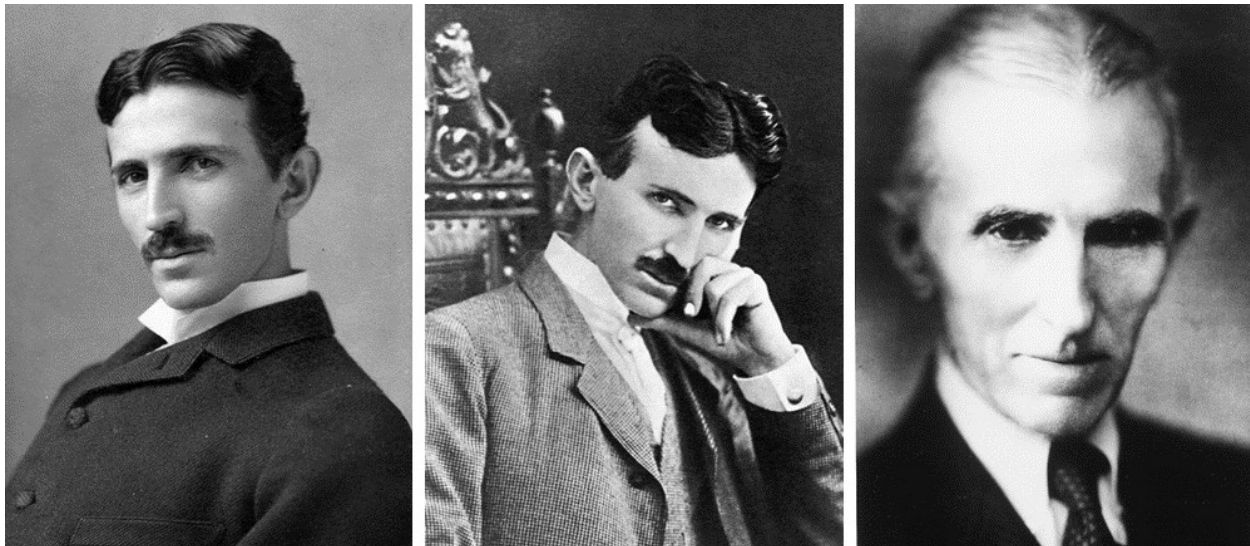
4.6.2	Spojování kondenzátorů . . . . .	33
4.7	Primární jiskřiště . . . . .	36
4.7.1	Statické jiskřiště . . . . .	37
4.7.2	Rotační jiskřiště . . . . .	38
4.8	Napájecí zdroj . . . . .	44
4.9	Usměrňovače . . . . .	47
4.9.1	Jednofázové usměrňovače . . . . .	47
4.9.2	Třífázové usměrňovače . . . . .	48
4.9.3	Stavba zdroje . . . . .	48
4.10	Omezovač proudu . . . . .	49
4.11	Teslův transformátor – fotografie . . . . .	51



# Kapitola 1

## Nikola Tesla

Nikola Tesla se narodil v noci z 9. na 10. 7.1856 v malé vesnici Similjan nedaleko Gospicu v Srbsku (dnes součást Chorvatska). Studoval nejdříve čtyřletou základní školu, pak gymnázium a vyšší gymnázium v Carlstadtu, kde odmaturoval. Pokračoval polytechnickou univerzitou ve Štýrském Hradci (dnešní Graz). Tady se začal více zabývat stejnosměrným proudem a stroji, které ho využívají. Odhalil však mnoho nevýhod u zařízení na stejnosměrný proud. Věděl, že v komutátoru se zbytečně ztrácí energie a proto se rozhodl vymyslet efektivnější zařízení. Prohlásil: „Dokážu, že tento mechanismus je překonán a že věda s ním spojená je již přežitá, jako že se jmenuji Nikola Tesla!“. Vzdělání dokončil studiem filosofie na univerzitě v Praze. Poté se dostal také do Budapešti.



Obrázek 1.1: Nikola Tesla v různých obdobích svého života.

V roce 1884 odjel do Spojených Států, kde začal pracovat u Thomase Edisona. Řekl mu, že dokáže zvýšit účinnost jeho dynam minimálně o 20 %. Edison mu slíbil odměnu 50 000 \$. Po pár měsících dokázal zvýšit účinnost všech dynam o 26–31 % a také snížil výrobní náklady. Když si ale přišel pro odměnu, Edison se mu vysmál, že nerozumí americkému humoru. [5]

Tesla podal výpověď. Prochází pak chudým obdobím a říká: „Nejhorších je posledních 29 dní v měsíci.“ S kapitálem od pana Carmena a Hoadleyho založil svou společnost *Tesla Electric Light Company*, kde zdokonalil obloukovou lampu na střídavý proud. Tesla střídavý proud propagoval odjakživa, to se ale ostatním nelíbilo. Carmen ho po zdokonalení lampy propustil a z vynálezu těžil sám. Roku 1885 se Tesla dokonce živil jako silniční dělník.

Náhodou se seznámil s A. K. Brownem, který byl nadšen pro myšlenku střídavého proudu a poskytl Teslovi peníze na vlastní laboratoř; 16. 5. 1888 konečně předvedl americkému institutu elektroinženýrů dynamo, motory a transformátory na střídavý proud. O jeho vynálezy projevil zájem George Westinghouse, který sepsal s Teslou smlouvu na 1 000 000 dolarů za všechny jeho patenty. [4]

Edison, zastánce stejnosměrného proudu, bojoval proti Teslovi většinou opravdu nemorálními praktikami. Začal zabíjet potulná zvířata jako psy a kočky (později i jiná např. slona) střídavým elektrickým proudem, aby dokázal, že je nebezpečný. Nechá také popravit jednoho vězně na elektrickém křesle. Poprava se napoprvé nezdaří a končí fiaskem.

Roku 1891 Tesla na své druhé přednášce v institutu elektroinženýrů předvedl svůj transformátor s fluorescenčními trubicemi a demonstroval přenos vysokofrekvenční energie bez pomocí drátů. Ve své laboratoři pak vyrobil bezdrátové osvětlení, jednotlivé světelné okruhy byly naladěny na různé frekvence, a proto se mohly samostatně rozsvěcovat. Přišel s nápadem o bezdrátovém rozvodu elektřiny po celé zemi. Elektřina měla být podle něho zadarmo.

Po nějakém čase se hodně rozšířil Teslův asynchronní motor a učinil z něho slavného člověka. Tesla spokojen se svým obrovským úspěchem přerušuje spolupráci s Westinghousem a přestává se zajímat o silnoproudou elektrotechniku. Dne 13. 3. 1895 v půl třetí ráno se Tesla dozvěděl zprávu o požáru své laboratoře, která kompletně vyhořela. Dostal obratem novou nabídku, kterou přijal a druhý den šel vybírat místo pro svou laboratoř. Ta za pár týdnů byla plně v provozu. Nezávisle na sobě s Roentgenem objevil paprsky X. Pár fotografií kostí své ruky a lebky poslal Roentgenovi na ukázkou, ale tento vynález si nijak nenárokoval.

V květnu na elektrické expozici před desetitisíci lidmi předváděl dálkově ovládaný model lodi. Ministerstvu obrany nabídl dálkově řízená torpéda, ale ti neměli pro vynález pochopení.

V roce 1899 odjel do Colorado Springs, kde si nechal postavit dřevěnou laboratoř s 90metrovým stožárem. Zde postavil největší vysokonapěťový transformátor s cívkou o průměru 16 m. Podařilo se mu napodobit bouřku a dosahoval elektrických výbojů až několik desítek metrů dlouhých, aniž by ubližovaly lidskému tělu. Používal k tomu vzduchový transformátor složený ze dvou souosých cívek tzv. Teslův transformátor. Tyto a mnohé další experimenty přinášely Teslovi obdiv veřejnosti. Při jednom z experimentů však došlo náhle k výpadku proudu, a když Tesla zatelefonoval do coloradské elektrárny, zjistil, že je v plamenech.

V roce 1900 začal Tesla budovat obrovskou „světovou stanicí“ na Long Islandu, kterou nazýval Wardencliff. Tato vysílačka měla mít vysílací výkon 1,5 MW a používala polokulovou anténu, která připomínala kopuli o průměru 20 m a kopule byla umístěna na věži vysoké 57 m. Stavba stála Teslu vyčerpání veškerých jeho finančních zdrojů, a proto byla v roce 1901 zastavena. Přestože se Tesla snažil získat prostředky z jiných zdrojů, nebyl úspěšný, projekt nebyl dokončen a Wardencliffská věž byla v roce 1917 zbořena. Tesla byl poté předběhnut Marconim, který 12. 12. 1901 poslal první písmeno přes Atlantik a zrealizoval krátkovlnnou,

mnohem jednodušší vysílačku. Tesla po této prohře přestal s výzkumem i budováním rádiového spojení a uchýlil se do soukromí. Velmi ho znechutilo, když Marconi dostal v roce 1909 Nobelovu cenu za fyziku pro objev rádia, ačkoli on ho objevil už několik let před ním. Přestože jeho prvenství bylo jednoznačně prokazatelné, Marconi měl v té době velký vliv, a tak tento spor nakonec vyřešil soud v Teslův prospěch až v roce 1943, tři měsíce po Teslově smrti.

Teslovy finanční problémy narůstaly, nedařilo se mu získat finance na své projekty apo první světové válce se stáhl do ústraní. Dále pokračoval ve výzkumech, ale už více v teoretické rovině, přičemž se zabýval futuristickými projekty, jako např. tzv. paprsky smrti (teleforce), které v době 2. světové války nabídl vládě USA k případné obraně proti nacistickému Německu, nebo létajícími stroji poháněnými elektromagnetickým polem.

Spekuluje se také o tom, že jednou na věži se svým asistentem zkoušel zařízení „smrtící paprsek“. Někdo tento pokus spojuje s nevysvětlitelnou přírodní katastrofou v tunguzské tundře. Pravděpodobnější je, že se tunguzské tundře jednalo o meteorit, ale zajímavé je, že se žádné stopy po meteoritu (kráter, úlomky...) nikdy nenašly. Tesla si měl být vědom ničivosti svého vynálezu, a proto ho zničil. Do současné doby mnoho jeho patentů nebylo odtajněno veřejnosti. Tesla se v pokročilém věku stal vegetariánem, žijícím pouze na mléku, chlebu, medu a zeleninových šťávách. Nikola Tesla zemřel 7. ledna 1943 v pokoji hotelu New Yorker.

Tesla je otcem vysokofrekvenčních proudů, fluorescenčních a neonových světel a jiných forem zářivkového osvětlení. Vyvinul první bezdrátové dálkové rádiové ovládání, naváděná torpéda, rádiově ovládané lodě. Vymyslel princip rádiového přenosu hlasu, princip televizoru nebo třeba i faxu. Radar předpověděl 40 let před jeho premiérou ve druhé světové válce. Dalšími jeho vynálezy byly: raný předchůdce přístroje na štěpení atomů, základ elektronového mikroskopu či moderní výpočetní techniky, konstrukce letadla s kolmým startem – vrtulník. Mezi jeho další vynálezy patří první sluneční elektrárna, mořskou vodou poháněná elektrárna a první tepelná čerpadla. Prakticky veškeré součástky na střídavý proud, asynchronní motory, alternátory, transformátory a mnoho dalších vymyslel a zkonstruoval Nikola Tesla. Během svého života podal asi 700 patentů.

Tesla se zajímal především o praktické využití vědy, jeho pokusy byly ale velice nákladné a některé jeho myšlenky by se daly přirovnat až ke sci-fi.

# Kapitola 2

## Základní součástky

### 2.1 Cívky

Cívka se skládá z vodiče navinutého na izolační nosnou kostru. Vinutí může být jednovrstvé, vícevrstvé nebo křížové (omezení vlastní elektrické kapacity).

Rozlišujeme cívky bez jádra, tzv. vzduchové cívky a cívky s feromagnetickým jádrem. Jádro musí být zhotoveno z magneticky měkké oceli, nebo při vyšších frekvencích se používá ferit. V podstatě se jedná o magnetické zásobníky energie.

Vodič by měl mít co nejmenší odpor, aby na cívce nedocházelo k tepelným ztrátám. Skutečná cívka se chová jako sériově zapojený rezistor s cívkou, protože není použit ideální vodič. [3]



Obrázek 2.1: Schématické značky cívek s různými jádry: vlevo – cívka se vzduchovým jádrem, obecná značka; uprostřed – cívka s feromagnetickým (železným) jádrem; vpravo – cívka s feritovým jádrem

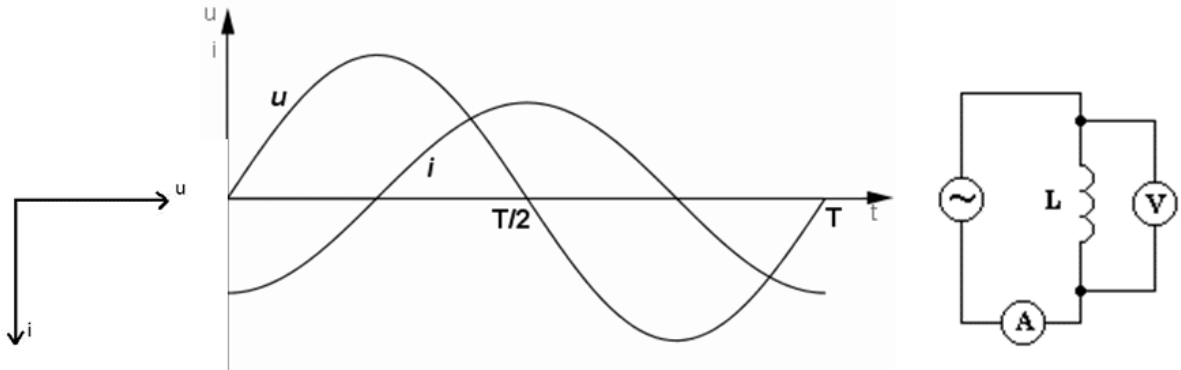
*Druhy cívek.* Podle rozměrů a tvaru lze rozlišit: *solenoid* – válcová cívka, *toroid* – cívka stočená do kruhu (na toroidní kostře). Cívky lze rozdělit podle frekvence střídavého proudu, pro kterou jsou určeny – *nízkofrekvenční cívky* a *vysokofrekvenční cívky*.

Parametry cívek:

- počet závitů –  $N$
- geometrické vlastnosti – počet závitů na jednotku délky  $\frac{N}{l}$ , délka  $l$ , obsah průřezu  $S$
- Indukčnost  $L$  – vyjadřuje velikost magnetického indukčního toku při elektrickém proudu
- Průřez drátu – maximální zatížení, maximální proud

Protéká-li vodičem (závitem nebo cívkou) střídavý proud, vytváří se v jeho okolí střídavé magnetické pole, které je ve fázi s proudem. Toto střídavé magnetické pole indukuje zpět ve vodiči napětí, které brání průchodu proudu, proto se mu říká *protielektromotorické napětí*. Protielektromotorické napětí je zpožděno za proudem o  $90^\circ$ .

Má-li se udržet stálý stav a má-li proud stále protékat, musí zdroj proudu dodávat na svorky vodiče (cívky) stejně velké napětí ale opačné polarity. Toto svorkové napětí se předbíhá o  $90^\circ$  před proudem



Obrázek 2.2: Fázorový diagram, časový rozvoj zpoždění proudu za napětím na cívce a schema zapojení voltmetru a ampérmetru při měření. [3]

Svorkové napětí  $\hat{U}$  protlačuje vodičem proud  $\hat{I}$ . Vodič se proti průchodu brání protielektromotorickým napětím ( $-\hat{U}$ ). Obě napětí se vzájemně vyvažují a stav je stálý. Pro svorkové napětí platí vztah

$$\hat{U} = L \frac{d\hat{I}}{dt}$$

Velikost indukovaného napětí je přímo úměrná indukčnosti  $L$  a rychlosti změny proudu  $\frac{d\hat{I}}{dt}$ . Z toho plyne: je-li proud v maximum, je indukované napětí nulové a při průchodu proudu nulou nastává maximum napětí. Mluvíme o fázovém posuvu o  $90^\circ$ .

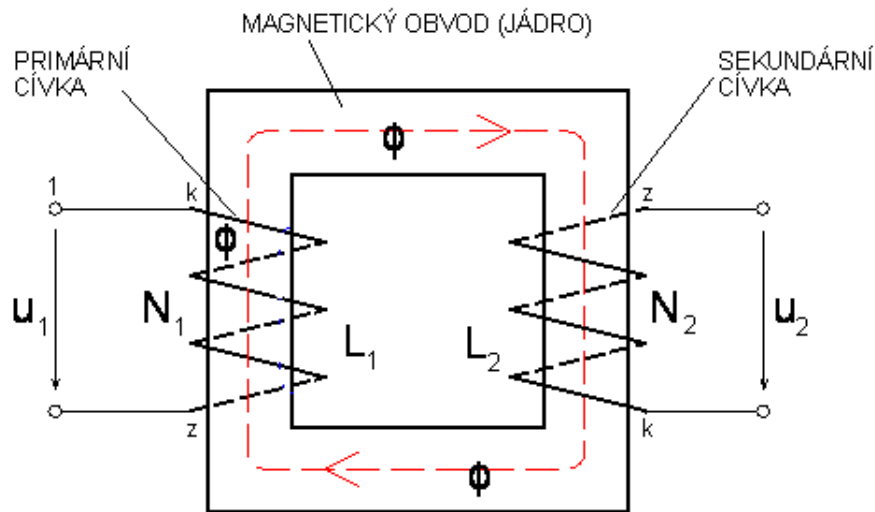
## 2.2 Transformátor

Transformátor je elektrický stroj bez pohyblivých částí, který mění střídavý proud určitého napětí na proud stejné frekvence se stejným, vyšším nebo nižším napětím. Jeho funkce jsou: transformace napětí, proudů a galvanické oddělení dvou obvodů.

Dělení transformátorů

- Podle počtu fází – jednofázový, trojfázový, speciální (dvě nebo více fází, měniče počtu fází). Počet fází na vstupu a výstupu se může lišit.

- Podle konstrukce magnetického obvodu – plášťový, jádrový, toroidní.
- Podle počtu vinutí:
  - jedno vinutí (autotransformátory — regulační transformátory, nebezpečné — při pro-  
ražení hrozí, že se dostane síťové napětí na výstup)
  - dvě vinutí – primární + sekundární vinutí (primár, sekundár)
  - Více než 2 vinutí (symetrické – zesilovací technika, nastavitelné zdroje střídavého  
napětí, potřeba různých napětí v zařízení, větší proudy, ...)



Obrázek 2.3: Cívky na kostře a směr magnetického indukčního toku.

Transformátor je měnič střídavého proudu. Skládá se ze tří hlavních částí: vinutí, jádro, izolační systém. [7]

Primární vinutí slouží k převodu elektrické energie na magnetickou. Procházejícím proudem se vytváří magnetický indukční tok  $\Phi$ . Tento tok je veden jádrem k sekundární cívce. Účelem magnetického obvodu většiny transformátorů je zajistit, aby co nejvíce magnetických indukčních čar procházelo zároveň primární i sekundární cívkou.

V sekundární cívce se podle principu Faradayova zákona elektromagnetické indukce indukuje elektrické napětí. Proto transformátor pracuje jen na střídavý nebo pulsující proud, protože u stejnosměrného proudu se nemění magnetický tok a na sekundárním vinutí nevzniká žádné napětí. [2]

Faradayův zákon elektromagnetické indukce:

$$U_i = -\frac{\Delta\Phi}{\Delta t}$$

kde  $\Delta\Phi$  představuje změnu indukčního magnetického toku a  $\Delta t$  příslušný časový interval.

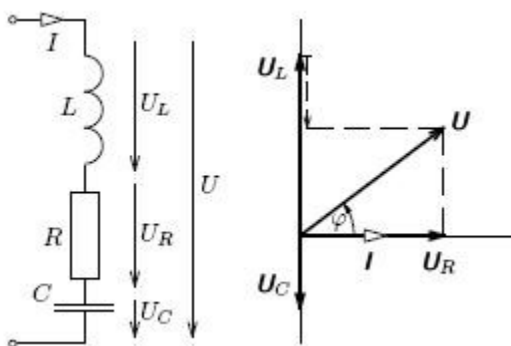
## 2.3 Cívka a kondenzátor

Důležitou úlohu hraje cívka u elektromagnetického kmitání (rezonance). To vzniká v obvodu s kondenzátorem a cívkou ( $LC$  obvod), kde se periodicky mění elektrická energie na magnetickou a opačně. Frekvence elektromagnetického kmitání závisí na indukčnosti cívky a kapacitě kondenzátoru. [2]

Každá reálná cívka se chová jako cívka sériově spojená s rezistorem a kondenzátorem (mezizávitová kapacita). Každý reálný kondenzátor se chová jako kondenzátor sériově nebo paralelně spojený s rezistorem. Ztráty na kondenzátoru popisuje ztrátový činitel  $\text{tg}\Delta$ .

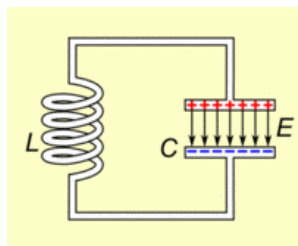
### $RLC$ obvod

Obvod s rezistancí, induktancí a kapacitancí nazýváme  $RLC$  obvodem. V sériovém zapojení prochází prvky obvodu stejný proud, ale napětí na jednotlivých prvcích se liší velikostí i vzájemnou fází. Zatímco napětí  $U_R$  má stejnou fázi jako proud, napětí  $U_L$  proud předbíhá a napětí  $U_C$  se za proudem opožďuje. [3]



Obrázek 2.4:  $RLC$  obvod a jeho fázorový diagram

Výsledné napětí určíme jako vektorový součet dílčích napětí v  $RLC$  obvodu pomocí Pythagorovy věty:  $U = \sqrt{U_R^2 + (U_L - U_C)^2}$ . Rezonanční frekvence obvodu je určena Thomsonovým vztahem:  $f_0 = (2\pi\sqrt{LC})^{-1}$ .



$$\begin{aligned}
 X_L &= X_C & \omega_0 &= \frac{1}{\sqrt{LC}} \\
 \omega_0 L &= \frac{1}{\omega_0 C} & 2\pi f_0 &= \frac{1}{\sqrt{LC}} \\
 \omega_0^2 &= \frac{1}{LC} & f_0 &= \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}}
 \end{aligned}$$

Obrázek 2.5: Paralelní spojení cívky s kondenzátorem a odvození Thomsonova vztahu

# Kapitola 3

## Teslův transformátor

Teslův transformátor je složen ze dvou sousých vzduchových cívek pracujících ve vysokých frekvencích, které jsou schopny generovat velmi vysoké napětí. Teslův transformátor byl vynalezen na konci 19. století. Původně měl sloužit jako zdroj pro dálkový přenos elektrické energie vyšších výkonů bez vodičů.

### 3.1 Princip funkce

Základní částí je vysokonapěťový zdroj dodávající budící napětí. Primární cívka  $L_1$  s malým počtem závitů spolu s kondenzátorem  $C_1$  tvoří paralelní rezonanční obvod, který je naladěn na stejný kmitočet jako sekundární cívka  $L_2$  se sekundárním jiskřištěm, které se chová jako kondenzátor  $C_2$ . Jedná se o tzv. *vázané obvody*. Primární jiskřiště plní funkci vysokonapěťového spínače pro výrobu vysoké frekvence.

Sekundární cívka s vysokým počtem závitů je umístěna v ose primární cívky. Její rezonanční kmitočet závisí na její indukčnosti, parazitní mezizávitové kapacitě a na případné přidavné kapacitě v podobě kovového toroidu nebo koule.

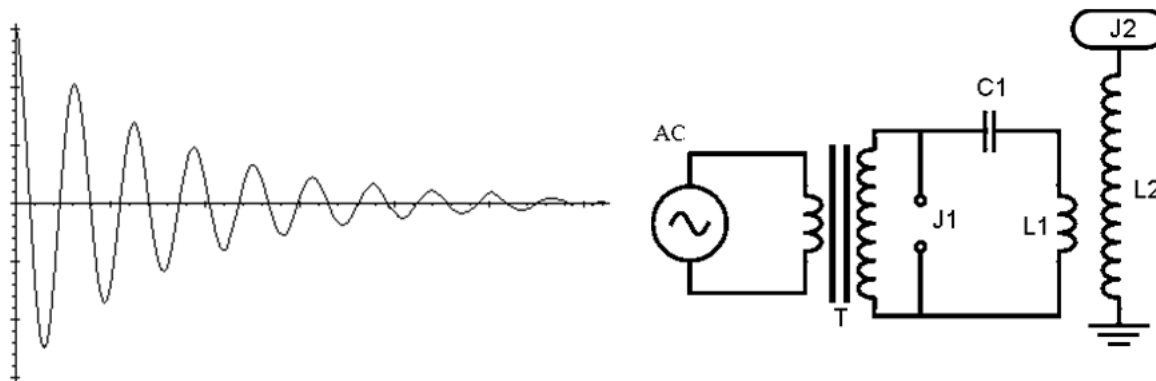
Vysokonapěťový zdroj nabíjí přes vinutí primární cívky kondenzátor  $C_1$ . Po nabití kondenzátoru na určité napětí přeskočí v jiskřišti jiskra, která připojí kondenzátor paralelně k primárnímu vinutí  $L_1$ . Rezananční obvod začne kmitat a vykoná určitý počet tlumených kmitů. Po dobu trvání těchto kmitů se v sekundární cívce  $L_2$  indukuje vysokofrekvenční střídavé napětí. Po vybití kondenzátoru výboj v jiskřišti zanikne, kondenzátor se odpojí od primární cívky a celý proces se opakuje. [4]

Naindukované vysokofrekvenční napětí má poněkud odlišné vlastnosti než nízkofrekvenční střídavé napětí. Uplatňuje se zde tzv. *skin efekt*.

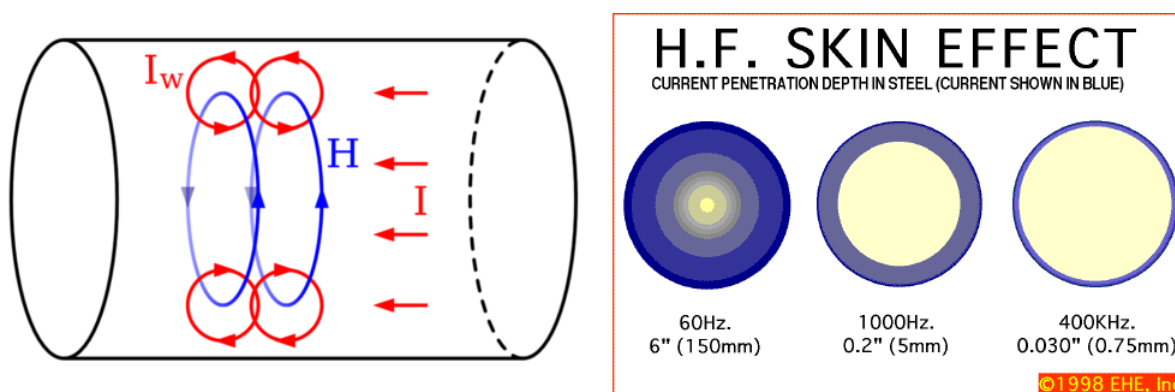
### 3.2 Skin efekt

Při vysoké frekvenci  $f$  střídavého elektrického proudu dochází k vytlačení elektrického proudu na povrch vodiče. Elektrický střídavý proud prochází vodičem podél elektrických siločar prolínajících se s indukčními čarami magnetického indukčního toku. Část tohoto toku prochází i tím samým vodičem a indukuje v něm uzavřené vířivé proudy.





Obrázek 3.1: Tlumené kmity (vlevo); základní zapojení Teslova transformátoru s primárním jiskřištěm (vpravo).



Obrázek 3.2: Uzavřené siločáry ve vodiči (vlevo) a hloubka skin efektu (vpravo). [13]

Skin efekt závisí na frekvenci proudu  $f$ , průřezu vodiče  $d$ , vodivosti  $G$  a relativní permeabilitě  $\mu_r$ . Hloubka vniku je dána vztahem

$$\delta = \sqrt{\frac{2}{\omega \mu \gamma}},$$

kde  $\gamma$  je měrná vodivost (konduktivita),  $\omega$  je úhlová rychlost proudu,  $\mu$  je absolutní magnetická permeabilita vodiče,  $\delta$  koeficient hloubky vniku.

### 3.3 Druhy Teslova transformátoru

Realizaci Teslova transformátoru (dále TT nebo TC – Tesla Coil) lze provést několika různými způsoby. Především se jedná o odlišnosti buzení zdrojů pro primární cívku. S tím také souvisí výběr tvaru primární cívky. Uvádím zde pouze ty nejpoužívanější druhy.

### **3.3.1 Teslův transformátor s primárním jiskřištěm SGTC (Spark Gap Tesla Coil)**

Jedná se asi o nejjednodušší zapojení Teslova transformátoru. Toto zapojení je původní, jak ho Tesla vymyslel a používal (byl omezen dobou svého vzniku, tranzistory neexistovaly, elektronky byly teprve pomalu objevovány). Podrobněji i s konstrukcí – viz dále.

### **3.3.2 Elektronkou buzený Teslův transformátor VTTC (Vacum Tube Tesla Coil)**

Primární cívka je v tomto případě buzena elektronkou zapojenou ve zpětnovazebném režimu. Zpětnovazebné napětí se odebírá z další pomocné cívky na TT. U výkonnějších VTTC se používá i několik elektronek v paralelním zapojení. Nevýhodou představuje omezení výkonem elektronky a také ceny elektronek jsou velice vysoké. K napájení obvykle slouží MOT nebo jiný vysokonapěťový transformátor s napětím v řádech kV. Výboje vypadají na rozdíl od klasického TT mohutněji, jsou podstatně tišší, mají vyšší teplotu a příliš se nevětví. U VTTC se volí co nejtěsnější vazba mezi primární a sekundární cívkou. Používá se proto válcová primární cívka. Výhodou VTTC je, že jde o poměrně jednoduché zapojení. Další výhodou je, že elektronka se dá krátkodobě přetížít a nezničí se napěťovými špičkami. [10]

### **3.3.3 Polovodičově buzený Teslův transformátor SSTC (Solid State Tesla Coil)**

Polovodičem buzený TT se řadí mezi velmi výkonné. Pro spínání budicího proudu se používají bipolární tranzistor IGBT (Insulated Gate Bipolar Transistor) nebo MOSFET (Metal Oxide Semiconductor Field Effect Transistor), který se vyznačuje schopností spínat vysoké proudy na frekvencích v řádech stovek kHz. Tento tranzistor řídíme obdélníkovým signálem, kterým lze přesně řídit výkon transformátoru. Pro nižší výkony se využívá zapojení s jedním tranzistorem, pro vyšší výkony se používá polomůstkové nebo můstkové zapojení. Polovodiče jsou ovšem dosti choulostivé součástky na přepětí a proudové rázy. Je nutné k nim připojit kvalitní řídicí obvody. [10]

### **3.3.4 Teslův transformátor buzený výkonovým tranzistorem OLTC (Off Line Tesla Coil)**

V podstatě se jedná o totožné zapojení jako u SGTC s tím rozdílem, že jiskřiště je nahrazeno výkonovým tranzistorem. Pro tyto aplikace se výborně hodí bipolární tranzistory IGBT (Insulated Gate Bipolar Transistor), které dokážou spínat proudy až několik kA a mohou pracovat v napěťových hladinách více než 6 000 V. Transformátor je napájen přímo ze sítě usměrněným napětím 230/400 V. Primární cívka je realizována pouze jako jeden závit drátem velkého průřezu, aby se dosáhlo co nejnižší indukčnosti. Díky malé indukčnosti primární cívky lze použít velkou kapacitu primárního kondenzátoru, což je pro nízké napětí výhodou. [10]

# Kapitola 4

## Teslův transformátor s primárním jiskřištěm SGTC (Spark Gap Tesla Coil)

### 4.1 Důvody výběru

Pro podrobnější popis a konstrukci jsem si vybral SGTC. Pro začátek jsem si chtěl konstrukci vyzkoušet v nejjednodušším zapojení, jak ji zkonstruoval Tesla. Velkou roli v rozhodování hrály také finance. Klasický TT lze postavit poměrně levně na rozdíl od modernějších TT spínaných výkonnými tranzistory či elektronkami. Tyto součástky jsou poměrně dost drahé a často také těžko sehnatelné. Další jejich nevýhoda je, že se při těchto celkem výkonnostně náročných podmínkách mohou součástky lehce zničit. Rozhodl jsem se tedy nejdříve pro konstrukci klasického TT, na kterém jsou jednotlivé části odolné, a k jejich zničení prakticky dojít nemůže.

### 4.2 Základní předpoklady

Je třeba si uvědomit několik základních podmínek, které musí být splněny, aby transformátor mohl fungovat.

Musí se zajistit, aby nabíjení i vybíjení primární rezonanční kapacity probíhalo v jednom cyklu pulsu a aby se energie akumulovaná v sekundární indukčnosti nevracela zpět do primárního obvodu.

Další podmínkou je, aby primární obvod, který tvoří paralelní  $RLC$  rezonanční obvod, byl naladěný na frekvenci stejnou nebo alespoň srovnatelnou s rezonanční frekvencí sekundárního obvodu.

Musí být zajištěno dostatečně vysoké napětí zdroje. Toto napětí vychází z přeskokové vzdálenosti v jiskřišti a také z požadované akumulované energie v primárním kondenzátoru. Výkon napájecího zdroje musí být konstantní, aby bylo zajištěno nabíjení kondenzátoru

v konstantní časové periodě. Kdyby zdroj nedosahoval konstantního výkonu, kondenzátor by se na plné napětí (přeskokové napětí jiskřiště) dostával v nepravidelných časech a docházelo by k potlačení rezonance.

Spínací frekvence jiskřiště musí být optimální, s její pomocí lze částečně regulovat výstupní výkon Teslova transformátoru.

Sled přeskoků jiskřiště by měl být pravidelný.

Jednotlivých podmínek se dá dosáhnout u výše uvedených TT. U VTTC, SSTC a OLTC je naladění mnohem jednodušší než u SGTC.

Teslův transformátor je tedy generátor vysokofrekvenčního velmi vysokého napětí. Jeho využití je v elektrotechnice velmi omezené. Šlo mi hlavně o ověření jeho činnosti a o vytváření světelných efektů.

## 4.3 Rizika

Důležité je si také uvědomit rizika ublížení na zdraví spojená s konstrukcí. Sekundární obvod příliš nebezpečný není, protože se zde uplatní skin efekt, i když hrozbu představuje možnost popálení v případě vyšších výkonů. O primárním obvodu se to už říci nedá. Být zasažen síťovým napětím je to nejmenší nebezpečí, nehorší jsou do série zapojené vysokonapěťové transformátory, které dosahují napětí v řádu několika kV s poměrně nízkou frekvencí 50 Hz, takže není dosaženo většího skin efektu. Proud se tedy dostává hlouběji do těla a může způsobit zástavu srdce. Transformátory typu MOT dodávají hodně vysoký proud. Samotné nebo spolu s nabitým kondenzátorem mohou způsobit i smrt.

Při vysokém napětí vniká ozon. Ozon je tříatomová molekula kyslíku, za normálních podmínek bezbarvý jedovatý plyn charakteristického zápachu. Vdechování ozonu vyvolává pokles kapacity plic v závislosti na jeho koncentraci a na hloubce dýchání. Vede ke vzniku zánětlivých onemocnění plic, narušení vývoje plic a snížení jejich funkce. Do těla se dostávají volné radikály kyslíku.

## 4.4 Sekundární cívka

Sekundární cívka je dlouhá válcová cívka s jednovrstvým vinutím. Vzhledem k rozměrům je její hlavní vlastnost velká indukčnost a poměrně malá rezistivita a kapacita. Rezistivita odpovídá samotnému odporu použitého vodiče. Rezonanční kmitočet sekundární cívky je určen její indukčností a parazitní mezizávitovou kapacitou, popřípadě také kapacitou toroidu.

### Výpočet odporu drátu a měrného odporu

Známe-li měrný odpor  $\rho$  materiálu vodiče, jeho délku  $L$  a průřez  $S$ , pak celkový odpor vodiče vypočítáme podle vzorce:  $R = \frac{\rho L}{S}$ . Měrný odpor je dán vztahem  $\rho = \rho_0(1 + \alpha t)$ , kde  $\rho_0$  je měrný elektrický odpor při teplotě  $0^\circ\text{C}$  [ $\mu\Omega\text{m}$ ],  $\alpha$  teplotní součinitel odporu [ $\text{K}^{-1}$ ],  $t$  teplota vodiče [ $^\circ\text{C}$ ].

## Výpočet mezizávitové kapacity

Pro cívku s jednovrstvým vinutím se mezizávitová kapacita určí dle vztahu:

$$C_Z = \epsilon_0 \epsilon_r \frac{S_Z}{l_i},$$

kde  $S_Z$  je plocha styku k sobě přilehajících závitů [ $\text{m}^2$ ],  $\epsilon_0 = 8,854 \cdot 10^{-12} \text{ F} \cdot \text{m}^{-1}$  permitivita vakua,  $l_i$  tloušťka izolace mezi závity [ $\text{m}$ ].

## Co je nutné dodržet

Jednotlivé závity je třeba klást těsně vedle sebe a v žádném případě se nesmí křížit. Na vinutí je vhodné použít nový nepoužitý vodič. Starší použitý vodič může mít popraskanou izolaci a navíc nebývá moc rovný. Hotovou cívku je vhodné nalakovat izolačním lakem na plošné spoje, lze také použít běžné bezbarvé laky. U menších cívek se obvykle jako kostra používá PVC trubka. V mém případě se jednalo o šedou PVC kanalizační trubku o průměru 12,5 cm.

Počet závitů by se měl pohybovat mezi 800–1000. Moje cívka má 1000 závitů.

Cívka by se měla zkonstruovat v poměru výšky ( $h$ ) a průměru ( $d$ )  $h : d \doteq 5 : 1$  až  $10 : 1$ . Je nutné dodržet dostatečnou vzdálenost mezi elektrodou a zemí. Primární cívka by měla být také v dostatečné vzdálenosti, aby nedocházelo k přeskoku mezi ní a primární cívkou. [1]

Musí se dosáhnout dobré mezizávitové izolační schopnosti tak, aby nedocházelo k průrazu mezi jednotlivými závity.

Rezonanční frekvenci ovlivňuje velké množství faktorů, proto by bylo dobré, aby cívka rezonovala na frekvenci vyšší, než je požadovaná. Samotná rezonanční frekvence sekundárního obvodu se celkem snadno snižuje, avšak zvýšení bývá problematické. Frekvenci lze snížit například přidáním toroidu, který se chová jako kondenzátor.

## Výpočet délky drátu

$$l_{\text{ot}} = 2\pi \left( \frac{D}{2} + r \right),$$

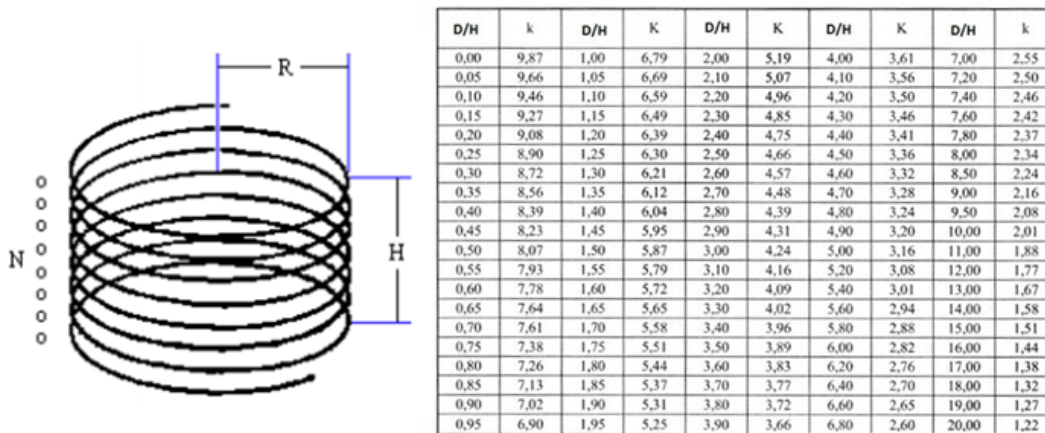
kde  $D$  je průměr kostry sekundární cívky [ $\text{m}$ ],  $r$  poloměr použitého vodiče [ $\text{m}$ ].

Tento vzorec platí pro výpočet délky jednoho závitu; pro zjištění celkové délky drátu stačí vynásobit počtem závitů. Dále by se ještě dalo zabývat tloušťkou izolace. V mém případě ji ale zanedbám, protože jsem použil lakovaný drát opředěný nití. Tato tloušťka tedy dosahuje opravdu malých rozměrů. [11]

## Výpočet indukčnosti

Indukčnost se dá změřit nebo vypočítat dle vztahu (1), (2) nebo (3) – Nagaokův vztah:

$$L = \mu_0 \frac{N^2 S}{H} = \mu_0 \frac{N^2}{H^2} V \quad (1), \quad L = \frac{(NR)^2}{9R + 10H} \quad (2), \quad L = k \frac{D^2}{H} N^2 \quad (3),$$



Obrázek 4.1: Válcová cívka (vlevo). Tabulka konstant zohledňujících rozložení magnetického pole v závislosti na poměru cívky  $\frac{D}{H}$  (vpravo).

kde  $L$  je indukčnost sekundární cívky [H],  $R$  poloměr sekundárního vinutí [in],  $N$  počet závitů,  $H$  výška, délka vinutí [m, in],  $D$  průměr cívky [m],  $S$  obsah plochy závitů [m<sup>2</sup>],  $V$  objem jádra cívky,  $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7} \text{ H}\cdot\text{m}^{-1}$  permeabilita vakua,  $k$  konstanta, která zohledňuje rozložení magnetického pole v závislosti poměru cívky  $\frac{D}{H}$ , určíme ji z tabulky.

### Výpočet frekvence

Pro výpočet frekvence lze využít Thomsonův vztah:

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

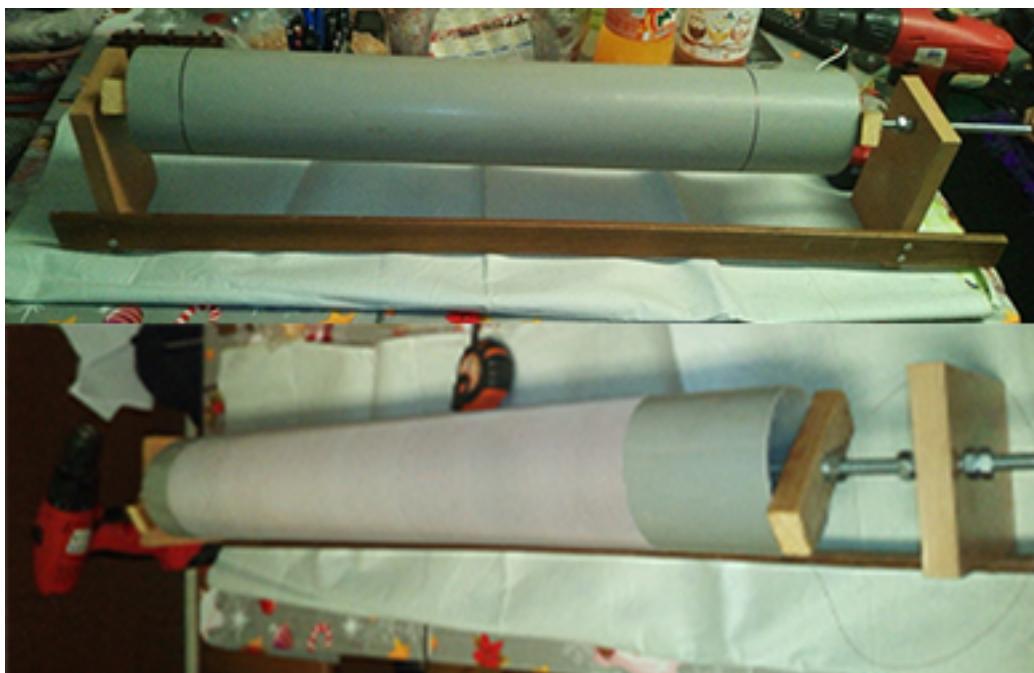
kde  $f_0$  je rezonanční frekvence [Hz],  $L$  indukčnost cívky [H],  $C$  kapacita kondenzátoru (kapacita toroidu, kapacita vinutí) [F].

### Motání cívky

Pro motání sekundární cívky jsem vyrobil jednoduchý motací přípravek. Do osy cívky byla umístěná závitová tyč o průměru 10 mm. Na konce trubky o průměru 12,5 cm jsem umístil kousky dřeva a stáhl je proti sobě pomocí závitové tyče. Cívku i se závitovou tyčí jsem poté uchytil do soustruhu a pokusil jsem se ji vystředit, aby při otáčení sebou házela co nejméně. Výrobek jsem poté vložil mezi 2 kousky provrtaných desek a zajistil proti pohybu do stran pomocí matic dotažených proti sobě. Pak už stačilo pouze upnout tyč do akumulátorové vrtačky, pomalu otáčet a skládat závity drátu pěkně vedle sebe. Celkem jsem navinul 1000 závitů na 55 cm trubky.

### Měření frekvence

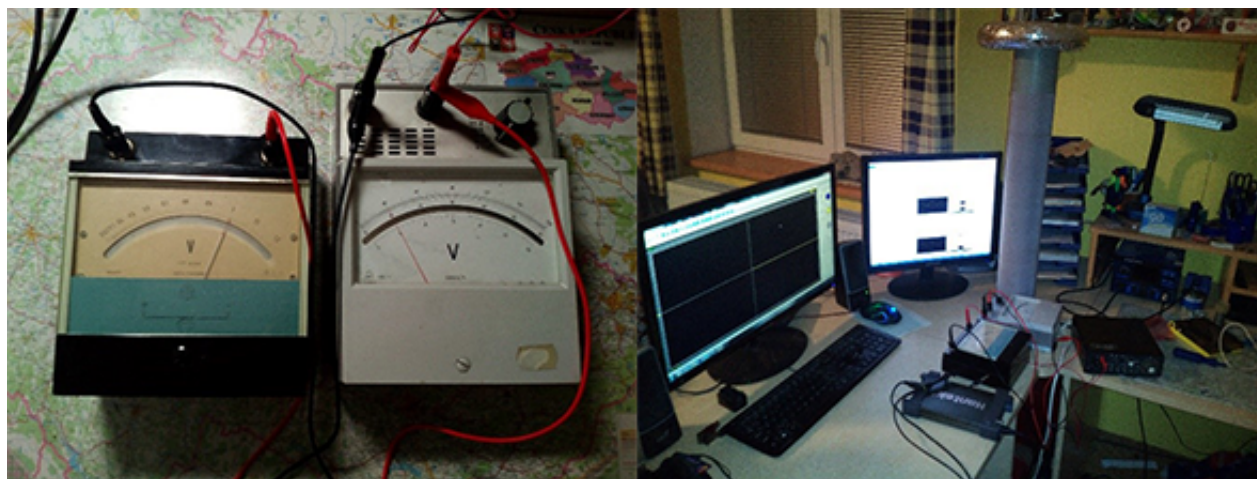
Kvůli velmi vysokému napětí na sekundární cívce měření osciloskopem, čítačem nepřipadá v úvahu. Rezonanční kmitočet hotové cívky se ale dá zjistit pomocí generátoru frekvence a dvou LED diod. Výstup generátoru se připojí přes dvě antiparalelně zapojené diody na spodní konec sekundární cívky. LED diody by měly být nízkopříkonové. Na generátoru



Obrázek 4.2: Kostra sekundární cívky (nahore); namotaná sekundární cívka (dole).

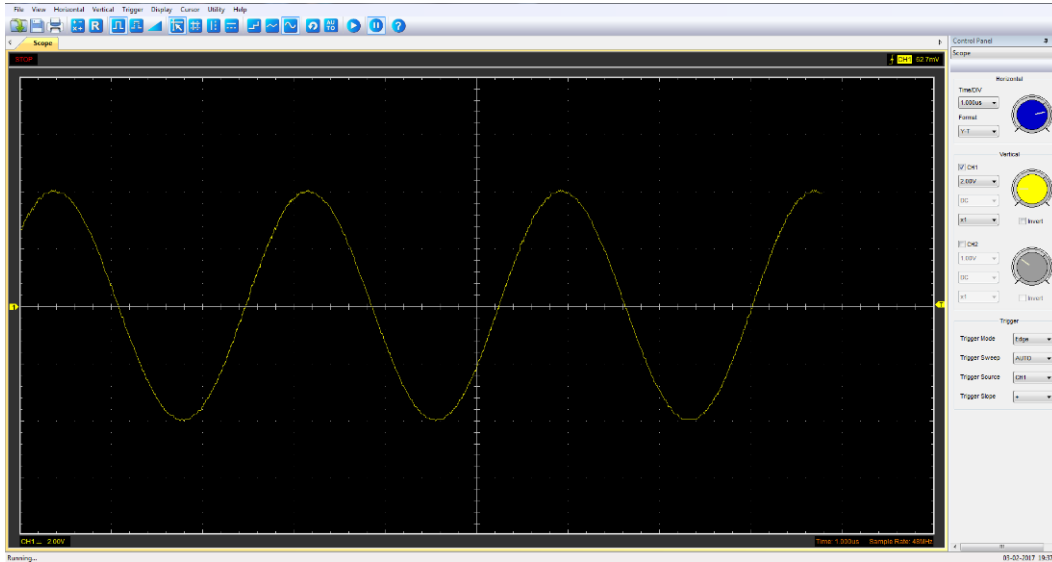
se nastaví přibližná vypočítaná frekvence a kmitočet se doladuje, dokud se obě diody nerozsvítí, což znamená, že je cívka v rezonanci. Výslednou frekvenci už lze změřit čítačem nebo osciloskopem.

Místo diod jsem použil dva antiparalelně zapojené ručičkové voltmetry, které by měly ukázat stejná napětí. Nejdříve jsem je naladil a poté připojil ke zdroji. Na jednom z voltmetrů jsem nastavil napětí 1 V, porovnal s voltmetrem druhým a sledoval odchylky. Důvod: voltmetry nebyly stejné (od různých výrobců), pocházely z různých období a nebyly nejnovější. Jejich odchylky byly naštěstí v řádu setin voltů.



Obrázek 4.3: Ručičkové voltmetry (vlevo). Namotaná sekundární cívka (vpravo).

Poté jsem přestoupil k měření. Připojil jsem voltmetry k cívce a ke generátoru. Na generátoru jsem nastavil co největší možné výstupní napětí a přibližnou frekvenci, kterou jsem vypočítal. Pak stačilo doladovat výstupní frekvenci z generátoru, dokud voltmetry neukázaly stejné hodnoty napětí.



Obrázek 4.4: Sinusoida na osciloskopu při měření bez toroidu.

Provedl jsem nejdříve měření bez toroidu. Původní vypočítaná teoretická frekvence byla 335 kHz, naměřená osciloskopem 370 kHz.

Budeme se následně zabývat časovou osou  $x$  z předešlého grafu, osa  $y$  znázorňuje napětí, které nyní k výpočtu nepotřebujeme. Na osciloskopu jsem měl nastavený čas jednoho dílku  $1 \mu\text{s}$  (z výše uvedeného obrázku jsou tyto informace lépe čitelné při zvětšení). Každý dílek je poté rozdělen na 5 dalších částí (lépe čitelné na ose  $x$ ). Frekvence je převrácená hodnota periody, stačí tedy zjistit čas jednoho kmitu a poté vypočítat podle vzorce:  $f = \frac{1}{T}$ .

Délku jednoho kmitu jsem určil z grafu jako 13,5 částí  $C$ . Každá část je tedy  $\frac{1}{5}$  délky dílku  $D$ . Po vynásobení časem jednoho dílku  $t_D = 1 \mu\text{s}$  dostáváme celkový čas kmitu:

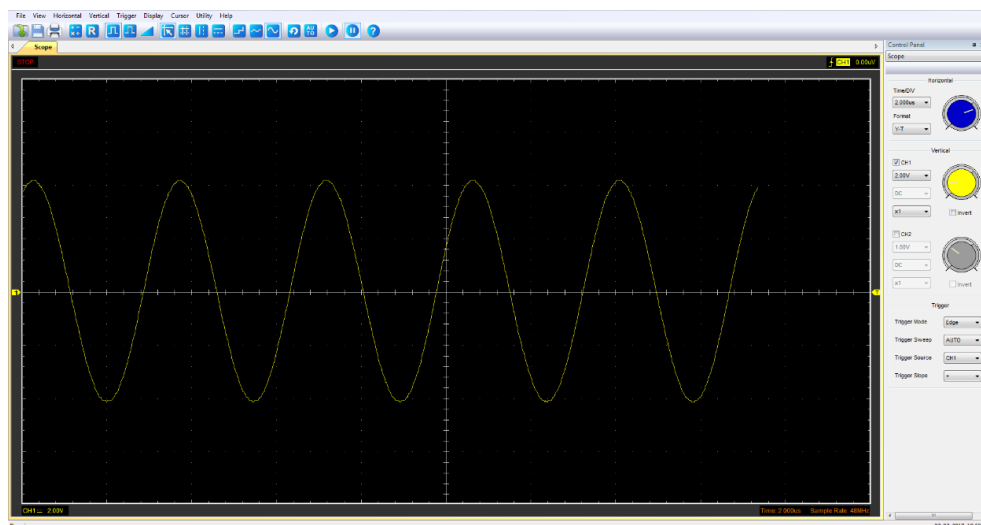
$$T = D \cdot t_D = C \cdot 0,2 \cdot t_D = 13,5 \cdot 0,2 \cdot 1 = 2,7 \mu\text{s}$$

$$f = \frac{1}{T} = \frac{1}{2,7 \cdot 10^{-6}} = 370\,370 \text{ Hz} = 370,7 \text{ kHz}$$

S toroidem vypočítána 221 kHz a naměřena 294 kHz. Výpočet je totožný.  $t_D = 2 \mu\text{s}$ ,  $C = 8,5$ ,  $T = 3,4 \mu\text{s}$ ,  $f = 294 \text{ kHz}$ .

Toto je důkaz, že toroid působí jako kondenzátor a jeho přidáním lze snížit frekvenci sekundárního obvodu.





Obrázek 4.5: Sinusoida na osciloskopu při měření s toroidem.

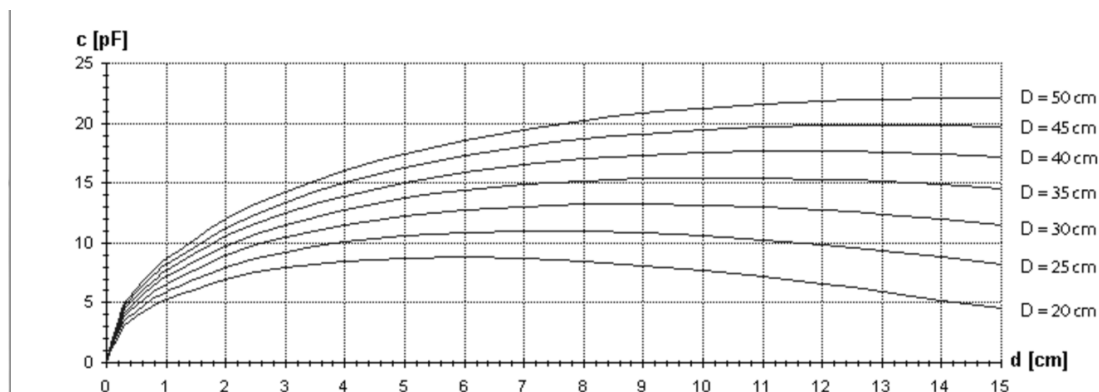
## Toroid

Toroid má v obvodu funkci kondenzátoru. Dá se buď koupit hotový, nebo se vyrábí obvykle z plechového husího krku stočeného do kruhu. Lze použít i plastový, který se obalí alobalem, nebo také polystyrenový věnec. Toroid, koule a jiné útvary svou kapacitou vůči okolí snižují rezonanční kmitočet sekundární cívky. Jak je z grafu vidět, největší kapacity se dosáhne jen při určitém poměru rozměrů  $d$  a  $D$ . Konkrétně je to asi  $d = 30\% D$ .

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:

$$C_t = 0,556 \cdot \left(1,2781 - \frac{d}{D}\right) \cdot \sqrt{\pi d (D - d)},$$

kde  $C_t$  je kapacita toroidu [pF],  $D$  vnější průměr toroidu [cm],  $d$  průměr trubky [cm].



Obrázek 4.6: Závislost kapacity toroidu na jeho velikosti.

Výpočet rezonanční frekvence  $f_0$  při zanedbání mezizávitové kapacity je dán vztahem:

$$f_0 = \frac{1}{2\pi\sqrt{1,2LC_{\text{toroid}}}}$$

kde  $f_0$  je frekvence,  $L$  indukčnost cívky,  $C_{\text{toroid}}$  kapacita toroidu.

## Výroba

Na výrobu toroidu jsem použil polystyrenový věnec a obalil ho alobalem. Nebyla to ale asi moc šťastná volba, protože vnitřní průměr toroidu by měl odpovídat zhruba průměru sekundární cívky. Tento nedostatek se pokusím napravit, pokud seženu „husí krk“, ten bych poté obalil alobalem.



Obrázek 4.7: První pokus o toroid, polystyrenový věnec obalený alobalem.

## 4.5 Primární cívka

Primární cívka je cívka napájená vysokým napětím o vysoké frekvenci. Napájecí napětí dosahuje zpravidla několika kilovoltů nebo i desítek kilovoltů. Frekvence se pohybují v řádu 100 kHz–1 MHz. Cívka by měla být navinuta měděným vodičem o co největším průřezu. Běžně se používá tlustý měděný drát, měděná trubka nebo měděná pásovina. Dalším jejím znakem je velice malý počet závitů.

Spolu s kondenzátorem cívka tvoří primární rezonanční obvod. Frekvence v tomto obvodu je ovlivňována indukčností primární cívky a kapacitou kondenzátoru. Kondenzátor je v cívce připojený do série a přes cívku se tedy nabíjí. Až je kondenzátor nabitý, dojde k přeskoku na primárním jiskřišti, kondenzátor se přepojí do paralelního zapojení a energie, v něm uchovaná, je uvolněna do cívky. Celý obvod se rozkmitá v podobě tlumených kmitů. Při vybíjení kondenzátoru tečou do cívky poměrně vysoké proudy. V primární cívce se indukuje napětí  $U_i$ , jehož velikost je přímo úměrná proudu tekoucímu do primární cívky a nepřímo úměrná času, za který proud proteče. Výkon by se tedy dal zvýšit vyšším proudem, ale také snížením času průtoku proudu tzn. vyšší frekvencí. Zvyšování frekvence nemá pouze pozitivní účinky, dochází totiž ke zvyšování odporu vodiče a tím pádem i k většímu tlumení kmitů[1].

$$U_i = L \frac{di}{dt} \sim L \frac{I_p}{T} = \frac{I_p}{f_0}$$

Kde:  $U_i$  indukované napětí na cívce [V],  $L$  indukčnost [H],  $I_p$  amplituda proudu [A],  $f_0$  frekvence [Hz],  $T$  perioda [s],  $\frac{di}{dt}$  časová změna proudu.

Při návrhu primární cívky musím brát v úvahu také vzdálenost mezi vodiči, budu vycházet z elektrické pevnosti vzduchu, elektrická pevnost suchého vzduchu je  $30 \frac{kV}{V}$  a elektrická pevnost vlhkého vzduchu je  $10 \frac{kV}{cm}$ .

Vzdálenost mezi závity  $l_i$  je teoreticky velice malá, je potřeba tuto vzdálenost předimenzovat, aby se cívka lépe vinula a aby bylo dosaženo lepšího rozložení elektrického pole kolem sekundární cívky. Měření vzdáleností provádíme vždy od středu vodiče. Výšku primární cívky lze vypočítat ze vztahu:

$$H = (N - 1) \cdot l_i + D ,$$

kde  $H$  je výška vinutí [m],  $N$  počet závitů,  $l_i$  mezera mezi závity [m],  $D$  průměr drátu [m].

Výpočty při návrhu primární válcové cívky jsou totožné se sekundární cívkou (délka vodiče, odpor vodiče, mezizávitová kapacita, indukčnost cívky, frekvence).

Některé zdroje uvádí 4 typy primárních cívek, kde poslední 4. typ je pouze jeden závit omotaný kolem sekundárního vinutí. Tento typ vinutí se dá využít pouze u TT řízených elektronkami nebo tranzistory. Běžně rozlišujeme 3 základní tvary primárních cívek: plochá cívka, kuželová (konická) a válcová.

Do níže uvedených vzorců je nutné zadávat hodnoty v palcích, nebo při zadání hodnot v centimetrech se musí výsledek vydělit číslem 2,54. Převodní vztah totiž je: 1 in=2,54 cm.

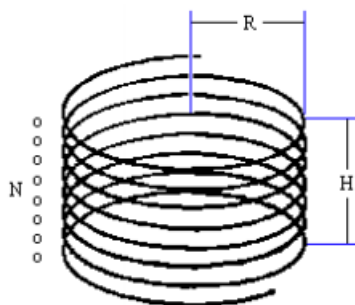
### Válcová cívka (Helical Coil)

Jedná se cívku ve tvaru spirály, kterou je velice jednoduché zkonstruovat. Hodí se ale spíše k transformátorům se zdroji spínanými elektronkami či polovodiči. Vyznačuje se nejvyšší vazbou mezi jednotlivými cívkami, což je u TT s primárním jiskřištěm spíše nevýhoda. Dále hrozí nebezpečí průrazu mezi primární a sekundární cívkou, které by mělo za následek zničení sekundární cívky. Výpočet dle vztahu: [12]

$$L = \frac{(NR)^2}{9R + 10H}$$

kde  $L$  je indukčnost cívky [ $\mu$ H],  $N$  počet závitů,  $R$  poloměr cívky (od středu cívky po střed drátu),  $H$  výška vinutí.

Při mém prvním pokusu jsem použil právě solenoid. Tehdy jsem ještě nevěděl, že je to pro můj typ TT asi ta nejhorší volba. Z Teslova transformátoru nesršel do prostoru žádný výboj. Pouze při přiložení kovového předmětu přeskočila jiskra do 1 cm. Po připojení sekundárního jiskřiště byly jiskry do 1 mm. Zkoušel jsem upravovat tvar cívky, měnit její poloměr a vzdálenost mezi závity, ale nepovedlo se mi dosáhnout takové indukčnosti, jak jsem si představoval.



Obrázek 4.8: Solenoid.



Obrázek 4.9: První pokus o Teslův transformátor rozložený (vlevo) a složený (vpravo).

Na nefunkčnosti mého prvního TT měla také velký podíl špatně navržená sekundární cívka s jiskřištěm. Navíc parametry komponentů byly pouze vypočítané, neprováděl jsem žádná měření. Po tomto neúspěchu jsem se rozhodl, že se nejprve o TT něco dozvím, až poté budu dále pokračovat v pokusech. Později jsem začal TT stavět úplně od začátku.

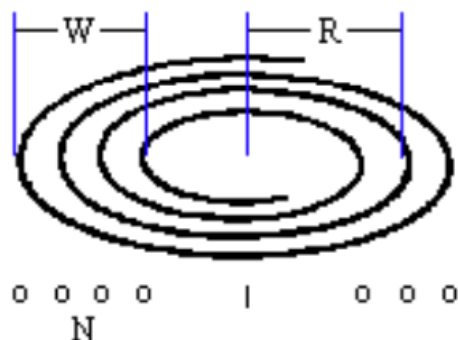
### Plochá cívka (Archimedes Spiral)

Plochá cívka někdy také nazývaná Archimédova spirála, je na konstrukci trochu složitější. Každý závit by měl být uchycen alespoň ve čtyřech bodech, aby bylo dosaženo pravidelné spirály. Tento typ cívky se vyznačuje nejmenší vazbou mezi primární a sekundární cívkou. Nevýhoda této spirály je docela malá účinnost, ale i tak je velice oblíbená. Okrajové závity nedokáží do cívky přenést prakticky žádnou energii. Používá se pro TT s primárním jiskřištěm. Pro TT se zdrojem spínaným tranzistorem či elektronkami je nepoužitelná. Výpočet dle vztahu: [12]

$$L = \frac{(NR)^2}{9R + 11W}$$

kde  $L$  je indukčnost cívky [ $\mu\text{H}$ ],  $N$  počet závitů,  $R$  průměrný poloměr cívky,  $W$  šířka vinutí.

Po prvním neúspěchu jsem se rozhodl právě pro tuto cívku. Potřeboval jsem rychle nějakou, kterou bych použil pro testování nového jiskřiště a hlavně nového sekundárního vinutí.



Obrázek 4.10: Archimédova spirála.

Vzal jsem tedy pár kusů dřevěných odřezků, pomocí hřebíků jsem na ně připevnil měděný drát a pokusil se ho vytvarovat do spirály. S touto provizorní cívku jsem byl docela spokojený, neboť ihned bez ladění se mi podařilo dosáhnout sršících výbojů a po přiložení kovových předmětů výbojů asi 5 cm dlouhých.

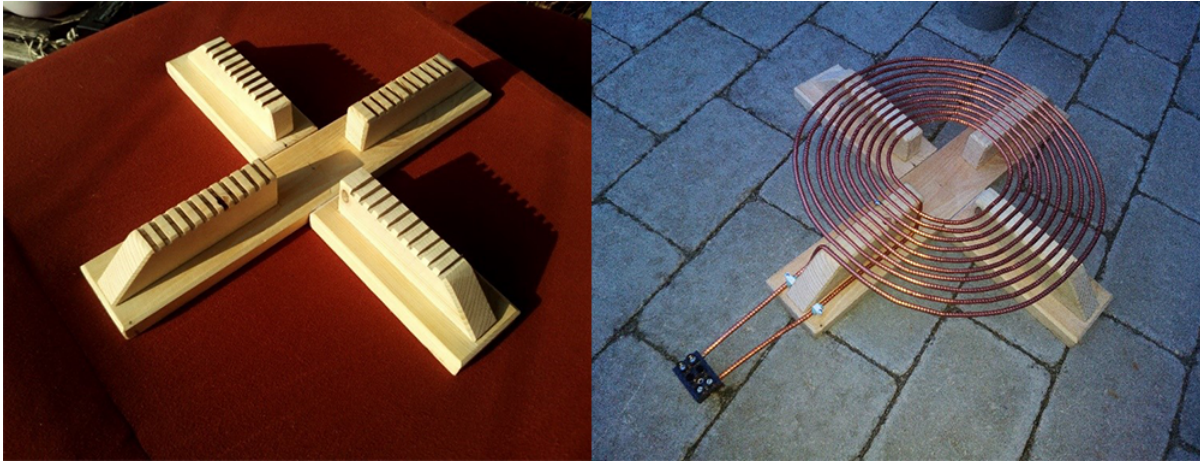


Obrázek 4.11: Archimédova spirála testovací (vlevo), dřevěný kříž pro novou cívku (vpravo).

Později jsem se rozhodl pro lepší řešení. Dřevěný kříž byl vytvořen z odřezků střešních latí a desek. Desky byly spojeny pomocí dřevěných kolíků a lepidla, aby se zde nenacházely jiné kovové materiály zhoršující parametry cívky. Do latí se mi pomocí pily a 5 mm silného kotouče na železo podařilo udělat zářezy pro uchycení drátu. Na motání primárních cívek jsem využil starý koaxiální kabel se silným měděným stíněním. Z kabelu bylo nejdříve zapotřebí odstranit opatrně poměrně silnou izolaci. Jednalo se o kabel používaný pro rozvody v zemi.

### Kuželová cívka (Inverse Conical Coil)

Kuželová cívka je pro konstrukci TT asi nejobtížnější. Vodič musí být motán do spirály a k tomu ještě do tvaru kužele, proto se cívka neobejde bez pořádné opory s uchycením každého závitu drátu alespoň ve čtyřech bodech. Cívka je kompromisem mezi solenoidem a Archimédovou spirálou. Vyznačuje se menší účinností než solenoid, ale zároveň větší než Archimédova spirála. Stejně je to pak i s vazbou cívek, vazba kuželové cívky je menší než



Obrázek 4.12: Dřevěný kříž pro novou cívku s drážkami (vlevo); hotová Archimédova spirála (vpravo).

u solenoidu, ale zároveň větší než u ploché cívky. Výhodou je také menší riziko průrazu sekundární cívky, hodí se proto i pro výkonnější TT. Výpočet dle vztahu, který vznikl kombinací dvou výše uvedených vztahů pro výpočet solenoidu a ploché cívky. [12]

$$L_1 = \frac{(NR)^2}{9R + 10H}$$

$$L_2 = \frac{(NR)^2}{9R + 11W}$$

$$L = \sqrt{(L_1 \sin x)^2 + (L_2 \cos x)^2},$$

kde  $L$  je indukčnost cívky [ $\mu\text{H}$ ],  $L_1$  parametr solenoidu,  $L_2$  parametr ploché spirály,  $N$  počet závitů,  $R$  průměrný poloměr cívky,  $H$  výška,  $W$  šířka vinutí,  $x$  [°] úhel, pod kterým je cívka motaná.

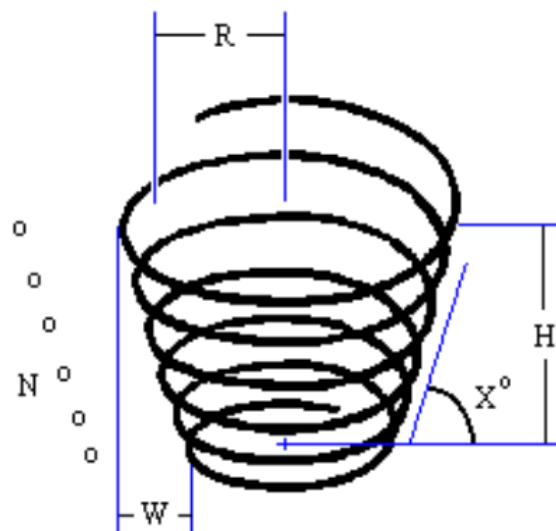
### Měření cívek

Změření indukčnosti cívky lze provést více způsoby. Můžou se použít různé měřiče indukčností, nebo dá postupovat staršími metodami jako měření icometem nebo pomocí reostatu, voltmetru a ampérmetru.

Měření pomocí icometu spočívá v poslouchání bzučáku a vyvažování ticha.

Při měření druhou metodou ampérmetr, voltmetr a reostat se využije zapojení na schématu, indukčnost se vypočítá dle vzorce níže a hodnoty indukčností při různých hodnotách odporu se vpisují do tabulky. Nakonec se vypočítá průměrná hodnota. Nevýhoda je, že do cívky tečou velké proudy, proto jsem nakonec od měření upustil a řídil se pouze vypočítanou hodnotou.

$$L = \frac{1}{2\pi f} \cdot \sqrt{\left(\frac{U}{I}\right)^2 - R_L^2}$$



Obrázek 4.13: Kuželová primární cívka.



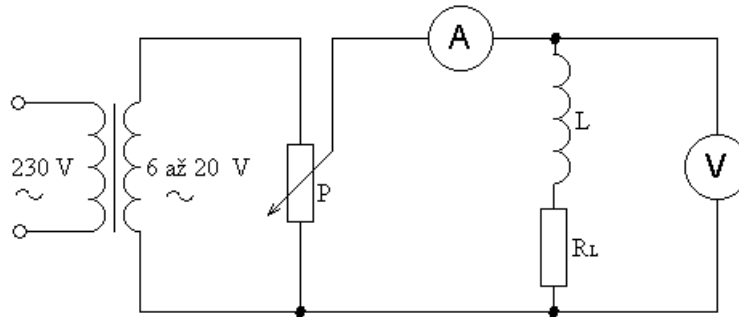
Obrázek 4.14: Stavba kuželové cívky (vlevo), hotová kuželová cívka (vpravo).

## 4.6 Primární kondenzátor

Na vysokonapěťový kondenzátor jsou kladené velké nároky. Tento prvek je zapojený v primárním rezonančním obvodu a tudíž musí snášet velké změny napětí v krátkém časovém úseku  $\frac{dU}{dt}$ . Kondenzátory většinou nemají velkou životnost, pro její prodloužení by měly být spíše předimenzované. Kapacity kondenzátorů nebývají veliké, pohybují se většinou mezi 10 až 100 nF. Důležitý parametr kondenzátorů je také ztrátový činitel  $\text{tg}\Delta$ , který musí být rovněž co nejnižší.

### 4.6.1 Ztrátový činitel $\text{tg}\Delta$

Každý reálný kondenzátor se chová jako sériově nebo paralelně zapojený kondenzátor s rezistorem.



Obrázek 4.15: Měření pomocí reostatu, ampérmetru a voltmetru.



Obrázek 4.16: Icomet (vlevo), reostat (vpravo).

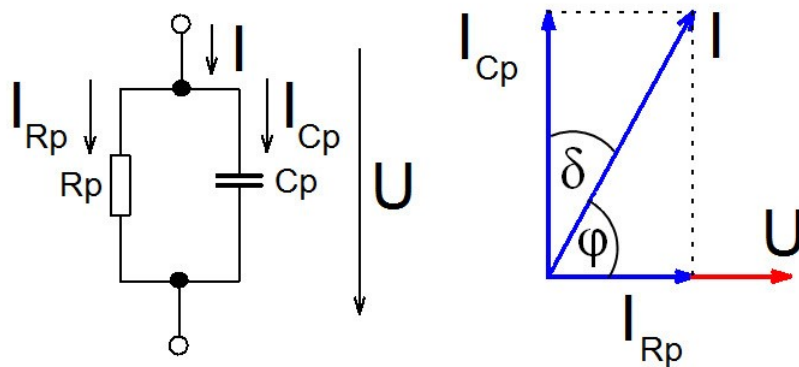
Ztráty energie, které vznikají v kondenzátoru, jsou představovány dvěma složkami: dielektrickými ztrátami závislými na kmitočtu a ztrátami způsobenými svodovým proudem mezi elektrodami (tento proud je dán konečnou hodnotou izolačního odporu, není k dispozici ideální izolant).

Náhradní obvod kondenzátoru je možné si představit jako spojení ztrátového rezistoru, který zahrnuje veškeré ztráty, a bezztrátového (ideálního) kondenzátoru. Spojení je buď sériové nebo paralelní. [16]

### Paralelní zapojení

$$tg\delta = \frac{1}{\omega C_p R_p}$$

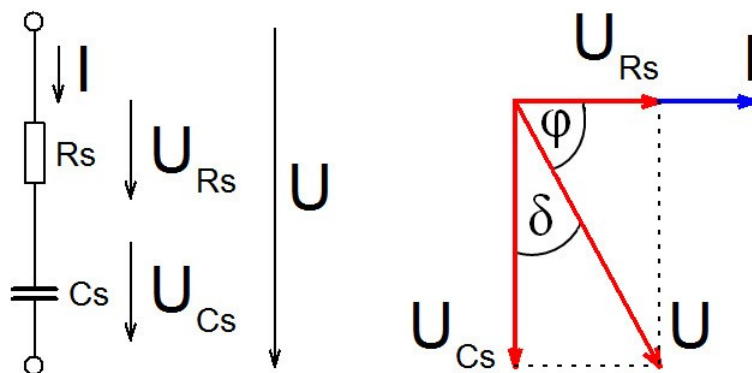




Obrázek 4.17: Rezistor s kondenzátorem, paralelní zapojení.

### Sériové zapojení

$$\operatorname{tg} \delta = \frac{U_{Rs}}{U_{Cs}} = \frac{R_s I}{X_{Cs} I} = \omega C_s R_s$$



Obrázek 4.18: rezistor s kondenzátorem, sériové zapojení

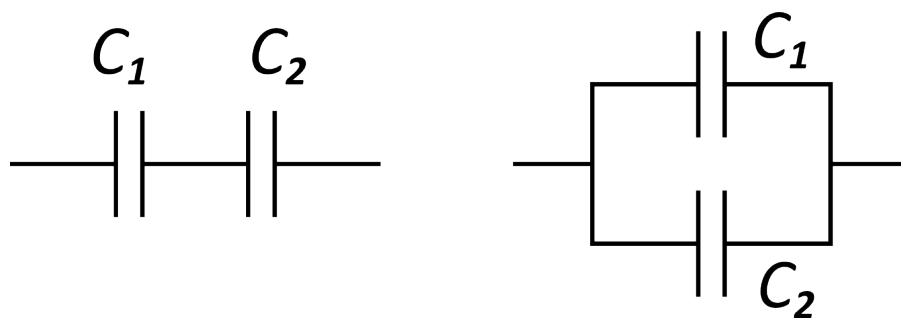
### 4.6.2 Spojování kondenzátorů

Výsledná kapacita  $C_V$  kondenzátorů spojených sériově resp. paralelně je dána vztahy:

$$\frac{1}{C_V} = \frac{1}{C_1} + \frac{1}{C_2} + \dots + \frac{1}{C_n} \text{ (sériové) resp. } C_V = C_1 + C_2 + \dots + C_n \text{ (paralelní spojení),}$$

kde  $C_1, C_2, \dots, C_n$  jsou kapacity spojovaných kondenzátorů.

Běžně se používají 3 druhy kondenzátorů: svitkový, leydenská láhev a MMC kondenzátor.



Obrázek 4.19: Spojení kondenzátorů do série (vlevo) a paralelně (vpravo).

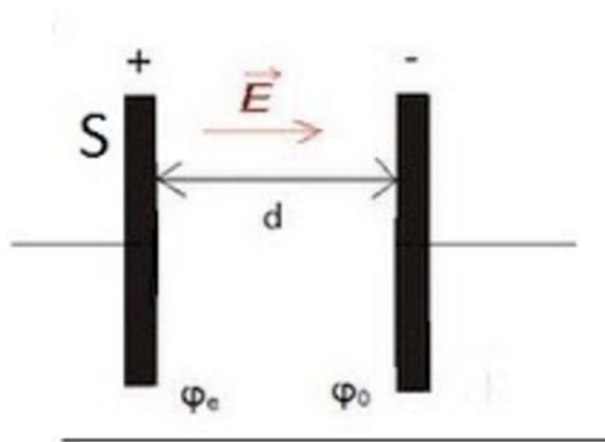
### Svitkový kondenzátor

Pro výrobu svitkového kondenzátoru jsem použil dva obdélníkové pásy z PVC, které slouží jako izolační dielektrikum. Elektrody jsem vyrobil z potravinářského alobalu a ty se přiloží z obou stran PVC. Dále je třeba pás smotat do tvaru válce, co možná nejvíce kondenzátor stáhnout a alobalové elektrody vyvést ven. Takto vyrobený kondenzátor je vysoce nekvalitní a dosahuje velice špatných parametrů, dosahuje obvykle kapacity v jednotkách nF. [8]

Výpočet kapacity deskového kondenzátoru  $C_{\text{des}}$  resp. svitkového kondenzátoru  $C_{\text{sv}}$  je možný dle následujících vztahů:

$$C_{\text{des}} = \frac{\epsilon_0 \epsilon_r S}{d}, \quad C_{\text{sv}} = \frac{2\epsilon_0 \epsilon_r b l}{d},$$

kde  $S$  je účinný plošný obsah desek,  $d$  vzdálenost desek,  $\epsilon_0 = 8,854 \cdot 10^{-12} \text{ F}\cdot\text{m}^{-1}$  permitivita vakua,  $\epsilon_r = 3,4$  až  $4,0$  relativní permitivita PVC,  $b$  ( $l$ ) šířka (délka) překrývajících se částí stočených fólií.

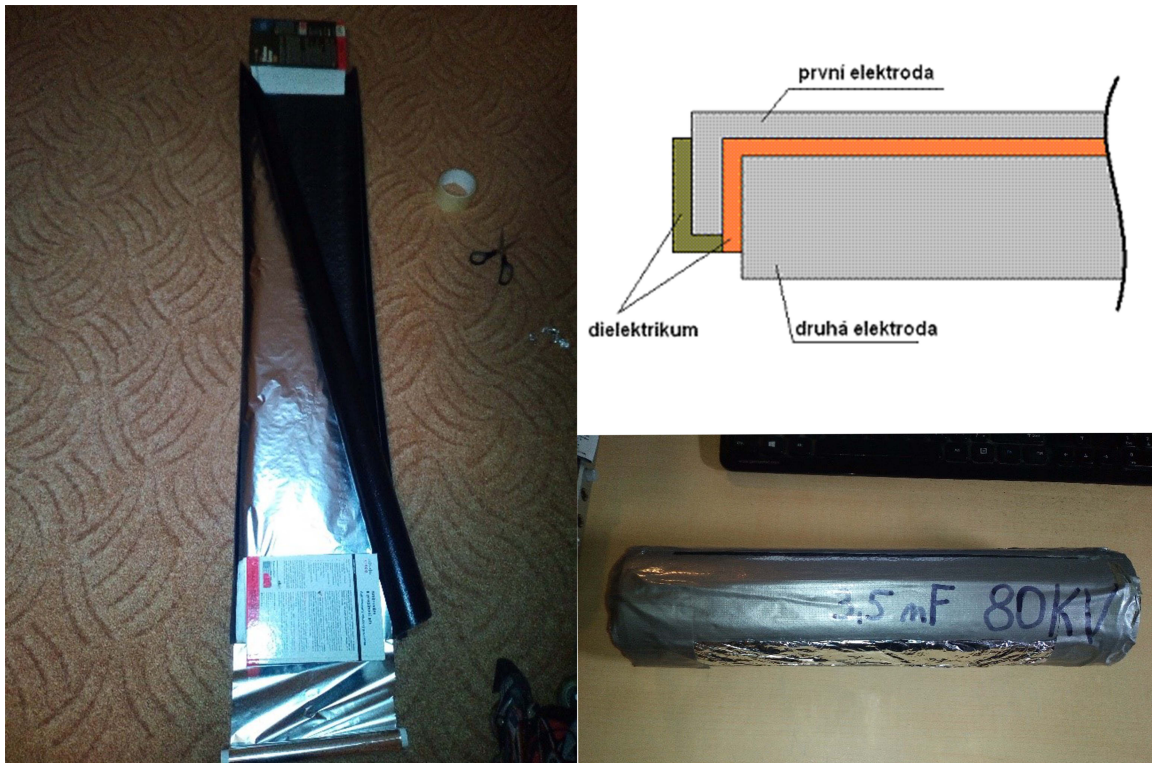


Obrázek 4.20: Desky kondenzátoru.

Elektrická pevnost a kapacita může být pouze odhadována. Mnou vyrobené kondenzátory se většinou lišily od výpočtů několikanásobně. Později jsem tedy zvolil raději metodu pokusů. Další problém, se kterým jsem se setkal, byla proměnlivá kapacita kondenzátoru.

Když srovnám měření kondenzátoru při pokojové teplotě a zahřátého kondenzátoru po použití v primárním rezonančním obvodu, kapacitance se lišila třeba i o jednu třetinu kondenzátorové kapacity. Jediná výhoda tohoto řešení spočívala ve velké elektrické pevnosti PVC v řádu desítek kV. Nakonec jsem od tohoto řešení raději úplně upustil.

Podobných svitkových kondenzátorů jsem vyrobil více.



Obrázek 4.21: Stavba kondenzátoru (vlevo), složení kondenzátoru (vpravo nahoře), hotový kondenzátor (vpravo dole).

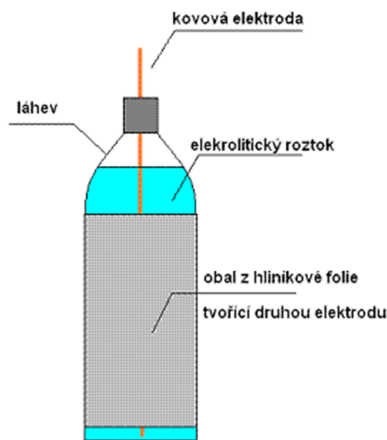
### Leydenská láhev

Leydenská láhev je první zkonstruovaný kondenzátor, který především v 18. století sloužil k raným experimentům s elektřinou.

Jedná se o láhev (sklenici) zvenčí obalenou alobalem. Vnitřní elektroda může být také alobal nebo vodivá kapalina. Používají se různé roztoky solí a kyselin. Nejčastěji to je však roztok NaCl (kuchyňské soli) o co největší koncentraci, je také možné použít roztoky  $H_2SO_4$  a HCl (kyseliny sírové a chlorovodíkové). Do kapaliny se poté vloží elektroda z ušlechtilého kovu (měď). Skleněná nebo PET láhev poté slouží jako dielektrikum, které má elektrickou pevnost i přes 30 kV. Problém tohoto druhu kondenzátorů spočívá v ne zrovna malém odporu slané vody, díky kterému je omezen maximální proud a výrazně se zhoršuje ztrátový činitel  $tg\Delta$ . [14].

Tímto řešením lze dosáhnout vyšších kapacit, ale kondenzátor bývá většinou zase nekvalitní. Leydenské láhve mohou být nebezpečné, neboť při proražení dielektrika či přehřátí kapaliny hrozí výbuch láhve, poté rozlití kyseliny, poleptání, ...

Nicméně kondenzátor v podobě Leydenské láhve jsem se rozhodl také vyzkoušet. Vzal jsem skleněné láhve, obalil alobalem a naplnil vodou s kuchyňskou solí. Plechové víčko jsem provrtal a uchytil do něj tenkou závitovou tyč. Ve víčku jsem udělal ještě jeden menší otvor a překryl ho lepicí páskou, aby při převrácení kapalina nevytekla. Tento přelepený otvor má funkci přetlakového ventilu při zahřátí kapaliny.



Obrázek 4.22: Složení Leydenské láhve.

Další možností je použít pásy alobalu prokládané sklem. Vznikne tak docela rozměrný kondenzátor s ne zrovna velkou kapacitou. Jeho vlastnosti nejsou také nejlepší.

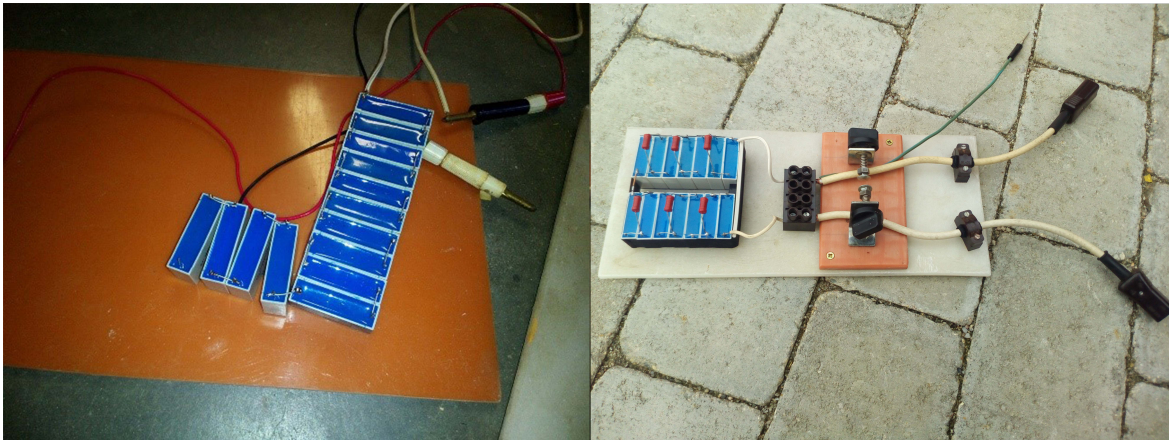
### MMC kondenzátor (Multi Mini Capacitor)

MMC kondenzátor je kondenzátor vytvořený vhodným sério-paralelním spojením malých kondenzátorů. Tímto spojováním může být teoreticky neomezeně zvyšována napěťová hladina i kapacita kondenzátoru. Tento kondenzátor má asi nejlepší vlastnosti a zároveň je možné získat nejpřesnější kapacitu. Hlavní nevýhoda spořívá v ceně kondenzátoru. Předěšlé kondenzátory bylo nožné postavit s nulovými náklady. Ušetřit se dá zakoupením starších typů součástek na různých bazarech. V mém případě to byly kondenzátory Tesla 120 nF na 1000 V. Při použití většího počtu kondenzátorů je vhodné tuto skupinu malých kondenzátorů doplnit o napěťový dělič, který se postará o rovnoměrné rozložení napětí mezi všechny kondenzátory.

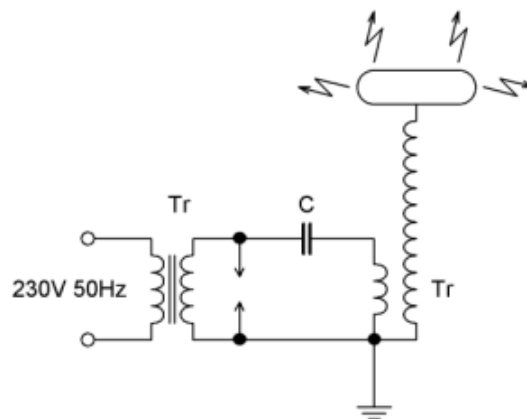
## 4.7 Primární jiskřiště

Jde o klasické zapojení, jaké používal sám Nikola Tesla. Je jednoduché na stavbu a dá se použít jak na miniaturní modely, tak i na zdroje s velkými výkony. Primární jiskřiště má v obvodu funkci vysokonapěťového spínače. Po nabití primárního kondenzátoru přeskočí jiskra a původní sériové zapojení kondenzátoru se změní na paralelní. Následně dojde ke vzniku tlumených kmitů. Celý proces se opakuje a vzniká vyšší frekvence, než je napájecí.

V praxi se nejvíce používají dva druhy – statické a rotační jiskřiště.



Obrázek 4.23: Stavba MMC (vlevo), složení kondenzátoru (vpravo nahoře).



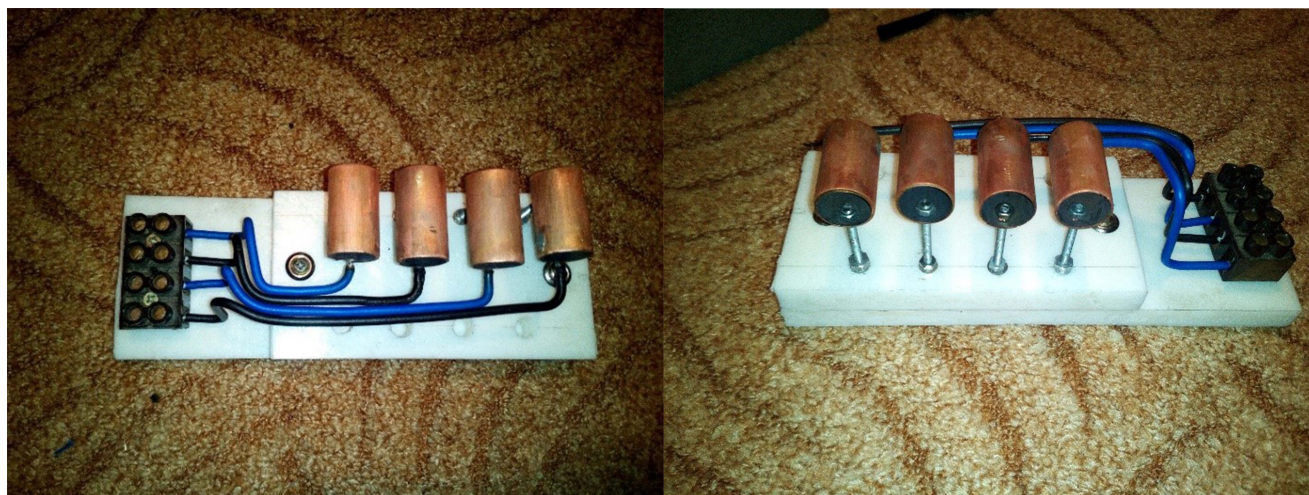
Obrázek 4.24: Základní zapojení Teslova transformátoru.

### 4.7.1 Statické jiskřiště

Statická jiskřiště se dají použít spíše pro malé TT, protože se špatně chladí, rychle se zahřejí a TT ztrácí výkon. Jejich výhodou je, že jsou malá a jejich stavba je velice jednoduchá. Pro nižší výkony se často používají 2 hroty nebo šrouby namířené proti sobě. Oblíbené jsou také měděné trubky používané pro rozvody topení poskládané v sérii. Jiskra se dělí na několik menších, dochází k větším změnám proudu a jiskřiště se lépe chladí.

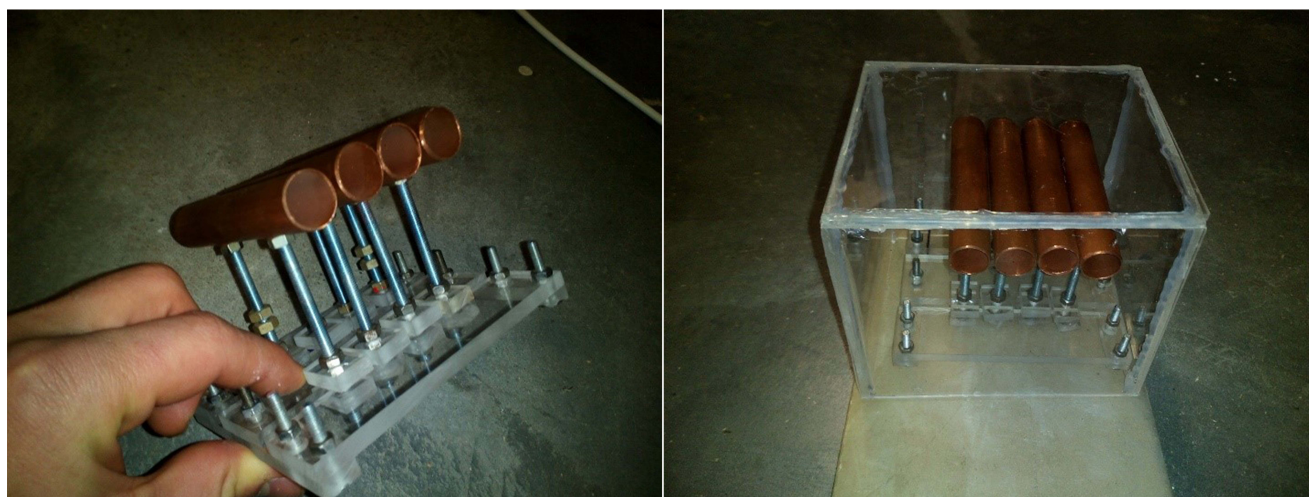
Můj první pokus bylo právě jiskřiště vyrobené z měděných trubek. Trubky jsem připevnil pomocí závitových tyčí na plastovou desku. Trubky byly umístěny do větší výšky nad plastovou desku, aby při zvýšení teploty nedocházelo k přílišnému zahřívání závitových tyčí, následnému tání plastu a vychýlení trubek ze svého místa. Toto řešení mělo ještě jeden důvod, a to nastavování vzdáleností trubek ohnutím závitové tyče. Dráty jsem připájel pomocí hořáku na propanbutanové láhvi. Učinil jsem to tak, protože moje pájka by tolik neprohrála materiál a nedošlo by k pevnému spojení drátu a trubky. Pájkou bych také dost potrápil. U tohoto řešení jsem se obával, aby při zahřátí drát neupadl. Později se ale ukázalo, že zahřívání není tak veliké.

S jiskřištěm jsem byl celkem spokojený. Pár nedostatků tu ale bylo. Vzdálenost trubek byla příliš velká, výrazná hlučnost a únik ozónu byly také záporem. Jiskřiště jsem se tedy rozhodl vyrobit ještě jedno.



Obrázek 4.25: První statické jiskřiště.

Nové jiskřiště už nemá původní nedostatky. Je uzavřené v krabici z plexiskla. Ta zamezuje úniku ozónu a snižuje hlučnost, zároveň ale zhoršuje ochlazování. Další vylepšení se týká vzdálenosti mezi trubkami, která je nyní nastavitelná. Dráty už nejsou na trubky raději naletovány, ale připojeny na závitové tyče.



Obrázek 4.26: Nové statické jiskřiště.

## 4.7.2 Rotační jiskřiště

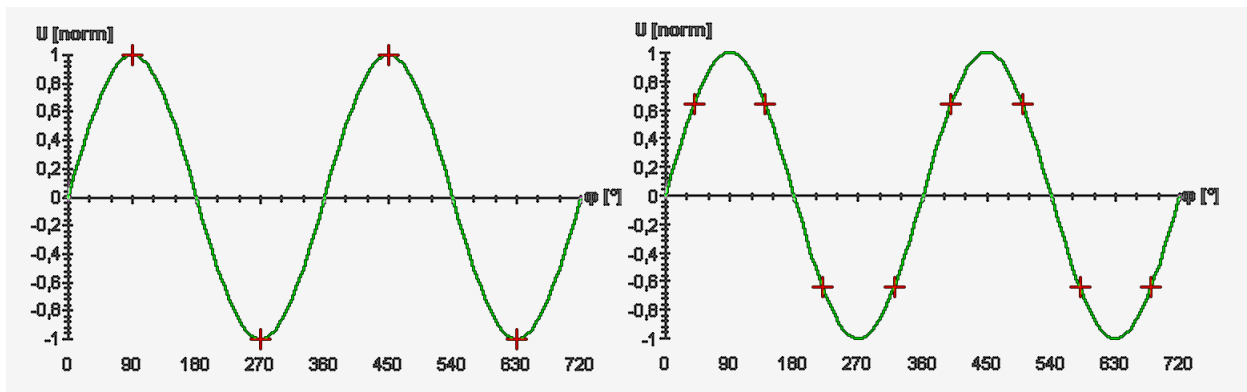
Rotační jiskřiště se dá použít od miniaturních TT až po obrovské TT, oproti statickému jiskřišti má výhodu v tom, že se otáčením ochlazuje a elektrody se tolik nepřehřívají. Navíc

se regulací otáček dá nastavit maximální výkon. Nevýhoda je taková, že není zrovna nejmenší a stavba je složitější.

Rotační jiskřiště můžeme dělit na synchronní a asynchronní. 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, přeskóčí 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 těmito jiskřišti se používá zkratka BPS (Breaks Per Second), která udává počet přeskoků za sekundu.

### Synchronní rotační jiskřiště

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. V ukázkových grafech je tento okamžik označen křížkem.

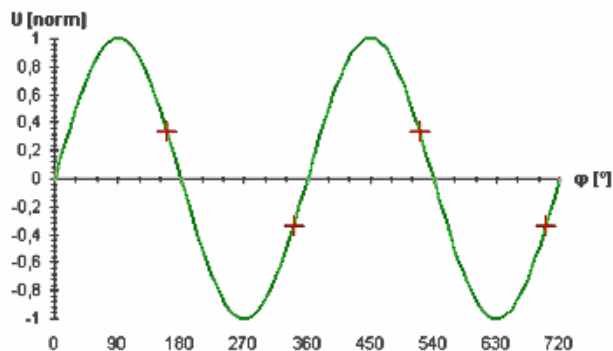


Obrázek 4.27: Znázornění správného načasování přeskoku.

Graf nalevo naznačuje jiskřiště nastavené na 100 BPS a k přeskokům dochází vždy při maximálním napětí. Vpravo je jiskřiště pro 200 BPS, kde k přeskoku dochází vždy při 0,7 násobku maximální hodnoty napětí. Pokud transformátor stíhá dobíjet kondenzátor, může být počet přeskoků i mnohem větší, záleží pak už jen na kvalitě a velikosti zdroje[10].

Další graf naznačuje situaci, kdy sice má motor synchronní otáčky, ale kotouč s elektrodami je pootočen. Díky tomu je kondenzátor nabíjen na menší napětí a TT nedosahuje plného výkonu. S upevněním kotouče s elektrodami na rotor motoru je pak třeba trochu experimentovat. Elektrody na kotouči také nemusí být rozmístěny pravidelně. Třeba u jiskřiště na 200 BPS lze příslušné dvojice elektrod posunout směrem k sobě tak, aby se kondenzátor nabíjel třeba 0,85 násobek maximální hodnoty.

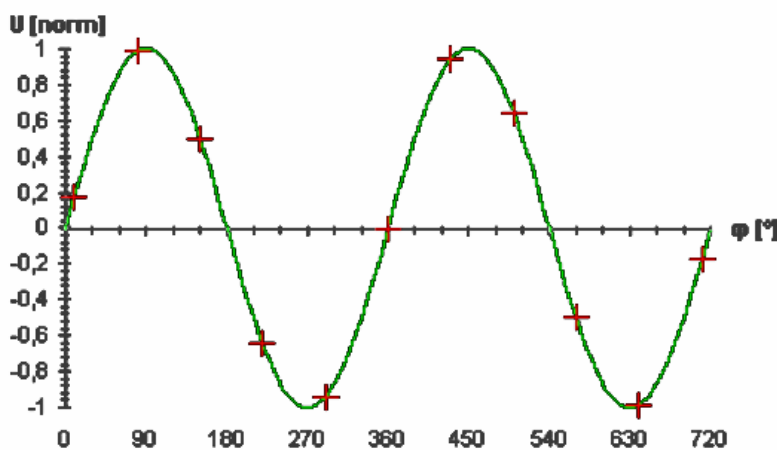
Místo synchronního motoru lze použít i klasický stejnosměrný s regulátorem otáček udržujícím otáčky v synchronismu se sítí. Mezi nevýhody synchronního jiskřiště patří těžko sehnatelný motor a nutnost seřízení vzájemného postavení statických a rotujících elektrod.



Obrázek 4.28: Znázornění špatného načasování přeskoků.

### Asynchronní rotační jiskřiště

Asynchronní jiskřiště naproti synchronnímu může mít libovolný asynchronní nebo komutátorový motor. Lze je sice použít i pro střídavě napájený TT, ale především jsou vhodné pro stejnosměrné napájení. Při použití ve střídavě napájeném TT 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.



Obrázek 4.29: Znázornění nepravidelných přeskoků.

Při použití ve stejnosměrném TT lze otáčkami motoru plynule řídit počet přeskoků za vteřinu a tím i regulovat výkon.

### Konstrukce rotačního jiskřiště s komutátorovým motorem

Osobně jsem se pokusil o rotační jiskřiště s komutátorovým motorem. Hned na úvod musím říci, že rotační jiskřiště byla ta nejtěžší součást TT po stránce výroby. Komutátorový motor jsem použil, protože se mi ho podařilo jednoduše sehnat. Motor má 700W a 8000 ot/min a byl vymontovaný pravděpodobně z nějakého křovinořezu. Osobně si myslím, že to není úplně ideální volba, protože komutátorové motory mají hodně vysoké otáčky.

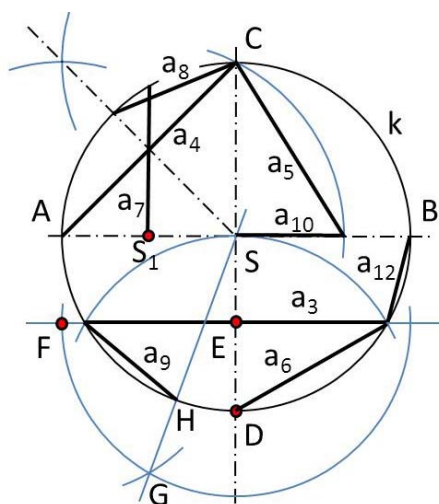


Můj první prototyp rotačního jiskřiště byl jak jinak než katastrofa. Nejdříve jsem vyrobil rotační kolo z texthumolitu. Tento materiál má výborné vlastnosti je pevný, izolant či odolný vůči teplu. Uprostřed jsem vyvrtal díru, protáhl šroub a upnul do soustruhu. V soustruhu jsem obrušoval kolo pomocí soustružnických noží, dokud nebylo vycentrované.



Obrázek 4.30: Kolo upnuté v soustruhu (vpravo), vrtání děr (ve středu), hotové kolo na první testy (vpravo).

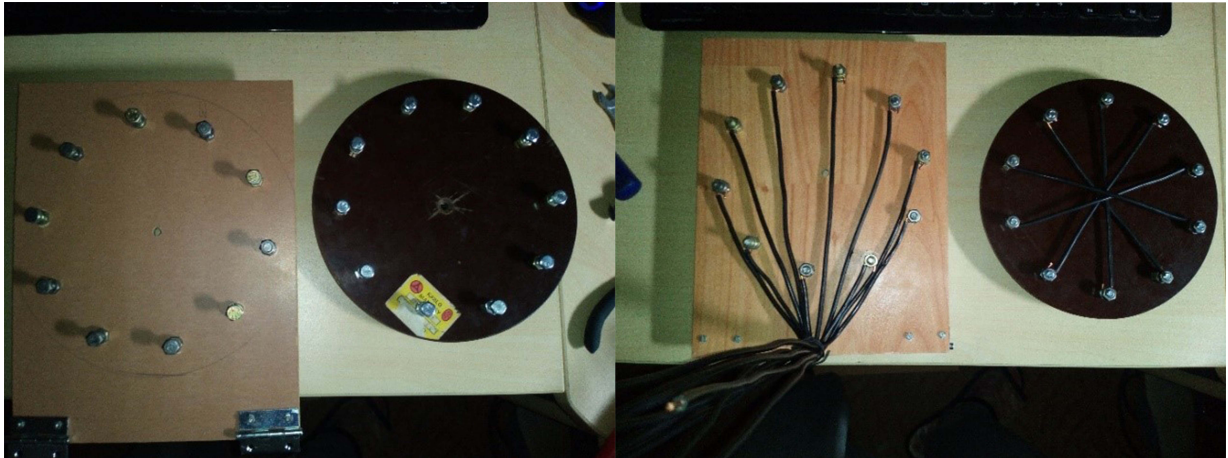
Následovně jsem musel vyvrtat díry pro 10 šroubů. Po pár marných pokusech rozdělit kružnici na 10 stejných dílů přímo na kole jsem raději vše narýsoval na papír. Při rozdělování kružnice jsem vycházel z konstrukce desetiúhelníku.



Obrázek 4.31: Konstrukce mnohoúhelníků.

Papír poté stačilo umístit na kolo a připevnit lepicí páskou. V místech vyřiznutých obdélníků jsem srovnával kružnici na papíru a kolu. Dále jsem označil díry důlčičkem, aby vrták

nesklouzl vedle a umístění otvorů bylo co nejpřesnější. Kolo při vrtání jsem měl přiložené na desce, která měla sloužit jako protikus. Tímto postupem byl zajištěn přesný rozestup mezi šrouby i na protější desce. Do desek pak stačilo nainstalovat šrouby a nastavit na stejné délky. Na rotační desce jsou spojeny vždy protější elektrody. Na jiskřišti mohly být tedy provedeny minimálně dva přeskoky.

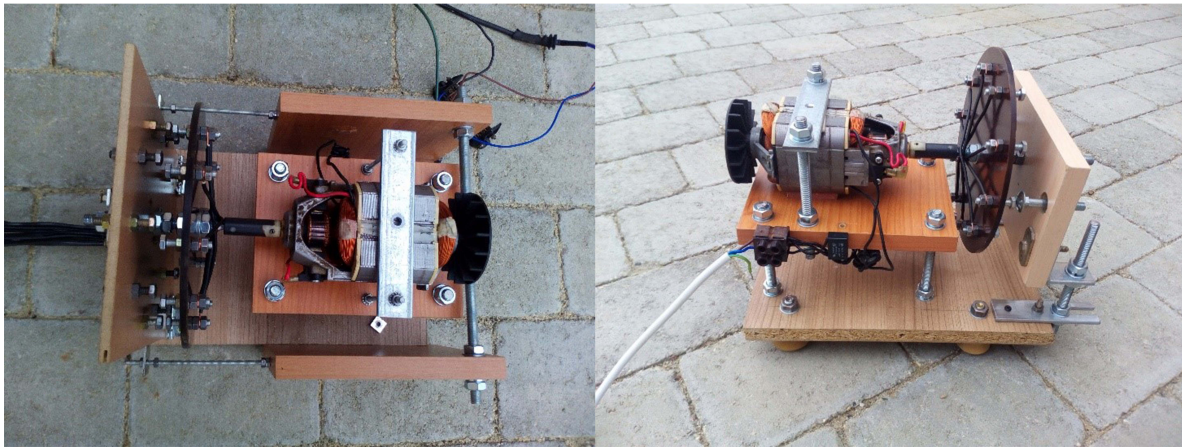


Obrázek 4.32: Prototyp rotačního jiskřiště.

Dlouho jsem se také potýkal s problémem uchycení kola na motor. Nešlo o jednoduchý úkol; ideální by byla výroba hřídele na soustruhu, ale ten jsem neměl k dispozici. Na první pokusy jsem použil závitovou tyč o průměru 4 mm na konci rozklepanou, aby držela ve čtvercovém otvoru v hřídeli motoru. Kolo bylo uchyceno dvěma maticemi dotaženými proti sobě na každé straně. Za maticí, která by se mohla povolovat, jsem porušil závit důlčičkem. Řešení to nebylo zrovna nejlepší, neboť nezabránilo přibližování a oddalování kola od protější desky. Mezera mezi elektrodami byla asi 5 mm, při bližší vzdálenosti se elektrody občas stýřely. Při prvním zapojení motoru jsem nepočítal s tak velkým proudovým nárazem zatíženého motoru. Podařilo se mi přerušit jedno rotorové vinutí.

Druhý prototyp jiskřiště se od prvního lišil uchycením rotujícího kola, hřídel nahrazená závitovou tyčí o průměru 10 mm na konci vybroušená do profilu uvnitř hřídele motoru. Tato hřídel házela také, ale tento pohyb byl vyrovnán uchycením závitové tyče v ložisku zalisovaném v plastu. Plast byl přichycen pomocí jednoho šroubu na protější desce, takže se mohl pohybovat a dorovnávat nerovnosti hřídele. Komponent byl poté opatřen gumovými nožkami (eliminace otřesů). Další změnu představovalo lepší uchycení stojící desky a možnost přesného nastavení deskového kola. S tímto řešením se mi povedlo dosáhnout mnohem větší přesnosti nastavení elektrod: 2–3 mm od sebe. Mezera se ale násobila minimálně 2×, protože u mého jiskřiště se počítá minimálně se dvěma přeskoky. Motor byl pak zapínán jen při sériovém spojení s žárovkami, čímž se omezil jeho příkon na 500 W. Otáčky motoru pak zvolna rostly až do plného výkonu.

Jističe na vedlejší desce byly použity místo vypínačů a měly sloužit pro přepínání mezi paralelním, sériovým a sérioparalelním zapojením elektrod. Jelikož se sériovými zapojeními násobila mezera přeskoky, bylo by nutné doplnit elektrody o štětečky z vodivého materiálu.

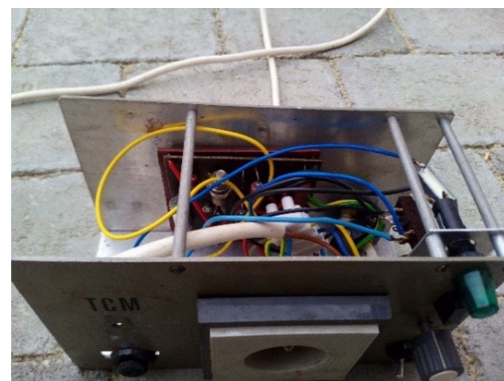
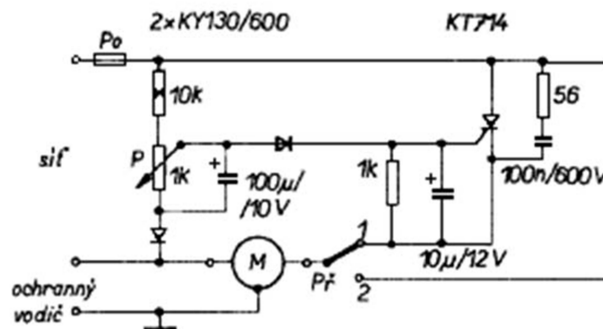


Obrázek 4.33: Druhý prototyp jiskřiště.

Zatím poslední, třetí pokus o rotační jiskřiště byl nejúspěšnější. Usoudil jsem, že moje předešlá jiskřiště byla příliš komplikovaná. Vyhledal jsem si více informací o rotačních jiskřištích a uznal jsem, že zapojení s jističí mi moc výhod nepřinese, tak jsem ho zrušil. Poté jsem už také nepotřeboval tolik elektrod na nerotující desce, tak jsem je omezil na dvě. Pokusil jsem se také o přesnější hřídel rotačního kola. Závitovou tyč jsem upnul do vrtačky, zapnul vrtačku a přikládal k rotující stolní brusce. Tímto způsobem se mi povedlo rovnoměrněji obrousit tyč. Nakonec jsem pilníkem dotvaroval konec tyče do čtvercového průřezu a připevnil do hřídele motoru. Dále jsem se soustředil ještě na regulaci otáček komutátorového motoru.

### Regulátor otáček komutátorového motoru

Regulátor umožňuje plynule nastavit rychlost otáčení v poměrně značném rozsahu a přitom zachovává jmenovitý krouticí moment motoru. Jedná se o elektrický obvod, který je galvanicky spojen se sítí, a proto je nutné počítat s možným probitím síťového napětí při poškození zařízení.



Obrázek 4.34: Regulátor komutátorových motorů.

Jak je patrné ze schématu, zapojení je velmi jednoduché. Jediná nevýhoda tohoto zařízení je, že není schopno dosáhnout plného výkonu, ale pouze polovičních otáček. Pro mé použití je tento rozsah dostačující, protože 8 000 otáček za minutu je na jiskřiště příliš.

V zapojení je použit k řízení velikosti proudu pouze v jedné půlčlenně tyristor, a proto nelze dosáhnout regulace do plného výkonu motoru. Přepínačem lze vyřadit regulátor a výkon motoru tak stoupne na 100 %.

Zapojení využívá velmi účinně zpětné vazby spočívající v tom, že při momentovém zatížení hřídele motoru se zvětšuje proud jdoucí motorkem a zvětšující se úbytek napětí na vinutí motoru dopomáhá k zvětšení úhlu a otevření tyristoru. Krouticí moment motoru tedy zůstává zachován.

## 4.8 Napájecí zdroj

Od zdroje se očekává poskytování vysokého napětí 5 až 20 kV, při kterém už přeskakují jiskry. Může být střídavý s nízkou frekvencí, lepší výsledky však dává proud stejnosměrný. Používá se mnoho různých typů zdrojů. Asi ty nejdostupnější a nejpoužívanější jsou:

- zapalovací cívka z auta (do 50 kV, malý proud, pro malé výkony)
- transformátor pro olejové topení OBIT (10 kV, 150 VA, proudové omezení)
- zdroj z televize nebo CRT monitoru (30 kV, malý proud, pro malé výkony)
- rozptylový transformátor na neonové trubice NST (5–10 kV, vysoký pracovní proud asi 20–150 mA, proudové omezení, drahý a méně dostupný)
- napěťový násobič (velmi malý proud, možno zapojit za VN transformátor)
- transformátor z mikrovlnné trouby MOT (2,1 kV, proud 0,5 A, nemá proudové omezení; přiklonil jsem se k této variantě)

### MOT (Microwave Oven Transformer)

MOT je vysokonapěťový transformátor z mikrovlnné trouby. Obsahuje 3 vinutí, primární a dvě sekundární vinutí. První sekundární vinutí žhaví magnetron 3,6 V, z druhého vinutí vystupuje napětí 2,0–2,3 kV s proudem kolem 0,5 A, které slouží jako zdroj anodového napětí pro magnetron. Tento transformátor je velice nebezpečný kvůli vysokému napětí a hlavně proudu na výstupu. Starší typy mívají měděné vinutí, u novějších se většinou používá hliník kvůli snížení výrobních nákladů.

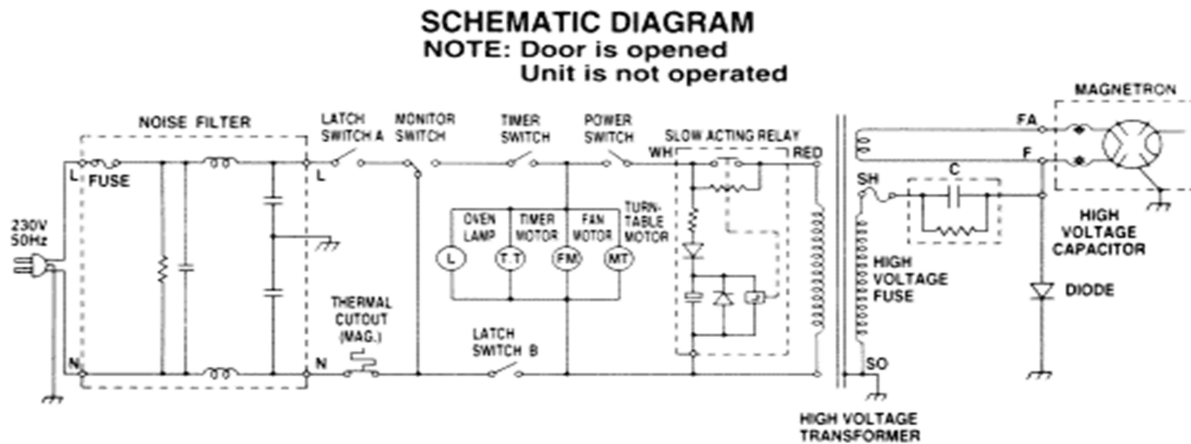
MOT má ovšem jednu velkou nevýhodu, není chráněn limitací výstupního proudu. Při pokusování s výboji představuje výboj v podstatě zkrat na sekundární straně transformátoru. Ten se proto rychle zahřívá a v krajním případě může i shořet. V tomto zapojení je proto nutné použití tlumivky.

MOT bývá hodně poddimenzovaný, takže se při používání nebo při delším chodu naprázdno velice zahřívá. Tento typ transformátoru není určen pro dlouhodobý chod. Je navržen tak, aby pracoval na hranici svých možností, po dobu několika málo desítek minut a za pomoci aktivního chlazení. To umožňuje výrazně zlevnit výrobu a snížit hmotnost přístroje. Transformátor je sice složen z EI plechů, ale ty jsou ve spodní části svařené, takže se jádro

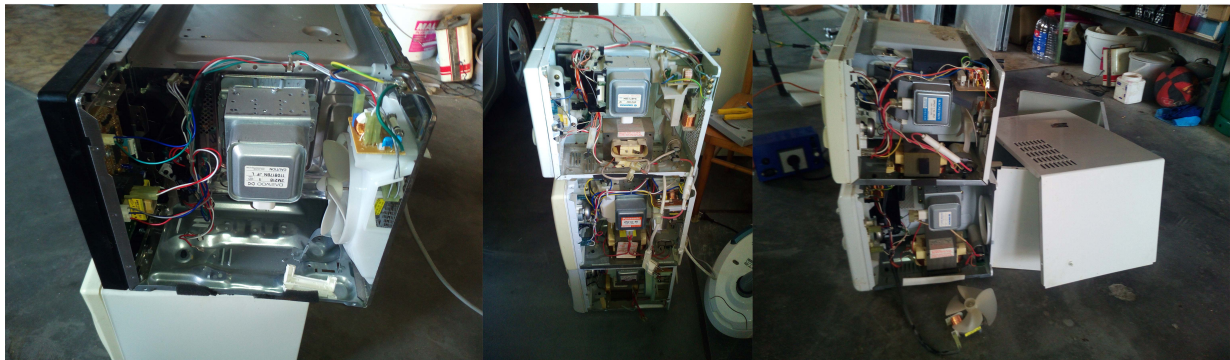
chová jako jeden celek. Tahle skutečnost má za následek velké ztráty v podobě obtížného přemagnetizování jádra, uzavírá se smyčka pro vířivé proudy. [15]

Dalším rozdílem oproti normálním transformátorům je vložení železných magnetických bočniců do magnetického obvodu jádra, přes které prochází určitá část primárního magnetického toku, která se tak nedostane do sekundárního vinutí.

Hlavní důvod, proč jsem se rozhodl využít tyto transformátory, byl, že staré mikrovlnné trouby v dnešní době není žádný problém sehnat. Další nevýhoda je nízké napětí pro TT, ale dá se vyřešit sériovým spojením více transformátorů.



Obrázek 4.35: Zapojení mikrovlnné trouby.



Obrázek 4.36: Rozebrané mikrovlnné trouby.

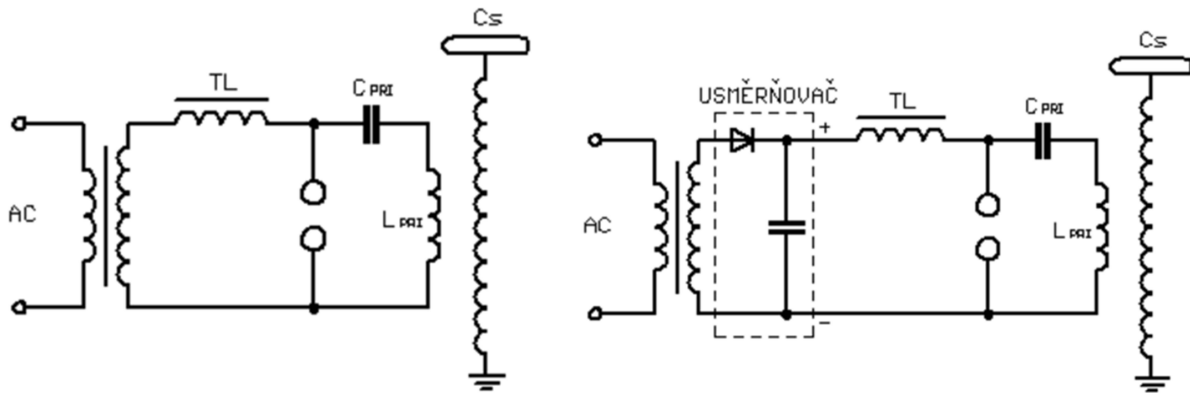
## Tlumivka

Tlumivka je cívka navinutá na feromagnetickém nebo nemagnetickém jádře a má v obvodu za úkol omezovat proud a napěťové špičky. Indukčnost se volí podle požadovaného nabíjecího proudu kondenzátoru. U stejnosměrných TT napájených zdrojem bez limitace proudu musí být indukčnost opravdu velká (až desítky H). Lze použít třeba několik tlumivek s ocelovým jádrem v sérii. Já jsem jako tlumivku využil sekundární vinutí transformátoru MOT. Primární vinutí pak stačí vyzkratovat.

Důležitou vlastností tlumivek je také to, že se spolu s jiskřištěm chovají jako zvyšující měnič napětí. To se může hodit u transformátorů typu MOT. Tuto skutečnost je důležité si uvědomit, protože při vyšším napětí může dojít třeba k poškození kondenzátoru. Proto je také dobré vybavit kondenzátory ochranným jiskřištěm.

### Teslův transformátor napájený střídavým proudem

Kondenzátor C je v tomto zapojení nabíjen střídavě na kladné a záporné napětí. Nabíjecí proud prochází přes tlumivku TL. Ta má za úkol vysokofrekvenčně oddělit transformátor od rezonančního obvodu, aby nedošlo k poškození transformátoru a zároveň omezuje proud tekoucí do kondenzátoru. Pokud je použit transformátor bez limitace proudu, je její použití nezbytné. Při napájení trafem s omezením zkratového proudu NST a OBIT ji lze v nouzi i vypustit. Výhodou tohoto uspořádání je relativně jednoduchá konstrukce. Problém nastává při použití rotačního jiskřiště, které je nezbytné pro vyšší výkony. Pro správnou funkci by totiž mělo být použito synchronní rotační jiskřiště.



Obrázek 4.37: TT napájený střídavým proudem (vlevo); TT s jednocestným usměrňovačem napájený stejnosměrným proudem (vpravo).

### Teslův transformátor napájený stejnosměrným proudem

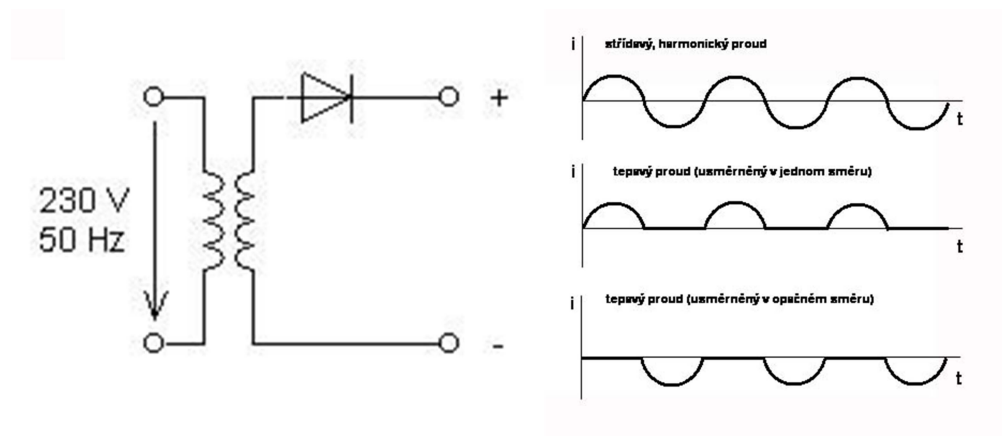
Změna oproti prvnímu zapojení spočívá v usměrnění vysokého napětí z transformátoru. Za usměrňovačem musí být v případě pouhého usměrnění jedné fáze zapojen filtrační kondenzátor s poměrně velkou kapacitou, jinak by usměrnění nemělo smysl. U stejnosměrného napájení je použití tlumivky TL nezbytné, protože přeskokem v jiskřišti by se zkratovala filtrační kapacita a při oscilacích by se otevíraly diody usměrňovače. Mezi výhody tohoto zapojení patří především možnost použít asynchronní rotační jiskřiště, jehož otáčkami lze plynule řídit počet přeskoků za vteřinu a tím i nastavit optimální příkon. Další výhodou je, že vhodným zapojením usměrňovače je možné použít k napájení i třífázový proud. V tomto případě pak filtrační kondenzátor může mít mnohem menší kapacitu, protože napětí za usměrňovačem neklesá k nule.

## 4.9 Usměrňovače

### 4.9.1 Jednofázové usměrňovače

#### Jednocestný usměrňovač

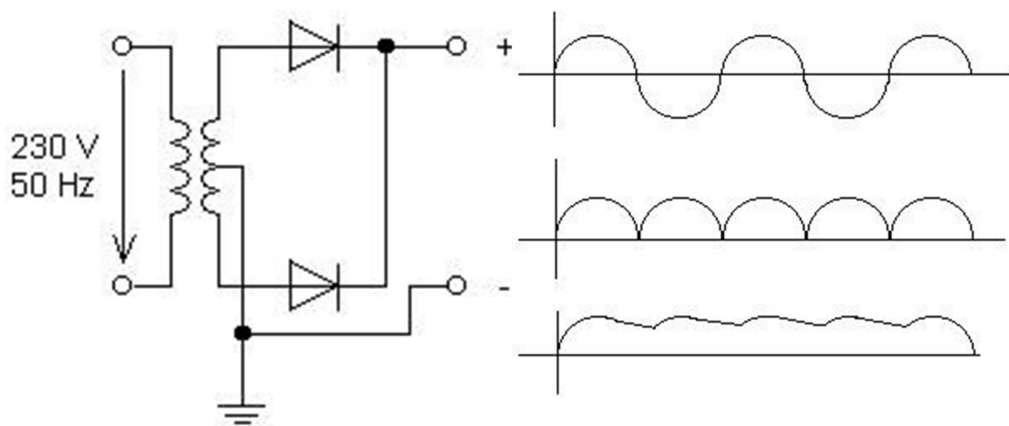
Jedná se o nejjednodušší zapojení s jednou diodou. Zvolil jsem sériové zapojení diod (zvyšuje se odolnost vůči vyššímu napětí).



Obrázek 4.38: Jednocestný usměrňovač a průběh proudu na jednocestném usměrňovači.

#### Dvoucestný usměrňovač

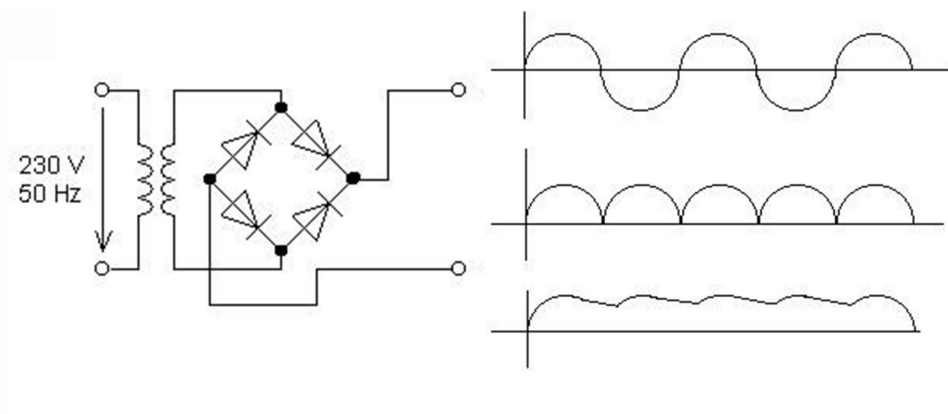
Použití více vinutí nebo transformátorů, 2 diody.



Obrázek 4.39: Dvoucestný usměrňovač a průběh proudu na dvoucestném usměrňovači.

#### Můstkový usměrňovač (Graetzovo zapojení)

Jak je patrné z grafu, toto zapojení by bylo nevhodnější, ale zatím se mi nepodařilo sehnat tolik usměrňovacích diod na vysoké napětí.

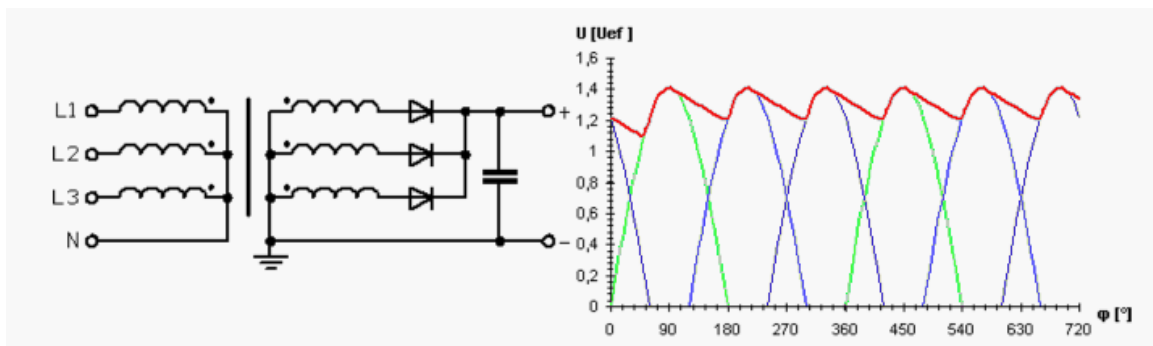


Obrázek 4.40: Graetzovo zapojení a průběh proudu při Graetzovu zapojení.

### 4.9.2 Třífázové usměrňovače

Do budoucna je plánuji využít, uvažuji totiž o dalším připojování MOT transformátorů. Transformátory budu muset rozložit mezi více fází kvůli jejich rovnoměrnému zatížení (nyní jsem na hranici, kterou snese jistič na jedné fázi, ta je také zbytečně přetěžovaná). Další výhoda, která přináší třífázové napětí je, že napětí ve zdroji nikdy nedosahuje nulových hodnot a není zapotřebí většího vyhlazení.

#### Jednocestný třífázový a můstkový třífázový usměrňovač (obr. 4.41 a 4.42)

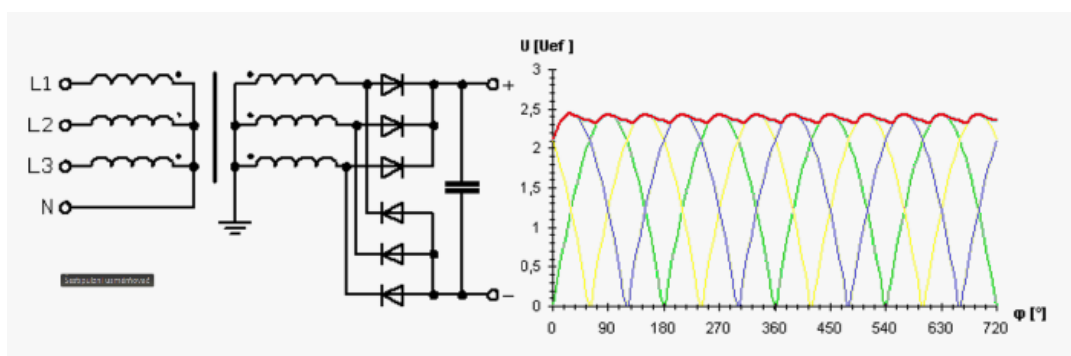


Obrázek 4.41: Jednocestný třífázový usměrňovač a průběh proudu.

### 4.9.3 Stavba zdroje

Při stavbě napájecího zdroje jsem využil 5 transformátorů z mikrovlnných trub. Všechny jsou zapojené do série, tři jako transformátory a zbývající dva mají vyzkratované primární vinutí a plní funkci tlumivky. Dále se na zdroji nachází jednocestný usměrňovač (7 diod v sérii na 2000 V) a kondenzátor (8 kondenzátorů v sérii o kapacitě  $1 \mu\text{F}$  na 2100 V) s vybíjecími rezistory. Tyto součástky pochází také z mikrovlnných trub.





Obrázek 4.42: Můstkový třífázový usměrňovač.



Obrázek 4.43: Stavba vysokonapětového zdroje.

## 4.10 Omezovač proudu

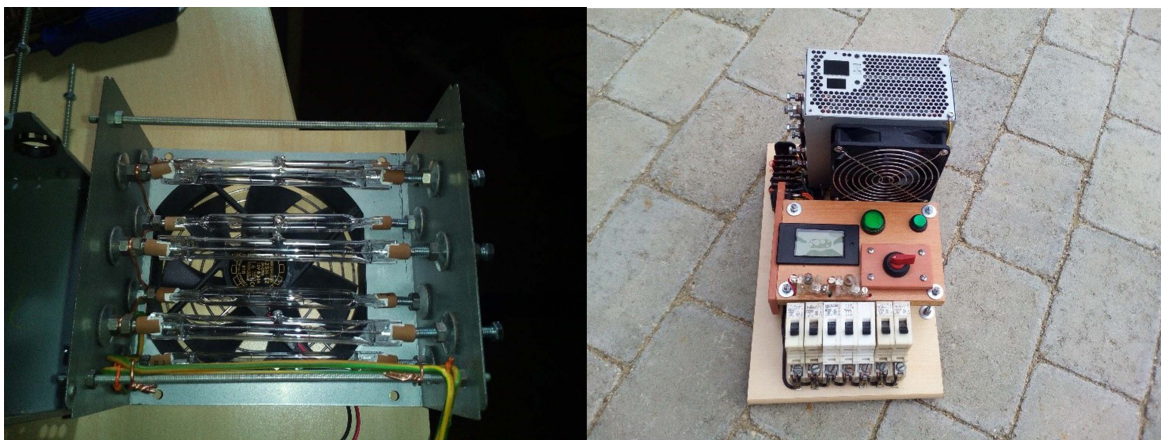
Můj zdroj se skládá z velkého množství transformátorů. Každý transformátor při připojení do sítě má krátkodobě zvýšený odběr proudu, proudový náraz. Tento problém jsem musel řešit, protože v rozvaděči našeho domu se nachází docela rychlý jistič typu B (L). Pro tento účel by byl ideální jistič s motorovou charakteristikou typu C (M, U) nebo D. Nicméně hlavní zaplombovaný jistič měnit nemohu, musel jsem tento problém řešit jinak.

Původní nápad: použít výkonné žárovky nebo tepelné těleso zapojené do série se zařízením. Nejdříve se zařízení zapojí přes tento jednoduchý proudový omezovač, transformátory by se nasatily, následovalo by vyzkratování omezovače a transformátory by pak fungovaly na plný výkon. Nápad byl postupně rozvíjen: usoudil jsem, že výkon transformátoru by bylo vhodné nějak regulovat a mít přehled o odběru proudu. Uvažoval jsem o triakové regulaci, ale pořizovací cena byla vysoká a zařízení bylo složitější. Nakonec jsem tedy zůstal u žárovek. Klasické žárovky na patici E27 nepřipadaly v úvahu – v dnešní době se vyrábí maximální výkon 100 W a zařízení by tak bylo velmi objemné. Řešením byly halogenové žárovky. Podařilo se mi je sehnat v mezinárodním obchodu eBay za přijatelnou cenu.

Na výrobu zařízení jsem využil plechovou krabici z počítačového zdroje. Nejdříve bylo nutné vyřešit uchycení halogenových žárovek. Na každé straně jsem do krabice vyvrtal 7 děr o průměru 10 mm. Do nich jsem umístil šrouby průměru 4 mm tak, aby nebyly propojené s krabicí a nedocházelo ke zkratu. Šrouby byly na konci vybroušeny do tvaru komolého kužele kvůli lepšímu kontaktu žárovky a šroubu. Halogenovou žárovku jsem pak umístil mezi tyto dva protější šrouby a dotáhl je proti sobě. Žárovky byly tedy pevně uchyceny, pak jen stačilo na šrouby napojit dráty a zajistit přívod proudu. Krabice byla doplněna o chladicí ventilátor.

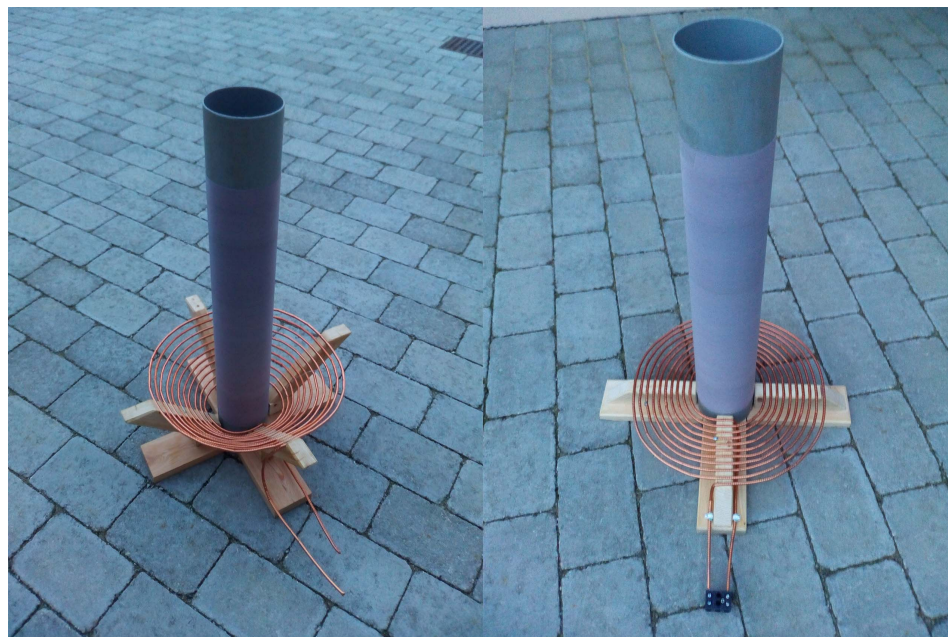
Vývody z omezovače proudu jsem napojil na jističe (mají pouze funkci vypínačů – využil jsem to, co bylo k dispozici), aby se žárovky daly postupně spínat či vypínat a tím přidávat nebo ubírat proud do dalšího obvodu.

Nakonec jsem už jen vše uspořádal na desku, doplnil o vypínač, indikační LED a měřící přístroj. Na LCD displeji měřícího přístroje se spolu s proudem a napětím zobrazuje příkon ve W a odběr ve Wh. Pro napájení ostatních prvků jsem využil malý transformátor se třemi sekundárními vinutími 9 V, 16V a 22 V. Devítivoltová větev zajišťuje napájení pro LED, šestnáctivoltová napájení pro ventilátor. Poslední 22 V větev byla použita pro rychlou kontrolu izolačního stavu mezi šrouby a krabicí z PC zdroje. Po zmáčknutí tlačítka je přivedeno 22 V na krabici. Při zkratu šroubu s krabicí se rozsvítí některá z malých žárovek.

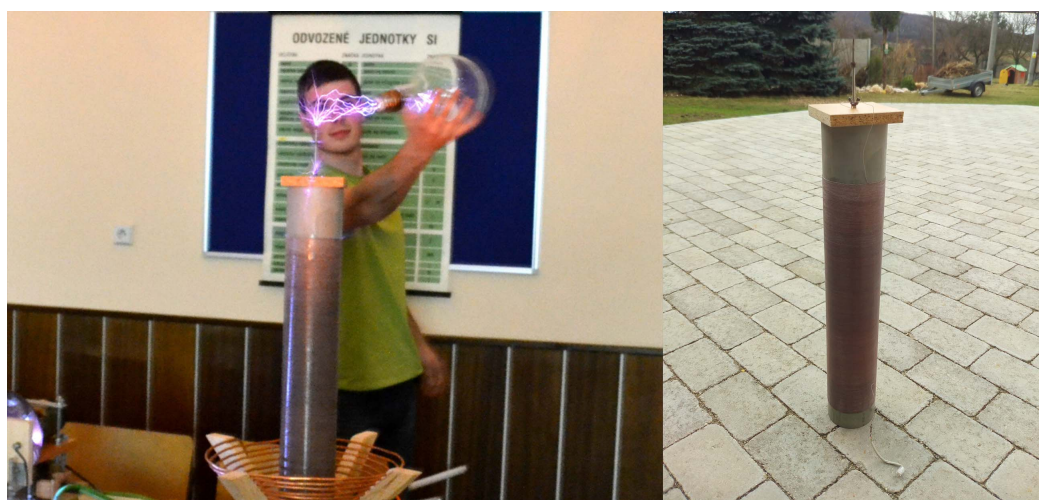


Obrázek 4.44: Omezovač proudu zevnitř a zvěňí.

## 4.11 Teslův transformátor – fotografie



Obrázek 4.45: Primární a sekundární cívka.



Obrázek 4.46: Zapojený TT a zalakovaná sekundární cívka.

## Závěr

Konstrukce Teslova transformátoru klasickým způsobem není tak jednoduchá, jak se na první pohled zdá. Během ní jsem se setkal s mnoha problémy, které bylo nutné řešit. Mé dílčí neúspěchy mě přiměly k dalšímu studiu této problematiky, na základě kterého jsem jednotlivé komponenty pozměnil. Transformátor je proto také vyroben formou jednotlivých modulů, aby nebylo těžké jednotlivé části měnit a nahrazovat novými. Stavba a pokusy s tímto zařízením mě bavily. Zdokonalování tohoto přístroje nekončí, plánuji další vylepšení, jako je audio modulace, doplnění o iontové motory a jiné.

# Literatura

- [1] **Tilbury, Mith** *The Ultimate Tesla Coil Design and Constuction Guide*. USA: Mc Graw Hill, r. 2008, 413 str.
- [2] **Frish, Herbert** *Základy elektroniky a elektronických obvodů*. Praha: SNTL – Nakladatelství technické literatury, r. 1987, 316 str.
- [3] **Trůneček, Jiří** *Základní kvalifikační učebnice – slaboproudá elektronika*. Praha: nakladatelství ROH, r. 1971, 307 str.
- [4] **Rayer** *Nikola Tesla*. <http://rayer.g6.cz/teslatr/teslatr.htm>.
- [5] **Svobodné noviny** *Nikola Tesla*. <http://svobodnenoviny.eu/nikola-tesla>.
- [6] **Elektrosystémy** *Cívky*.  
[http://et-pocitacovesystemy.wz.cz/elektronicke\\_soucastky/civky.html](http://et-pocitacovesystemy.wz.cz/elektronicke_soucastky/civky.html).
- [7] **user.unob.cz** *Transformátory*. <https://user.unob.cz/zaplatilek/ZEL/Tema10.htm>.
- [8] **Danyk** *Kondenzátor*. <http://danyk.cz/tckond.html>.
- [9] **tc pipa.wz.cz** *Teslův transformátor*. [http://tc-pipa.wz.cz/tesluv transformator/teslak.html](http://tc-pipa.wz.cz/tesluv_transformator/teslak.html).
- [10] **elektronika.kvalitne.cz** *Teslův transformátor*.  
<http://elektronika.kvalitne.cz/VN/tesla/TCteorie.html>.
- [11] **www.vutbr.cz** *Teslův transformátor*.  
[https://www.vutbr.cz/www\\_base/zav\\_prace\\_soubor\\_verejne.php?file\\_id=87452](https://www.vutbr.cz/www_base/zav_prace_soubor_verejne.php?file_id=87452).
- [12] **How a Tesla Coil works** *Teslův transformátor*.  
<http://tayloredge.com/reference/Machines/TeslaCoil.pdf>.
- [13] **Wikipedie** *Skin efekt*. <https://cs.wikipedia.org/wiki/Skin-efekt>.
- [14] **fyzika.gjvj.cz** *Leydenská láhev*. <http://fyzika.gjvj.cz/pokusy/pokusy/733.htm>.
- [15] **www.svarbazar.cz** *MOT*.  
<https://www.svarbazar.cz/phprs/view.php?cislocianku=2008031901>.
- [16] **eluc.kr-olomoucky.cz** *tgd*. <https://eluc.kr-olomoucky.cz/verejne/lekce/558>.
- [17] **elektross.gjn.cz** *RLC*. <http://elektross.gjn.cz/sesit/sesit11.html>.