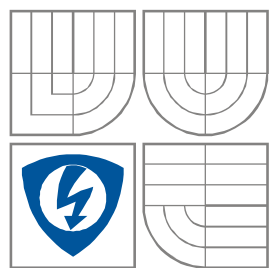


VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY



FAKULTA ELEKTROTECHNIKY A KOMUNIKAČNÍCH
TECHNOLOGIÍ

ÚSTAV VÝKONOVÉ ELEKTROTECHNIKY
A ELEKTRONIKY

FACULTY OF ELECTRICAL ENGINEERING AND COMMUNICATION
DEPARTMENT OF POWER ELECTRICAL AND ELECTRONIC ENGINEERING

NÁVRH TESLOVA TRANSFORMÁTORU PRO VN JISKROVÝ ZDROJ

TESLA COIL PROPOSITION FOR HV SPARK GAP SOURCE

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE
BACHELOR'S THESIS

AUTOR PRÁCE
AUTHOR

PETR SIUDA

VEDOUCÍ PRÁCE
SUPERVISOR

ing. PETR DOHNAL, Ph.D.

BRNO, 2014

ZDE VLOŽIT ZADÁNÍ

Abstrakt

Tato bakalářská práce se zabývá základním seznámením s Nikolou Teslou a s jeho vynálezem Teslova transformátoru a jeho využití v elektrochemické praxi. Práce je rozdělená do čtyř částí. V úvodní části je stručně shrnut život elektrotechnika Nikoly Tesly a rozebrána problematika Teslova transformátoru. Druhá část je zaměřena na možné druhy a buzení Teslova transformátoru, výběr nejvhodnější varianty pro návrh základních komponent polovodičově buzeného teslova transformátoru pro VN jiskrový zdroj. Ve třetí části je popsán návrh budícího obvodu a desky plošných spojů. Dále je zde popsána výroba jednotlivých komponent a jejich základní technická dokumentace. V poslední, čtvrté části je popsáno oživení, měření a odzkoušení funkčního vzorku.

Abstract

This thesis deals with the basic familiarization with Nikola Tesla and his invention of the Tesla coil. The work is divided into four parts. The introductory section briefly summarizes the life of Nikola Tesla Electrical and discussed the issue of a Tesla coil and his utilization for plasmochemical praxis. The second part focuses on the earliest species and Plasma Tesla coil, a selection of the best solution for the design of the basic components of the excited semiconductor Tesla coil for high voltage spark source. In the third part describes the design of the driver circuit and the PCB. Also described herein is the production of individual components and their basic technical documentation. At last, the fourth section describes live-up, measurement and functional testing of the sample.

Klíčová slova

Teslův transformátor

Rezonanční frekvence

Polovodičově buzené

Vysoké napětí

Keywords

Tesla coil

Resonant frequency

Semiconductor activation

High voltage

Bibliografická citace

SIUDA, P. *Návrh Teslova transformátoru pro VN jiskrový zdroj*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, 2014. 45 s. Vedoucí bakalářské práce Ing. Petr Dohnal, Ph.D..

Prohlášení

Prohlašuji, že svou bakalářskou práci na téma **Návrh Teslova transformátoru pro VN jiskrový zdroj** jsem vypracoval samostatně pod vedením vedoucího bakalářské práce a s použitím odborné literatury a dalších informačních zdrojů, které jsou všechny citovány v práci a uvedeny v seznamu literatury na konci práce.

Jako autor uvedené bakalářské práce dále prohlašuji, že v souvislosti s vytvořením této bakalářské práce jsem neporušil autorská práva třetích osob, zejména jsem nezasáhl nedovoleným způsobem do cizích autorských práv osobnostních a jsem si plně vědom následků porušení ustanovení § 11 a následujících autorského zákona č. 121/2000 Sb., včetně možných trestněprávních důsledků vyplývajících z ustanovení § 152 trestního zákona č. 140/1961 Sb.

V Brně dne

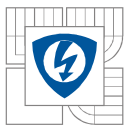
Podpis autora

Poděkování

Děkuji vedoucímu bakalářské práce **Ing. Petru Dohnalovi, Ph.D.** za účinnou metodickou, pedagogickou a odbornou pomoc a další cenné rady při zpracování mé bakalářské práce.

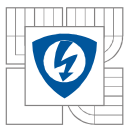
V Brně dne

Podpis autora



Obsah

SEZNAM OBRÁZKŮ.....	7
SEZNAM TABULEK	8
SEZNAM SYMBOLŮ A ZKRATEK.....	9
1 ÚVOD	10
1.1 NIKOLA TESLA	10
2 PRINCIP TESLOVA TRANSFORMÁTORU	12
2.1 TEORETICKÁ FUNKCE TESLOVA TRANSFORMÁTORU	12
2.2 SKUTEČNÝ TESLŮV TRANSFORMÁTOR.....	13
2.3 ZNÁMÉ DRUHY TESLOVA TRANSFORMÁTORU	14
2.3.1 JISKŘIŠŤOVÝ TESLŮV TRANSFORMÁTOR SGTC (SPARK GAP TESLA COIL)	14
2.3.2 ELEKTRONKOU BUZENÝ TESLŮV TRANSFORMÁTOR VTTC (VACUM TUBE TESLA COIL)....	16
2.3.3 POLOVODIČOVĚ BUZENÝ TESLŮV TRANSFORMÁTOR SSTC (SOLID STATE TESLA COIL)	16
2.3.4 TESLŮV TRANSFORMÁTOR BUZENÝ VÝKONOVÝM TRANZISTOREM OLTC.....	17
2.4 TEORETICKÝ NÁVRH SKUTEČNÉHO JISKŘIŠŤOVÉHO (SGTC) TESLOVA TRANSFORMÁTORU	18
2.4.1 NÁVRH SEKUNDÁRNÍ CÍVKY	19
2.4.2 NÁVRH PRIMÁRNÍ CÍVKY	25
2.4.3 NÁVRH PRIMÁRNÍHO REZONANČNÍHO KONDENZÁTORU	28
3 NÁVRH A VÝROBA JEDNOTLIVÝCH KOMPONENT PRO VN JISKROVÝ ZDROJ (PROVEDENÍ SSTC)	30
3.1 VÝROBA SEKUNDÁRNÍ CÍVKY	30
3.2 NÁVRH BUDÍČÍHO OBVODU	31
3.3 NÁVRH DESKY PLOŠNÝCH SPOJŮ	35
3.4 SIMULACE TESLOVA TRANSFORMÁTORU V PROGRAMU SIMPLORER.....	36
4 OŽIVENÍ A ODZKOUŠENÍ.....	40
4.1 MĚŘENÍ NA SSTC.....	40
5 ZÁVĚR.....	42
LITERATURA	43
PŘÍLOHY	45



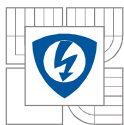
SEZNAM OBRÁZKŮ

<i>Obrázek 1 - Nikola Tesla.....</i>	<i>10</i>
<i>Obrázek 2 - Zjednodušené schma SGTC.....</i>	<i>12</i>
<i>Obrázek 3 - Schema zapojení obvodu TC</i>	<i>14</i>
<i>Obrázek 4 - Možné provedení statického jiskřiště.....</i>	<i>15</i>
<i>Obrázek 5 - Provedení rotačního jiskřiště</i>	<i>15</i>
<i>Obrázek 6 - Schematické zapojení SGTC.....</i>	<i>16</i>
<i>Obrázek 7 - Zapojení s jedním IGBT tranzistorem</i>	<i>17</i>
<i>Obrázek 8 - Zapojení OLTC s IGBT tranzistorem</i>	<i>18</i>
<i>Obrázek 9 - Náskres pro výpočet délky vodiče pro jeden závit</i>	<i>20</i>
<i>Obrázek 10 - Náskres pro výpočet mezery dvěma závity.....</i>	<i>21</i>
<i>Obrázek 11 - Náskres toroidního jiskřiště</i>	<i>24</i>
<i>Obrázek 12 - Schéma zapojení měření rezonanční frekvence.....</i>	<i>31</i>
<i>Obrázek 13 - Polovodičový polomost.....</i>	<i>31</i>
<i>Obrázek 14 - Pouzdro obvodu TC4427</i>	<i>33</i>
<i>Obrázek 15 - Sekundární cívka SSTC</i>	<i>33</i>
<i>Obrázek 16 - Schéma polovodičového budiče.....</i>	<i>34</i>
<i>Obrázek 17 - Deska plošných spojů</i>	<i>35</i>
<i>Obrázek 18 - Přední strana osazené DPS.....</i>	<i>35</i>
<i>Obrázek 19 - Zadní strana osazené DPS</i>	<i>36</i>
<i>Obrázek 20 - Výkonová část budiče</i>	<i>36</i>
<i>Obrázek 21 - Schéma zapojení obvodu pro simulaci</i>	<i>37</i>
<i>Obrázek 22 - teoretický průběh napětí na primární cívce.....</i>	<i>38</i>
<i>Obrázek 23 - Teoretický průběh proudu primární cívkou.....</i>	<i>38</i>
<i>Obrázek 24 - Teoretický průběh napětí na výstupu TC.....</i>	<i>39</i>
<i>Obrázek 25 - Naměřené průběhy napětí a proudu na SSTC</i>	<i>41</i>



SEZNAM TABULEK

<i>Tabulka 1 - Nagaokova tabulka pro určení konstanty k vzduchové jednovrstvé cívky</i>	<i>22</i>
--	-----------

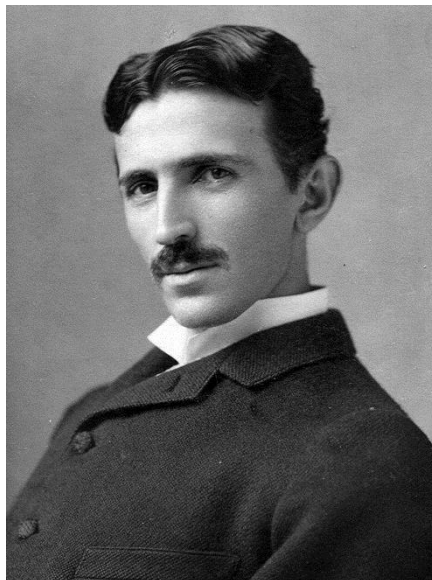


SEZNAM SYMBOLŮ A ZKRATEK

C	kapacita	[F]
L	indukčnost	[H]
f	frekvence	[Hz]
I	proud	[A]
U	napětí	[V]
W	energie	[J]
R	odpor	[Ω]
B	magnetická indukce	[T]
P	výkon	[W]
l	délka	[m]
D	průměr	[m]
r	poloměr	[m]
H	výška	[m]
n	počet závitů	[-]
T	teplota	[°C]
ρ	měrný elektrický odpor	[Ωm]
VF	vysoká frekvence	
VN	vysoké napětí	
SPM	počet sepnutí za minutu	
J	jiskřiště	
TC	Teslův transformátor	
SSTC	Polovodičově buzený TC	
MCU	mikroprocesor	

1 ÚVOD

1.1 Nikola Tesla



Obrázek 1 - Nikola Tesla

Nikola Tesla (1856-1943) se narodil v jedné malé vesnici Similjan v Srbsku. V té době Srbsko patřilo Rakousko-Uhersku. Když mu bylo 21 let, začal studovat na technické škole ve Štýrském Hradci (dnes toto město známe jako Graz). Na této škole se poprvé seznámil se stejnosměrným strojem, na kterém ovšem viděl spoustu nevýhod. Již jako mladý student pojal myšlenku sestavit elektrický motor bez jakékoli komutace. Jako student zavítal i do Prahy, kde studoval na Karlově Univerzitě v roce 1880. Své studium ukončil v Budapešti, kde také přišel s myšlenkou točivého magnetického pole.

Po škole se Nikola Tesla uchýlil do Paříže, kde pracoval jako projektant a konstruktér elektrických strojů v továrně patřící Edisonovi. I přes to, že se „Continental Edison Co“ zabývala konstrukcí stejnosměrných strojů, Nikola Tesla už v té době sestavil první asynchronní motor a snažil se ho prosadit. Zklamání ovšem přišlo rychleji než jakýkoli úspěch, o asynchronní motor nebyl žádný zájem. Tesla ovšem přetrvával a odcestoval do Ameriky, kde se dále snažil o prosazení svého vynálezu. Začal pracovat v New Yorku u firmy „Edison Machine Works“ jako projektant elektrických strojů, ale ani zde se svým vynálezem nijak nepochodil. Edison byl totiž přesvědčen, že budoucnost náleží jeho stejnosměrnému proudu, a že pro střídavý stroj by nebylo žádné uplatnění. Tesla dokázal zvýšit účinnost Edisonových stejnosměrných strojů, načež byl podveden a vyhozen z firmy. Byl nucen založit si vlastní společnost a to „Tesla Electric Co“, ale ani na své půdě ze začátku nenacházel podmínky pro realizaci svého objevu a zabýval se různými vylepšeními pro obloukové lampy. Tesla se však chtěl věnovat střídavým strojům, což se nelíbilo jeho investorům a přišel o zdroj financí.



Teslovi se podařilo navázat spolupráci s Georgem Westinghousem, který byl generální ředitel „Westinghouse Electric Manufacturing Co“ v Pittsburgu. Tato firma se spolu s Teslou zabývala stavbou střídavých elektráren a rozvodem elektrického proudu. Westinghouse nabídl Teslovi 1 000 000 USD za všechny jeho patenty, mimo jiné i za patent točivého magnetického pole a za každou jednu koňskou sílu elektrického výkonu 1USD. Tesla nabídku přijal a byl jmenován na post ředitele vývojové laboratoře. Když se firma později dostala do finanční tísně, Tesla se vzdal všech nároků na odměny.

Po nějakém čase se asynchronní motor značně rozšířil a učinil z Tesly slavného člověka. Přednášel na prestižních amerických i evropských vysokých školách, kde sklízel veliký úspěch. Tesla napojen svým obrovským úspěchem přerušuje spolupráci s Westinghousem a přestává se zajímat o silnoprůdovou elektrotechniku.

Nyní začíná druhá éra Teslovi činnosti, kdy založil laboratoř vysokého napětí a začal experimentovat s vysokonapěťovými generátory. Dosahoval elektrických výbojů až několik desítek metrů dlouhých aniž by ubližovaly lidskému tělu. Používal k tomu vzduchový transformátor složený ze dvou souosých cívek, které jsou v rezonanci na frekvenci 33kHz tzv. Teslův Transformátor. Tyto a mnohé další experimenty přinášely Teslovi obdiv veřejnosti. Veřejnost byla utvrzována myšlenkou, že Tesla dokáže přenášet velké množství elektrické energie bez nutnosti výstavby elektrického vedení, tzn. bezdrátově. I když by se o jeho vysokonapěťových experimentech a o úmyslu bezdrátového přenosu energie dalo pochybovat, musíme ocenit jeho objevy v oboru bezdrátové telegrafie. Tesla používal velmi dlouhé netlumené vlny, které nebyl nikdo jiný schopen využít. Marconi nebo Popov realizovali jiskrovou telegrafii, která byla založená na krátkých vlnách. Teslovi se podařilo na začátku 90. let 19. století sestavit v New Yorku vysílačku s dosahem až 40km a předvedl vodní člun, který byl řízen dálkově elektromagnetickými vlnami ze břehu. Používal uzemněnou anténu vysílače i přijímače. V roce 1900 začal Tesla budovat obrovskou „světovou stanici“ na Long Islandu, kterou nazýval Wardencliff. Táto vysílačka měla mít vysílací výkon 1,5MW a používala polokulovou anténu, která připomínala kopuli o průměru 20m. Tato kopule byla umístěna na věži vysoké 57m. Táto stavba stála Teslu vyčerpání veškerých jeho finančních zdrojů, a proto byla v roce 1901 zastavena. V tom samém roce byl Tesla předběhnut Marconim, který zrealizoval krátkovlnnou mnohem jednodušší vysílačku. Tesla po této prohře přestal s výzkumem a budováním rádiového spojení a uchýlil se do soukromí.

Teslovi tedy nešlo pouze o elektrický bezdrátový přenos informace, ale o bezdrátový přenos energie. Tento přenos v měřítku jaký Tesla zamýšlel, dodnes není zrealizován a je považován spíše za Sci-fi. Tesla však za svůj život vytvořil spoustu patentů a vynálezů, jejichž technické plány jsou dodnes utajované a veřejnosti nepřístupné. Byl to významný elektrotechnik a bez jeho asynchronního motoru si dnešní dobu neumíme představit [1], [2].

2 PRINCIP TESLOVA TRANSFORMÁTORU

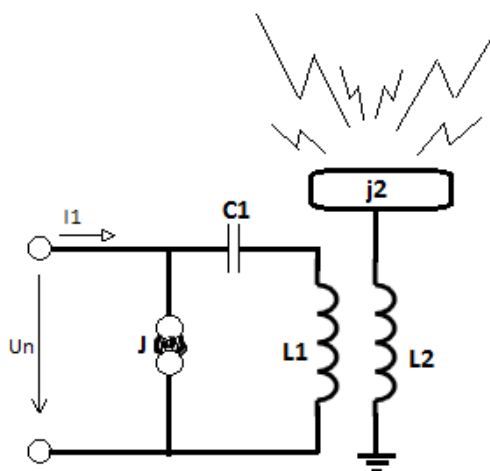
Teslův transformátor je klasický transformátor, složený ze dvou souosých vzduchových cívek pracujících v rezonanci, který dokáže generovat velmi vysoké napětí. Teslův transformátor byl vynalezen na konci 19. století a jeho prvotní využití mělo být jako primární zdroj pro dálkový přenos elektrické energie bez vodičů [3], [4].

2.1 Teoretická funkce Teslova transformátoru

Jelikož se jedná o vzduchový transformátor, může být jeho obvod rozdělen na dvě části. Na primární část, která se skládá ze samotné primární indukčnosti L_1 (H), primární rezonanční kapacity C_1 (F) a z jiskřiště J . Tato část musí být připojena ke zdroji elektrické energie. Na tento zdroj jsou kladeny vysoké požadavky, protože musí být dostatečně tvrdý (odvíjí se od požadovaného výkonu transformátoru a musí dosahovat dostatečně vysokého napětí U_n (V).

Sekundární část obvodu se skládá pouze ze sekundární indukčnosti L_2 (H) a ze sekundárního jiskřiště j_2 .

Po připojení napájecího zdroje začne procházet proud I_1 přes primární indukčnost a přes primární rezonanční kapacitu do doby, než dosáhne napětí na primární kapacitě hodnoty napájecího zdroje. V tomto okamžiku dochází na jiskřišti k přeskoce a z obvodu se stává paralelní rezonanční LC obvod, který se rozkmitá na frekvenci danou hodnotami základních obvodových prvků. Tento prudký kmitající proudový ráz vyvolaný vybitím kondenzátoru do primární indukčnosti vyvolá v primární cívce magnetickou indukci B (T). Primární cívka je naladěna na stejnou rezonanční frekvenci jako obvod na primární straně, jedná se o tzv. vázané obvody. Napětí naindukované na sekundární cívce považujeme za výstup transformátoru. Po poklesu napětí na jiskřišti přestane primární obvod kmitat a děj se celý opakuje od začátku. Nejvíce energie se přenesne při totožné, nebo alespoň blízké hodnotě rezonanční frekvence primárního a sekundárního obvodu. Sám Nikola Tesla své transformátory provozoval pod hranicí jejich rezonanční frekvence [1], [3], [4].



Obrázek 2 - Zjednodušené schéma SGTC

2.2 Skutečný Teslův transformátor

Samotná Teslův transformátor je, jak už bylo uvedeno výše složen se základních R , L , M a C prvků. Na některé z těchto prvků jsou v praxi kladeny velice vysoké požadavky. Tyto požadavky jsou kladeny zejména na primární rezonanční kapacitor C_1 , který musí být stavěný na vysoké napětí, musí dosahovat požadované kapacity v řádech nF a musí dobře snášet pulsní vybíjení při vysokých frekvencích řádově 100kHz.

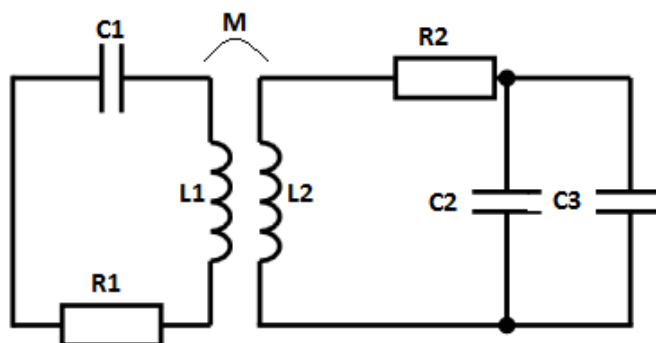
Primární cívka je zhotovená z měděného vodiče značného průřezu, který se odvíjí od požadovaného výkonu samotného transformátoru například 10mm². Tato cívka může být provedena v několika variantách, a to ve tvarech

- 1, ploché cívky
- 2, válcové cívky (solenoid)
- 3, kuželové cívky

Indukčnost L_2 je provedena jako válcová cívka, která je vinutá v jedné vrstvě se značným počtem závitů přibližně (500-2500)z. Její poměr a výška h ku průměru d by měl odpovídat, dle uvažovaného výkonu transformátoru, přibližně (5-10):1. Tato cívka je navinuta tenkým lakovaným drátem závit vedle závitu. Jak u cívky sekundární, tak u primární uvažujeme i nějakou parazitní rezistivitu, která nám však nijak nevádí. Kapacita C_3 je tvořena kapacitou sekundárního jiskřiště, často toroidu či koule, vůči zemi. Její hodnotu určuje velikost toroidu nebo koule, ale obvykle dosahuje maximálně řádů desítek pF.

Vzájemná indukčnost M , je vytvářena vzájemnou vazbou primární a sekundární cívky L_1 a L_2 , její velikost není nikterak velká, závisí na velikosti a uspořádání cívek a dosahuje maximálních hodnot kolem 0,3. Vzájemná indukčnost dosahuje maximálních hodnot tehdy, kdy je osa primární cívky kolineární s osou sekundární cívky, která se nachází ve středu cívky primární.

Primární i sekundární obvod Teslova transformátoru disponuje značnými parazitními prvky, a to zejména kapacitou a odporem. V primárním odporu se setkáváme s přechodovými odpory a s vlastní rezistivitou použitých vodičů, které nám tlumí kmity rezonanční oscilace. Hodnoty této parazitní rezistivity se pohybují v desetinách až jednotkách Ω . Parazitní kapacitu v primárním obvodu neuvažujeme, protože mezi závitová kapacita primární cívky je v porovnání s kapacitou rezonančního kondenzátoru velice dobře zanedbatelná. V sekundárním obvodu ovšem musíme uvažovat se všemi parazitními jevy. Jelikož je pro navinutí primární cívky potřeba hodně dlouhý vodič, uvažujeme s jeho měrnou rezistivitou a výsledný odpor sekundární cívky dosahuje až 300 Ω . Dále uvažujeme s mezi závitovou kapacitou C_3 , která při vinutí v jedné vrstvě vodiči hned u sebe dosahuje značných hodnot. V závislosti na počtu závitu může tato kapacita dosáhnout až 10pF [1], [2], [3], [4].

*Obrázek 3 - Schema zapojení obvodu TC*

2.3 Známé druhy Teslova transformátoru

Pro realizaci samotného Teslova transformátoru se využívá značné množství různých zapojení, způsobu buzení primární cívky, řízení výkonu atd. Veškerá zapojení, které budou níže uvedeny patří mezi nejpoužívanější [6].

2.3.1 Jiskřišťový Teslův transformátor SGTC (Spark Gap Tesla Coil)

Jedná se o základní zapojení Teslova transformátoru, které používal sám Nikola Tesla. Tento typ transformátoru lze napájet jak střídavým, tak stejnosměrným napětím. Je však nutno podotknout že hladina napájecího napětí by se měla pohybovat v řádech kV. Tento typ zapojení lze velice dobře uplatnit pro miniaturní modely ale i pro transformátory značného výkonu (jednotky kW).

Jak z textu výše vyplývá, největší úskalí tohoto zapojení bude získat kvalitní zdroj pro napájení samotného transformátoru. Nejčastěji se potřebujeme pohybovat v napěťové hladině kolem 10kV a dodávaný proud ze zdroje by neměl být nižší než 0,1A v závislosti na požadovaném výkonu transformátoru. Často se tento zdroj realizuje pomocí rozptylového transformátoru pro napájení neonových trubic, transformátorem z mikrovlnné trouby MOT doplněný o patřičný násobič napětí nebo přímo VN transformátorem. Každý z uvedených napájecích zdrojů má své výhody i nevýhody, kterými se budeme zabývat později.

Další velice vysoké nároky jsou kladeny na primární rezonanční kondenzátor C_1 , který musí zvládat špičkové napětí, které se na něm může objevit a také musí přenášet pulsní proud na vysokých kmitočtech řádově 100kHz.

Jiskřiště může být základně ve dvou provedeních a to:

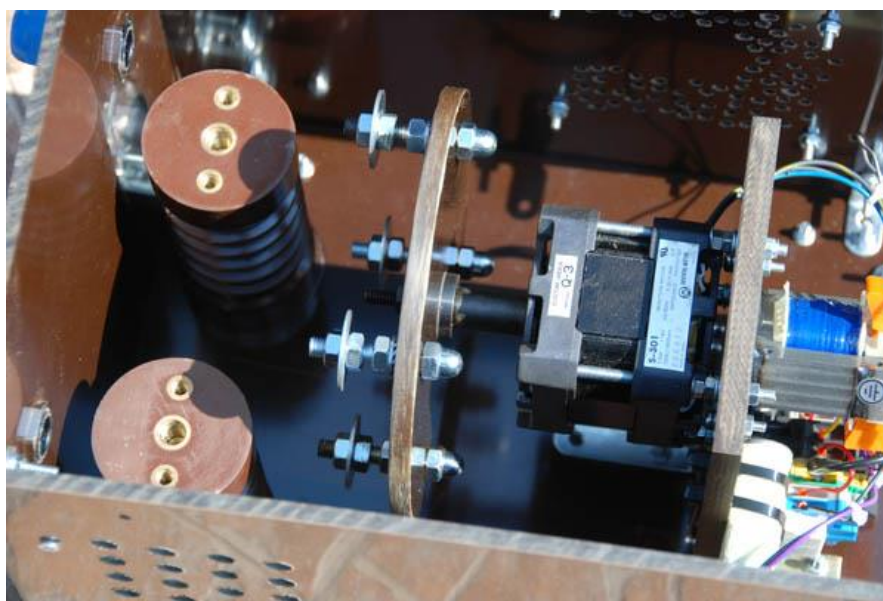
A, Statické – Tento typ jiskřiště se používá spíše pro transformátory velice malých výkonů (maximálně stovky W). Jedná se o elektrody, jejichž vzájemná vzdálenost udává minimální přeskokové napětí. Nevýhodou tohoto typu jiskřiště je značné přehřívání, které způsobuje ionizaci vzduchu, a zhoršení elektrických vlastností samotného materiálu. Po určité

době není schopno jiskřiště přenést dostatečně velký proud a může dojít k trvalému zapálení oblouku mezi elektrodami vlivem velké výstupní práce elektronu z použitého kovu.

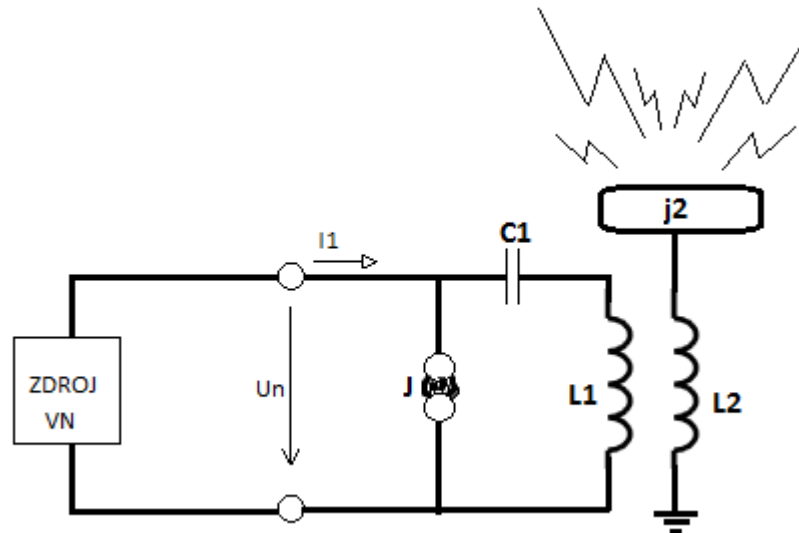


Obrázek 4 - Možné provedení statického jiskřiště

B, Rotační – Jiskřiště je realizováno jako pohyblivé, na nevodivém kotouči, který je připevněn k rotačnímu pohonu, jsou na okraji v určitém rozestupu nalisovány nýty. Tento kotouč se otáčí mezi dvojicí elektrod, které jsou statické. Při míjení kovového nýtu s dvojicí elektrod dochází k porušení elektrické pevnosti a k přeskočení elektrického výboje, který není omezený napětíovou hladinou, protože se snažíme dosáhnout co nejmenší vzdálenosti mezi nýtem a elektrodou. Tím dosahuje jiskřiště a celý transformátor vyšší účinnosti. Jiskřiště se otáčením ochlazuje a nedochází k nežádoucím jevům typu přehřívání a zhoršování elektrických vlastností použitého materiálu [5], [6], [7], [11].



Obrázek 5 - Provedení rotačního jiskřiště



Obrázek 6 - Schematické zapojení SGTC

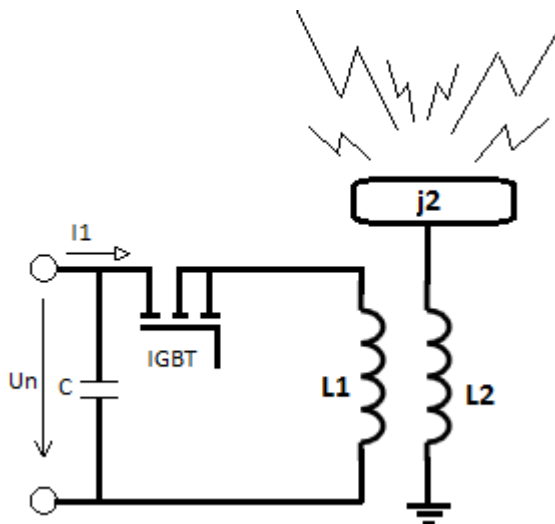
2.3.2 Elektronkou buzený Teslův transformátor VTTC (Vacum Tube Tesla Coil)

Tento typ zapojení je realizován s výkonovou elektronkou, která se stará o buzení primární cívky a je zapojena ve zpětnovazebním režimu. Nevýhodou je, že potřebujeme další vinutí, ze kterého budeme odebírat zpětnovazební signál. Výkon těchto transformátorů je omezený výkonovou řadou elektronek, která se pohybuje v desítkách maximálně stovkách W. Pro výkonnější aplikace se používá paralelní spojení elektronek. Celý tento transformátor napájíme zejména z vysokonapěťového transformátoru 0,2/2,2kV, který lze získat z mikrovlnné trouby. Toto napětí 2,2kV je usměrněno a částečně vyhlazeno kondenzátorem. VTTC je tím pádem schopno produkovat 50-100 impulsů za vteřinu, což ovšem způsobuje značné přehřívání anody elektrony. Z toho důvodu se konstruují různé regulátory, které jsou schopny propouštět například každou druhou periodu síťového napětí. Na rozdíl od klasického SGTC je tento transformátor tišší, náboje dosahují vyšší teploty a moc se nevětví. Nižší hlučnost je způsobena postupným narůstáním sekundárního napětí v závislosti na napětí primární strany [5], [6], [7], [11].

2.3.3 Polovodičově buzený Teslův transformátor SSTC (Solid State Tesla Coil)

Polovodičově buzený TC je jedním z nejvýkonnějších. Pro spínání budicího proudu se používají tranzistory IGBT (Insulated Gate Bipolar Transistore) nebo MOS Fet, které se vyznačují schopností spínat vysoké proudy na frekvencích v řádu 100kHz. 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 polo můstkové nebo můstkové zapojení [5], [6], [7], [11].

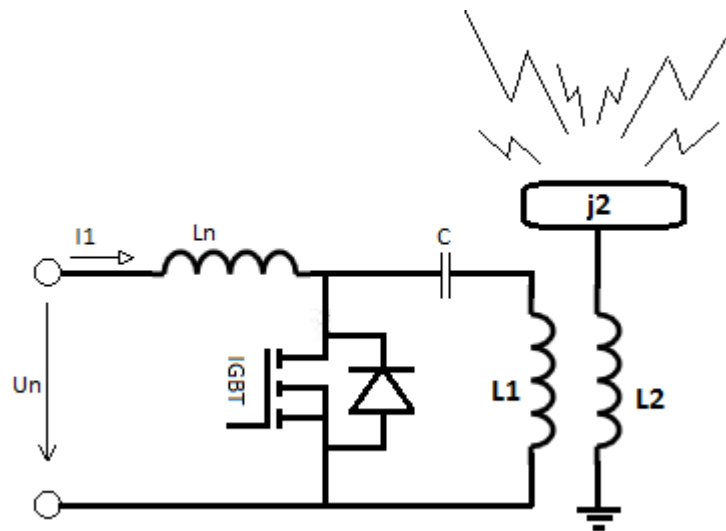


Obrázek 7 - Zapojení s jedním IGBT tranzistorem

2.3.4 Teslův transformátor buzený výkonovým tranzistorem OLTC

OLTC (Off Line Tesla Coil) V podstatě se jedná o totožné zapojení jako u SGTC, s tím rozdílem, že je jiskřiště nahrazeno výkonovým tranzistorem. Pro tyto aplikace se výborně hodí tranzistory IGBT, které dokážou spínat proudy až několik kA a mohou pracovat v napěťových hladinách více než 6kV. Transformátor je napájen přímo ze sítě usměrněným napětím 230/400V. Primární cívka je realizována pouze jako jeden závit drátem velkého průřezu aby se dosáhlo co nejnižší indukčnosti. V závislosti na nízké indukčnosti primární cívky lze používat velkou kapacitu primárního kondenzátoru, což je pro nízké napětí výhodou.

Transformátor je v případě napájení z jedné fáze připojen na napětí meziobvodu maximálně 325V. Mezi samotným napájecím zdrojem a transformátorem je nutno umístit patřičnou tlumivku, která zabrání zkratování zdroje přes sepnutý tranzistor. Také se přes ni nabíjí rezonanční kondenzátor. Po sepnutí tranzistoru se rezonanční obvod tvořící primární kapacita a primární indukčnost uzavře a začne kmitat. Při jedné půlperiodě teče proud přes tranzistor a při druhé půlperiodě přes paralelní nulovou diodu. Samotný tranzistor je řízen obdélníkovým signálem, kterým určujeme počet impulzů za sekundu. Nejčastěji se volí hodnota kolem 5kHz, musíme zajistit, aby délka trvání impulzu nepřesahovala délku trvání tlumených kmitů primárního rezonančního obvodu [5], [6], [7], [11].



Obrázek 8 - Zapojení OLTC s IGBT tranzistorem

2.4 Teoretický návrh skutečného jiskřišťového (SGTC)

Teslova transformátoru

Pro teoretický návrh a Teslova transformátoru byl vybrán klasický Teslův transformátor s rotačním jiskřištěm, který konstruoval sám Nikola Tesla.

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

- Je potřeba 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 byl primární obvod, který tvoří paralelní RLC rezonančním obvodem naladěný na stejnou, nebo alespoň podobnou frekvenci jako je rezonanční frekvence 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 však zdroj nedosahoval konstantního výkonu, kondenzátor by se na plné napětí (přeskovou napětí jiskřiště) dostával v nepravidelných časech a docházelo by k potlačení rezonance. Tesla tuto skutečnost nazýval jako že „Zdroj musí mít konstantní tlak“.
- Spínací frekvence jiskřiště musí být optimální, lze s ní částečně regulovat výstupní výkon Teslova transformátoru.
- Důležitou podmínkou je zajistit optimální čas, ve kterém se má stát přeskok. Tento čas závisí na použitém napájecím zdroji. Jinými slovy řečeno množství energie, které

vteče do kondenzátoru za čas t , by mělo odpovídat polovině kapacity násobené kvadrátem napětí. Pokud máme k dispozici pouze slabý zdroj elektrické energie, je nutno spínací čas optimalizovat tak, aby se rezonanční kapacita stíhala nabíjet na požadované napětí. Tuto optimalizaci provedeme zvýšením přeskokové vzdálenosti mezi elektrodami, nebo snížením otáček rotačního jiskřiště.

- Sled přeskoků jiskřiště by měl být pravidelný, což je u stacionárního jiskřiště téměř nemožné zajistit, proto se s oblibou využívá rotační jiskřiště, kde je počet přeskoků dán otáčkami kotouče a počtu kontaktů.
- Pokud budou splněny všechny výše uvedené podmínky, dostáváme se do plynulého chodu Teslova transformátoru, kterého se budeme snažit dosáhnout.

Všechny podmínky, které byly uvedeny výše, se dají zrealizovat u jak jiskřišťového TC, tak u Teslova transformátoru buzeného polovodičovými součástkami. U Teslova transformátoru SSTC buzeného polovodičovými součástkami je dodržení všech podmínek daleko jednodušší a přesnější než u transformátoru s jiskřištěm. Z tohoto důvodu byl vybrán SSTC transformátor jako vhodný pro použití v aplikaci VN jiskrový zdroj.

Teslův transformátor je tedy generátor vysokofrekvenčního velmi vysokého napětí. Jeho využití je v elektrotechnice velice omezené, nám však jde pouze o ověření jeho činnosti a praktické zkušenosti a informace z této práce budou dále aplikovány pro konkrétní aplikaci, která už se bude dát aktivně a efektivně využívat [8], [9], [10], [11].

Uvedeme si pár možností, ke kterým je možné využít Teslův transformátor:

- Generátor VF-VN
- Výroba zvukových a hlavně světelných efektů připomínající blesky
- Výroba ozonu O_3

2.4.1 Návrh sekundární cívky

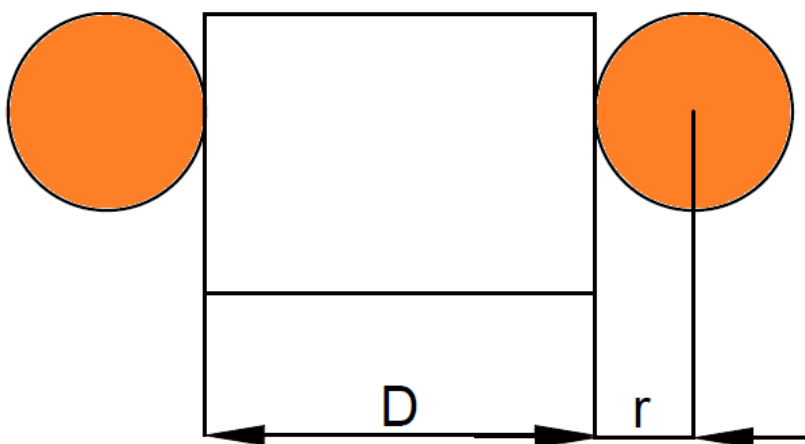
Sekundární cívka je válcová cívka navinuta v jedné vrstvě závit vedle závitu. Její elektrické vlastnosti nám udávají rezonanční frekvenci f_0 . Jelikož její hlavní vlastnost je velká indukčnost a poměrně malá rezistivita a kapacita. Rezistivita odpovídá samotnému odporu použitého vodiče, který lze vypočítat z délky použitého vodiče a měrné rezistivity.

V návrhu sekundární indukčnosti může být postupováno různými způsoby, dle požadovaných parametrů. Byl zvolen návrh postavený na základě námi požadovaných rozměrů. Musely být dodrženy určité zákonitosti:

- Cívka by měla být realizována v poměru výška H ku průměru D cca. (5-10):1 Aby byla dosažena dostatečná vzdálenost mezi elektrodou a zemí. Je nutné zajistit

dostatečnou mezi závitovou izolační schopnost tak, aby nedocházelo k průrazu mezi jednotlivými závity

- Rezonanční frekvence by se měla teoreticky přibližovat k námi požadované hodnotě, kterou však 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 symbolizuje kapacitní vazbu vůči zemi [10], [11], [12], [2].



Obrázek 9 - Náčrtek pro výpočet délky vodiče pro jeden závit

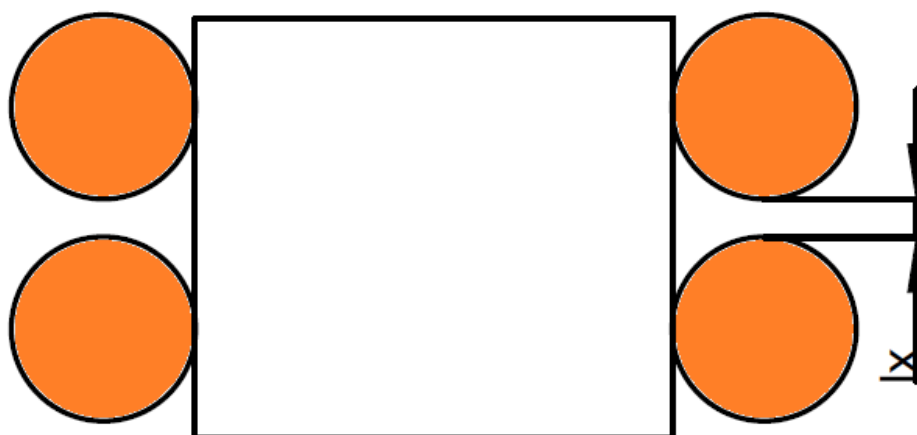
Podle výše uvedeného náčrsku může být vypočítána délka drátu, která bude potřebná na jeden závit sekundárního vinutí [12], [10].

$$l_{1ot} = 2 * \pi * \left(\frac{D}{2} + r \right) [m] \quad \text{Rov. 1}$$

Kde: D – průměr kostry sekundární cívky

r – poloměr námi použitého vodiče

Pokud bude potřeba počítat celkovou délku potřebného vodiče, mělo by být uvažováno i s tloušťku izolace samotného vodiče a vzduchovou mezeru mezi vodiči.



Obrázek 10 - Náčrtek pro výpočet mezery dvěma závity

Celková mezera l_x je dána tloušťkou izolace vodiče a vzduchovou mezerou mezi vodiči.

$$l_x = 2 * l_{iz} + l_{vz} [m] \quad \text{Rov. 2}$$

Kde: l_x – celková mezera mezi dvěma závity

l_{iz} – tloušťka izolace na jednom vodiči

l_{vz} – tloušťka vzduchové mezery mezi dvěma závity

Ve vztahu (2) je uvažováno $2 * l_{iz}$ což vyjadřuje dvojnásobnou tloušťku izolačního materiálu při naprosté těsnosti dvou závitů a l_{vz} , která vyjadřuje tloušťku vzduchové mezery mezi dvěma závity. Tato vzdálenost je závislá na způsobu a preciznosti vinutí závitů. Jako orientační hodnota byla použita tabelována vzdálenost, která se uvádí ke konkrétnímu druhu zpracování a vinutí cívky [12], [10].

Tato vzdálenost l_x má největší vliv na parazitní „mezi závitovou“ kapacitu sekundárního vinutí. Může být zavedeno zjednodušení, že $l_x \ll 2r$ a vzdálenost l_x zanedbat.

Celkovou délku poté bude vypočítána jako:

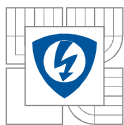
$$l = l_{1ot} * n [m; -] \quad \text{Rov. 3}$$

Kde: l_{1ot} – délka vodiče potřebná pro jeden závit

n – počet závitů

Celková výška jedné vrstvy závitů sekundární cívky může být vypočítána dle následujícího vztahu

$$H = (2r + l_x) * n \sim 2r * n [m] \quad \text{Rov. 4}$$



Nyní byly shrnuty všechny základní vztahy pro navinutí sekundární cívky, bude potřeba zjistit její elektrické parametry a to indukčnost L_s (H) a vlastní kapacitu C_p (F).

Indukčnost sekundární cívky může být změřena, nebo vypočítat z následného vztahu.

$$L_s = \frac{A^2 * n^2}{9A + 10H} [\mu H] \quad \text{Rov. 5}$$

Nebo může být využit tzv. Nagoakův vztah [6]:

$$L_s = k \frac{D^2}{H} n^2 10^{-3} [\mu H; cm^2; cm; -] \quad \text{Rov. 6}$$

Kde: L_s – Indukčnost sekundární cívky

A – poloměr sekundárního vinutí ($0,5D+r$)

n – počet závitů

H – výška vinutí

D – průměr cívky

k – konstanta, která přihlíží k rozložení magnetického pole v závislosti poměru cívky D/H určíme ji u tabulky (1)

D/H	k	D/H	K	D/H	K	D/H	K	D/H	k
0,00	9,87	1,00	6,79	2,00	5,19	4,00	3,61	7,00	2,55
0,05	9,66	1,05	6,69	2,10	5,07	4,10	3,56	7,20	2,50
0,10	9,46	1,10	6,59	2,20	4,96	4,20	3,50	7,40	2,46
0,15	9,27	1,15	6,49	2,30	4,85	4,30	3,46	7,60	2,42
0,20	9,08	1,20	6,39	2,40	4,75	4,40	3,41	7,80	2,37
0,25	8,90	1,25	6,30	2,50	4,66	4,50	3,36	8,00	2,34
0,30	8,72	1,30	6,21	2,60	4,57	4,60	3,32	8,50	2,24
0,35	8,56	1,35	6,12	2,70	4,48	4,70	3,28	9,00	2,16
0,40	8,39	1,40	6,04	2,80	4,39	4,80	3,24	9,50	2,08
0,45	8,23	1,45	5,95	2,90	4,31	4,90	3,20	10,00	2,01
0,50	8,07	1,50	5,87	3,00	4,24	5,00	3,16	11,00	1,88
0,55	7,93	1,55	5,79	3,10	4,16	5,20	3,08	12,00	1,77
0,60	7,78	1,60	5,72	3,20	4,09	5,40	3,01	13,00	1,67
0,65	7,64	1,65	5,65	3,30	4,02	5,60	2,94	14,00	1,58
0,70	7,61	1,70	5,58	3,40	3,96	5,80	2,88	15,00	1,51
0,75	7,38	1,75	5,51	3,50	3,89	6,00	2,82	16,00	1,44
0,80	7,26	1,80	5,44	3,60	3,83	6,20	2,76	17,00	1,38
0,85	7,13	1,85	5,37	3,70	3,77	6,40	2,70	18,00	1,32
0,90	7,02	1,90	5,31	3,80	3,72	6,60	2,65	19,00	1,27
0,95	6,90	1,95	5,25	3,90	3,66	6,80	2,60	20,00	1,22

Tabulka 1 - Nagaokova tabulka pro určení konstanty k vzduchové jednovrstvé cívky

I když jsme schopni celkem přesně vypočítat indukčnost sekundární cívky, je dobré si výpočet ověřit měřením a dále počítat s naměřenými hodnotami.

Bylo potřeba si také vypočítat odpor vinutí jak pro stejnosměrnou, tak pro střídavou složku proudu.

Pro stejnosměrnou složku platí známý vztah pro výpočet rezistivity vodiče.

$$R_{DC} = l * \rho_{20} * (1 + (T_o - 20^{\circ}\text{C}) * \alpha) [\Omega] \quad \text{Rov. 7}$$

Kde: R_{DC} – celkový odpor pro stejnosměrnou složku proudu

l – celková délka vodiče

ρ_{20} – měrná rezistivita při 20°C

T_o – teplota okolí

α – teplotní součinitel elektrického odporu pro daný materiál

Odpor pro střídavou složku proudu může být vypočítán se zjednodušením, kdy bude uvažován vysokofrekvenční proud, a tudíž bude docházet pouze ke skinefektu.

$$R_{AC} = \frac{9,96 * 10^{-7} * \sqrt{f_0}}{d} [\Omega] \quad \text{Rov. 8}$$

Efektivní odpor vodiče při skin efektu (když je výrazně tlustší než δ) odpovídá tomu jako by proud procházel pouze vrstvou s tloušťkou δ . Můžeme tedy zhruba uvažovat průřez δ krát průměr vodiče. Válcový vodič s průměrem D velkým ve srovnání s δ má odpor přibližně rovný válcové trubce s tloušťkou stěny δ . Při měrném odporu vodiče ρ platí pro odpor při průchodu střídavého proudu vodičem délky l [13]:

$$R_{AC} \approx \frac{\rho * l}{\pi(D - \delta)\delta} \approx \frac{\rho * l}{\pi D \delta} \quad \text{Rov. 9}$$

Kde: R_{AC} – odpor sekundární cívky pro vysokofrekvenční proud

f_0 – rezonanční frekvence

l – délka vodiče

D – průměr vodiče

δ – hloubka vniku $\delta = \sqrt{\frac{2\rho}{\omega\mu}}$

Kde: ρ – rezistence vodiče

ω – úhlová rychlost proudu

μ – absolutní magnetická permeabilita vodiče

Celkový odpor je dán paralelní kombinací R_{DC} a R_{AC} .

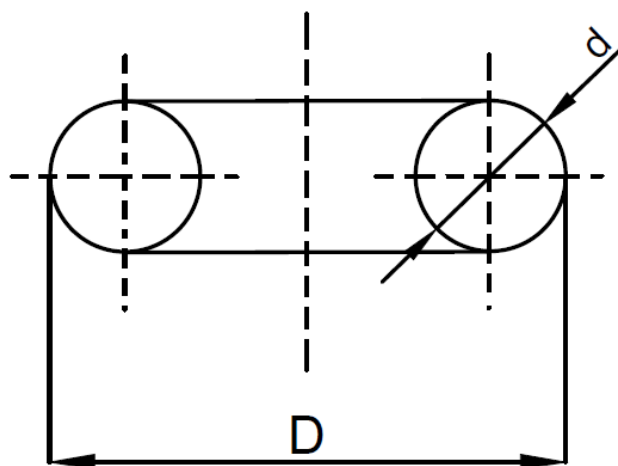
Dále bylo potřeba znát samotnou rezonanční frekvenci námi navinuté cívky. Od této frekvence se bude odvíjet další postup při návrhu zbylých komponent. Rezonanční frekvenci sekundární cívky ovlivňuje velké množství faktorů, avšak velký vliv na samotnou frekvenci má sekundární jiskřiště j_2 , které zároveň slouží jako kapacita vůči okolí a zemi. Nejvyšší kapacita toroidu může být dosažena pouze při určitém, daném poměru d/D a to konkrétně když $d = 30\%$ z D [3], [10].

Pro výpočet kapacity toroidu může být využit vzorec uváděný v literatuře:

$$C_{toroid} = 0,556 * \left(1,2781 - \frac{d}{D}\right) * \sqrt{\pi * d * (D - d)} [pF] \quad \text{Rov. 10}$$

Kde: d – průměr použité trubky

D – průměr celého toroidu



Obrázek 11 - Náčrt toroidního jiskřiště

Pro výpočet sekundární rezonanční frekvence již byly zjištěny veškeré informace. V případě, kdy byla zanedbána mezi závitová vlastní kapacita sekundární cívky, může být zavedeno zjednodušení a rezonanční frekvence se může počítat s kapacitou toroidu, která bude navýšena o 20%. Platí však podmínka, že vnitřní průměr toroidu musí být přibližně stejný jako průměr sekundární cívky. Bude získána teoretická hodnota rezonanční frekvence sekundárního obvodu, kterou bude nutné si ověřit měřením, protože není možné provést dokonale těsné navinutí sekundární cívky [3], [4].

$$f_0 = \frac{1}{2 * \pi * \sqrt{L_s * 1,2C_{toroid}}} [Hz] \quad \text{Rov. 11}$$

2.4.2 Návrh primární cívky

Primární cívka, kterou reprezentuje primární indukčnost Teslova transformátoru, se vždy vyznačuje velice nízkým počtem závitů v porovnání se sekundární cívkou. Tato cívka ve spojení s primárním rezonančním kondenzátorem tvoří za určitých podmínek paralelní rezonanční obvod. Navíjí se drátem poměrně vysokého průřezu a její indukčnost dosahuje typicky pouze desítek μH .

Pokud je primární kondenzátor nabitý na plné napětí a dojde k přeskoku přes mezeru jiskřiště, tvoří primární cívka společně s primárním kondenzátorem paralelní rezonanční obvod, kdy se energie v kondenzátoru vybíjí do primární cívky a celý obvod se rozkmitá na rezonanční frekvenci f_0 . To znamená, že do primární cívky tečou poměrně vysoké hodnoty vysokofrekvenčního proudu za velice nízký čas. Tato skutečnost je základním principem pro indukování napětí na sekundární straně transformátoru. Toto napětí roste přímo úměrně s proudem, který teče do primární cívky, a nepřímo úměrně s časem za který tento proud proteče. To znamená, že čím vyšší napětí se naindukuje na primární cívce, tím vyšší napětí bude na sekundární cívce. Tento jev může být popsán rovnicí (9) [14], [10].

$$u_i = L \frac{d_i}{d_t} \sim L \frac{I_p}{T} = \frac{I_p}{\frac{1}{f_0}} [V] \quad \text{Rov. 12}$$

Kde: u_i – indukované napětí na cívce

L – indukčnost

I_p – maximální hodnota proudu primárním obvodem

T – perioda proudu počítaná z vlastní rezonanční frekvence f_0

d_i/d_t – změna proudu v čase, kdy malé písmena značí veličiny proměnné v čase

Z této rovnice (12) vyplývá skutečnost, že vyššího indukovaného napětí by se dalo dosáhnout zvýšením proudu, což by obnášelo zvýšit napětí zdroje nebo kapacitu primární kapacity. Další možností je snížit časový interval spínání proudu. Nejvýraznějšího zvýšení indukovaného napětí by bylo dosaženo zvýšením indukčnosti primární cívky. Zvýšení primární indukčnosti by obnášelo zvýšení počtu závitů, čímž by se zároveň zvýšil odpor primární cívky, který by způsoboval větší tlumení kmitů a zároveň by snížil převod transformátoru.

Primární kapacita musí být zvolena tak, aby spolu s primární indukčností tvořila paralelní rezonanční obvod kmitající na rezonanční frekvenci f_0 , která je totožná s rezonanční frekvencí sekundárního obvodu. Dále je potřeba brát ohled na použitý napájecí zdroj a jeho proudové schopnosti. Musí být zajištěno nabití kondenzátoru na plnou hodnotu napětí v čase mezi přeskoky jiskřiště. Pokud by byla zvolena kapacita příliš vysoká, docházelo by k pomalejšímu nabíjení kondenzátoru a musela by být snížena vzdálenost mezi elektrodami nebo snížen počet přeskoků při použití rotačního jiskřiště. Naopak, při použití nižší kapacity by nebylo

možné využít celý potenciál napájecího zdroje a došlo by k rapidnímu snížení výkonu transformátoru jako celku [12], [4], [10].

Pokud bude uvažována optimální hodnota kapacity pro náš Teslův transformátor, může se vycházet ze vztahu pro kapacitu, který bere ohled na výkon napájecího zdroje a rychlost rotačního jiskřiště:

$$C = \frac{I_n}{U_n * SPM} [F] \quad \text{Rov. 13}$$

Kde: C – kapacita kondenzátoru

I_n – jmenovitý proud napájecího zdroje

U_n – jmenovité napětí napájecího zdroje

SPM – (Switch Per Minute) – počet přeskoků v jiskřišti za minutu

Jelikož primární kapacitu ovlivňuje značná řada parazitních vlivů, je velice obtížné určit přesnou hodnotu, která bude v praxi použita. Avšak skutečná kapacita by se měla co nejvíce přibližovat vypočítané hodnotě.

Když už byla vypočítána primární rezonanční kapacita, zbývá navrhnout samotnou primární cívku, která musí odpovídat námi požadovaným parametrům. Cívka musí společně s primární kapacitou tvořit paralelní rezonanční obvod, který bude kmitat na rezonanční frekvenci f_0 , která by měla být totožná s rezonanční frekvencí sekundárního obvodu. [12], [4], [15].

Indukčnost primární cívky (15) byla vyjádřena ze vztahu pro rezonanční frekvenci paralelního LC obvodu (14):

$$f_0 = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}} [Hz] \quad \text{Rov. 14}$$

Kde: f_0 – rezonanční frekvence

L – indukčnost primární cívky

C – kapacita primárního rezonančního kondenzátoru

$$L = \frac{1}{4\pi^2 C f_0^2} [H] \quad \text{Rov. 15}$$

Kde: f_0 – rezonanční frekvence

L – indukčnost primární cívky

C – kapacita primárního rezonančního kondenzátoru

Pro návrh primární cívky bylo zvoleno několik možností výběru tvaru cívky. Nejčastěji se používají 3 základní tvary, kdy každý z nich má své výhody a nevýhody. Cívka se navíjí holým drátem.

1 – **plochá cívka**, která má nejnižší vzájemnou vazbu vůči sekundární cívce a dokáže přenést nejméně energie do sekundárního obvodu. Tato cívka je však velice jednoduchá na konstrukci a vhodná k teoretickým výpočtům, proto je velmi oblíbená. Její nízká účinnost, která vyplývá z toho, že nejvzdálenější vnější závity nepřenáší do sekundární cívky skoro žádnou energii, není vždy nevýhodou. Hrozí minimální nebezpečí přeskočení výboje na sekundární cívku [3], [4].

2 – **válcová cívka** ve tvaru spirály. Tato cívka dosahuje naopak nejvyšší vazby mezi primární a sekundární cívkou, hrozí však nebezpečí přeskočení výboje mezi primární a sekundární cívkou i při správném dimenzování vzduchové mezery. Je stejně jako předchozí typ velice jednoduchá ke konstrukci i k teoretickým výpočtům [3], [4].

3 – **kuželová kónická cívka**, někdy také nazývaná Archimédova spirála. Tato varianta vinutí se vyznačuje svým vytažením do prostoru. Spirála se se vzrůstající výškou rozšiřuje, a proto na sekundární cívku působí i vnější závity. U tohoto provedení hrozí daleko menší nebezpečí přeskočení výboje na sekundární vinutí než u válcové cívky a zároveň dosahuje větší vzájemné vazby k sekundární cívce než plochá cívka. Jeví se jako ideální kompromis mezi dvěma extrémy [3], [4].

Z výše uvedeného vyplývá, že se tato varianta perfektně hodí pro transformátory s vyšším výkonem, kdy lze zvýšit rozestup mezi závity a tím i elektrickou pevnost.

Byla zvolena třetí varianta návrhu cívky, pro kterou bude potřeba určit vzdálenost mezi závity tak, aby nedocházelo k přeskokům mezi závity. Vlivem velké změny proudu v krátkém časovém intervalu dochází k indukovanému napětí, které by mohlo překročit mez pevnosti vzduchu mezi závity. Při určování mezery mezi závity bude vycházeno z elektrické pevnosti vzduchu, kdy elektrická pevnost suchého vzduchu je 30kV/cm a elektrická pevnost vlhkého vzduchu je 10kV/cm. Bude vycházeno z rovnice (12), kdy maximální hodnota proudu primárním obvodem dosazovanou do vztahu pro indukované napětí může být vypočítána dle vztahu (16) [3], [4], [10].

$$I_p = C \frac{d_u}{d_t} \sim C \frac{U_n}{T} = C \frac{U_n}{\frac{1}{f_0}} [A] \quad \text{Rov. 16}$$

Kde:

- I_p – maximální hodnota proudu primárním obvodem
- C – kapacita primárního rezonančního kondenzátoru
- U_n – jmenovité napětí zdroje, předpokládáme kondenzátor nabitý na plné napětí
- T – perioda proudu počítaná z vlastní rezonanční frekvence f_0
- d_u/d_t – změna napětí v čase, kdy malé písmena značí veličiny proměnné v čase

Vzdálenost mezi závity l_i vyjde teoreticky velice malá, proto je třeba tuto vzdálenost několikrát předimenzovat, aby se cívka lépe vinula a aby bylo dosaženo lepšího rozložení

elektrického pole kolem sekundární cívky. Je nutno podotknout, že měření vzdálenosti mezi závitů provádíme od středu vodiče [3], [4], [10].

Výšku primární cívky lze vypočítat ze vztahu:

$$H = (n - 1) * l_i + d[m] \quad \text{Rov. 17}$$

Kde: H - výška vinutí primární cívky

n – počet závitů primární cívky

l_i – mezera mezi vodiči (uvažována od středu vodiče)

d – průměr drátu

Vlastní indukčnost primární cívky může být vypočítána ze vztahu pro výpočet indukčnosti Archimédovi cívky [15], [10] :

$$L = \frac{A^2 * n^2}{9A + 10H} [\mu H] \quad \text{Rov. 18}$$

Kde: L - indukčnost primární cívky

A – Průměrný poloměr primární cívky

n – počet závitů primární cívky

H – výška vinutí vypočítána ze vztahu (14)

Samotné doladění do rezonance může být provedeno posouváním odbočky mezi závitů primární cívky.

2.4.3 Návrh primárního rezonančního kondenzátoru

Doposud se o primární kapacitě psalo pouze velice stručně. Na tento prvek Teslova transformátoru jsou kladeny největší požadavky, protože musí splňovat řadu kritérií. Jedním z nich je, aby dosahoval požadované kapacity, a aby byl stavěný na vysoké napětí. Dále tento kondenzátor musí umět převést v ideálním případě všechnu svou akumulovanou energii, kterou vypočítáme dle vztahu (19), do primární cívky. Tento děj se opakuje s velmi krátkou periodou, a proto musí být kondenzátor tzv. pulsní [8], [4], [10].

$$W = \frac{1}{2} C U^2 [J] \quad \text{Rov. 19}$$

Kde: W – energie akumulovaná v kondenzátoru

C – kapacita kondenzátoru

U – napětí na kondenzátoru

Existuje velké množství variant a způsobů jak si kondenzátor sám vyrobit, některé jsou vhodnější, některé zase méně vhodné. Dále v práci bude popsáno pár nejpoužívanějších variant pro výrobu rezonančního kondenzátoru Teslova transformátoru.

1, **Svitkový kondenzátor** – Pro výrobu svitkového kondenzátoru může být použit obdélníkový pás z PVC který bude zastupovat izolační dielektrikum. Jako kovové elektrody můžou být použity pásy z alobalu, které se nanesou z obou stran PVC. Dále je třeba pás smotat do tvaru válce a alobalové elektrody zamotat na stranách. Takto vyrobený kondenzátor je vysoce nekvalitní a dosahuje velice špatných parametrů. Takto vyrobený kondenzátor dosahuje obvykle kapacity v jednotkách nF. Elektrická pevnost však může být pouze odhadována, ale z pravidla bývá desítky kV [3], [4].

2, **Láhvový kondenzátor** – Kondenzátor je vyroben ze skleněné láhve, kdy je tato láhev obalena alobalem, který tvoří jednu elektrodu. Druhou elektrodu tvoří tyč ponořená v koncentrovaném roztoku NaCl, případně jiného dostupného elektrolytu, kterým je láhev naplněna. Tento typ kondenzátorů má proměnnou kapacitu závislou na teplotě. Kapacita nejde nijak přesně vypočítat a v praxi dosahuje maximálně jednotek nF [3], [4].

3, **MMC kondenzátor** – (Multi Mini Capacitor) je kondenzátor vytvořený vhodným sério-paralelním spojením malých kondenzátorů. Tímto spojováním může být teoreticky neomezeně zvyšována napěťová hladina i kapacita výsledného kondenzátoru. 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. Tento typ kondenzátoru je nejvhodnější, protože se lze dostat na napěťové hladiny desítek kV a na kapacity desítky až stovky nF. Pořizovací cena je však nejvyšší [3], [4], [16].

3 NÁVRH A VÝROBA JEDNOTLIVÝCH KOMPONENT PRO VN JISKROVÝ ZDROJ (PROVEDENÍ SSTC)

Pro výrobu VN jiskrového zdroje byla použita polovodičově buzená Teslova cívka. Požadavky na výstupní napětí nejsou nějak extrémně náročné a při požadovaném napětí 20kV může být sekundární cívka maximálně zmenšena.

3.1 Výroba sekundární cívky

Rozměry sekundární cívky byly zvoleny na základě dostupných materiálů, které se dají využít jako kostra válcové cívky. Jedním z nejvhodnějších byla PE trubka o průměru $D=50\text{mm}$. Materiál PE má velice dobré elektrické vlastnosti, kdy jeho permeabilita je rovna cca 2 a tudíž se velice blíží vzduchu. S touto hodnotou je dále počítáno.

Sekundární cívka by měla mít dle teorie 500-2500 závitů, byl zvolen kompromis 1000z a pro vinutí byl použit měděný smaltovaný drát o průměru $d=0,3\text{mm}$.

Výpočet délky drátu:

$$l_{1ot} = 2 * \pi * \left(\frac{D}{2} + r \right) = 2 * \pi * \left(\frac{0,05}{2} + 0,015 \right) = 0,25m$$
$$l = l_{1ot} * n = 0,25 * 1000 = 250m$$

Výpočet výšky vinutí:

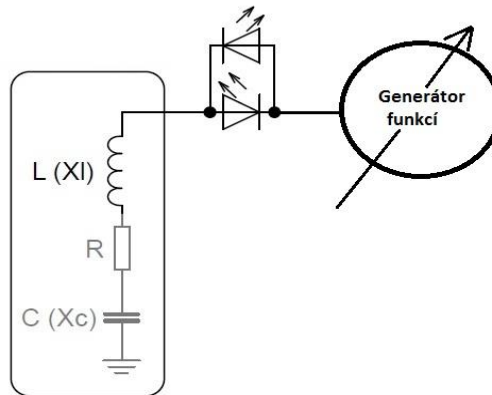
$$H = (2r + l_x) * n \sim 2r * n = 2 * 0,015 * 1000 = 30cm$$

Výpočet indukčnosti cívky:

$$L_s = k \frac{D^2}{H} n^2 10^{-3} = 9,08 * \frac{5^2}{30} * 1000^2 10^{-3} = 7,56mH$$

Sekundární cívka byla navinuta dle vypočítaných hodnot a pro zajištění dostatečné elektrické pevnosti mezi jednotlivými závitů byla celá cívka přelakována izolačním lakem ELMOTHERM VA160-E2, který dosahuje po vytvrzení elektrické pevnosti 4500V/40 μm . Po vytvrzení bylo potřeba ověřit správnost výpočtu rezonanční frekvence.

Měření bylo provedeno pomocí RC generátoru funkcí, dvojice nízkopříkonových LED diod a samotné cívky s toroidem. Celé měření spočívá v nalezení rezonanční frekvence cívky laděním RC generátoru v okolí vypočítané frekvence, kdy má obvod při rezonanci největší impedanci, vznikne na ní největší úbytek napětí a LED diody budou svítit s největším jasnem. Místo LED diod lze použít i voltmetr, na kterém lze sledovat napětí.



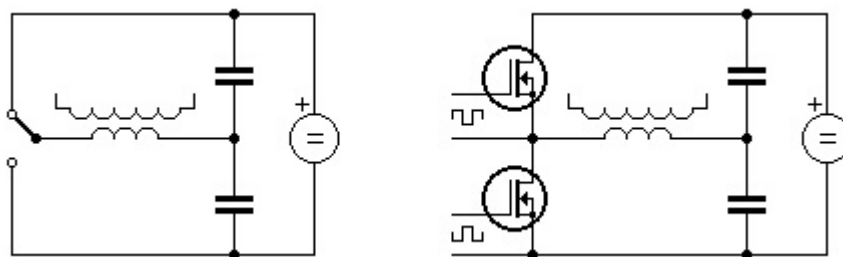
Obrázek 12 - Schéma zapojení měření rezonanční frekvence

Měřením bylo zjištěno, že první rezonance cívky nastává kolem 350kHz.

3.2 Návrh budicího obvodu

Celý komplex Teslova transformátoru je třeba budit polovodičovými součástkami, které budou primární a zároveň i sekundární cívku uvádět do rezonance a zároveň bude možná plynulá regulace frekvence, která se bude měnit v závislosti na připojené zátěži k sekundární cívce.

Jako jednu z možností buzení se nabízí polovodičový půlmůstek, který na rozdíl od buzení jedním výkonovým tranzistorem dosahuje mnohem vyšší účinnosti a dává nám možnost primární cívku vybudit symetrickým signálem.



Obrázek 13 - Polovodičový polomost

Jako spínací prvky byly zvoleny tranzistory IRFP250 v pouzdře TO247AC, které mají pro tuto aplikaci dostatečné parametry. Ztrátový výkon pouzdra P_d může dosahovat až 214W, napětí Gate může být až 20V a proud G-S 30A. Tranzistor také obsahuje nulovou diodu, která se u těchto tranzistorů projevuje jako sekundární produkt výroby přechodu GS. Měla by dosahovat podobných vlastností jako samotný tranzistor, ale pro jistotu byl každý z tranzistorů doplněn o Schottkyho diodu MURS360. Ke každému z výkonových tranzistorů je doplněn párový svitkový kondenzátor o kapacitě 680nF, přes který poteče proud do budicího (primárního) vinutí Teslovy cívky.

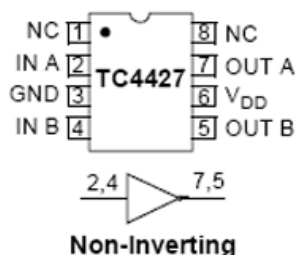
Pro buzení obou tranzistorů je navržen a použit GDT (Gate Driver Transformer), který zajišťuje galvanické oddělení můstku a řídicích obvodů. Na tento transformátor jsou kladeny velké nároky zejména na kvalitu jádra, potřebujeme co nejmenší ztráty při magnetování V_f pulzy. Tento transformátor má další velkou výhodu a tou je ochrana výkonových tranzistorů před stejnosměrnou složkou, která by nám dokázala kterýkoliv z tranzistorů zničit. Shrnutí výhod GDT dohromady je možno napsat v několika bodech:

1. Galvanické oddělení můstku od řídicích obvodů
2. Galvanické oddělení jednotlivých vinutí (ochrana řídicích obvodů před zničením)
3. Možnost navinutí libovolného počtu vinutí, kdy nám stačí jeden GDT pro plný polovodičový můstek
4. Možnost volby jiného transformačního poměru než 1:1
5. Při vypnutém buzení jsou gate všech MOS FET tranzistorů zkratovány a tím vypnuty
6. Snadné otočení fáze o 180° prohozením vývodů vinutí

Pro vinutí transformátoru bylo zvoleno toroidní feritové jádro, které se používá pro frekvence 10-500kHz. Převodový poměr kvadrofilárního vinutí transformátoru byl navržen na 1:1. A vinutí bylo provedeno 20 závitů Cu smaltovaným drátem o průměru 1mm.

Další úskalí nastává volbou budicího obvodu transformátoru, jelikož má každý MOSFET tranzistor konstrukční kapacitu mezi gate a source a mezi gate a drain. U výkonových MOSFET tranzistorů nelze tuhle kapacitu v žádném případě zanedbávat, v případě tranzistoru IRFP250 je tato kapacita 2,5nF. Pro každé sepnutí a vypnutí tranzistoru je třeba tuhle kapacitu nabíjet a vybíjet ze zdroje řídicího napětí a proto je potřeba, aby tento zdroj byl schopen dodat značný proud. Kapacita gate-drain je mnohem menší ale může způsobovat tzv. Millerův efekt a to přenos napětí z výstupu na vstup. Pokud tranzistor velice rychle rozepneme napětí na drainu bude +U_{cc} a z drainu přes zmiňovanou kapacitu může dojít k přenosu napětíového impulsu na gate a tím tranzistor znovu otevřít nebo jej prorazit. Z tohoto důvodu požadují, aby měl budicí zdroj malý vnitřní odpor a tím dokázal eliminovat možnost zpětného přenosu. Do gate byla tedy zapojena zenerova dioda 15V a jako zdroj budicího napětí byl zvolen obvod MOSFET driver TC4427 doplněný o dva tranzistory IRF540, které budou zajišťovat spolehlivé napájení gate tranzistorů IRFP240.

Tento obvod je schopen dodávat proud až 1.5A při napětí 4-18V což pro buzení tranzistorů IRF540 bohatě stačí. V jednom pouzdře se ukrývají dva stejné budiče, které je možné využít nezávisle na sobě.

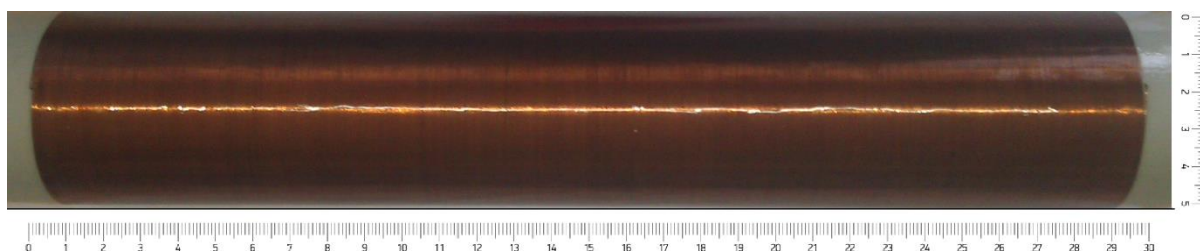


Obrázek 14 - Pouzdro obvodu TC4427

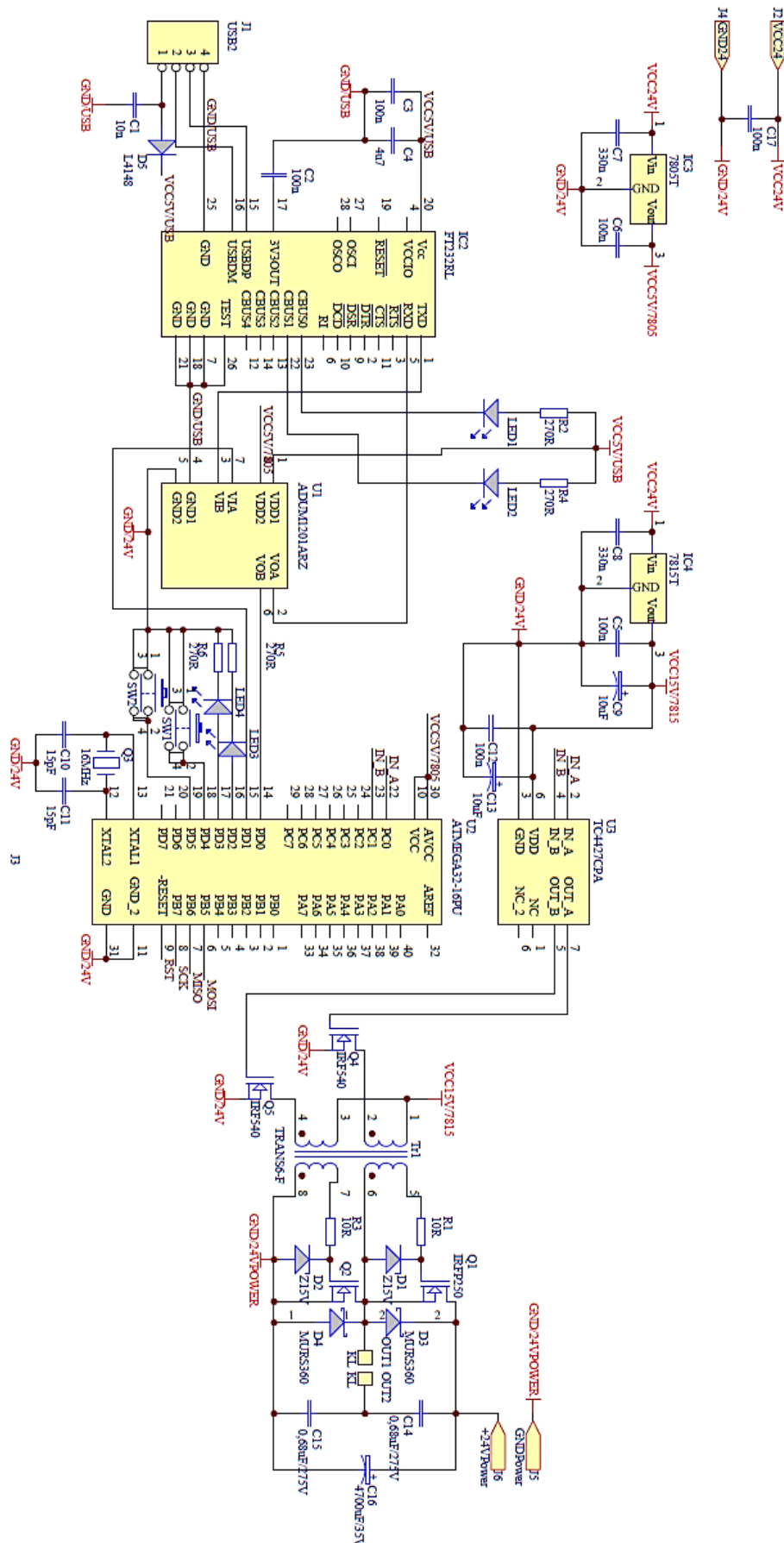
Obvod TC4427 bude řízen dvěma spárovanými signály z procesoru Atmega32 běžící na 16MHz, tento procesor nám generuje impuls o délce, která bude odpovídat délce periody rezonanční frekvence sekundární cívky čili 400kHz, tj. cca 2,5us. Také je možné řídit opakovací frekvenci celého cyklu, kterou bude možné regulovat výkon transformátoru. Procesor bude doplněn o 2 LED diody, které budou signalizovat správnou funkci a chod procesoru a o dvě tlačítka, kterými bude možno spustit a zastavit buzení transformátoru.

Samotná regulace a nastavení požadované frekvence a střídý se bude provádět z PC pomocí USB portu. Pro tuto aplikaci a komunikaci PC s procesorem ATMEGA byl použit integrovaný převodník RS232/USB do chipu FT232RL, který byl od procesoru oddělen galvanicky optočlenem ADUM 1201.

Celý přípravek bude napájen ze zdroje stejnosměrného napětí 24V, který je schopen dodat proud až 20A. Celkový příkon by tak mohl dosáhnout až 480W.



Obrázek 15 - Sekundární cívka SSTC

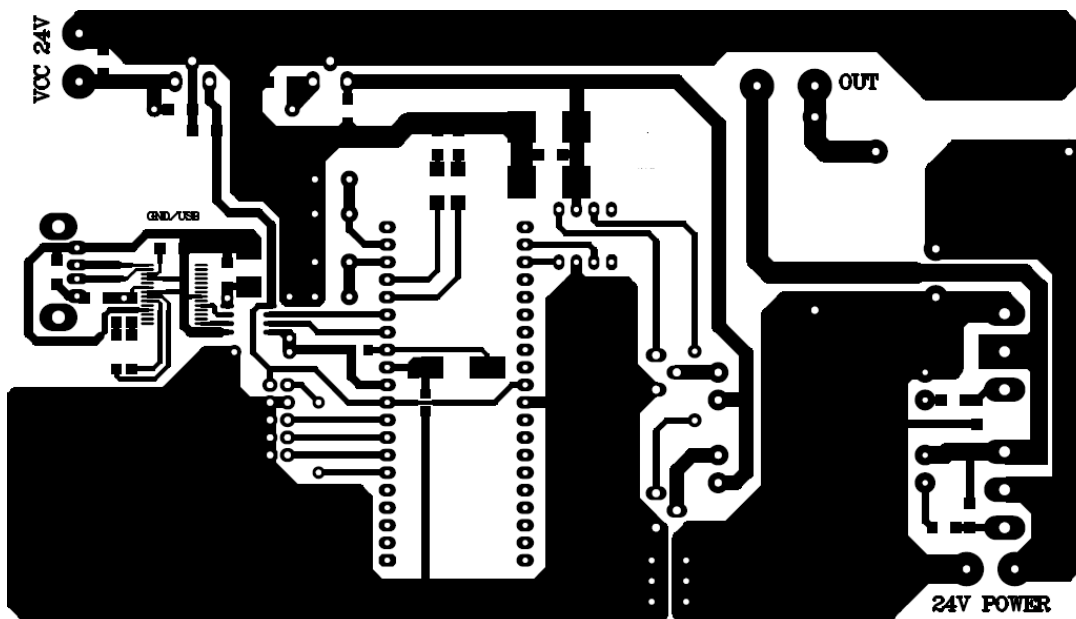


Obrázek 16 - Schéma polovodičového budiče

3.3 Návrh desky plošných spojů

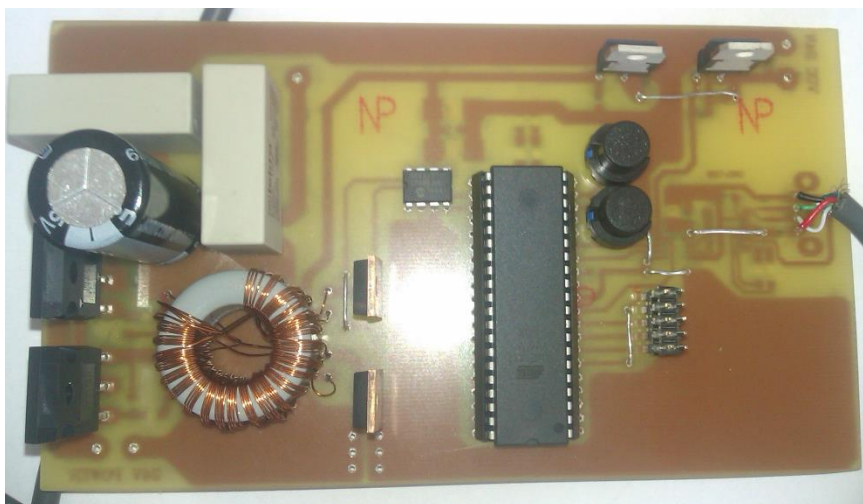
Pro návrh desky plošných spojů byl použit stejný software jako pro kreslení schéma a to PROTEL SE99. Tento software umožňuje tvorbu vlastních pouzder součástek a následně s nimi při návrhu jednoduše manipulovat.

DPS byla navržena jednostranná tak, aby bylo oddělené napájení výkonové části polovodičového můstku a napájení řídicí elektroniky. Tyto dva napájecí okruhy jsou odděleny rozdělením GND, které se dá v případě potřeby propojit propojkou.

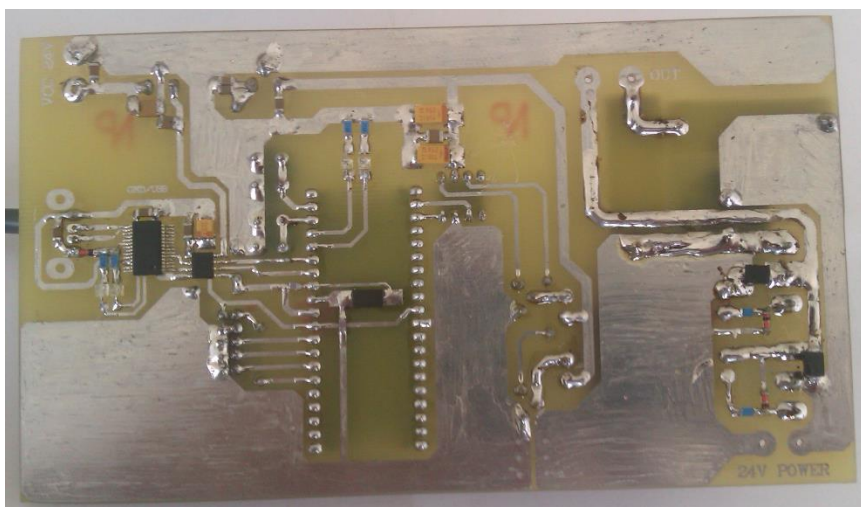
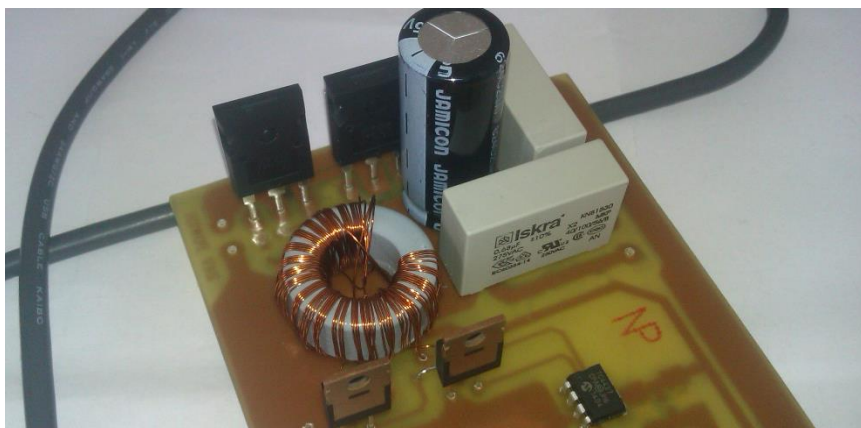


Obrázek 17 - Deska plošných spojů

Pro výrobu desky plošných spojů byla použita deska z cuprexitu FR4 s vrstvou 35um Cu, pokrytou fotocitlivou vrstvou, který byl přes vytištěnou šablonu osvícen UV zářením v temné komoře a následně vyleptán v chloridu železitém (FeCl_3). Celá deska byla následně pocínována olovnatým cínem a odsáta vakuovou odsávačkou cínu. Následně byla deska osazena součástkami.



Obrázek 18 - Přední strana osazené DPS

*Obrázek 19 - Zadní strana osazené DPS**Obrázek 20 - Výkonová část budiče*

3.4 Simulace Teslova transformátoru v programu SIMPLORER

Pomocí softwaru SIMPLORER byla provedena první simulace chování zjednodušeného modelu transformátoru jako celku po dobu jedné periody. Bylo simulováno autentické schéma s reálnými hodnotami elektrických součástek. Sekundární cívka je složená z vlastní indukčnosti, rezistivity a z parazitní mezi závitové kapacity. Dalo by se říct, že je tato kapacita rozložená na celé délce cívky lineárně. V ideálním případě, kdy by primární souosa cívka byla stejně dlouhá jako sekundární a působila na sekundární cívku po celé délce stejnou vzájemnou vazbou, lze uvažovat, že napětí na sekundární cívce bude s výškou lineárně narůstat. Jinak řečeno, na každém závitě by se naindukovalo naprosto stejné napětí.

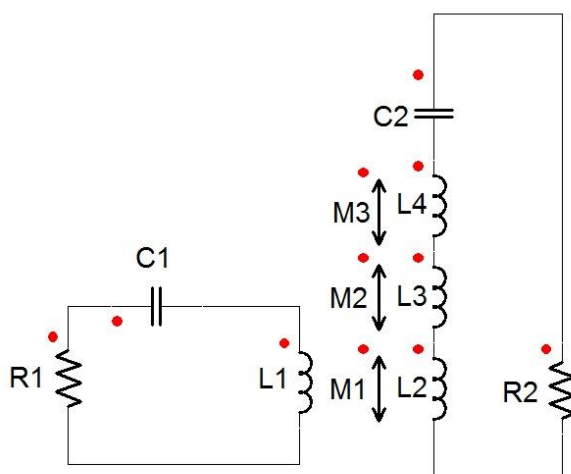
V realitě tomu tak není. Primární cívka je válcová a dosahuje pouze do cca jedné čtvrtiny výšky sekundární cívky. Tudíž lze vyvodit, že vzájemná vazba nebude po celé délce sekundární cívky konstantní. Ve spodní části bude vyšší a na posledním závitě sekundární cívky se bude blížit nule. Dále lze uvažovat, že pokud bude celé vinutí rozděleno na několik dílčích cívek, budou se také vzájemně ovlivňovat a budou mít určitou vzájemnou vazbu.

Další velký podíl na nelinearitě napětí na sekundární cívce má přídavná kapacita v podobě kapalinové kádinky připojené na výstup sekundární cívky. Kdy tato kapacita působí na sekundární cívku společně s mezi závitovou kapacitou a společně tvoří proměnnou kapacitu celé cívky, jejíž velikost při sestavování modelu zcela přesně neumíme určit.

Výsledek těchto jevů je takový, že napětí na sekundární cívce nenarůstá lineárně, ale exponenciálně. Na závitů blízko zemi se nám může indukovat například jen sto voltů a na závitů opačného konce cívky i několik kilo-voltů.

Z tohoto důvodu byla v simulaci sekundární cívka rozdělena na 3 části, kdy každá má jinou vzájemnou vazbu s primárním vinutím.

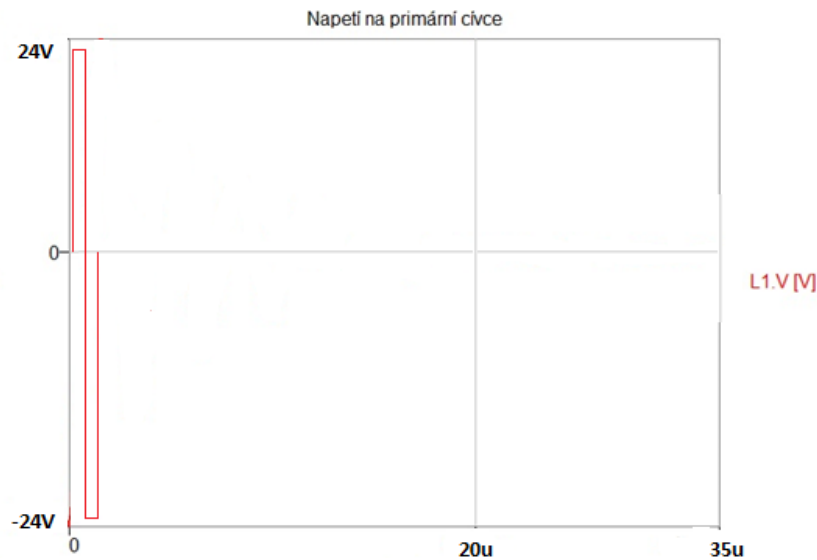
Kondenzátor je po spuštění simulace nabitý na 24V.



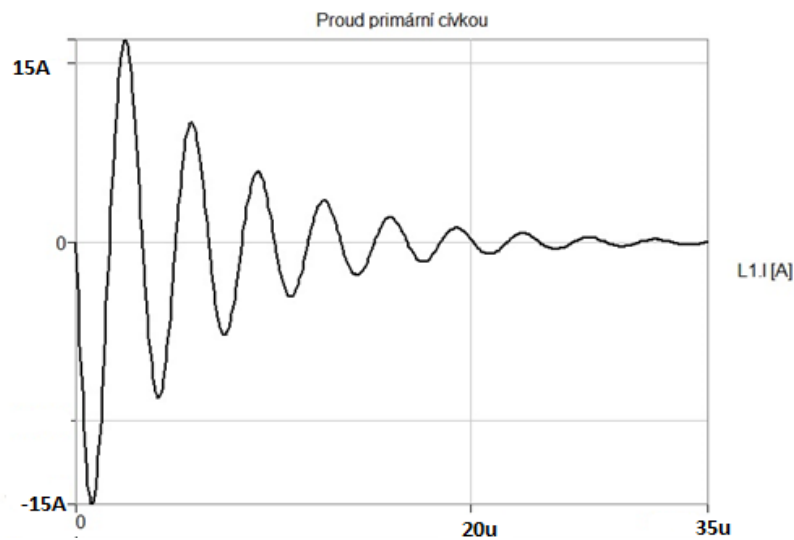
Obrázek 21 - Schéma zapojení obvodu pro simulaci

Kondenzátor C1 je primární rezonanční kondenzátor představující primární mezi závitovou kapacitu a kapacitu MOS-FET tranzistorů. Indukčnost L1 reprezentuje primární vinutí o hodnotě 4uF, R1 nám zastupuje parazitní rezistivitu primárního obvodu a dosahuje hodnoty 1Ω. V sekundární části obvodu se vyskytují indukčnosti L2, L3, L4, které dohromady zastupují sekundární vinutí. Tyto tři indukčnosti jsou provázány vzájemnou vazbou s indukčností L1. Koeficient pro výpočet vzájemné vazby k, je nastaven pro M1=0,3, M2=0,2, M3=0,05. Kapacita C2 zastupuje připojenou kádinku s roztokem o kapacitě 25pF a odpor R2 zastupuje parazitní rezistivitu vodiče vinutí a jeho hodnota je 55Ω. Pro simulaci není uvažován skinefekt.

Simulaci musíme brát pouze orientačně a musíme brát v úvahu, že se lze dopustit chyby až stovek procent. Celý Teslův transformátor disponuje celou řadou parazitních veličin, o kterých nic nevíme a nejsme schopni je zavést do simulace.

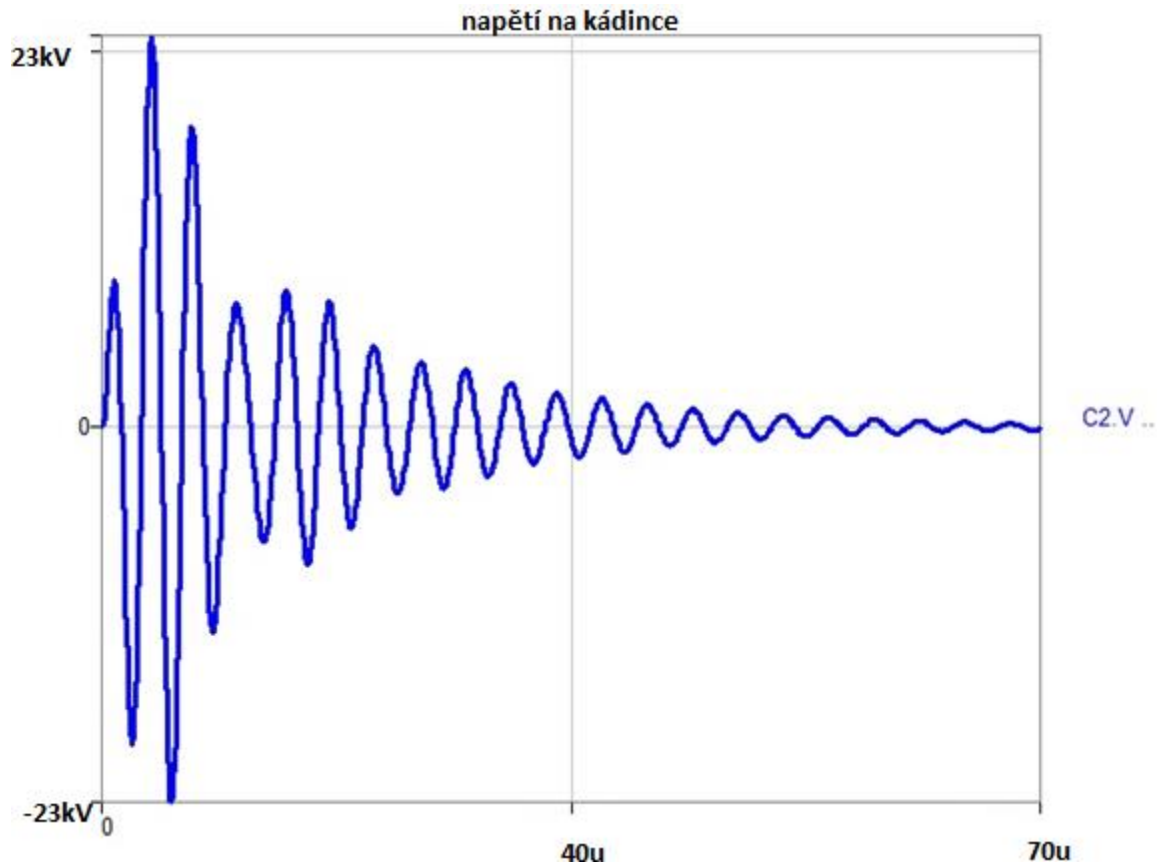


Obrázek 22 - teoretický průběh napětí na primární cívce



Obrázek 23 - Teoretický průběh proudu primární cívkou

V primárním obvodu lze sledovat, že se obvod rozkmitá na frekvenci kolem 300kHz. Exponenciální obálka průběhu je způsobena postupnou ztrátou energie v cívce. V reálném provozu však bude cívka buzena tak, aby na výstupu bylo dosaženo požadované střední hodnoty napětí, při požadavku na maximální výkon transformátoru budeme buzení opakovat ihned po uplynutí jedné periody, a tudíž by proud v primární cívce měl být harmonický.



Obrázek 24 - Teoretický průběh napětí na výstupu TC

Lze vidět, že napětí na výstupu Teslova transformátoru dle simulace dosahuje maximální hodnoty kolem 40kV peak-peak. Je to ovšem hodnota teoretická, v realitě toto napětí může být klidně i dvojnásobné, nebo naopak poloviční. V každém případě toto napětí již splňuje požadavky, které byly na celý přístroj kladeny a to výstupní napětí o velikosti alespoň 20kV. Přesnější hodnoty bychom mohli dostat měřením na sekundární straně transformátoru za pomoci VN děliče napětí.

4 OŽIVENÍ A ODZKOUŠENÍ

Po osazení desky plošných spojů součástkami přišel čas pro oživení a odzkoušení funkčnosti. První poznatky po připojení napájecího napětí pro řídicí elektroniku byly takové, že LED diody problikly, tak jak bylo uvedené v datasheetu. Následně byl celý driver připojen k počítači pomocí USB kabelu.

PC okamžitě nainstaloval patřičné drivery a začal komunikovat s procesorem ATMEGA32.

Jelikož zatím nebyl napsaný řídicí program pro procesor, byl k oživení výkonové části použit generátoru signálu, kterým byla výkonová část buzena stejným signálem, jaký bude generovat MCU. Generátor byl připojen přímo na výstup z procesoru, abych byla odzkoušena funkčnost všech potřebných komponent.

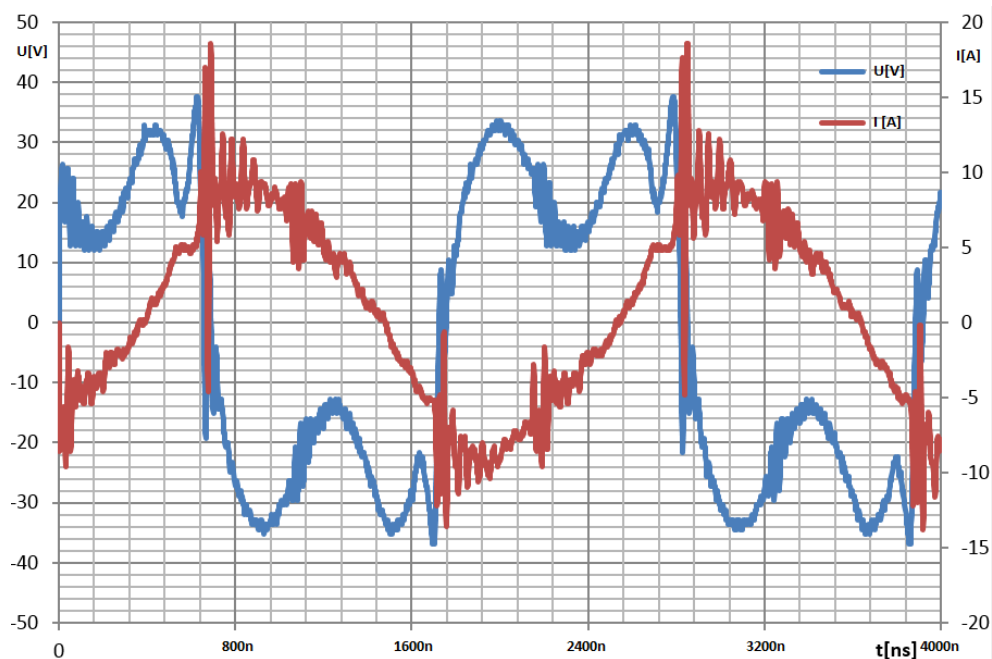
Hned na první pokus se transformátor rozběhnul podle mých představ a na výstupu se objevilo vysoké napětí, které se dalo plynule regulovat s měnící se střídou budícího signálu. Výkonové tranzistory IRFP250 je nutno intenzivně chladit, protože na nich zůstává velká výkonová ztráta. Regulátory napětí L78xx se také neobejdou bez chlazení a proto jsou opatřeny pasivními chladiči.

Program procesoru ATMEGA je v této fázi odladěn, aby na výstupu PC0 a PC1 generoval pulzy o délce trvání 1-50us s krokem 0.0625us, a prodlevou 0-1000us se stejným krokem z důvodu nastavení potřebné rezonanční frekvence a výkonu jisrového výboje v kádince. Program se řídí pomocí tlačítek (Zapnout a vypnout), indikuje funkci (Červená LED) a funkci programu (Zelená LED) Hodnoty času se nastavují pomocí PC, příkazem SET_T1 a SET_T2 zapsaným do sériového portu čipu FTDI. Proces lze spustit a zastavit příkazy SET_START a SET_STOP. Rychlost sériové komunikace je 19200kbit/s.

4.1 Měření na SSTC

Z důvodu nemožnosti měřit průběhy napětí a proudu na sekundární straně transformátoru, bylo provedeno měření alespoň na primární straně. K měření byl použit digitální osciloskop, který byl vybaven napěťovou sondou 10:1 a rogowskiho cívku, kterou se měřil proud v primárním vinutí. Z důvodu obrovského rušení vlivem spínání a vlivem elektromagnetického pole působící na rogowskiho cívku z primární indukčnosti transformátoru bylo potřeba rogowskiho cívku umístit do co největší vzdálenosti od transformátoru. Připojení transformátoru k budícímu obvodu bylo metr a půl dlouhými dráty o průřezu 4mm² a měřicí cívku jsem umístil přímo k budícímu obvodu. Pokus o posunutí měřicí cívky blíže k transformátoru, což by zajistilo přesnější výsledky měření neovlivněné vlastní indukčností připojovacích kabelů, přinášelo drastické zkreslení způsobené elektromagnetickým rušením.

Ideální pro tuto aplikaci měření by bylo použit nízkoimpedanční bočník, na kterém bychom snímali napětí osciloskopem.



Obrázek 25 - Naměřené průběhy napětí a proudu na SSTC

V grafu lze sledovat induktivní charakter obvodu, kdy napětí předbíhá proud. Lze vidět dva zákmity proudu při vedení v obou směrech můstku, tyto zákmity jsou způsobeny spínáním indukčností primárního vinutí a taky vzájemnou vazbou sekundární a primární cívky. Ve značné míře se nám zde uplatňuje vzájemná indukčnost přívodních kabelů. Je možné, že se při měření vysokofrekvenčního proudu uplatňuje i vlastní frekvence rogowského cívky, která způsobuje zkreslení zobrazovaného průběhu. Zákmity, které lze sledovat na napěťovém průběhu jsou způsobeny spínáním polovodičů. Střední hodnota odpovídá napětí napájecího zdroje.

Z grafu je snadné odečíst periodu, která je $2,3\mu\text{s}$. Budicí frekvence je tedy 430kHz . Výhodou této konstrukce je snadná změna budicí frekvence, střída budícího signálu a možnost použití relativně nízkého primárního napětí. Změnou střidy budícího signálu lze jednoduše a plynule regulovat výstupní výkon a napětí, které je třeba pro každou aplikaci nastavit zvlášť.

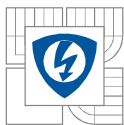
Při zavedení zpětné vazby lze transformátor aktivně doladovat do rezonance tak aby dosahoval co nejvyšší účinnosti. Další výhodou je, že výstupní napětí z transformátoru neobsahuje jiné ve velké míře zastoupené frekvenční složky jako třeba u SGTC, kde je výstupní signál namodulovaný na frekvenci spínacího jiskřiště.

5 ZÁVĚR

V této práci byly nastudovány a prakticky aplikovány základní principy, které byly získány při zpracování semestrálního projektu, které využívá chod Teslova transformátoru. Podařilo se teoreticky navrhnout a prakticky sestrojit funkční vzorek polovodičového budicího obvodu pro řízení teslova transformátoru.

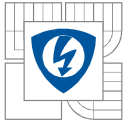
Dále byla navržena a prakticky vyrobena primární a sekundární cívka transformátoru. Celý vzorek byl osazen patřičnými součástkami a následně oživen. Na funkčním vzorku bylo provedeno měření, které se zaměřovalo na primární stranu transformátoru. Dále byla odzkoušena funkčnost jako celku. Byla zhodnocena praktická využitelnost výrobku a porovnána se zadáním práce.

Funkční vzorek je prakticky použitelný pro danou aplikaci, čímž bylo splněno zadání práce.

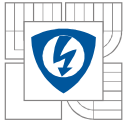


LITERATURA

- [1] TESLA, Nikola. Moje experimenty a patenty. Vyd. 1. Liberec: Dialog, 2012, 133 s. ISBN 978-80-7424-044-7.
- [2] CHILDRESS, David Hatcher. Nikola Tesla a jeho tajné vynálezy. Praha: Dobra, 2008, 190 s. ISBN 978-80-86459-57-8.
- [3] Klasický teslův transformátor. Klasický teslův transformátor [online]. 2004 [cit. 2013-12-11]. Dostupné z: <http://elektronika.kvalitne.cz/VN/tesla/TCteorie.html>
- [4] Tesla coil design, construction and operation guild. Tesla coil design, construction and operation guild [online]. 2004 [cit. 2013-12-11]. Dostupné z: <http://www.teslacoildesign.com/>
- [5] Tesla's legacy. Tesla's legacy [online]. 2011 [cit. 2013-12-11]. Dostupné z: <http://www.hvtesla.com/>
- [6] Návrh a ověření vlastností Teslova transformátoru. Západočeská univerzita v Plzni, 2007. Jan Tampír. Bakalářská práce. Západočeská univerzita v Plzni. Vedoucí práce Doc. Ing. Jiří Laurenc, CSc
- [7] Extreme electronics. Tesla Coils [online]. 2012 [cit. 2013-12-11]. Dostupné z: <http://www.extremeelectronics.co.uk>
- [8] TRINKAUS GEORGE, Tesla lost inventions, High Voltage Press ISBN 0-9709618-2-0
- [9] TRINKAUS GEORGE, Tesla Coil, High Voltage Press ISBN 0-9709618-0-4
- [10] TALAŠ, P. Analýza Vývoj vysokofrekvenčních zkušebních zdrojů vysokého a velmi vysokého napětí. Bakalářská práce. Brno: Ústav elektroenergetiky FEKT VUT v Brně, 2012, 59 stran.
- [11] Tesla Transformátor. Tesla Transformátor [online]. 2009 [cit. 2013-12-11]. Dostupné z: <http://www.blesky.ic.cz/>
- [12] DANIEL H, CAULEY, DRSSTC Building the modern day Tesla Coil, Chicago ISBN 978-1-4116-9526-9, 239 stran
- [13] Wikipedie. Skin efekt [online]. 2013 [cit. 2013-12-11]. Dostupné z: http://cs.wikipedia.org/wiki/Skin_efekt
- [14] TRINKAUS GEORGE, Tesla lost inventions, High Voltage Press ISBN 0-9709618-2-0
- [15] TILBURY MITCH, The ultimate Tesla Coil design, ISBN 978-0-07-149737-4, New York, 413 stran



[16] SIUDA, P. *Návrh Teslova transformátoru*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, 2014. 44s. Vedoucí semestrální práce
Ing. Petr Dohnal, Ph.D..



PŘÍLOHY

- | | |
|-----------|--------------------------------------|
| Příloha A | Schéma budicího obvodu ve formátu A3 |
| Příloha B | Deska plošných spojů ve formátu 1:1 |