

Měnič pro Teslův generátor

Bakalářská práce

Studijní program: B2612 – Elektrotechnika a informatika
Studijní obor: 2612R01 – Elektronické informační a řídicí systémy

Autor práce: **Vojtěch Snopek**
Vedoucí práce: Ing. Martin Černík, Ph.D.



Technická univerzita v Liberci
Fakulta mechatroniky, informatiky a mezioborových studií
Akademický rok: 2017/2018

ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

(PROJEKTU, UMĚLECKÉHO DÍLA, UMĚLECKÉHO VÝKONU)

Jméno a příjmení: **Vojtěch Snopek**
Osobní číslo: **M14000125**
Studijní program: **B2612 Elektrotechnika a informatika**
Studijní obor: **Elektronické informační a řídicí systémy**
Název tématu: **Měnič pro Teslův generátor**
Zadávající katedra: **Ústav mechatroniky a technické informatiky**

Z á s a d y p r o v y p r a c o v á n í :

1. Na základě pokynů vedoucího sestavte schéma obvodu, navrhnete seznam vhodných komponent a navrhnete plošný spoj a konstrukční uspořádání.
2. Vytvořte jednoduché náhradní obvodové schéma výstupního transformátoru, sestavte k němu obvodovou rovnici, parametry určete na základě měření.
3. Připojte měnič k Teslově transformátoru a podle pokynů změřte časové průběhy napětí na dohodnutých uzlech, spotřebu elektrické energie a další parametry.

Rozsah grafických prací: **dle potřeby dokumentace**

Rozsah pracovní zprávy: **30–40 stran**

Forma zpracování bakalářské práce: **tištěná/elektronická**

Seznam odborné literatury:

- [1] **Martin Zavřel: Stavba polovodičově buzeného Teslova transformátoru. Bakalářská práce ZČU 2014.**
- [2] **Kronjäger, J.: Tesla coil theory. online:
<http://www.kronjaeger.com/hv-old/hv/src/tesla/testheU.ps>**

Vedoucí bakalářské práce: **Ing. Martin Černík, Ph.D.**

Ústav mechatroniky a technické informatiky

Konzultant bakalářské práce: **Ing. Miroslav Novák, Ph.D.**

Ústav mechatroniky a technické informatiky

Datum zadání bakalářské práce: **10. října 2017**

Termín odevzdání bakalářské práce: **14. května 2018**

prof. Ing. Zdeněk Plíva, Ph.D.
děkan



Kolář
doc. Ing. Milan Kolář, CSc.
vedoucí ústavu

V Liberci dne 10. října 2017

Prohlášení

Byl jsem seznámen s tím, že na mou bakalářskou práci se plně vztahuje zákon č. 121/2000 Sb., o právu autorském, zejména § 60 – školní dílo.

Beru na vědomí, že Technická univerzita v Liberci (TUL) nezasahuje do mých autorských práv užitím mé bakalářské práce pro vnitřní potřebu TUL.

Užiji-li bakalářskou práci nebo poskytnu-li licenci k jejímu využití, jsem si vědom povinnosti informovat o této skutečnosti TUL; v tomto případě má TUL právo ode mne požadovat úhradu nákladů, které vynaložila na vytvoření díla, až do jejich skutečné výše.

Bakalářskou práci jsem vypracoval samostatně s použitím uvedené literatury a na základě konzultací s vedoucím mé bakalářské práce a konzultantem.

Současně čestně prohlašuji, že tištěná verze práce se shoduje s elektronickou verzí, vloženou do IS STAG.

Datum: 14. 5. 2018

Podpis:



Poděkování

Tímto bych chtěl poděkovat svému vedoucímu práce panu Ing. Martinu Černíkovi Ph.D. za poskytnutí odborných rad potřebných k vytvoření této bakalářské práce. Poděkování patří také Ing. Leoši Petržílkovi a celému kolektivu PCB-Lab za výrobu plošných spojů.

Abstrakt

Tato bakalářská práce je zaměřena na teoretický rozbor Teslova generátoru, ve kterém je obsaženo náhradní schéma a obvodové rovnice, do nichž jsou dosazeny hodnoty napětí, frekvence přiváděné do budícího obvodu a naměřené hodnoty součástek pevně daných. Hlavně tato práce obsahuje samotnou realizaci polovodičového měniče, tedy návrh schématu a návrh tištěného spoje výkonového měniče a řídicího obvodu. Dále jeho oživení a měření napěťových a proudových časových průběhů.

Klíčová slova

Teslův generátor, výkonový měnič, řídicí obvod, buzený polovodičově.

Abstract

This bachelor thesis is focused on the theoretical analysis of Tesla generator, which contains a substitution scheme, circuit equations in which the voltage values are set, the frequency supplied to the excitation circuit and the measured values of the fixed components given. Finally, this work contains the realization of the inverter circuit, realized by the semiconductor, namely the design of the schematic and the design of the printed connection of the power inverter and the control circuit. Then, its put into operation and measurement voltage and current waveforms.

Key words

Tesla coil, power inverter, control circuit, semiconductor powered.

Obsah

Obsah	7
Seznam použitých obrázků	8
Seznam symbolů a zkratek.....	9
1. Úvod	10
1.1. Nicola Tesla	11
2. Teslův generátor – základní princip funkčnosti.....	12
2.1. Rozdělení podle principu buzení Teslova generátoru	14
2.1.1. SGTC.....	14
2.1.2. VTTC.....	16
2.1.3. OLTC.....	17
2.1.4. SSTC	18
2.2. Teoretický rozbor Teslova generátoru.....	19
2.2.1. Náhradní schéma Teslova generátoru s rezonančním obvodem na primární straně	19
2.2.2. Rovnice	20
2.2.3. Výpočet pomocí MATLAB™	21
2.3. Rizika činnosti Teslova generátoru	24
2.4. Sestavené komponenty	25
2.4.1. Sekundární cívka.....	25
2.4.2. Faradayova klec.....	26
2.4.3. Napěťový dělič	26
3. Stavba výkonového měniče.....	27
3.1. Popis plošného spoje výkonového měniče	29
4. Řídicí obvod pro výkonový měnič.....	29
5. Ožívování a měření Teslova generátoru	33
5.1. Měření vlastností sekundární cívky	33
5.1.1. Frekvenční závislost cívky	33
5.1.2. Rezananční frekvence cívky a činitel jakosti	34
5.2. Ožívování komponent	35
Závěr	39
Seznam použité literatury a zdrojů	41
Přílohy	43

Seznam použitých obrázků

Obrázek č. 1 - Nikola Tesla [7].....	11
Obrázek č. 2 - Zapojení SGTC	14
Obrázek č. 3 - Statické jiskřiště [2]	15
Obrázek č. 4 - Rotační jiskřiště [2].....	15
Obrázek č. 5 - Zapojení VTTC	16
Obrázek č. 6 - Zapojení OLTC	17
Obrázek č. 7 - Poloviční můstek (nalevo) Plný můstek (napravo).....	18
Obrázek č. 8 - Náhradní schéma Teslova generátoru s rez. obvodem na primární straně	19
Obrázek č. 9 - Zdrojový kód 1.....	21
Obrázek č. 10 - Závislost výstupního napětí na rezonančním kondenzátoru.....	22
Obrázek č. 11 - Náhradní schéma Teslova generátoru bez rez. obvodu na primární straně	22
Obrázek č. 12 - Zdrojový kód 2.....	23
Obrázek č. 13 - Závislost výstupního napětí na frekvenci	23
Obrázek č. 14 - Navíjení sekundární cívky [11]	25
Obrázek č. 15 - Faradayova klec [11].....	26
Obrázek č. 16 - RCD ochrana IGBT	28
Obrázek č. 17 - Fázový závěs.....	30
Obrázek č. 18 - Obvod pro mrtvé časy	32
Obrázek č. 19 - Výstup z řídicího obvodu	35
Obrázek č. 20 - Výstup z výkonového měniče	36
Obrázek č. 21 - Vstup na primární cívku.....	36
Obrázek č. 22 – Průběh napětí na výstupu z napěťového děliče na sekundární cívce TG	37
Obrázek č. 23 - Korona	40

Seznam symbolů a zkratk

IGBT	Bipolární tranzistor s izolovaným hradlem
f_r, f_1, f_2	rezonanční frekvence, dolní frekvence, horní frekvence
U1, U2	vstupní napětí, výstupní napětí
N1, N2	počet primárních závitů, počet sekundárních závitů
Q	činitel jakosti cívky, činitel jakosti rezonančního obvodu
VN	vysoké napětí
Z	impedance
X	reaktance
L	indukčnost
C	kapacita
R	odpor
D	polovodičová dioda
ω	úhlová frekvence
U_{RMS}	efektivní napětí
V_{SS}	stejnoseměrné napětí
U_{pp}	maximální napětí
k	transformační poměr
TG	Teslův generátor
M	vzájemná indukčnost
VCO	napětím řízený oscilátor
RLC	analogový elektrický oscilační obvod
RCD	ochranný obvod s odporem, diodou a kondenzátorem
rez.	rezonanční
U_{GE}	Napětí mezi gatem a emitorem

1. Úvod

Tato bakalářská práce pojednává o návrhu schématu výkonového měniče a také řídicího obvodu a o samotné konstrukci jak výkonového měniče, tak řídicího obvodu. Dále obsahuje návrh náhradního schématu Teslova generátoru, ke kterému jsou sestaveny obvodové rovnice a do nichž jsou dosazeny naměřené hodnoty jednotlivých prvků. Na závěr práce je zařazena kapitola o samotném ožívování výkonového měniče a řídicího obvodu, na nichž jsou měřeny časové průběhy napětí osciloskopem.

Práce je členěna na čtyři základní části:

První část obsahuje základní rozdělení Teslova generátoru podle budícího obvodu a rizika činnosti Teslova generátoru. Dále obsahuje návrh jednoduchého náhradního schématu výstupního transformátoru a sestavení obvodových rovnic.

Druhá část obsahuje návrh a popis výkonového měniče.

Třetí část obsahuje návrh a popis řídicího obvodu pro výkonový měnič.

Čtvrtá část je zaměřena na ožívování, sestavení komponentů a vlastního provozu Teslova generátoru tedy ověření jeho funkčnosti.

1.1. Nicola Tesla

„Vědecký člověk nemá za cíl dojít k okamžitému výsledku. Neočekává, že se jeho pokročilé nápady a myšlenky snadno uchytí. Jeho práce je jako práce plantážníka – pro budoucnost. Jeho povinností je položit základy a ukázat cestu těm, kteří přijdou.“ [5]



Obrázek č. 1 - Nikola Tesla [7]

Jeden z mnoha citátů, poučných i prozírajících budoucnost, který vyslovil vědec, vynálezce, fyzik a elektrotechnický inženýr Nikola Tesla. Narodil se roku 1856 v Chorvatsku (tehdejší Rakousko-Uhersko), ač byl srbského původu. Své studium s technickým zaměřením započal v Rakousku ve městě Graz, poté se přesunul do Prahy, kde však studia ukončil roku 1880. Následně pracoval v Budapešti, kde zároveň začal věnovat větší pozornost výzkumu elektřiny potažmo střídavého proudu a kde zhotovil hned několik vynálezů (např. telefonní zesilovač). Jako elektroinženýr pracoval v Německu a také ve Francii, kde objevil princip elektromagnetické indukce a střídavého proudu, kdy na základě tohoto objevu došlo k sestrojení asynchronního motoru. V roce 1884 opouští evropský kontinent a vydává se do amerického New Yorku, kde získá pracovní místo po boku T. A. Edisona, se kterým se však po nějaké době lidsky i názorově rozejde (Edison prosazuje stejnosměrný proud, zatímco Tesla

střídavý). Poté se Tesla rozhodne osamostatnit a za pomoci sponzorů vyrábí nové vynálezy. Většinu svých patentů však prodal a potýkal se s neustálou finanční tísní.

Co se týče povahy N. Tesly, byl úzkostlivý, neměl rád blízký kontakt s člověkem (podávání rukou na pozdrav, štil se lidských vlasů apod.). Měl oblíbené číslo 3, se kterým neustále pracoval. Ať už ve svých stereotypch, kdy vše třikrát opakoval, nebo chtěl mít určitý počet jakékoli věci, která však musela být dělitelná třemi. Co neskrýval byla láska k holubům, o které se staral až do své smrti, tj. 7. ledna roku 1943 v New Yorku. Teslovou celoživotní vizí bylo docílit bezdrátového přenosu elektřiny či energie, a i když tento neobyčejný muž fascinovaný elektřinou působil pro mnohé jako velký podivín, zapsal se do dějin nepochybně i skrze houževnatost a nezdolné odhodlání nevzdat se svojí pravdy a dokázat, že díky jeho vynálezům lze udělat svět lepším a dokonalejším. Svým dílem tak udal směr dnešní doby, která dodnes čerpá z jím položených základů.

2. Teslův generátor – základní princip funkčnosti

Teslův generátor je vysokofrekvenční a vysokonapěťový transformátor, jehož konstrukce je tvořena dvěma paralelními RLC obvody, tedy primárním a sekundárním obvodem. Základní podmínkou Teslova generátoru je, aby byly RLC obvody naladěny na stejnou rezonanční frekvenci, která se vypočítá pomocí Thompsonova vztahu (1)

$$f_r = \frac{1}{2 \cdot \pi \cdot \sqrt{L \cdot C}} \quad (1)$$

V praxi je velice složité přesně naladit jak primární, tak i sekundární obvod na stejnou rezonanční frekvenci, a proto se tyto obvody nastavují pouze přibližně. Pokud jsou RLC obvody naladěny na stejnou rezonanční frekvenci, dostává se Teslův generátor do nejvyšší účinnosti, a tedy dochází k obrovskému nárůstu výstupního napětí.

Jak již bylo řečeno Teslův generátor je tvořen dvěma obvody.

Primární obvod neboli vinutí tvoří malý počet závitů měděného drátu o větším průřezu. Toto vinutí je buzeno zdrojem, který pracuje na rezonanční frekvenci sekundárního vinutí. Zdrojů buzení je několik, ty nejvýznamnější jsou uvedeny v kapitole 2.1. Rozdělení podle principu buzení Teslova generátoru.

Sekundární obvod neboli vinutí tvoří velký počet závitů měděného drátu o malém průřezu. Díky rezonanci sekundární cívky a přenosem mezi primární a sekundární cívkou se na sekundární cívce naindukuje napětí, které ale nejde vypočítat jako u klasického transformátoru transformační rovnicí (2), protože Teslův generátor pracuje na rezonanční frekvenci, a tak se zde uplatňuje činitel jakosti Q , který udává, kolikrát je vyšší napětí na cívce nebo kondenzátoru při rezonanční frekvenci, než je napětí při frekvenci dostatečně vzdálené od rezonanční frekvence. Výpočet činitele jakosti pro rezonanční obvod (3).

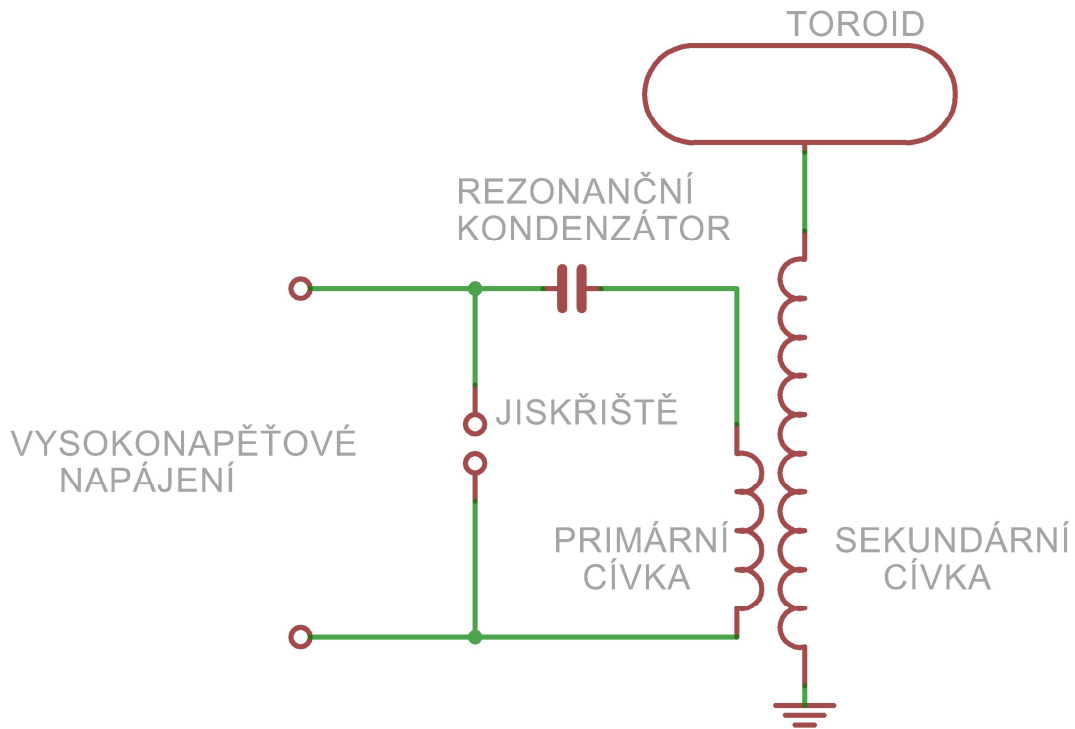
$$\frac{U_2}{U_1} = \frac{N_2}{N_1} = k \quad (2)$$

$$Q = \frac{2 \cdot \pi \cdot f_r \cdot L}{R_L} \quad (3)$$

2.1. Rozdělení podle principu buzení Teslova generátoru

2.1.1. SGTC

Anglická zkratka SGTC znamená Spark Gap Tesla Coil (česky: Teslova cívka s jiskřištěm).



Obrázek č. 2 - Zapojení SGTC

Popis funkce: Při připojení napájení se začne nabíjet kondenzátor, ten se nabíjí na určitý proud a po dosažení určené hodnoty proudu dojde v jiskřišti k výboji, který kondenzátor připojí k cívce paralelně a ze zapojení se stane paralelní rezonanční obvod. Po vybití kondenzátoru na určitou úroveň proudu se zhasí výboj a rezonanční obvod se rozpojí. Poté se začne kondenzátor opět nabíjet a celý cyklus se opakuje stále dokola.

SGTC se dělí na dvě skupiny.

Statické jiskřiště – Tvoří dvojice elektrod, mezi nimiž je vzdálenost, kterou udává minimální přeskokové napětí, které se v zapojení může objevit. Tento typ není vhodný pro dlouhodobý provoz, protože se elektrody dost zahřívají a mohlo by dojít k trvalému výboji, a tím pádem k destrukci jiskřiště. Používá se pouze na menší výkony v řádech stovek wattů.



Obrázek č. 3 - Statické jiskřiště [2]

Rotační jiskřiště – Princip tohoto zapojení spočívá v tom, že na kotouč z nevodivého materiálu jsou přidělané vodivé kolíky (šrouby). Celý kotouč rotuje mezi dvojicí statických elektrod. Při míjení dojde k výboji a oddálením z důvodu rotace zase ke zhašení. Tento druh zapojení je vhodný pro vyšší výkony, protože se díky rotaci kotouče nepřehřívá.

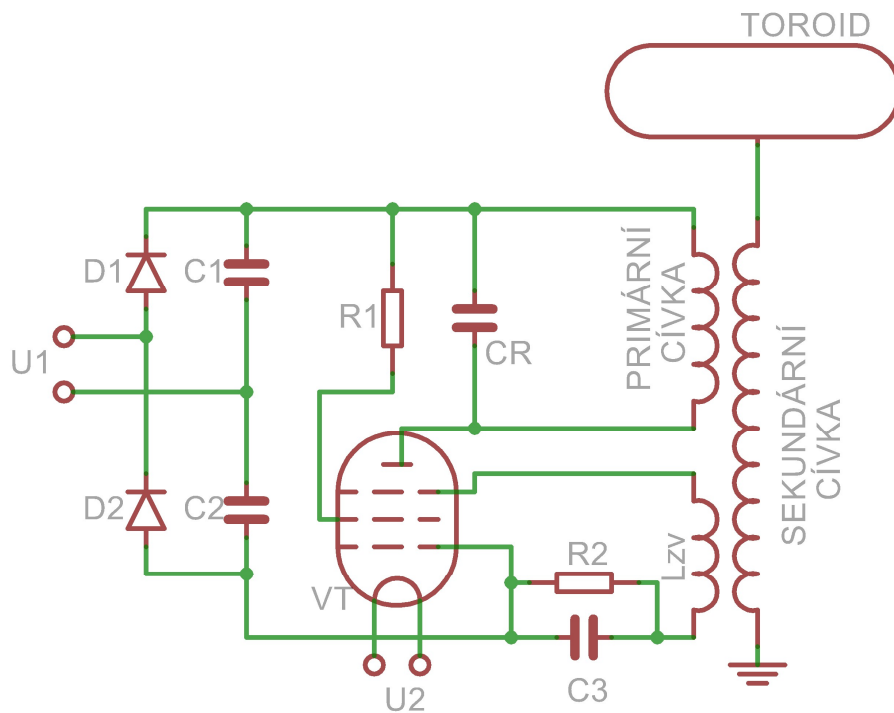


Obrázek č. 4 - Rotační jiskřiště [2]

Celkové zapojení SGTC je výhodné v tom, že je konstrukčně velmi jednoduché, ale jeho výkon je omezen výběrem vhodného zdroje a tepelným zatížením.

2.1.2. VTTC

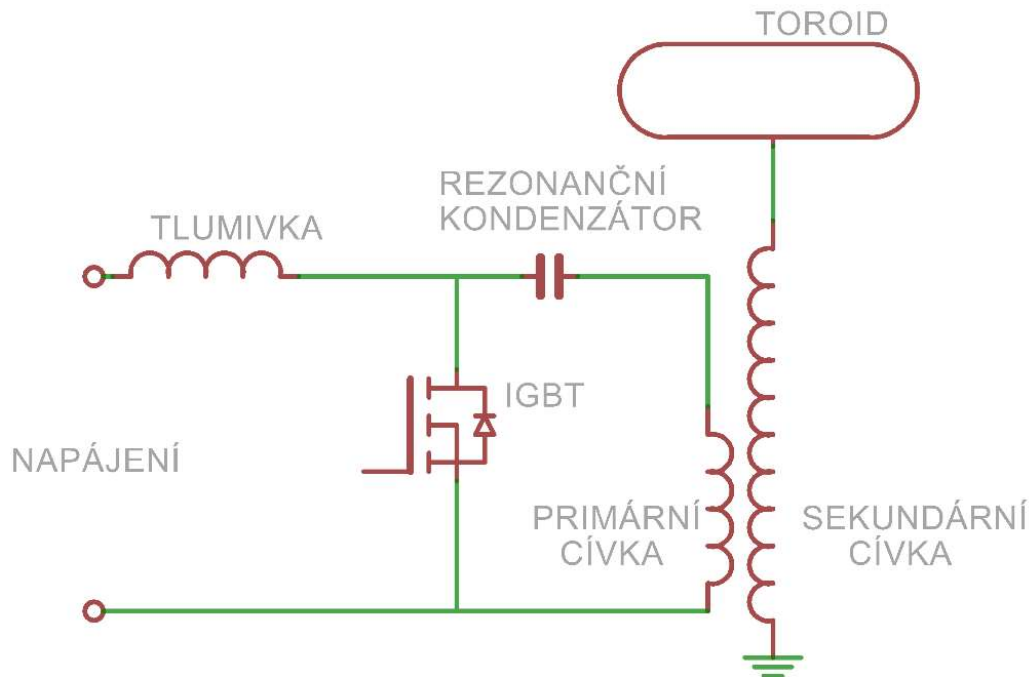
Jak je z anglické zkratky zřejmé (Vakuum Tube Tesla Coil), jedná se o zapojení s výkonovou elektronkou, která budí primární cívku a je řízena zpětnou vazbou. Pro zpětnou vazbu je tedy nutné doplnit k samotnému Teslovu generátoru další cívku. Pro potřebu vyššího výkonu se dají zapojit elektronky paralelně. Výhoda tohoto typu zapojení je v menší hlučnosti hoření korony, protože díky elektronkám narůstá výstupní napětí pozvolna. Další výhodou elektronek je, že se dají krátkodobě přetěžovat a nevadí jim napěťové špičky. Nevýhodou je použití vysokonapěťového transformátoru pro napájení v řádech kV. Důsledkem napájení VN transformátoru ze sítě jsou na anodu elektronky přiváděny impulsy o frekvenci 50 Hz, což způsobuje přehřívání anody. Z tohoto důvodu se do Teslova generátoru dodělávají různé regulátory pro úpravu frekvence vstupující na anodu. Pro VTTC je vhodné použít válcovou primární cívku pro lepší vazbu se sekundární cívku.



Obrázek č. 5 - Zapojení VTTC

2.1.3. OLTC

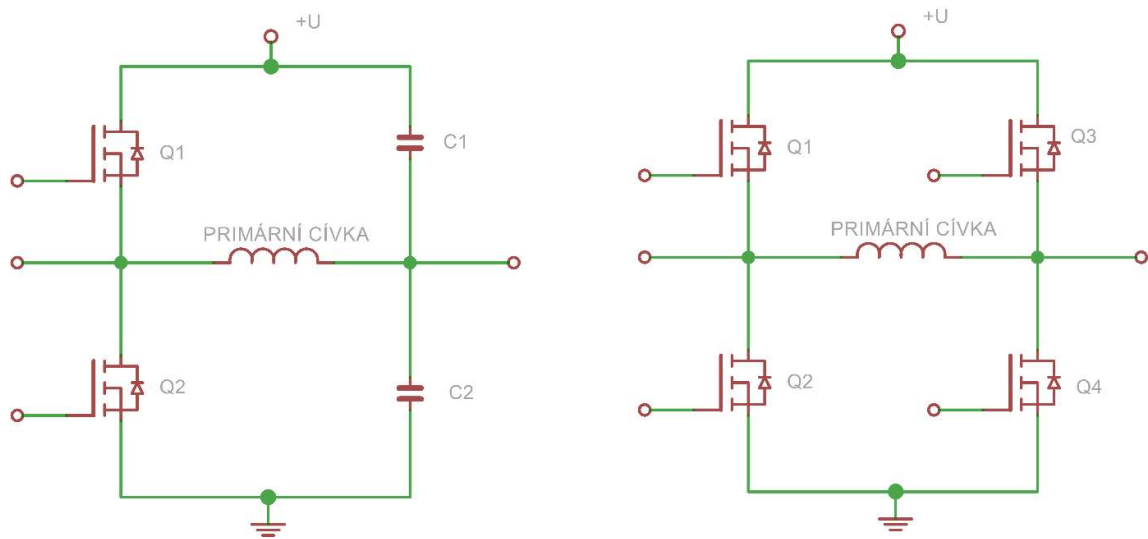
V anglickém znění Off Line Tesla Coil, které se svým zapojením podobá SGTC. V tomto případě však bylo jiskřiště nahrazeno polovodičovou součástkou. Nelze však použít tyristor, neboť u něj nedochází k okamžitému sepnutí a při vysokém nárůstu proudu není využit celý objem křemíku při lavinovém sepnutí v součástce a dojde k poškození. Nejlépe se dá použít IGBT tranzistor, který je řízený obdélníkovým signálem, jehož frekvence určuje rychlost spínání tranzistoru, a tedy je snazší naladit primární obvod do rezonanční frekvence. Při použití IGBT tranzistoru je nutné použít externí zpětnou diodu pro přenos zbylé energie ve vypnutém stavu IGBT, čímž se na primární cívku dostává vyšší proud, což má za následek snížení počtů závitů. Kvůli zamezení přímému zkratu přes tranzistor se mezi zdroj a transformátor přidává tlumivka. OLTC není náročné na zdroj, je účinnější než SGTC a nedochází k rušení a vzniku ozonu v jiskřišti. Nevýhodou je nižší odolnost, finanční nákladnost a nemožnost použití na vysoké výkony.



Obrázek č. 6 - Zapojení OLTC

2.1.4. SSTC

Nejdokonalejší zapojení primární části Teslova generátoru je polovodičové buzení. Jde o zapojení řídicího obvodu s měničem, který v tomto zapojení nahrazuje rezonanční kondenzátor primárního obvodu. Spínací frekvence měniče je přizpůsobena rezonanční frekvenci sekundární cívky, ale to se stále mění různými vlivy v prostředí např. pohyb osob, změna vlhkosti ovzduší atd. Proto se musí frekvence výstupního napětí měniče stále doladovat. K tomu slouží obvod nazvaný fázový závěs, který si můžeme představit jako zpětnou vazbu. V tomto případě zapojení je vhodné sekundární cívku a primární cívku navinout jako sousedé cívky, aby byl vyšší činitel vazby mezi cívkami. Zapojení SSTC se dělí na dvě základní varianty, a to poloviční můstek a plný můstek.

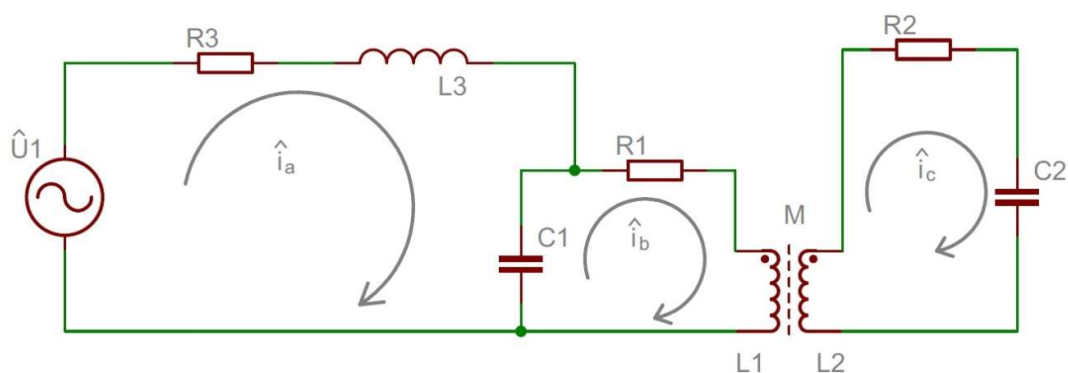


Obrázek č. 7 - Poloviční můstek (nalevo) Plný můstek (napravo)

V případě polovičního můstku se dá říci, že je také poloviční napětí měniče oproti plnému můstku. Poloviční můstek tvoří dva bipolární tranzistory s vysokou spínací frekvencí a s širokým pásmem spínaných výkonů nejlépe IGBT a kondenzátorů. Plný můstek je taktéž tvořený nejlépe IGBT tranzistory, kde jsou kondenzátory nahrazeny tranzistory a je tedy využité celé napětí meziobvodu. Toto zapojení spíná tranzistory do kříže, které tak přivádějí výkon na primární cívku. Nevýhodou oproti polovičnímu můstku je riziko proražení čtyř tranzistorů namísto dvou, které jsou velmi nákladné. U SSTC je možno doplnit do řídicího obvodu audio i digitální modulaci. V dalších částech této práce bude SSTC popsáno podrobněji.

2.2. Teoretický rozbor Teslova generátoru

2.2.1. Náhradní schéma Teslova generátoru s rezonančním obvodem na primární straně



Obrázek č. 8 - Náhradní schéma Teslova generátoru s rez. obvodem na primární straně

Toto náhradní schéma znázorňuje v jednodušší formě skutečný Teslův generátor. Obvod je rozdělen do dvou částí, jež tvoří primární obvod a sekundární obvod.

Primární obvod obsahuje napájení U_1 . Odpor R_3 , který znázorňuje odpor vedení, indukčnost L_3 , která představuje indukčnost vedení. Dále je zde kapacita C_1 , která znázorňuje kapacitu na primární cívce, odpor R_1 a indukčnost L_1 znázorňují odpor a indukčnost primární cívky.

Sekundární obvod je tvořen kapacitou C_2 , která je tvořena vzduchem okolo Teslova generátoru, dále je zde odpor sekundární cívky R_2 a indukčnost sekundární cívky L_2 .

Naměřené hodnoty jednotlivých prvků naleznete na obrázku č. 9 - Zdrojový kód.

2.2.2. Rovnice

Pro sestavení rovnic byla použita metoda smyčkových proudů vycházející z druhého Kirchhoffova zákona. Metoda smyčkových proudů se využívá jak pro stejnosměrné, tak i pro střídavé obvody. Pomocí této metody se dají zjistit úbytky napětí a proudu na jednotlivých součástkách. Druhý Kirchhoffův zákon zní: Součet všech úbytků napětí v uzavřené smyčce se rovná nule. Z toho vyplývá, že se nám napětí nemůže vytrácet.

Dále je důležité umět vyjádřit impedanci jednotlivých prvků obvodu. Impedance je fyzikální veličina popsána reálnou a imaginární složkou, tedy komplexním číslem. Impedance obsahuje zdánlivý odpor součástky a fázový posuv napětí vůči proudu při průchodu střídavého proudu.

Pro odpor je impedance vyjádřena vztahem (4). Je to tedy vlastní hodnota odporu, jelikož na odporu nedochází k fázovému posuvu.

Pro cívku je impedance vyjádřena vztahem (5). U cívky se proud zpožďuje za napětím.

Pro kondenzátor je impedance vyjádřena vztahem (6). U kondenzátoru proud předbíhá napětí.

$$Z = R \quad (4)$$

$$Z = j\omega L \quad (5)$$

$$Z = \frac{1}{j\omega C} \quad (6)$$

Nyní je možné si vyjádřit dané rovnice pro daný obvod. Rovnice (7) je pro smyčku i_a , (8) je pro smyčku i_b a (9) je pro smyčku i_c .

$$R_3 \hat{i}_a + j\omega L_3 \hat{i}_a + \frac{1}{j\omega C_1} (\hat{i}_a - \hat{i}_b) = \hat{u}_1 \quad (7)$$

$$\frac{1}{j\omega C_1} (\hat{i}_b - \hat{i}_a) + R_1 \hat{i}_b + j\omega L_1 \hat{i}_b - j\omega M \hat{i}_c = 0 \quad (8)$$

$$j\omega L_2 \hat{i}_c - j\omega M \hat{i}_b + R_2 \hat{i}_c + \frac{1}{j\omega C_2} \hat{i}_c = 0 \quad (9)$$

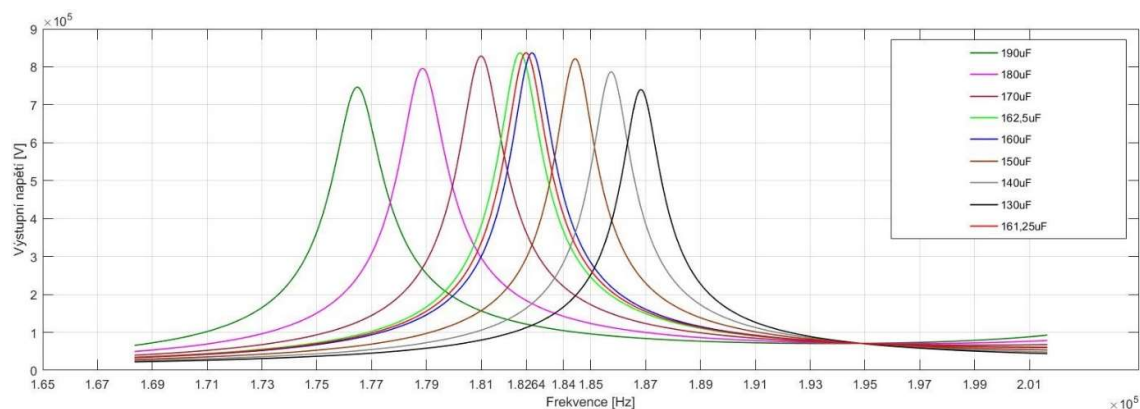
2.2.3. Výpočet pomocí MATLAB™

```
teslacoil.m* x +
1 - clear all;
2 - pocmat=501; %pocet matic
3 - freq1=185000; %rezonancni frekvence tc
4 - proc_f=9; % procentni odchylka dolni a horni frekvence
5 - freq1_dol=freq1*(1-proc_f/100); % vypocet dolni frekvence
6 - freq1_hor=freq1*(1+proc_f/100); % vypocet horni frekvence
7 - freq=logspace(log10(freq1_dol),log10(freq1_hor),pocmat); % rada frekvenci
8 - omega=2*pi*freq; %uhlova rezonancni frekvence tc
9 - % zadani parametru prvku
10 - L1=14.3e-6;
11 - L2=50e-3;
12 - L3=5e-6;
13 - kappa=0.32;
14 - M=sqrt(L1)*sqrt(L2)*kappa;
15 - C1=1.6125e-7;
16 - C2=1.4865e-11;
17 - U1=150;
18 - R1=0.20;
19 - R2=340.9;
20 - R3=0.08;
21 - P=zeros(1,pocmat,'double');
22 - for nn=1:pocmat
23 - A=[(R3+1i*omega(nn)*L3+1/(1i*omega(nn)*C1)) (-1/(1i*omega(nn)*C1)) (0);
24 - (-1/(1i*omega(nn)*C1)) (1/(1i*omega(nn)*C1)+R1+(1i*omega(nn)*L1)) (-1i*omega(nn)*M);
25 - (0) (-1i*omega(nn)*M) (R2+1i*omega(nn)*L2+1/(1i*omega(nn)*C2))];
26 - B=[U1;0;0];
27 - ii=A\B;
28 - iC=ii(3);
29 - P(nn)=abs(iC/(1i*omega(nn)*C2));
30 - end
31 - plot(freq,P,'k-');
```

Obrázek č. 9 - Zdrojový kód 1

Na začátku jsem zadal počet matic neboli počet bodů v grafu, aby byl graf krásně vyhlazený. Dále bylo nutné zadat přibližnou rezonanční frekvenci Teslova generátoru. Poté jsem provedl výpočet dolní a horní frekvence, která je určena procentní odchylkou od zadané rezonanční frekvence. Dále jsem vygeneroval logaritmickou osu x, která je ohraničená dolní a horní frekvencí a obsahuje 501 bodů. Poté jsem zadal vzorec pro výpočet úhlové frekvence. Následně jsem zadal jednotlivé hodnoty prvků v obvodu. Nakonec jsem využil FOR cyklus, který obsahuje matice A a B. Tyto matice obsahují rovnice popsané v předchozí kapitole 2.2.2. Rovnice. Dále jsem použil příkaz pro výpočet lineárních rovnic, které jsou zadané pomocí matic a poté výpočet výstupního napětí neboli napětí na sekundární cívice.

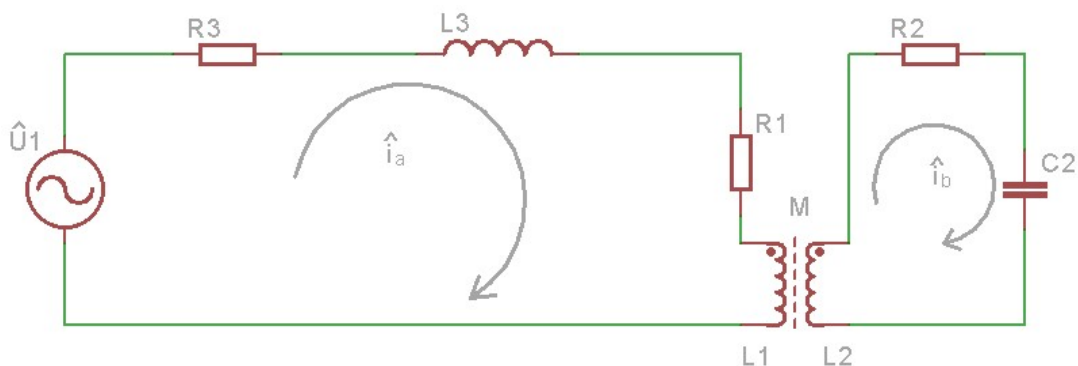
V části, kde jsou zadány parametry prvků, jsem měnil hodnotu kondenzátoru C_1 , pomocí čehož jsem hledal teoreticky přesnou hodnotu rezonanční frekvence Teslova generátoru. Tyto průběhy jsou vidět na obrázku č. 10 - Závislost výstupního napětí na rezonančním kondenzátoru.



Obrázek č. 10 - Závislost výstupního napětí na rezonančním kondenzátoru

Z obrázku je patrné, že Teslův generátor se dostane do maximální rezonance při frekvenci 182,64 kHz a při hodnotě kondenzátoru $C_1 = 162,5 \mu\text{F}$. Maximální rezonance se projevuje náhlým vzestupem napětí na sekundární cívce, což je způsobeno tím, že se proud protékající obvodem a napětí dostávají do fáze.

Tento teoretický rozbor byl vypočten pro sekundární cívku neuzavřenou ve Faradayově kleci. Pro reálný provoz nebyl použit rezonanční kondenzátor, protože vycházely velmi vysoké hodnoty kondenzátoru. Dále se však ukázalo, že rezonanční kondenzátor nebyl nutný pro provoz Teslova generátoru. Rezonanční obvod byl pouze na sekundární straně. Následující výpočty více odpovídají realitě.



Obrázek č. 11 - Náhradní schéma Teslova generátoru bez rez. obvodu na primární straně

Obvodové rovnice pro obvod z obrázku č. 11 - Náhradní schéma Teslova generátoru bez rezonančního obvodu na primární straně.

$$R_3 \hat{i}_a + j\omega L_3 \hat{i}_a + R_1 \hat{i}_a + j\omega L_1 \hat{i}_a - j\omega M \hat{i}_b = \hat{u}_1 \quad (10)$$

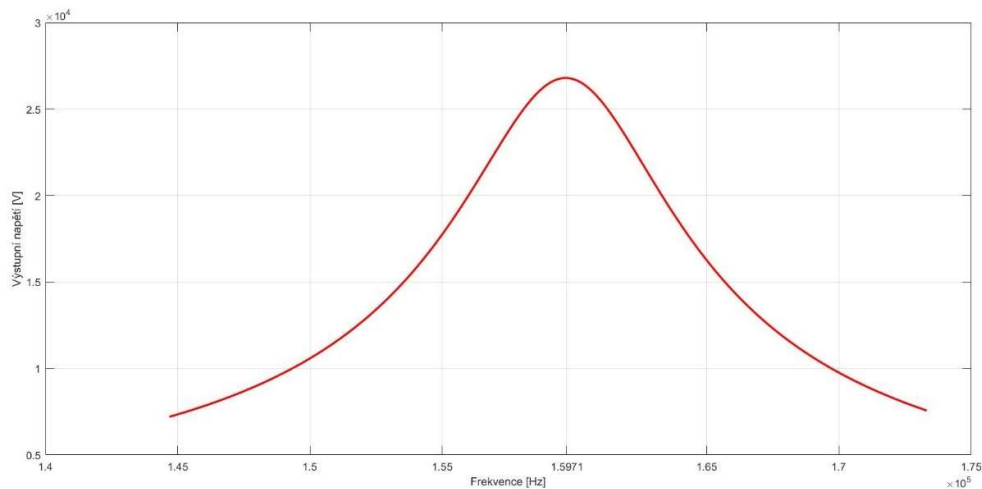
$$j\omega L_2 \hat{i}_b - j\omega M \hat{i}_a + R_2 \hat{i}_b + \frac{1}{j\omega C_2} \hat{i}_b = 0 \quad (11)$$

```

1 clear all;
2 pocmat=501; %pocet matic
3 freq1=159000; %rezonancni frekvence tc
4 proc_f=9; % procentni odchylka dolni a horni frekvence
5 freq1_dol=freq1*(1-proc_f/100); % vypocet dolni frekvence
6 freq1_hor=freq1*(1+proc_f/100); % vypocet horni frekvence
7 freq=logspace(log10(freq1_dol),log10(freq1_hor),pocmat); % rada frekvenci
8 omega=2*pi*freq; %uhlova rezonancni frekvence tc
9 % zadani parametru prvku
10 L1=14.356e-6;
11
12 L2=53e-3;
13 L3=2e-6;
14 kappa=0.32;
15 M=sqrt(L1)*sqrt(L2)*kappa;
16 C2=2.005e-11;
17
18 U1=92;
19 R1=9.68;
20 R2=402.9;
21 R3=0.08;
22 P=zeros(1,pocmat,'double');
23 for nn=1:pocmat
24     A=[ (R3+1i*omega(nn)*L3+R1+1i*omega(nn)*L1) (-1i*omega(nn)*M); (-1i*omega(nn)*M) (R2+1i*omega(nn)*L2+1/(1i*omega(nn)*C2)) ];
25     B=[U1;0];
26     ii=A\B;
27     iB=ii(2);
28     P(nn)=abs(iB)/(1i*omega(nn)*C2);
29 end
30 plot(freq,P,'k-');
31

```

Obrázek č. 12 - Zdrojový kód 2



Obrázek č. 13 - Závislost výstupního napětí na frekvenci

Hodnotu odporu sekundární cívky R_2 jsem vypočítal z jakosti cívky, která je uvedena v kapitole 5.1.2. Rezonanční frekvence cívky a činitel jakosti. Pomocí vzorce (3) a jednoduché úpravě mi vyšla hodnota odporu cívky $R_2 = 402,9\Omega$

Pro úpravu rezonanční frekvence jsem měnil hodnotu C_2 . Při hodnotě $C_2 = 200,5 \text{ pF}$ jsem se v simulaci dostal na přesnou hodnotu rezonanční frekvence, která je $159,71 \text{ kHz}$. Tento průběh je znázorněn na obrázku č. 13 - Závislost výstupního napětí na frekvenci.

2.3. Rizika činnosti Teslova generátoru

Napětí na sekundární cívce Teslova generátoru dosahuje řádů desítek tisíc až miliónů voltů při vysokých frekvencích až stovek kilohertz, proto je důležité při práci s ním dodržovat určitá bezpečnostní opatření, aby nedošlo k úrazu elektrickým proudem.

Vhodnou pomůckou je užití Faradayovy klece, která odstíní elektromagnetické pole a ochrání tak osoby i přístroje v okolí.

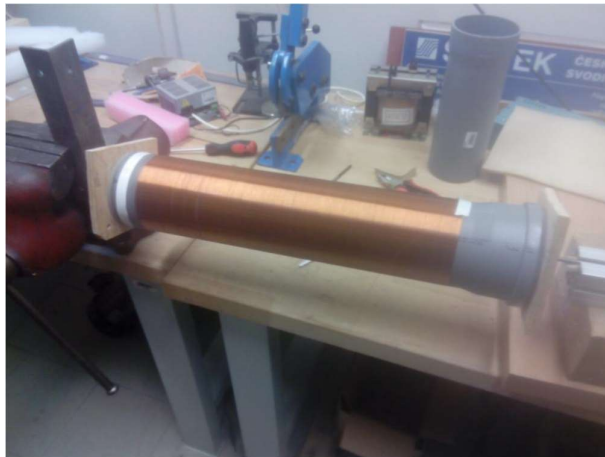
Další důležité opatření je dobré odvětrávání prostor, kde Teslův generátor pracuje (srší výboje), neboť při hoření výboje vzniká ozon, který je zdraví škodlivý.

2.4. Sestavené komponenty

Má bakalářská práce vychází z mého bakalářského projektu [11], ve kterém jsem sestrojil sekundární cívku, Faradayovu klec a napěťový dělič. Tyto komponenty využívám ve své práci, proto vám dále popíši jejich rozměry a specifikace.

2.4.1. Sekundární cívka

Sekundární cívka je vinutá drátem o průměru 0,25 mm na novodurovou trubku o průměru 110 mm. Cívka má přibližně 1600 závitů a její rozměry jsou: výška 650 mm, délka závitů 400 mm a zakončuje jí toroid o průměru 350 mm. Cívka je motána závit vedle závitů a žádný závit se nesmí křížit, nebo by mohlo dojít ke zničení cívky. Dále je cívka chráněna izolačním lakem, který zaručuje kromě elektrické pevnosti také mechanickou odolnost. Cívka je zobrazena na obrázku č. 14 - Navíjení sekundární cívky [11].



Obrázek č. 14 - Navíjení sekundární cívky [11]

2.4.2. Faradayova klec

Na stavbu Faradayovy klece bylo použito pozinkované pletivo s rozměry ok 25x25 mm s drátem o průměru 2 mm. Válcová podstava má obvod 3 m a je na koncích spojena pomocí pásoviny a šroubů. Víko je vytvořeno z ocelového prutu zatočeného do kruhu a přes něj navařeným pletivem, jaké bylo použito pro podstavu. Rozměry klece jsou 0,95 m průměr a 1 m výška. Klec je zobrazena na obrázku č. 15 - Faradayova klec.



Obrázek č. 15 - Faradayova klec [11]

2.4.3. Napěťový dělič

Napětí na sekundární cívice Teslova generátoru je možné měřit pomocí vestavěného odporového děliče, který je připojen k cívice paralelně. Napěťový dělič je zkonstruován ze 108 sériově řazených odporů o hodnotě odporu 4,7 M Ω a jedním 50 k Ω odporem spojených do série. Napětí se měří na posledním odporu (50k Ω). Zjištěné napětí se musí vynásobit 10153x, abychom dostali hodnotu výstupního napětí na sekundární cívice.

3. Stavba výkonového měniče

V mé bakalářské práci bylo zadané, aby byl Teslův generátor buzený polovodičově tedy SSTC. Typ zapojení výkonového měniče byl zvolen jako plný můstek.

Schéma výkonového měniče bylo převzato z [1] a mírně upraveno.

Celé schéma výkonového měniče najdete v příloze [1] - Schéma výkonového měniče.

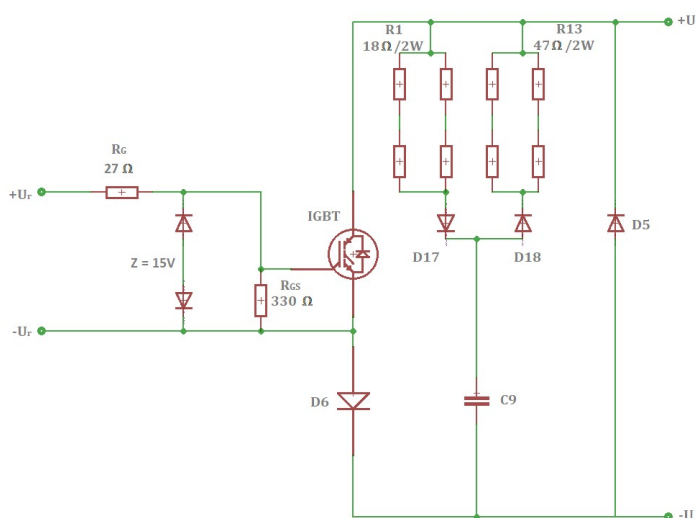
Výkonový měnič je tedy plný můstek, který umožňuje využít celého napětí napěťového meziobvodu. Tomu bylo třeba přizpůsobit použité součástky, aby snesly jak špičkové napětí, tak frekvenci spínání. Jako nejvhodnější se jevílo užití IGBT transistorů. IGBT je bipolární tranzistor, který je zkonstruován pro velký rozsah spínaných výkonů (od W až po MW) a vysoké spínací frekvence. Datasheet ke zvolenému IGBT tranzistoru FGH50N6S2D je uveden v seznamu použité literatury [9]. Z důvodu velmi rychlého spínání tranzistorů byla vnitřní zpětná dioda vyřazena z chodu zapojením diody sériově DPG60I400HA (D6, D7, D11, D12) a byla nahrazena antiparalelním zapojením rychlejší diody MUR1560G (D5, D8, D9, D10). Výsledkem bylo zkrácení času vypínání tranzistoru při induktivním zatížení.

Ve schématu je část, která obsahuje MOSFET drivery UCC27322 (IO1, IO2), tyto drivery dostávají impulsy z řídicí desky pomocí stíněného kabelu na svorkovnici (J_1). Drivery jsou galvanicky odděleny od silnoproudé části pomocí malých toroidů s transformačním převodem přibližně 0,6. Díky tomuto převodu si lze spočítat přibližné napětí na výstupu z toroidů. Pokud jsou drivery napájeny napětím 12 V, tak je výstup přibližně 20 V. Na každém toroidu jsou dvě sekundární vinutí a jedno primární vinutí, které má 9 závitů a sekundární 2x15 závitů. Výstupy jsou přiváděny na IGBT tranzistory tak, aby spínaly do kříže, tedy do plného můstku. Z důvodu potřeby ochrany proti nahodilým špičkám napětí U_{GE} jsou ke každému tranzistoru připojeny dvě Zenerovy diody 15 V. Dále je zde zapotřebí odporů pro omezení proudu, jelikož je MOSFET driver schopen poskytovat proud až 9 A. Hodnota odporu pro omezení je 27 Ω . Tento odpor je zařazen před vstupem do gate sériově. Dále je zde umístěn ochranný odpor, který je zapojen mezi gatem a emitorem tranzistoru s hodnotou 330 Ω .

Další důležitou částí výkonového měniče je ochrana tranzistorů pomocí RCD obvodů, které omezují zákmity s vysokými hodnotami napětí při jejich velmi rychlém spínání a vypínání. Při induktivním zatížení tranzistoru a jeho sepnutí se na něm objevují napěťové špičky, které je potřeba eliminovat co nejvíce, protože by tyto špičky mohly zničit tranzistory. Dále by mohlo tranzistory zničit jejich vypnutí při induktivní zátěži, kdy prudce stoupá napětí. Tento prudký nárůst je třeba zpomalit.

Aby se zamezilo těmto nechtěným dějům, je k tranzistorům implementováno sérioparalelní zapojení diod, rezistorů a kondenzátoru, tedy RCD obvody. Při sepnutí tranzistoru odpor R1 omezí vodivost a dioda D17 vede omezený proud na kondenzátor C9. V této chvíli je na tranzistoru nejmenší napětí a všechnu energii pohlcuje kondenzátor. Při nasycení kondenzátoru přestane mít kondenzátor vodivost, a to způsobí nárůst napětí jak na kondenzátoru, tak na tranzistoru.

Tato operace se provádí cyklicky, proto se musí kondenzátor vybit, aby se mohl znovu nabíjet, což je zajištěno přes diodu D18 a odpor R13, který omezuje proud, jímž se kondenzátor vybíjí. Tento proud je přičten k proudu, který teče přes sepnutý tranzistor, neboť kondenzátor se vybíjí při sepnutém stavu tranzistoru.



Obrázek č. 16 - RCD ochrana IGBT

Dále jsou na schématu patrné dva elektrolytické kondenzátory C5, C6 (390 μ F/400V), které plní funkci filtrace a vyhlazování napájecího napětí. Kondenzátory C1 a C4 jsou zde pro potřebu vykrývání proudových špiček u ochran IGBT. Nakonec jsou zde varistory pro ochranu jak samotných IGBT tranzistorů, tak celého obvodu.

3.1. Popis plošného spoje výkonového měniče

Plošný spoj výkonového měniče najdete v příloze [2] - Návrh plošného spoje výkonového měniče.

Proběhl nový návrh plošného spoje oproti návrhu uvedenému v příloze [1].

Plošný spoj měniče byl navržen tak, aby odpovídal normám s ohledem na procházející proud a frekvenci napětí. Navržené cesty jsou co nejkratší z důvodu co nejmenší indukčnosti mezi IGBT tranzistorem a součástkami s ním spojenými.

Většího povoleného ztrátového výkonu se dosáhlo použitím sério-paralelního zapojení odporů v RCD obvodech, které jsou v SMD provedení. Tímto zapojením bylo docíleno lepšího odvodu tepla do desky plošného spoje a do chladiče přichyceného nad ním.

4. Řídicí obvod pro výkonový měnič

Schéma řídicího obvodu bylo převzato z [1] a mírně upraveno.

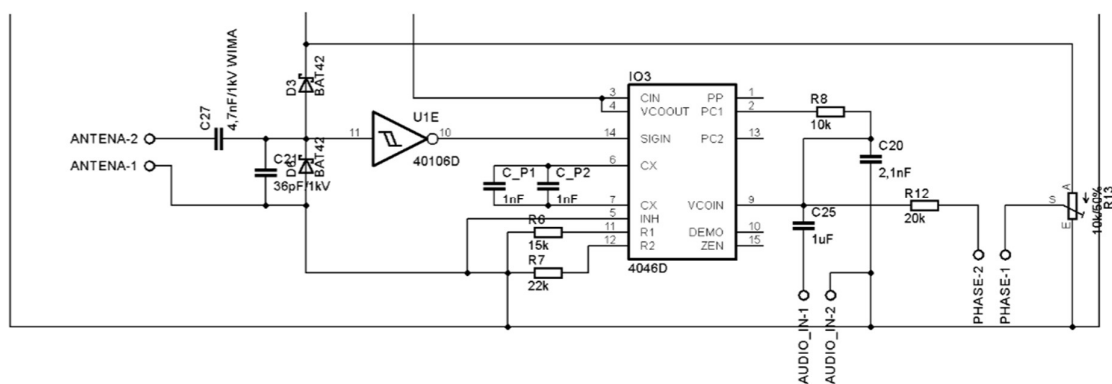
Celé schéma řídicího obvodu najdete v příloze [3] - Schéma řídicího obvodu pro výkonový měnič.

Plošný spoj řídicího obvodu byl z velké části navržen z SMD součástek za účelem zmenšení plošného spoje. Návrh plošného spoje najdete v příloze [4] - Návrh plošného spoje řídicího obvodu pro výkonový měnič.

Řídicí obvod obsahuje 4 základní části, které budou dále podrobněji popsány.

První část řídicího obvodu je napájení, které je zde vyřešeno stabilizovaným laboratorním zdrojem 12 V. Toto napětí je využito k napájení MOSFET driverů (IO1, IO2), které jsou osazeny na desce výkonového měniče. Poté je těchto 12 V sníženo podélným stabilizátorem U3 LM7805 na hodnotu 5 V, tímto napětím se napájí zbytek řídicího obvodu (U1, U2, IO3).

Druhou část tvoří fázový závěs. Na to je zde použit integrovaný obvod 74HCT4046AD s označením ve schématu IO3. Fázový závěs slouží k neustálému doladování rezonanční frekvence, aby Teslův generátor měl co nejvyšší jakost. Signál z antény je přivedený na kondenzátor C27 4,7nF/1kV WIMA, aby se oddělila stejnosměrná složka. Poté je signál filtrován dolní propustí C21 = 33pF/1kV a upraven pomocí Schottkyho diod D3 a D6. Nakonec je signál upraven Schmitovým invertorem U1E. Tento upravený signál je připojen na 14. pin integrovaného obvodu s názvem SIG IN. Dále se tento signál fázově porovnává se signálem VCO OUT. Jestliže je zjištěna rozdílná fáze na těchto dvou vstupech, bude výstupní signál na PC1 OUT upraven dolní propustí, kterou tvoří odpor R8 a kondenzátor C20. Díky této úpravě signálu vstupujícího do VCO IN se frekvence napětím řízeného oscilátoru (VCO) upraví na požadovanou hodnotu. Dále jsou k tomuto obvodu připojeny součástky pro úpravu frekvenčního rozsahu VCO OUT, což jsou odpor R6 a kondenzátory C_P1 a C_P2. Odpor R7 nastavuje offset VCO, tedy na jaké frekvenci bude VCO pracovat při nulovém signálu na vstupu. Nakonec je celý obvod zajištěn při odběru proudovými špičkami dvěma paralelně řezanými kondenzátory C28 a C19, které jsou umístěny co nejbližší napájení integrovaného obvodu. Všechny tyto součástky a celý obvod jsou zobrazeny na obrázku č. 17 - Fázový závěs.



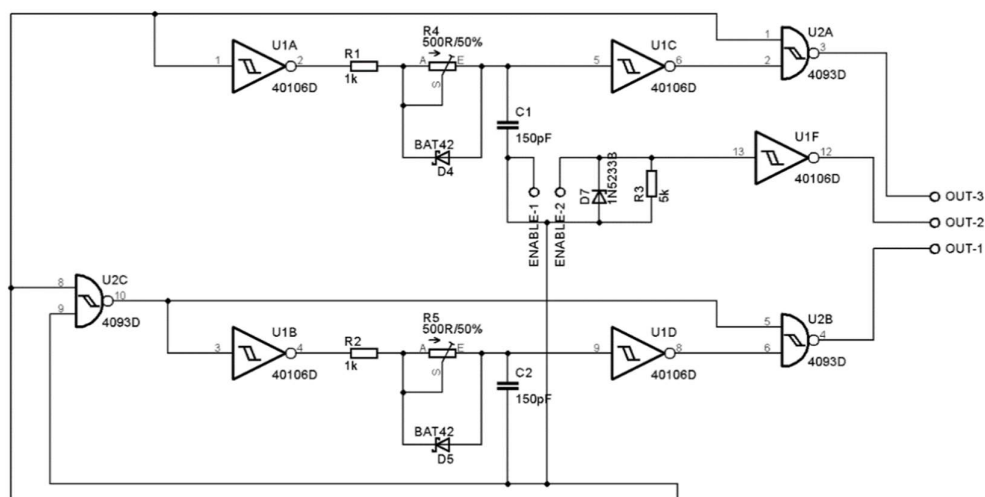
Obrázek č. 17 - Fázový závěs

Třetí část řídicího obvodu tvoří audiomodulace, která nebyla v zadání pro bakalářskou práci. Audiomodulace je v podstatě rozkmit hořícího oblouku ve frekvenci neperiodického a neharmonického signálu, tedy audio nahrávky, kterou přivádíme na vstup konektoru AUDIO_IN, jenž je vidět na obrázku č. 17 - Fázový závěs. Frekvence audio nahrávky, kterou pouštíme na vstup, je v rozmezí od 16 Hz do 20 kHz, což je vlastně pásmo slyšitelnosti lidského sluchu. Naproti tomu samotný Teslův generátor pracuje na frekvenci o mnoho vyšší, přibližně okolo 200 kHz. Tyto dvě frekvence jsou tedy od sebe dostatečně vzdálené, aby se neovlivňovaly. Audio signál vstupující na konektor AUDIO_IN je přefiltrován (oddělení stejnosměrné složky) přes kondenzátor C25 a dále pokračuje na vstup VCO IN integrovaného obvodu, který byl použit pro fázový závěs. Zde je audio signál přidán ke zpětné vazbě napěťově řízeného oscilátoru tedy VCO, a tím je vlastně rozkmitáno hoření korony s frekvencí audio signálu. Amplituda audio signálu je omezena hodnotou změny, při které by Teslův generátor vypadl z rezonance.

Čtvrtá část řídicího obvodu je zaměřena na realizaci mrtvých časů mezi spínáním IGBT tranzistorů. Obvod pro řízení mrtvých časů se dělí na dvě části, a to přímý vstup a obrácený vstup, z důvodu spínání tranzistorů křížem. Výstup z napětově řízeného oscilátoru je přiveden na přímou část na vstup hradla „HEF40106D“ s označením U1A. Zde se signál zneguje a vytvaruje. Jestliže je tedy vstupem logická nula (0 V), pak se na výstupu U1A objeví logická jednička (+5 V), tento signál je dále veden přes odpory R1 a R4 na kondenzátor C1 a na vstup hradla U1C, kde je v tuto chvíli nulové napětí z důvodu nabíjení kondenzátoru C1, ale toto napětí postupně exponenciálně roste a když dosáhne hodnota napětí rozhodovací úrovně (3,7 V), tak se i výstup na U1C přeploží z logické jedničky na logickou nulu. Vybíjení kondenzátoru se urychluje přes diodu D4.

Obrácený vstup je identický s přímým vstupem až na to, že signál z napětově řízeného oscilátoru je přiveden na NAND hradlo „HEF4093D“ s označením U2C.

Poznámka: Při oživování byla zjištěna chyba v převzatém schématu řídicího obvodu. Původní hradlo NAND „HEF4093D“ bylo nahrazeno NOR hradlem s označením „CD4001B“.



Obrázek č. 18 - Obvod pro mrtvé časy

5. Oživování a měření Teslova generátoru

5.1. Měření vlastností sekundární cívky

Při měření vlastností sekundární cívky byly podstatné tři body měření, a to zjistit, jestli je cívka frekvenčně závislá, při jaké frekvenci se cívka dostává do rezonance a zjistit činitel jakosti.

5.1.1. Frekvenční závislost cívky

Pro zjištění, zdali je cívka frekvenčně závislá, je důležité měřit impedanci v různých frekvencích. Cívku jsem měřil pomocí impedančního analyzátoru, který měří maximálně do 100 kHz.

f (Hz)	R (Ω)	L (mH)
100	171,2	51,9
1000	171,5	51,95
10 000	173,3	51,86
50 000	190,5	51,35
100 000	231,8	49,70

Tabulka č. 1 - Frekvenční závislost cívky

Z uvedené tabulky č. 1 - Frekvenční závislost cívky je vidět, že cívka je frekvenčně závislá.

5.1.2. Rezonanční frekvence cívky a činitel jakosti

Rezonanční frekvence cívky byla měřena následujícím způsobem. Na cívku byl přiveden signál z generátoru funkcí a na odporový dělič, který obsahuje Teslova cívka, byl připojen osciloskop. Postupným zvyšováním frekvence bylo dosaženo místo, kde se posouvají fáze. Při posunu o $\pi/2$ nastává rezonance, v našem případě je to 159,71 kHz.

Dále bylo třeba zjistit činitele jakosti cívky. Ten se vypočítá pomocí vzorce (12).

$$Q = \frac{f_r}{f_2 - f_1} \quad (12)$$

Frekvence f_1 a f_2 jsou krajní frekvence ve frekvenčním pásmu při poklesu o 3 dB, tedy o $\pi/4$ a o $3\pi/4$. Tyto frekvence byly zjištěny pomocí osciloskopu, kde ale bohužel nebylo možno odečítat přesný fázový posun a tento posun se musel přepočítat na zpoždění. Po přepočítání stačilo nastavit frekvenci na generátoru funkcí tak, aby odpovídala vypočítanému zpoždění, které bylo kontrolováno na osciloskopu. Krajní frekvence byly naměřeny v hodnotách $f_1=159,09$ kHz a $f_2=160,30$ kHz. Po dosazení do vzorce (12) byla výsledná jakost cívky $Q = 132$. Rezonanční frekvence a jakost cívky byla měřena, když byla sekundární cívka uložena ve Faradayově kleci.

První měření cívky proběhlo bez Faradayovi klece, toto měření bylo uvedeno v mém bakalářském projektu [11].

První měření cívky probíhalo jiným způsobem a to tak, že pomocí osciloskopu byla zjištěna přibližná rezonanční frekvence. Poté bylo okolí této přibližné rezonanční frekvence proměřeno podrobněji a byly zapsáno jak vstupní, tak výstupní napětí, které jsou uvedené v tabulce č. 2 - Zisk v rezonanci. Z těchto napětí byl vypočten zisk v dB pomocí vzorce (13). Při největším zisku je tedy cívka v rezonanci. Bylo zjištěno, že rezonanční frekvence cívky je 195,5 kHz. Z krajních frekvencí $f_1=194,8$ kHz, $f_2=196,2$ kHz a rezonanční frekvence byla pomocí vzorce (12) vypočtena jakost cívky s výsledkem $Q = 140$.

f (kHz)	U1 (V)	U2 (V)	P_U(dB)
190,0	0,25	1,06	12,58
191,0	0,25	1,43	15,18
192,0	0,25	2,14	18,65
193,0	0,25	3,00	21,58
194,0	0,25	4,70	25,45
194,5	0,25	6,52	28,29
195,0	0,25	9,88	31,90
195,5	0,25	13,30	34,52
195,6	0,25	13,10	34,39
196,0	0,25	9,90	31,95
196,5	0,25	6,60	28,40
197,0	0,25	4,78	25,60

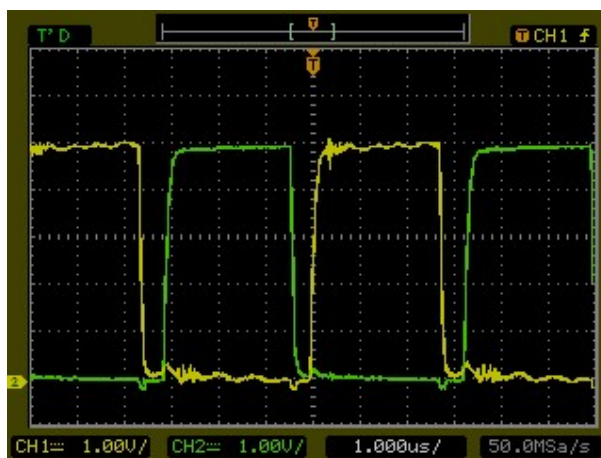
Tabulka č. 2 - Zisk v rezonanci

$$P_{U_{db}} = 20 \cdot \log\left(\frac{U_2}{U_1}\right) \quad (13)$$

Za rozdílem těchto dvou měření stojí kapacita, která je tvořena Faradayovou klecí. Tedy při měření s Faradayovou klecí došlo k navýšení kapacity na sekundárním obvodu. Když zvýšíme kapacitu, tak nám klesne rezonanční frekvence cívky, což je viditelné ze vzorce (1), a také jakost cívky se o trochu sníží.

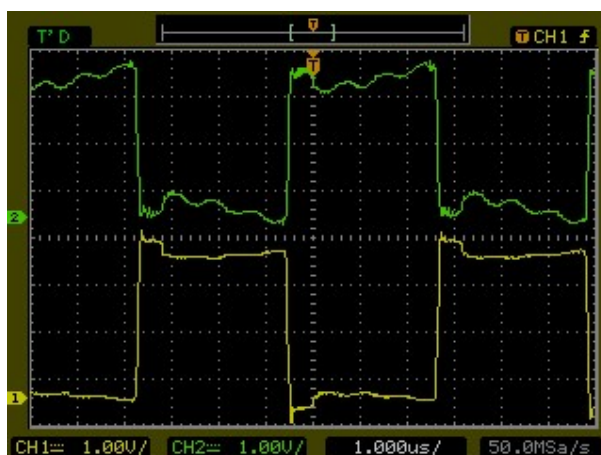
5.2. Oživování komponent

Jako první byl oživen řídicí obvod. Obvod fungoval po prvním zapojení bez problému, ale na jiné frekvenci. To bylo vyřešeno určením jiné hodnoty kondenzátorů C_P1 a C_P2, které jsou vidět na obrázku č. 17 - Fázový závěs. Průběhy výstupního napětí z řídicího obvodu jsou vidět na obrázku č. 19 - Výstup z řídicího obvodu.



Obrázek č. 19 - Výstup z řídicího obvodu

Na obrázku č. 20 - Výstup z výkonového měniče jsou vidět jednotlivé průběhy obou kanálů vedoucí na primární cívku. Měření probíhalo při napájení měniče 30 V_{ss}. Na obrázku je vidět, že napětí je 1 V/dílek, ale sonda byla nastavená 1:10, tedy 3 V z průběhu musíme vynásobit 10x a výsledek pak je 30 V na výstupu z měniče.



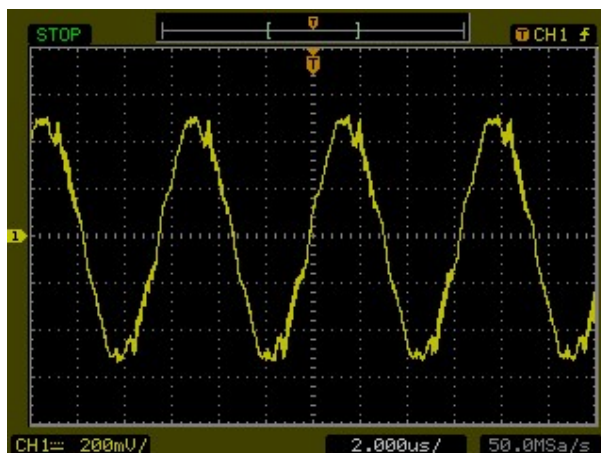
Obrázek č. 20 - Výstup z výkonového měniče

Na obrázku č. 21 - Vstup na primární cívku je vidět vstupní napětí na primární cívku, které je upraveno pomocí indukce zapojené do série na výstup z měniče. Indukce je tam zapojena z důvodu velkého odběru proudu z měniče způsobeného malým počtem závitů na primární cívce. Hodnota indukce zapojené do série je $L = 15 \mu\text{H}$.



Obrázek č. 21 - Vstup na primární cívku

Na obrázku č. 22 – Průběh napětí na výstupu z napěťového děliče na sekundární cívice TG je vidět výstupní napětí z Teslova generátoru měřené přes napěťový dělič. Výkonový měnič byl napájen 30 V_{ss} a výstupní napětí je tedy nutno vynásobit 10153x, aby bylo zjištěno výsledné výstupní napětí.



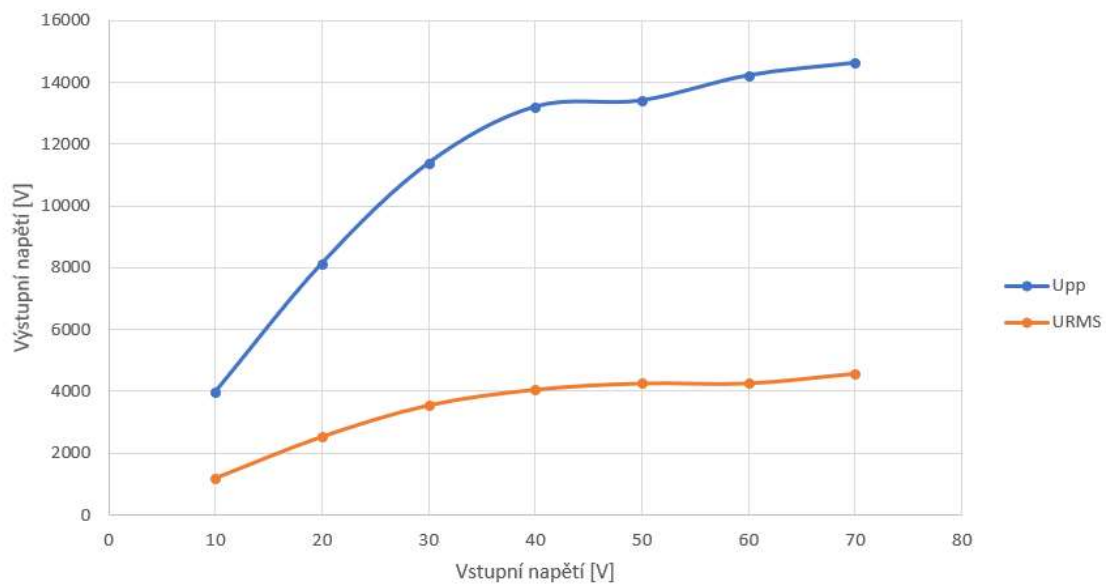
Obrázek č. 22 – Průběh napětí na výstupu z napěťového děliče na sekundární cívice TG

Dále je uvedena tabulka č. 3 - Závislost vstupního a výstupního napětí. K této tabulce je přiložen graf č. 1 - Závislost napětí, ve kterém je vidět závislost výstupního napětí na vstupním. U výstupního napětí je měřena jak jeho maximální hodnota tedy U_{pp} , tak i jeho efektivní hodnota tedy U_{RMS} .

U_{in} (V)	I_{in} (A)	P_{SS} (W)	U_{pp} (V)	U_{RMS} (V)
10	2,41	24	4000	1200
20	5,2	104	8100	2500
30	7	210	11000	3600
40	8,2	328	13000	4100
50	8,8	440	13500	4200
60	9	540	14000	4300
70	9,1	637	15000	4600

Tabulka č. 3 - Závislost vstupního a výstupního napětí

Z tabulky č. 3 - Závislost vstupního a výstupního napětí je vidět, že odebíraný výkon neboli příkon dosahoval hodnot 637 W.



Graf č. 1 - Závislost napětí

Z grafu č. 1 - Závislost napětí je vidět, že při napájení 70 V_{ss} výstupní napětí na sekundární cívice dosahuje hodnoty maximálního napětí okolo 15 kV.

Závěr

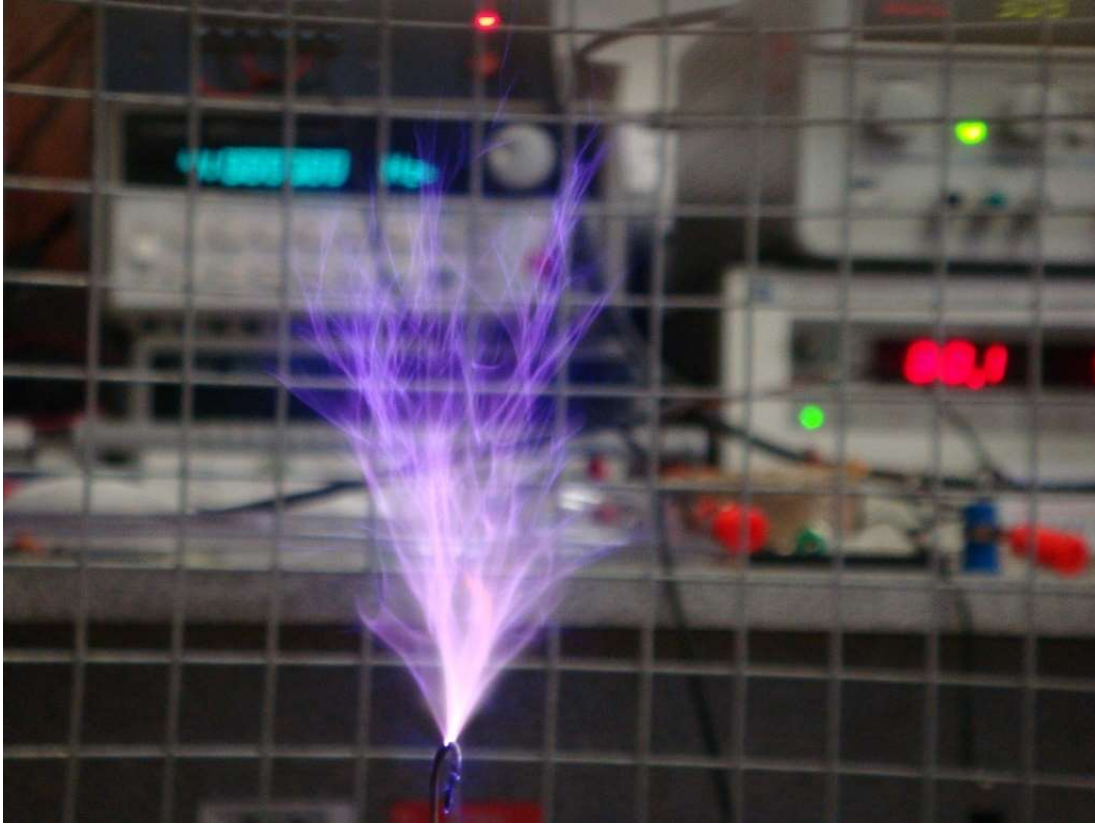
Návrh a realizace výkonového měniče a řídicího obvodu proběhl úspěšně ve všech bodech zadání.

Řídicí obvod, který je popsán v této práci, od výměny hradla plnil svou funkci. Jediný problém nastal při ověřování funkce fázového závěsu. Ten nefungoval. Předpoklad nefunkčnosti fázového závěsu je nižší napětí na výstupu z Teslova generátoru, než jaké bylo očekáváno. Z tohoto důvodu se fázový závěs nezavěsí. Díky Faradayově kleci je rezonanční frekvence stabilní, a proto se dá Teslův generátor udržet v rezonanci se stabilní korunou, která je vidět na obrázku č. 24 - Korona. Při měření byla odzkoušena audiomodulace. Výsledný zvuk byl zřetelný, ale zkreslený hlukem korony.

Výkonový měnič, který je popsán v této práci, fungoval od prvního zapojení bez problému do maximálního napájecího napětí $100 V_{SS}$. Při vyšších výkonech se podařilo zničit dva IGBT tranzistory. Důvodem zničení byly příliš krátce nastavené mrtvé časy spínání tranzistorů v souvislosti s delším časem závěrného zotavení nulových diod.

Výpočty v simulaci Teslova generátoru jsem si potvrdil, že napětí v rezonanci se zvýšilo a simulace odpovídá naměřeným hodnotám.

Do budoucna bude třeba nahradit nulové diody rychlejšími diodami. Poté umístit výkonový měnič s řídicím obvodem do konstrukční krabičky, do které bude namontováno aktivní chlazení výkonového měniče.



Obrázek č. 23 - Korona

Seznam použité literatury a zdrojů

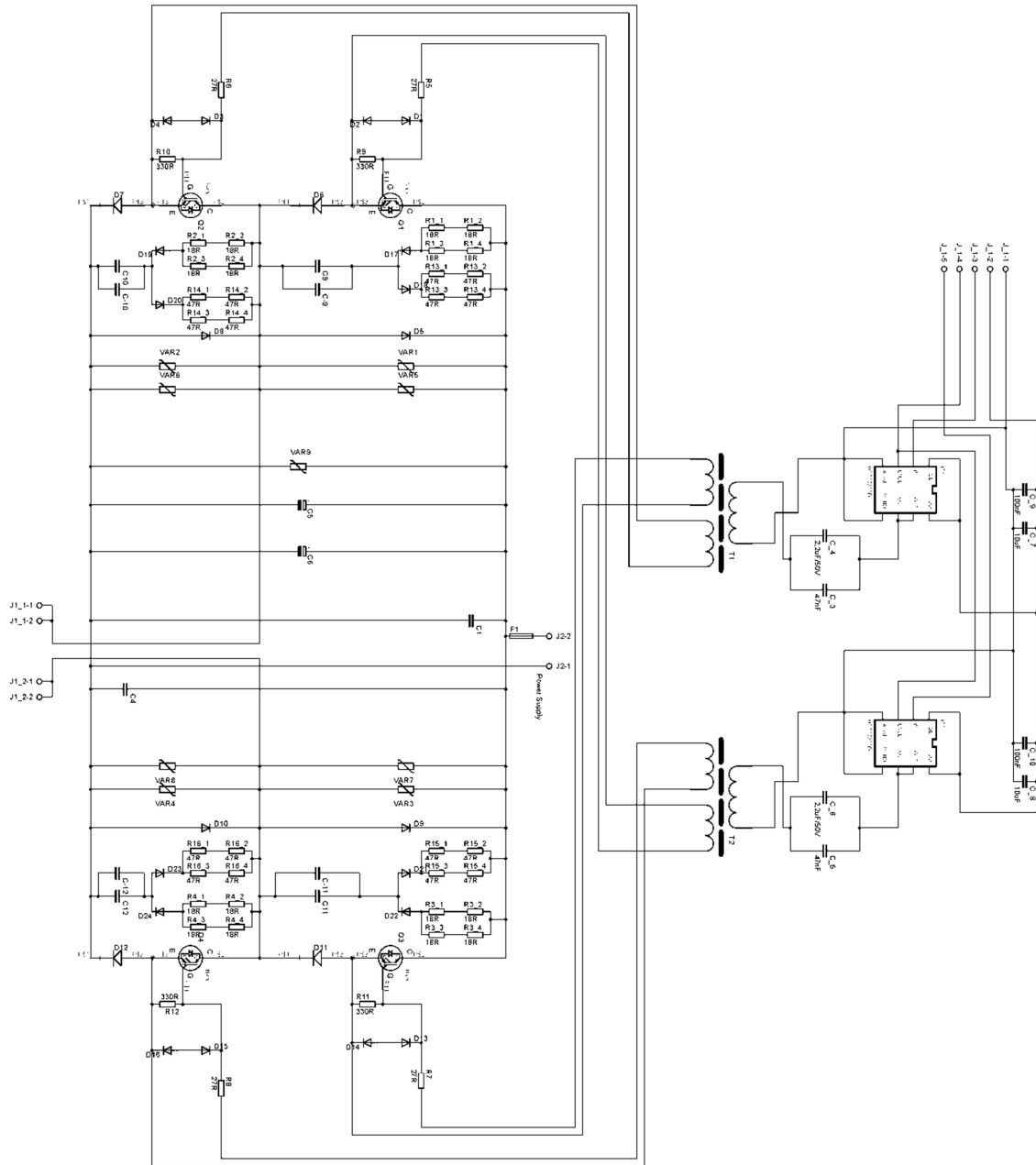
- [1] Martin Zavřel: Stavba polovodičově buzeného Teslova transformátoru. Bakalářská práce ZČU 2014.
- [2] ADÁMEK, Milan. Adamsova Teslárna: Můj druhý teslák [online]. 2007 [cit. 2018-04-23]. Dostupné z: <http://www.adasoft.cz/tesla/teslak2.html>
- [3] Citáty slavných osobností: Nikola Tesla citáty [online]. [cit. 2018-04-23]. Dostupné z: <https://citaty.net/autori/nikola-tesla/>
- [4] Osobnosti: Nikola Tesla [online]. [cit. 2018-04-23]. Dostupné z: <https://zivotopis.osobnosti.cz/nikola-tesla.ph>
- [5] LETEMSVĚTEMAPPLEM: Další 13 hlubokomyslných citátů Nikoly Tesly, které vás ohromí [online]. 13.5.2015 [cit. 2018-04-23]. Dostupné z: <https://www.letemsvetemapplem.eu/2015/05/13/dalsich-13-hlubokomyslnych-citatu-nikoly-tesly-ktere-vas-ohromi/>
- [6] Petr Siuda: Návrh Teslova transformátoru pro VN jiskrový zdroj. Bakalářská práce VUTBR 2014.
- [7] Borderland Sciences Research Foundation: Nikola Tesla [online]. [cit. 2018-04-23]. Dostupné z: <https://borderlandsciences.org/tesla/index.html>
- [8] EpochaPlus: Nikola Tesla: Génius, co předběhl svou dobu [online]. [cit. 2018-04-24]. Dostupné z: <https://epochaplus.cz/nikola-tesla-genius-co-predbeh-l-svou-dobu/>
- [9] ON SEMICONDUCTOR: Datasheet IGBT FGH50N6S2D [online]. [cit. 2018-04-25]. Dostupné z: http://www.farnell.com/datasheets/2298411.pdf?_ga=2.10106035.769716465.1524673060-1410458309.1512411949&_gac=1.241493686.1523880771.EAlaIQobChMI1evjmuK-2gIVOMqyCh0z7gIQEAAYAiAAEglwPD_BwE

- [10] ČERNÍK, Martin. Elektrické obvody: teorie a příklady. Liberec: Technická univerzita v Liberci, 2014. ISBN 978-80-7494-161-0.
- [11] Vojtěch Snopek: Teslův generátor buzený měničem. Bakalářský projekt TUL 2016.

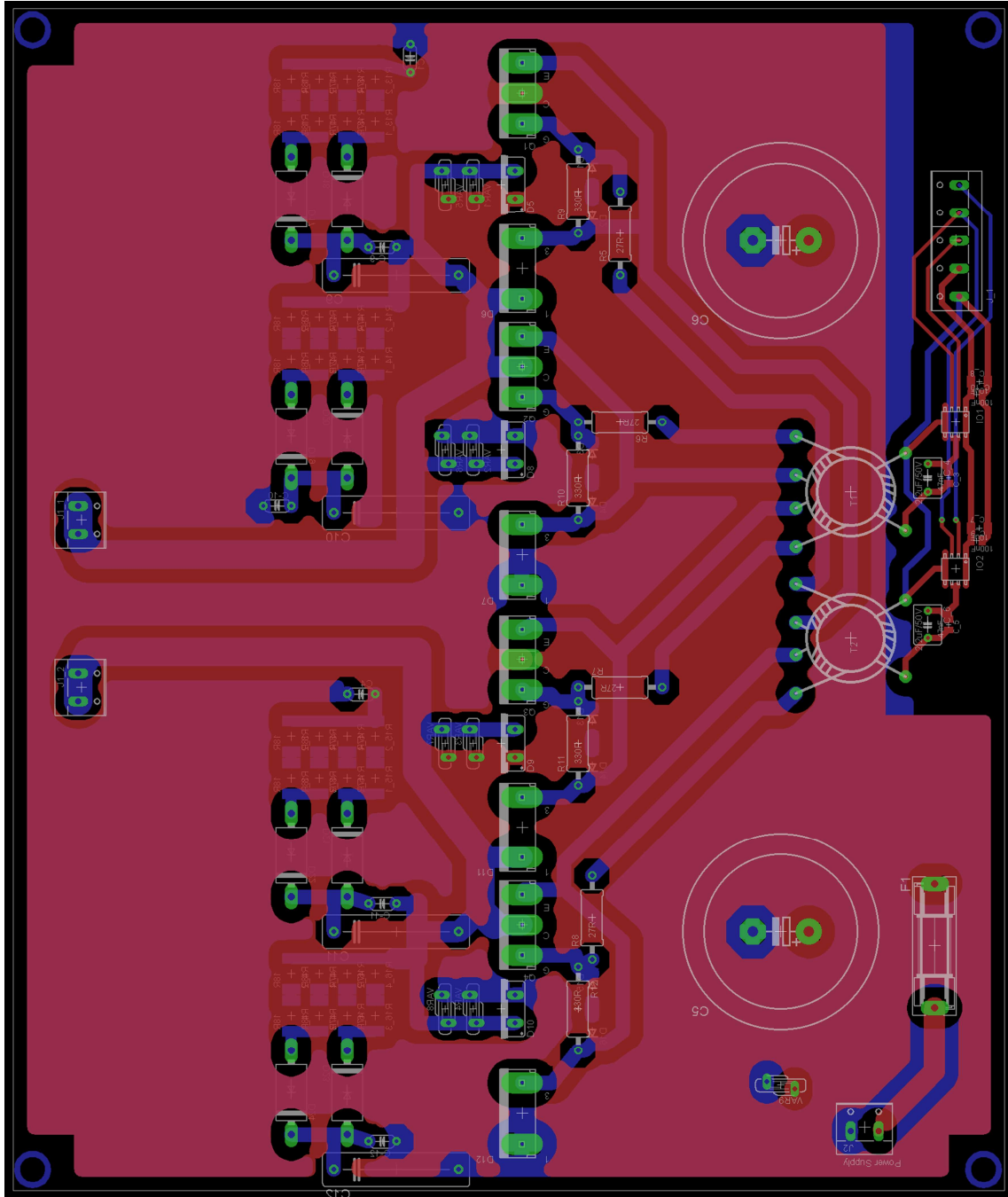
Přílohy

Příloha 1 Schéma výkonového měniče.....	44
Příloha 2 Návrh plošného spoje výkonového měniče.....	45
Příloha 3 Schéma řídicího obvodu pro výkonový měnič	46
Příloha 4 Návrh plošného spoje řídicího obvodu pro výkonový měnič.....	47
Příloha 5 Seznam použitých součástek.....	48

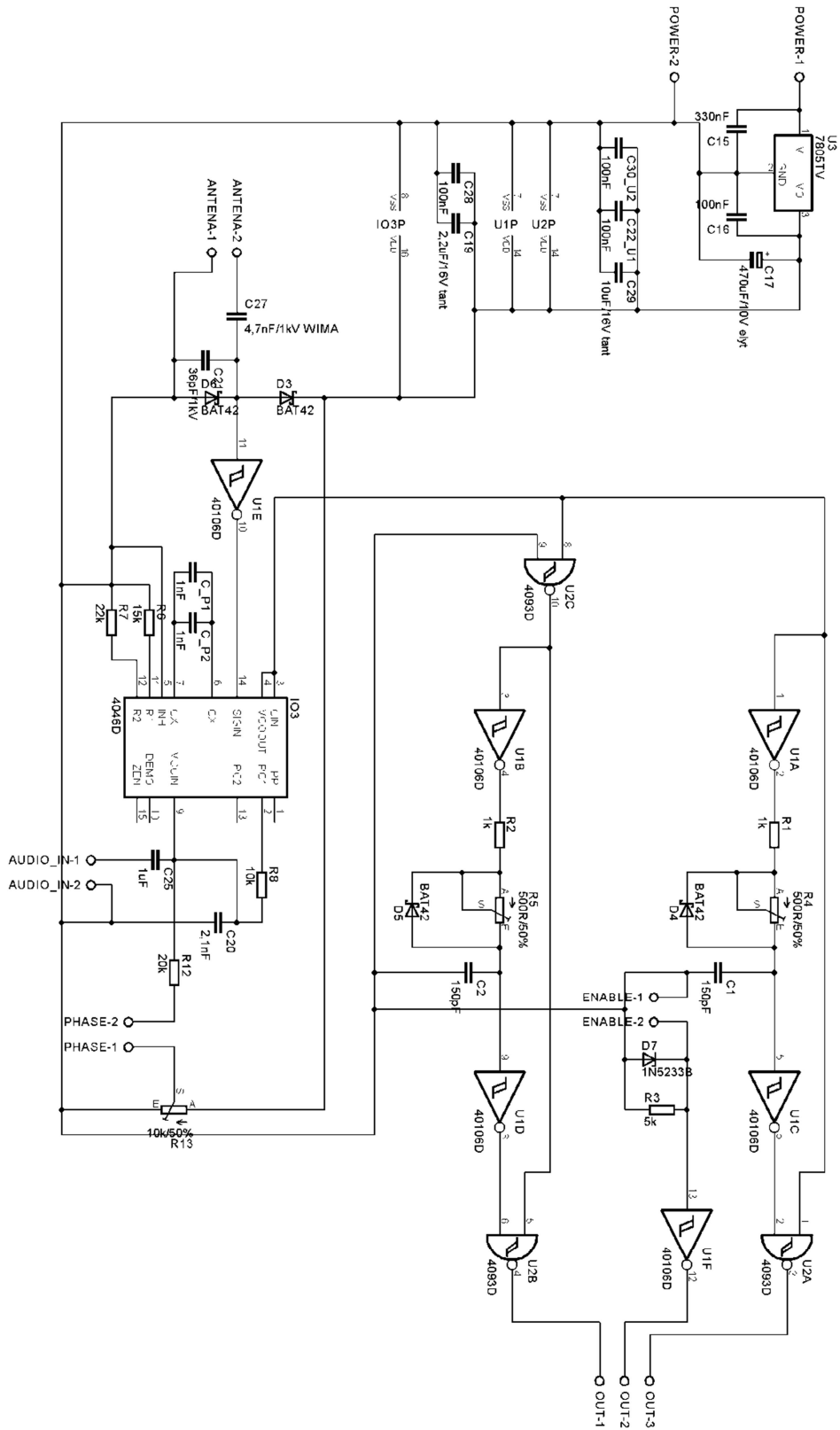
Příloha 1 Schéma výkonového měniče



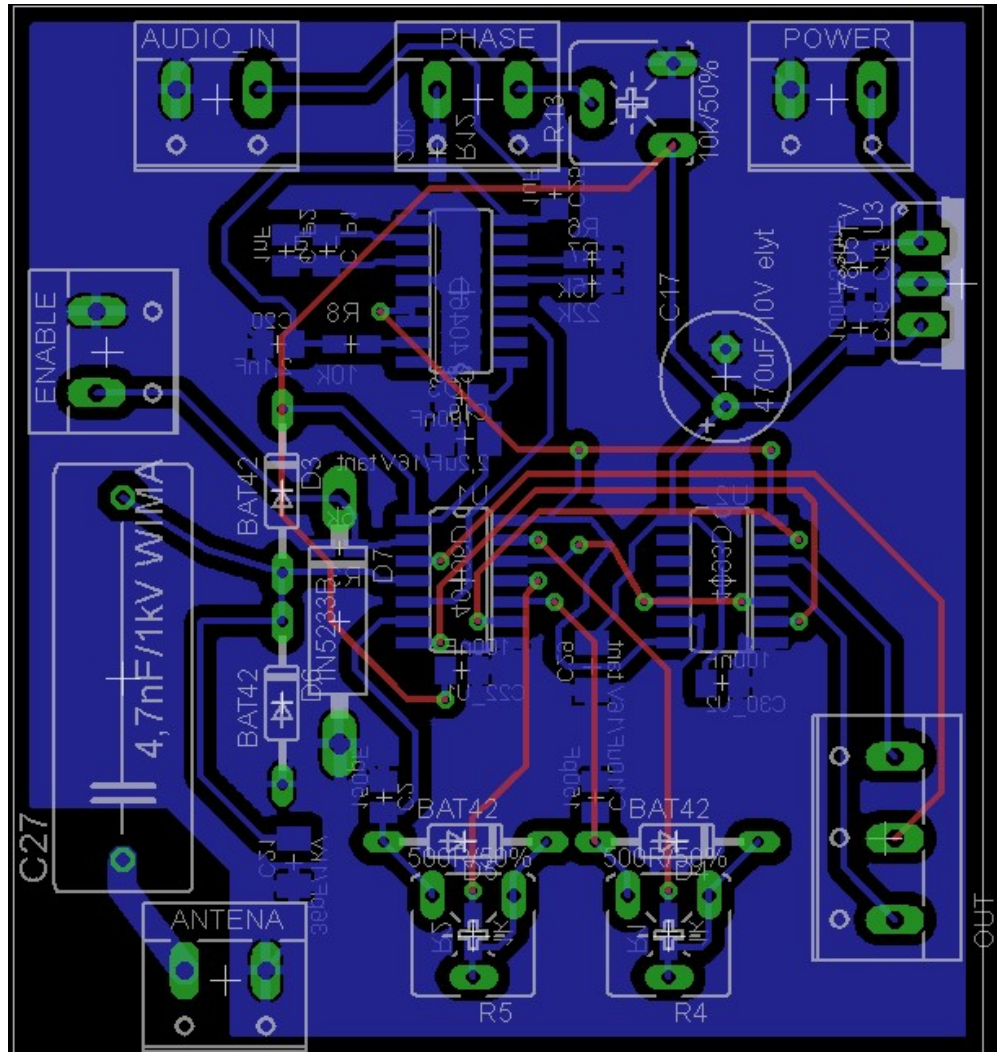
Příloha 2 Návrh plošného spoje výkonového měniče



Príloha 3 Schéma řídicího obvodu pro výkonový měnič



Příloha 4 Návrh plošného spoje řídicího obvodu pro výkonový měnič



Příloha 5 Seznam použitých součástek

Výkonový měnič					
Název	Označení	Pouzdro	Označení výrobce	Objednávací kód	Počet
IGBT tranzistor	Q1,2,3,4	TO 247	FGH50N6S2D	1095034	4x
Fast diode	D6,7,11,12	TO 247	DPG60I400HA	747-DPG60I400HA	4x
Fast diode	D5,8,9,10	TO 220	MUR1560G	MUR1560G	4x
Fast diode	D17,18,19,20,21,22,23,24	DO201-15	STTH3R02	STTH3R02	8x
Zener diode	D1,2,3,4,13,14,15,16	DO214AA	1SMB5929BT3G	1SMB5929BT3G	8x
Varistor 250V clap	var1,2,3,4,5,6,7,8	Bulk	SR151K10D	SR151K10D	8x
Varistor 340V clap	var9	Bulk	SR201K07D	SR201K07D	1x
Snub kondenzát.	C9,10,11,12		FKP1-1000/1250/5	505-FKP11000/1250/5	4x
Snub 100nF/ker.	C1,4		CCH-100K	CCH-100K	2x
Elektrolyt 390uF/400V	C5,6		LGN2G391MELB40	LGN2G391MELB40	2x
R=18R/2W	R1,2,3,4	2512	CRCW251218R0JNEG	71-CRCW2512-J-18-E3	16x
R=47R/2W	R13,14,15,16	2512	HTCR2512EW-47RFT18	2082194	16x
R=27R	R5,6,7,8	rm15	PRO2000202709JA100	PRO2-27R	4x
R=330R	R9,10,11,12	rm15	PRO2000203300JA100	PRO2-330R	4x
svokovnice 2pin	J2,J_1	rm5	DG126-5.0-2P14	DG126-5.0-02P-14-00A	2x
svokovnice 3pin	J1,J_1	rm5	DG126-5.0-3P14	DG126-5.0-03P-14-00A(H)	2x
držák pojistky	F1				1x
Toroidy	T1,2				2x
UCC driver	IO1,IO2	soic8	UCC27322D	595-UCC27322D	2x
Kond. 2,2uF/50V	C_4,C_6	Wima 5mm	MKS2B042201F00KO00	MKS2-2.2U/50-R	2x
Kond. 47nF	C_3,C_5	805	C1206C473K2RAC7800	C1206C473K2RAC	2x
Kond. 100nF	C_9,C_10	805	C1206C104K5RACTU	80-C1206C104K5R	2x
Kond. 10uF	C_7,C_8	805	GRM31CR61H106KA12L	GRM31CR61H106KA12L	2x
Řídicí obvod					
C=100nF ker.	C22,28,30	805	C1206C104K5RACTU	80-C1206C104K5R	4x
C=150pF ker.	C1,2	805	C1206C151J5GAC	80-C1206C151J5GAC	2x
C=100nF/16V tant	C29	1206	T491A106M016AT7280	80-T491A106M16AT7280	1x
C=2,2uF/16V tant	C19	1206	T491A225K016AT	T491A225K016AT	1x
C=1nF ker.	C_P	805	C1206C102J4RACTU	80-C1206C102J4R	2x
C=2,1nF ker.	C20	805	1206YC222KAT2A	581-1206YC222KAT2A	1x
C=1uF ker.	C25	805	1206YC105KAT2A	581-1206YC105K	1x
C=36pF/1kV ker	C21	805	C1206C360J5GACTU	80-C1206C360J5G	1x
C=330nF ker.	C15	805	C1206C334K4RACTU	80-C1206C334K4R	1x
C=4,7nF/1kV WIMA	C27	WIMA 22,5mm	FKP1U014705F00JSSD	FKP1-4.7N/2000	1x
C=470uF/10V	C17	elektrolyt 3,5mm	EEU-FM1A471	667-EEU-FM1A471	1x
R=1k	R1,2	805	CRCW12061K00FKEB	71-CRCW12061K00FKEB	2x
R=5k	R3	805	RT1206FRE074K99L	603-RT1206FRE074K99L	1x
R=15k	R6	805	RT1206FRE0715KL	603-RT1206FRE0715KL	1x
R=22k	R7	805	RC1206FR-0722KL	603-RC1206FR-0722KL	1x
R=10k	R8	805	RC1206FR-0710KL	603-RC1206FR-0710KL	1x
R=20k	R12	805	RC1206FR-0720KL	603-RC1206FR-0720KL	1x
R=500R	R4,5	trim	PT6KV-501A2020	531-PT6KV-500	2x
R=10k	R13	trim	PT6KV-103A2020	531-PT6KV-10K	1x
D_BAT42	D3,4,5,6	DO35	BAT42	511-BAT42	4x
D_1N5233B	D7	DO35	1N5233B	512-1N5233B	1x
U1	HEF40106BT	soic14	HEF40106BT,652	771-HEF40106BT652	1x
U2	HEF4093BT (CD4001)	soic14	HEF4093BT-Q100,118	771-HEF4093BTQ100118	1x
IO3	74HCT4046AD	soic16	74HCT4046AD,112	771-HCT4046AD112	1x
U3	L7805TV	TO 220	L7805ABV	511-L7805ABV	1x
svokovnice 2pin		rm5	DG126-5.0-2P14	DG126-5.0-02P-14-00A	5x
svokovnice 3pin		rm5	DG126-5.0-3P14	DG126-5.0-03P-14-00A(H)	1x