

**ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI
FAKULTA ELEKTROTECHNICKÁ**

Katedra elektromechaniky a výkonové elektroniky

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

**Teslův transformátor využívající
polovodičové spínací součástky**

Jan Hák

2017

Originál (kopie) zadání BP/DP

Originál (kopie) zadání BP/DP

Anotace

Bakalářská práce se zabývá podrobným popisem a návrhem Teslova transformátoru DRSSTC. Jedná se o polovodičově buzený transformátor s laděným sekundárním a primárním vinutím do rezonance. V silové části jsou použity pro buzení primární cívky polovodičové SiC MOSFETy. Řídící část je složena ze zpětnovazební vazby, přerušovače, omezovače proudu, budiče tranzistorů a pomocných zdrojů.

V úvodní části je popsán život vynálezce transformátorů Nikola Tesly. Dále v teoretické části práce je stručně popsáno provedení jednotlivých typů Teslových transformátorů a jejich výhody a nevýhody. V praktické části se nachází podrobnější popis jednotlivých částí navrženého transformátoru. Výstupem této práce je zkonstruování a zprovoznění celého přístroje.

Klíčová slova

Teslův transformátor, přerušovač, stabilizátor napětí, omezovač proudu, zpětná vazba, řídicí část, sekundární vinutí, primární vinutí, ovládací brána, usměrňovač, klopné obvody.

Abstract

The Bachelor Thesis consists of detailed description and design of the Tesla transformer DRSSTC (Dual Resonant Solid State Tesla Coil). The transformer is semiconductor with the secondary and primary wind into resonance. The SiC MOSFET semiconductor transistor is used to control the primary coil. The controlling part is consisted of feedbacks, breakers, surge suppressors, control gates and auxiliary sources.

In the beginning is described Nikola Tesla's life as an inventor of transformers. The implementation of individual types of Tesla transformers and their advantages and disadvantages are described in the theoretical part of the thesis. The individual parts of the designed transformer is described in the practical part. The outcome of this thesis is a construction and commissioning of the whole appliance.

Key words

Tesla Coil, interrupter, Voltage regulator, current limiter, the feedback, control portion, a secondary coil, the primary coil, control gate, rectifier, flip-flop.

Prohlášení

Prohlašuji, že jsem tuto bakalářskou práci vypracoval samostatně, s použitím odborné literatury a pramenů uvedených v seznamu, který je součástí této bakalářské práce. Dále prohlašuji, že veškerý software, použitý při řešení této bakalářské práce, je legální.

V Plzni dne 13.6.2017

.....

Jan Hák

Poděkování

Tímto bych rád poděkoval vedoucímu bakalářské práce Ing. Lubošovi Streitovi, Ph.D. za cenné profesionální rady, připomínky a metodické vedení práce.

OBSAH

SEZNAM SYMBOLŮ A ZKRATEK	3
1 ÚVOD	5
1.1 HISTORIE A NIKOLA TESLA.....	5
1.2 PRINCIP TESLOVA TRANSFORMÁTORU.....	7
1.3 SGTC – SPARK GAP TESLA COIL - JISKŘIŠTĚ	7
1.3.1 Princip SGTC	8
1.4 TESLŮV TRANSFORMÁTOR SE SPÍNACÍM VÝKONOVÝM TRANZISTOREM OLTC (OFF-LINE TESLA COIL).....	9
1.5 SSTC (SOLID STATE TESLA COIL) S POLOVODIČOVÝM BUDIČEM.....	10
1.5.1 Princip SSTC	11
1.6 ISSTC INTERRUPTED SOLID STATE TESLA COIL.....	12
1.7 VTTC – VAKUUM TUBE TESLA COIL	12
1.8 TWIN – TC	13
1.9 DRSSSTC DUAL RESONANT SOLID STATE TESLA COIL	13
2 NÁVRH TESLOVA TRANSFORMÁTORU	14
2.1 ZPĚTNÁ VAZBA	16
2.2 AKTIVNÍ OMEZOVAČ PROUDU OCD(OVER-CURRENT DETECTOR) A VSTUPNÍ PŘERUŠOVAČ	16
2.3 OVLÁDÁNÍ KLOPNÉHO OBVODU 74HC74.....	17
2.4 OVLÁDÁNÍ BUDIČE TRANZISTORŮ	18
2.5 POMOCNÉ ZDROJE	19
2.6 OCHRANA VÝKONOVÝCH MOSFETŮ	20
2.7 OPTICKÝ PŘERUŠOVAČ (INTERRUPTER)	21
3 SILOVÁ ČÁST ZAŘÍZENÍ	22
3.1 NAPÁJENÍ SILOVÉ ČÁSTI STROJE	22
3.2 GDT- TRANSFORMÁTOR	22
3.3 OVLÁDÁNÍ SILOVÉ ČÁSTI STROJE	23
3.4 MECHANICKÁ ČÁST STROJE	23
3.5 NASTAVENÍ POŽADOVANÉ REZONANČNÍ FREKVENCE.....	24
3.6 TOROID	25

4	OŽIVOVÁNÍ.....	27
4.1	MĚŘENÍ ŘÍDÍCÍ ČÁSTI	27
4.2	MĚŘENÍ SILOVÉ ČÁSTI S FIKTIVNÍM OBVODEM.....	28
4.3	MĚŘENÍ SILOVÉ ČÁSTI.....	30
5	ZÁVĚR	31
6	SEZNAM LITERATURY A INFORMAČNÍCH ZDROJŮ	32
7	PŘÍLOHY	34

Seznam symbolů a zkratk

C.....	Kondenzátor
R.....	Rezistor
L.....	cívka
GND.....	zem
IN	vstup do hradla
OUT	výstup z hradla
IC--.....	označení hradla

Seznam obrázků

OBR. 1: NIKOLA TESLA	6
OBR. 2: SCHÉMA SGTC TRANSFORMÁTORU.....	9
OBR. 3: SCHÉMA OLTC TRANSFORMÁTORU	10
OBR. 4: POLOVIČNÍ MŮSTEK NA LEVÉ STRANĚ A PLNÝ MŮSTEK NA STRANĚ PRAVÉ	10
OBR. 5: VTTC TRANSFORMÁTOR.....	12
OBR. 6: SCHÉMA ŘÍDÍČÍHO UNIVERZÁLNÍHO OBVODU UD2.7	15
OBR. 7: SCHÉMA ZPĚTNÉ VAZBY	16
OBR. 8: SCHÉMA AKTIVNÍHO OMEZOVAČE PROUDU.....	18
OBR. 9: SCHÉMA OVLÁDÁNÍ BUDIČE.....	19
OBR. 10: SCHÉMA SOUČÁSTKY FDD8424H	19
OBR. 11: SCHÉMA ZDROJŮ PRO ŘÍDÍČÍ ČÁST	20
OBR. 12: POMOCNÉ ZDROJE.....	20
OBR. 13: VYSÍLAČ OPTICKÉHO SIGNÁLU.....	21
OBR. 14: SCHÉMA OVLÁDACÍ ČÁST STROJE	22
OBR. 15: GDT- TRANSFORMÁTOR	22
OBR. 16: SCHÉMA SILOVÉ ČÁSTI.....	23
OBR. 17: PODSTAVA TESLOVY CÍVKY	24
OBR. 18: PRIMÁRNÍ CÍVKA.....	24
OBR. 19: UKÁZKA VÝPOČTU PROGRAMEM JAVA	25
OBR. 20: TOROID.....	26
OBR. 21: VÝSTUPNÍ PRŮBĚH Z ŘÍDÍČÍ ČÁSTI GDT1-1	27
OBR. 22: VÝSTUPNÍ PRŮBĚH NAPĚTÍ Z GENERÁTORU PŘI FREKVENCI 42,19KHZ	28
OBR. 23: PRŮBĚHY VÝSTUPNÍHO NAPĚTÍ (MODRÁ BARVA) A VÝSTUPNÍHO PROUD (FIALOVÁ BARVA) PŘI FIKTIVNÍM ZAPOJENÍ PRO 42,24KHZ.....	29
OBR. 24: PRŮBĚHY VÝSTUPNÍHO NAPĚTÍ (MODRÁ BARVA) A VÝSTUPNÍHO PROUD (FIALOVÁ BARVA) PŘI FIKTIVNÍM ZAPOJENÍ PRO 60KHZ.....	29
OBR. 25: VÝSTUPNÍ PRŮBĚHY ZE SILOVÉ ČÁSTI.....	30

1 Úvod

Teslův transformátor byl vybrán pro zpracování této práce z důvodu experimentování.

V atmosféře naší planety se běžně vyskytují energetické výboje, které lidi fascinovaly, nebo v nich budily strach, avšak v každém z nás vyvolávají respekt k tomuto fyzikálnímu jevu. Teslův transformátor dokázal částečně obdobné výboje, avšak neporovnatelně v menším měřítku, zkrotit. Nikola Tesla patřil k typu lidí, kterého elektřina fascinovala a jeho vynálezy ji dokázaly využívat a přizpůsobovat potřebám lidstva. Proto se autor rozhodl sestrojít si jeden jeho transformátor, aby i on osobně zakusil krásu výbojů a jejich zvukovou stopu.

Předkládaná práce je založena na návrhu a posléze na konstrukčním provedení Teslova transformátoru s polovodičovým buzením. Pro tuto bakalářskou práci byl vybrán DRSSC (Dual Resonant Solid State Tesla Coil) transformátor s primárním a sekundárním laděním do rezonance, z důvodu vyšší účinnosti v porovnání s ostatními známými typy.

Práce je rozdělena na část teoretickou, praktickou a závěrečnou. Teoretickou část autor rozdělil do níže uvedených kapitol. V první kapitole seznamuje s historií a životem Nikoly Tesly. Další kapitoly popisují různé typy Teslových transformátorů se zaměřením na principy, výhody a nevýhody jednotlivých zařízení včetně schémat zapojení.

Druhá praktická část se zabývá konkrétním typem Teslova transformátoru a popsáním jednotlivých částí řídicího obvodu. Konkrétně zpětnou vazbou, klopným obvodem, přerušovačem, omezovačem proudu, ovládací bránou, vysílačem optického přerušovače a pomocného zdroje. Je zde uvedena také silová část obvodu, včetně toroidu, stavby primární a sekundární cívky a nastavení rezonanční frekvence.

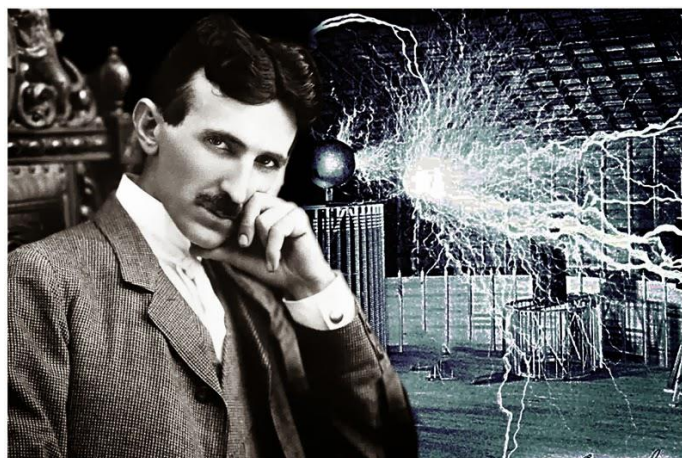
Třetí závěrečná část je věnována samotnému sladění a uvedení do provozu. Postavený transformátor je zapojen a poté testován. Součástí této části je také hodnocení získaných poznatků z celého průběhu stavby a následného zapojení transformátoru. Během montáže byly všechny důležité momenty stavby fotografovány a jsou součástí přílohy této bakalářské práce.

1.1 Historie a Nikola Tesla

Nikola Tesla byl srbský vynálezce, narozen dne 10. Července 1856. Otcem byl poslán na studium v roce 1880 na Karlovu Univerzitu, kde vydržel jeden semestr. Po smrti

otce téhož roku začal pracovat v telegrafní společnosti. V roce 1883 vynalezl svůj první motor na střídavý proud. O rok později se odstěhoval do Ameriky za svým idolem Thomas Alva Edisonem, u kterého se ucházel o práci. Edison zaměstnal mladého Teslu ve své továrně. Byl zastáncem využívání stejnosměrného proudu, i když to znamenalo, že každý odběratel bude mít svůj vlastní přívod od elektrárny až po koncové místo odběru. Ztráty ve vedení byly vysoké, ale přesto se nechtěl stejnosměrného proudu vzdát, neboť na něm byly založeny i další jeho patenty, z kterých mu plynuly zisky. Mladému Teslovi zadal úkol vylepšení vlastností stejnosměrného proudu, čehož se zhostil tím, že Edisonovi navrhl použití střídavého proudu. Tesla za svůj návrh nedostal přislíbenou odměnu a od Edisona odešel a založil vlastní společnost.

V tomto období začala „válka o elektřinu“. Edison byl nekompromisní zastáncem stejnosměrného proudu a neváhal při argumentacích o nebezpečnosti střídavého proudu použít i tvrdě zinscenované příklady smrti zvířat a i člověka. Oproti tomu Tesla pracoval na přístrojích založených na střídavém proudu, na zavedení střídavého proudu a jeho využití. Začal pracovat pro Westinghousovu společnost, která vyhrála s nabídkou na dodávku elektrické energie pro Světovou výstavu v Chicagu. Úspěch znamenal výhru a změnil přístup a pohled lidí na střídavý proud a jeho využití. Také v tu dobu Tesla vynalezl a patentoval zdroj světla v podobě vylepšené obloukové lampy, která nevyužívá žádný Edisonův patent a tím osvětlil celý areál světové výstavy. V témže roce vyhrála společnost Westinghouse kontrakt na stavbu elektrárny u Niagarských vodopádů, čímž bylo definitivně rozhodnuto o využívání střídavého proudu oproti stejnosměrnému. Střídavý proud se začal používat po celém světě. Náskok firmy Westinghouse v oboru se ale rychle zmenšoval a o pozdější zakázky se dělil s General Electric.



Obr. 1: Nikola Tesla

Nikola Tesla si zaregistroval několik dalších patentů. Jedním z nich byl i kapesní zemětřesořas. Jednalo se o zařízení založené na Teslově elektromechanickém oscilátoru, který byl Teslou patentován již roku 1893, a pozdější verze právě měla umět vyvolávat zemětřesení. Dalším z jeho známých objevů byla rádiová komunikace. Tento patent se jeho konkurent Marchese Guglielmo Marconi snažil přivlastnit. Patentový úřad byl nucen prohlásit za vynálezce Teslu, jelikož se Marconioho schémata příliš podobala Teslovým. Další patent sloužil k vylepšení elektrického vodiče jednoho z prvních koaxiálních kabelů. Tesla se na sklonku svého života zabýval otázkou přenosu elektrické energie bez použití vedení tzv. „bezdrátově“. Z důvodu nezískání finančních prostředků na výzkum se jeho sen přenášet elektřinu vzduchem neuskutečnil. Podrobněji popsáno pod odkazy [1], [2].

1.2 Princip Teslova Transformátoru

Teslův Transformátor pracuje na principu rezonančního kmitočtu k výrobě vysoké hodnoty střídavého napětí. Lze ho rozdělit do dvou částí. Část primární a sekundární.

Primární část Teslova transformátoru obsahuje přívod elektrické energie přes vysokonapěťový transformátor. Dále pak přes jednotlivý spínací obvod, jenž se liší typem Teslova transformátoru. Výstup ze spínací části jde na primární cívku. Ta je tvořena malým počtem závitů o vysoké hodnotě průřezu.

Sekundární část se skládá ze sekundární cívky, která má mnohonásobně vyšší počet závitů než cívka primární a je vytvořena nejčastěji měděným drátem menšího průřezu. Sekundární vinutí je navinuto na izolant s dostatečnou tepelnou odolností a je umístěno ve středové ose primární cívky. Podrobněji popsáno pod odkazy [3], [4], [5], [6].

1.3 SGTC – Spark GAP Tesla Coil - jiskřiště

Jedná se o typ, který používal Nikola Tesla. Jde o klasický Teslův Transformátor s jiskřištěm. Podle jiskřiště lze rozdělit SGTC na rotační a statické.

Statické jiskřiště se skládají obvykle z měděných trubek. Jiskry se rozdělí po celé délce válce a tím se docílí snadnějšího chlazení. Jedná se o nejjednodušší volbu. Ke správnému používání je zapotřebí zdroj napětí s minimálním výstupním napětím několika kV, aby vznikl, výboj na jiskřišti.

Rotační jiskřiště používají externí motor, který způsobuje otáčení dvou elektrod. Elektrody musí být vždy při maximálních hodnotách napětí naproti sobě, v jiném případě je porušena podmínka pro správnou funkčnost. Tento způsob má několik výhod. Jednou

z nich je možnost regulovat počet přeskoků, další výhodou je, že se otáčející elektrody chladí a není zapotřebí vnější chlazení. Více informací na [3], [4], [5], [6].

1.3.1 Princip SGTC

Kondenzátor je pomocí vysokonapětového transformátoru TR1 obr. 2 nabíjen. Transformátor slouží, jak k oddělení obvodu od sítě, tak i k snížení zvlnění proudu. V tomto případě je použit transformátor proudu a není potřeba pro vytvoření tvrdého zdroje proudu použít tlumivku. Při nabití kondenzátoru dojde k překročení elektrické pevnosti a na jiskřišti vznikne výboj. Je nutné, aby k nabití kondenzátoru a následnému výboji došlo za kratší dobu, než je půlperioda kmitu. Výboj způsobí spojení kondenzátoru paralelně s primárním vinutím transformátoru. Jiskřiště slouží tedy jako spínače. Při spojení vznikne rezonanční obvod, který trvá po celou dobu výboje. Rezonanční obvod vychází ze shodných reaktancí kapacitních a indukčních ($X_L = X_C$). Z toho lze odvodit Thomsonův vztah pro rezonanční frekvenci, kde platí:

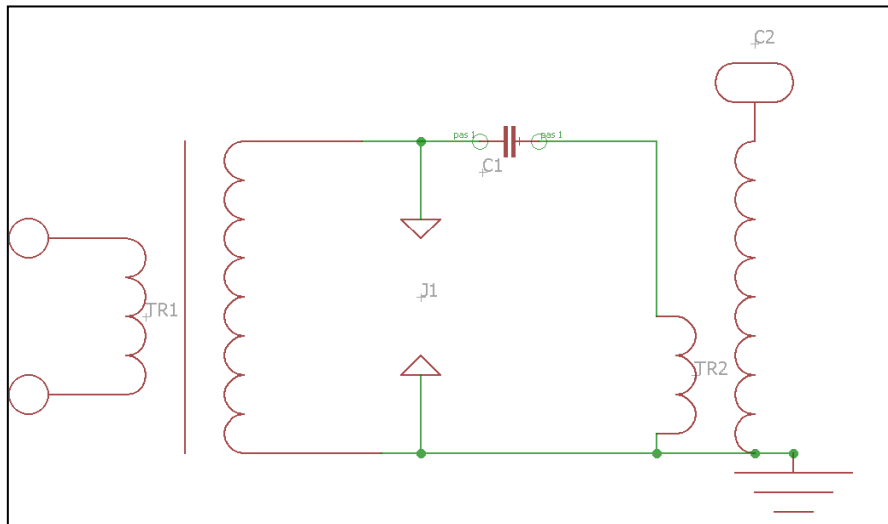
$$f_0 = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}}$$

Rezonanční obvod má za následek vyšší proud a menší impedanci obvodu. Při vzniklém výboji prochází primární cívkou elektrický proud a vytváří magnetický tok. Celým magnetickým obvodem prochází magnetický tok Φ . Ten protíná magnetický obvod sekundární cívkou. V cívce se začne indukovat napětí podle Faradayova indukčního zákona, kde platí:

$$U_i = -N * \frac{d\Phi}{dt}$$

U_i	indukované napětí v cívce
N	počet závitů na cívce
$\Phi(t)$	celkový magnetický tok za dobu t

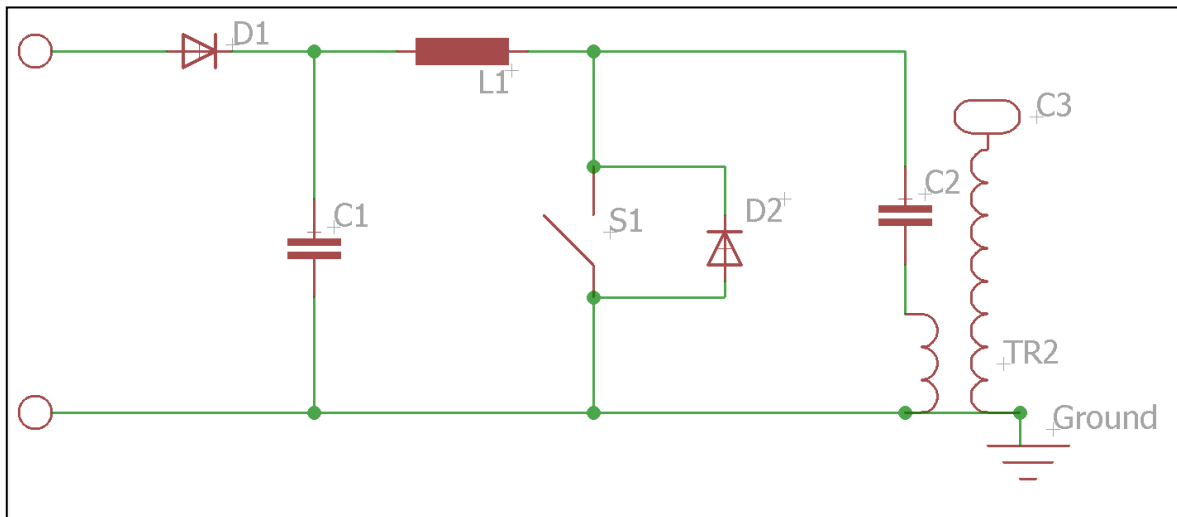
Při vysokém naindukovaném napětí dochází na konci sekundárního vinutí k přeskokům nábojů do vzduchu a následnému srčení. Na sekundární cívce vznikají tlumené kmity. Pro maximální přenos energie z primární části do sekundární, a tudíž i pro maximální možný výkon Teslova transformátoru, je zapotřebí, aby byla primární část se sekundární naladěna na stejnou rezonanční frekvenci. Potom platí $f_1=f_2$. Při vybití kondenzátoru se přeruší výboj a celý cyklus se opakuje po celou dobu sepnutí obvodu. Detailněji na [3], [4], [5], [6].



Obr. 2: Schéma SGTC transformátoru

1.4 Teslův Transformátor se spínacím výkonovým tranzistorem OLTC (Off-Line Tesla Coil)

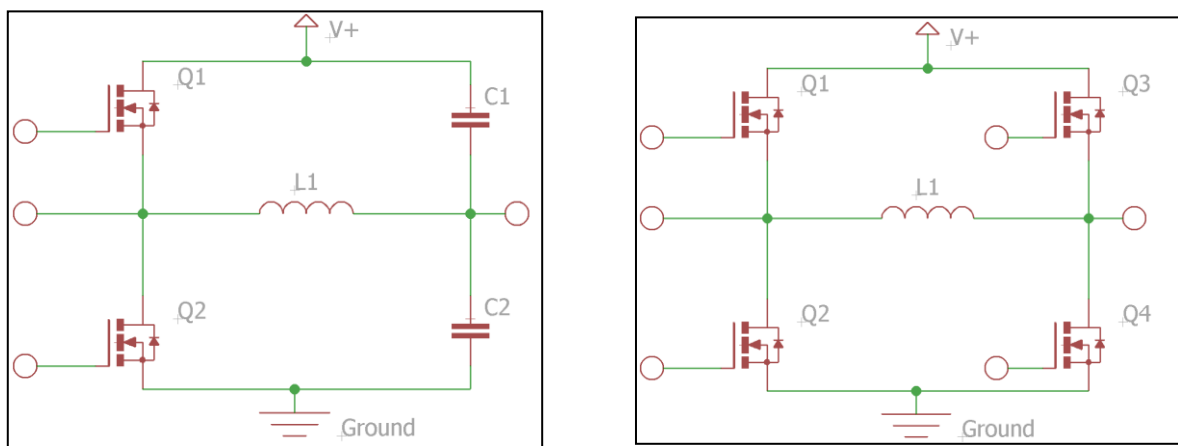
Jedná se o podobné zapojení jako u SGTC. Rozdíl je v nahrazení jiskřiště za polovodičový spínač (na obr. 3 S1). Jiskřiště způsobuje značné rušení a vysoké ztráty a z tohoto důvodu byla snaha o jeho nahrazení. Také použitím polovodičového řízení docílíme snadnějšího naladění rezonanční frekvence. Nejlepším řešením je použití IGBT tranzistoru s externí zpětnou diodou. Nutné je usměrnění napájecího napětí, které je řešeno pomocí kapacity diody D1. C1 a tlumivka L1 vyhlazují průběhy. Při nabití kondenzátoru C2 dojde k sepnutí IGBT tranzistoru. Z důvodu rychlého nárůstu maximální hodnoty proudu je použit tranzistor s vysokou spínací frekvencí. Tohoto cíle nelze docílit při použití tyristoru. Při vypnutí IGBT tranzistoru se zbývající energie dostává přes zpětnou diodu. Primárním vinutím, prochází vyšší hodnota proudu, než tomu bylo v případě SGTC, což má za následek menší počet závitů na primární cívce. Výboje na sekundární cívce jsou velice hlučné. Tento typ není vhodný pro audio-modulaci. Podrobnější popis na [3], [4], [5], [6].



Obr. 3: Schéma OLTC transformátoru

1.5 SSTC (Solid State Tesla Coil) s polovodičovým budičem

SSTC lze rozdělit do dvou kategorií. U první kategorie je schéma podobné jako u typu VTTC (podrobně popsán na str. 10) s tím rozdílem, že elektronka je nahrazena bipolárním či unipolárním tranzistorem. Na Gate tranzistoru přichází signál z externího vinutí. To je navinuto podél sekundárního vinutí. Signál je tvarován na obdélníkový průběh a zvyšován, následně veden již do zmiňovaného Gatu.



Obr. 4: Poloviční můstek na levé straně a plný můstek na straně pravé

Druhá kategorie využívá měniče, které lze rozdělit na jednocestné a dvoucestné. Jednocestné měniče používají jeden spínací prvek a jsou obvodově jednodušší. Spínací prvek musíme dimenzovat na vysoké výkonové hodnoty. V dnešní době jsou častěji používání dvoucestné měniče tzv. „můstkové“. Nejznámější jsou dva druhy můstkových zapojení a to polo-řízený můstek obsahující pouze dva spínací prvky anebo plný můstek

využívající čtyři spínací prvky. U polo-řízeného můstku jsou zbývající dva spínací prvky z plného můstku nahrazeny kondenzátory, které vytváří společně s polovodiči napěťový dělič.

1.5.1 Princip SSTC

U polo-řízeného můstku je každý tranzistor napájen s opačnou polaritou napětí. Nejdříve je sepnut tranzistor Q1. Začne procházet proud přes kondenzátory C1 a C2, které se začnou nabíjet. Proud prochází také přes cívku, která má nyní orientovaný směr. Při vypnutí tranzistoru Q1 a následnému sepnutí Q2 dochází k obrácení polarity na cívce, a tím i přeorientování směru proudu. Cívka respektuje primární vinutí transformátoru.

Způsobem rychlé změny orientace proudu u cívky se indukuje napětí dle vztahu:

$$U_i = \frac{dU}{dt}$$

Napětí na sekundární cívce nezávisí jen na počtu závitů jako u použití OLTC nebo SGTC transformátoru, ale také na frekvenci přepínání mezi jednotlivými spínacími součástkami. V návaznosti na tento fakt lze dosáhnout mnohem vyšších výkonů. Napětí na kondenzátorech C1 a C2 odpovídá $\pm \frac{1}{2} U_{\text{nap}}$.

U plného můstku pracují při kladné a záporné polaritě vždy dva spínací prvky. Hlavní výhodou oproti využití polo-řízeného můstku je ve dvojnásobném výstupním napětí a lepším odběrem energie ze sítě. Při kladné polaritě je přiveden na Gate tranzistorů Q1 a Q4 signál a napětí na cívce je orientováno jedním směrem. Následuje rozepnutí Q1 a Q4 a sepnutí Q2 a Q3, kde napětí na cívce změní smysl orientace. Na sekundárním vinutí se začne indukovat napětí z primární cívky. Při následném rozepnutí Q2 a Q3 a sepnutí Q1 a Q4 je důležité počítat s „mrtvým časem“. Jedná se o čas, kdy nesmí přijít signál na následující dvojici tranzistorů z důvodu možného vzniku větrového zkratu. Ten by měl za následek několikanásobně zvýšený průběh proudu. Spínací prvky obvykle nejsou schopny zvýšený proud přenést a hrozilo by zničení elektrických součástek. To omezuje možnou spínací frekvenci a tím i možný maximální přenášený výkon. K ochraně proti změně smyslu proudu na cívce se používá paralelní kombinace spínacího prvku s nulovou diodou.

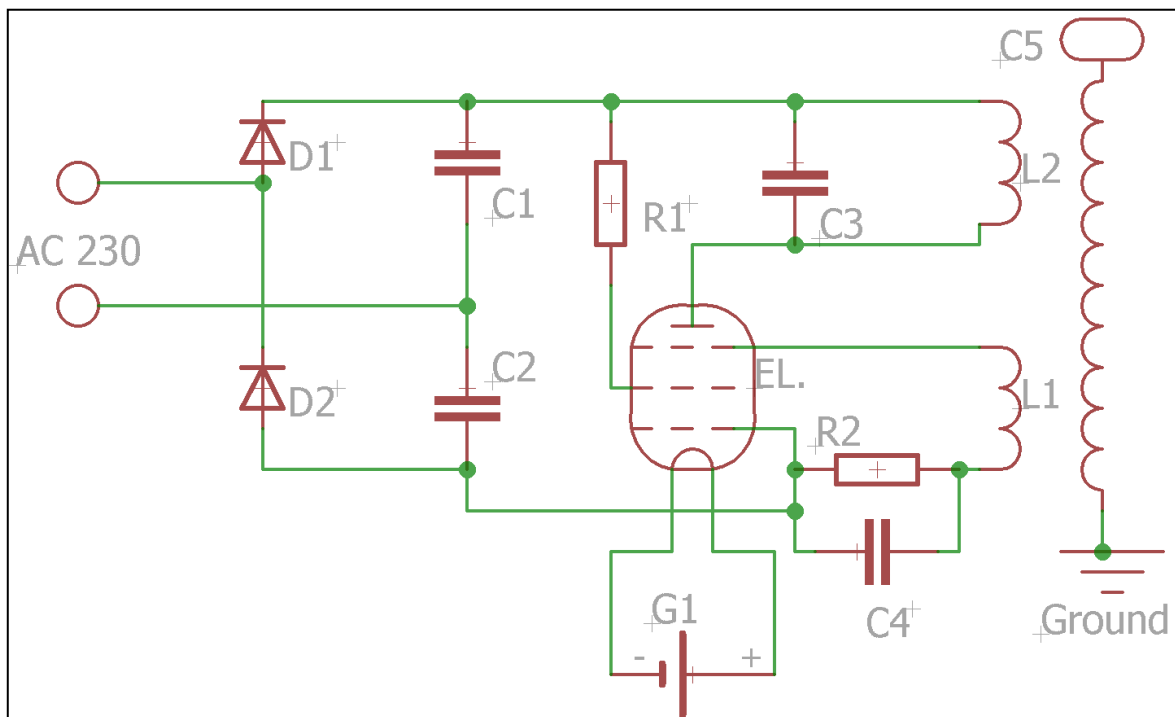
Efektivnější způsob pro regulaci je použití právě plného můstku. Ke správnému chodu plného můstku je nutné přivádět jednotlivé signály na oba tranzistory, tedy Q1 a Q4 nebo Q2 a Q3 zároveň. S optimálním poměrem 50:50. Další informace na [3], [4], [5], [6].

1.6 ISSTC Interrupted Solid State Tesla Coil

ISSTC je rozšířením k typu SSTC. Využívá možnosti vlastního nastavení doby zapnutí a vypnutí na oscilátoru TC, což docílí zvýšení impulzního špičkového výkonu. Výboje se na sekundární cívice prodlouží a sníží střední výkon zdroje. Součástky se mohou tedy dimenzovat na menší tepelné a výkonové parametry a celý TC se tak zlevní. Podrobnější popis na [3], [4], [5], [6].

1.7 VTTC – Vakuum Tube Tesla Coil

VTTC je jeden z prvních Teslových transformátorů. Jde o klasický STTC model s tím rozdílem, že jiskřiště je nahrazeno elektronkou. Elektronka slouží jako polovodičový prvek, který se využíval více v minulosti. V baňce je nutné zachovat vakuum, aby správně fungovala. Baňka je v současné době nahrazena polovodičovými prvky typu IGBT tranzistory, tyristory, diody atd. VTTC transformátor má tu výhodu, že ho lze použít i k audio modulaci, nejčastěji amplitudové modulaci. Tato modulace je závislá na vstupním zvukovém signálu. Výstup z modulace je připojen na vstup elektronkového oscilátoru, který způsobuje změnu indukovaného napětí na primární a posléze tedy sekundární cívice. Výstupem ze sekundární cívk je výboj v podobě stejného vstupního zvukového signálu. Další popis na [3], [4], [5], [6].



Obr. 5: VTTC Transformátor

1.8 TWIN – TC

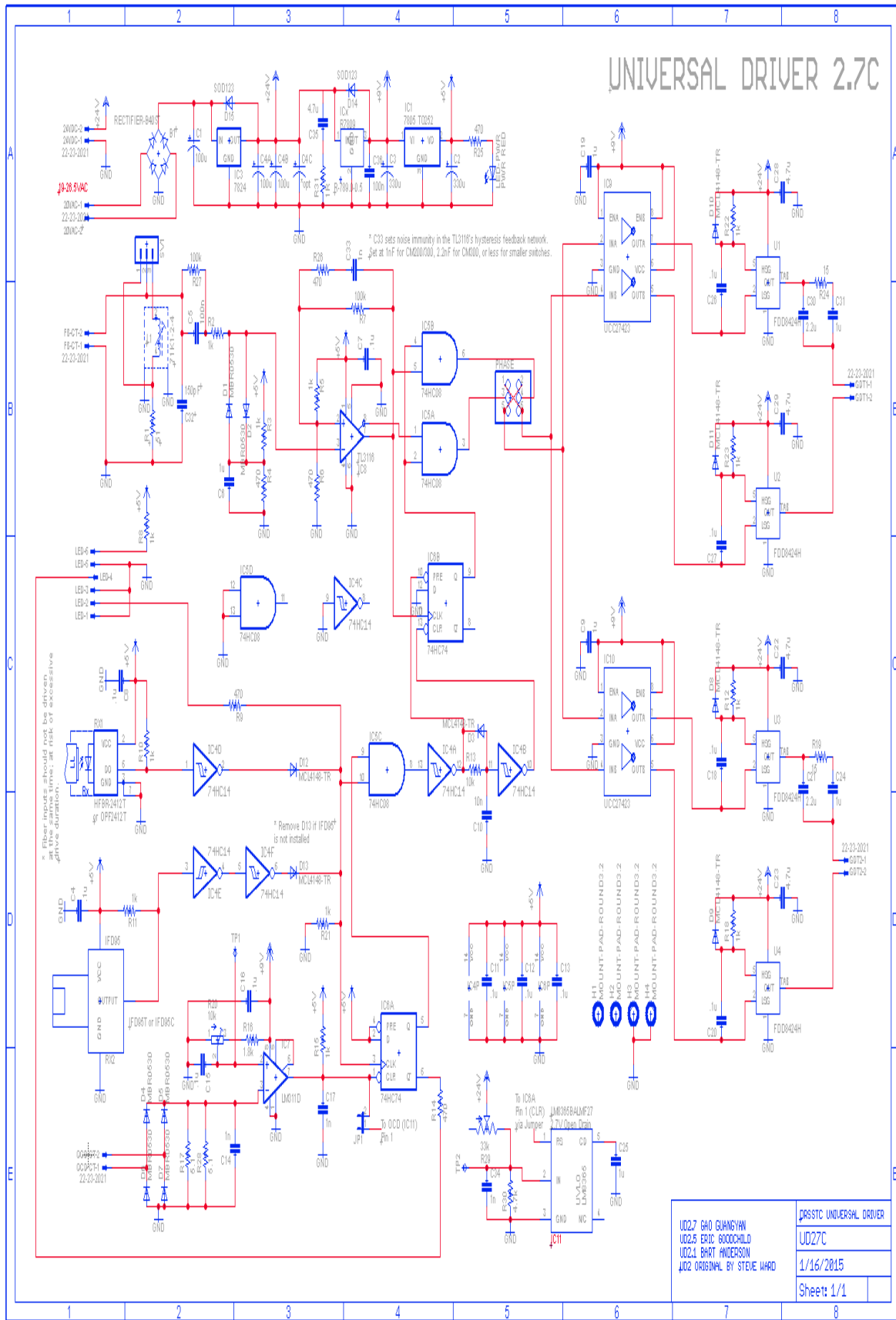
TWIN – TC je typ, který obsahuje dva transformátory. Transformátory jsou fázově posunuté naproti sobě a způsobují dvojnásobnou účinnost. Výboje dosahují zpravidla až dvojnásobné délky, než je tomu při stejných parametrech u SSTC. U primárních částí nesmí docházet k výbojům a ke ztrátě celkového sekundárního výkonu. Více informací na **Chyba! Nenalezen zdroj odkazů.**

1.9 DRSSTC Dual Resonant Solid State Tesla Coil

DRSSTC je druh měniče podobný jako SSTC s tím rozdílem, že je primární vinutí laděno na shodnou rezonanční frekvenci jako sekundární vinutí. Konfigurace způsobuje, že dostáváme na primární straně mnohem vyšší napětí, než je tomu u předešlých druhů, tedy vyšší indukované napětí z primární strany na sekundární. Při zvětšení napětí na sekundární straně se prodlouží celkové výboje. Rezonanční frekvenci primární strany lze dosáhnout přidáním kondenzátoru na primární stranu. Z důvodu rychlé změny proudu je na kondenzátor kladen důraz na možnou rychlou změnu proudu. Proto musí být dimenzován tak, aby vyhovoval vztahu $i_c = d_u/dt$. Bez použití přerušovače (interrupter) je obvod vysoce ztrátový. Díky přerušovači není obvod v sepnutém stavu pořád, ale jen skokově a tím je docíleno snížení střední hodnoty zařízení. Tento typ umí taky audio modulaci a díky těmto výhodám se staví do popředí od ostatních druhů Teslových transformátorů. Více informací na [3], [4], [5], [6], [7], [8], [9], [10].

2 Návrh Teslova transformátoru

Pro vlastní téma bakalářské práce autor zvolil variantu DRSTC, tedy polovodičově buzený Teslův transformátor s naladěnou rezonanční frekvencí a to jak na primární části, tak na sekundární straně. Volba je určena z důvodu efektivnějších výsledků, z hlediska výbojů. Pro řídicí část Teslova transformátoru použil obvod UD2.7 od Steve Ward's viz literatura [11] a obr. 6. Tento obvod byl volně ke stažení, včetně nákupního košíku, návrhu desky plošných spojů, schématu, obrázků zapojení. Obvod se skládá ze zpětnovazební části, přijímače z optického přerušovače, ovladače budičů tranzistorů, lineárních regulátorů, aktivního omezovače proudu a signalizace. Všechny části jsou podrobně popsány níže v kapitolách. Podrobnější popis na [7], [9], [10], [11].

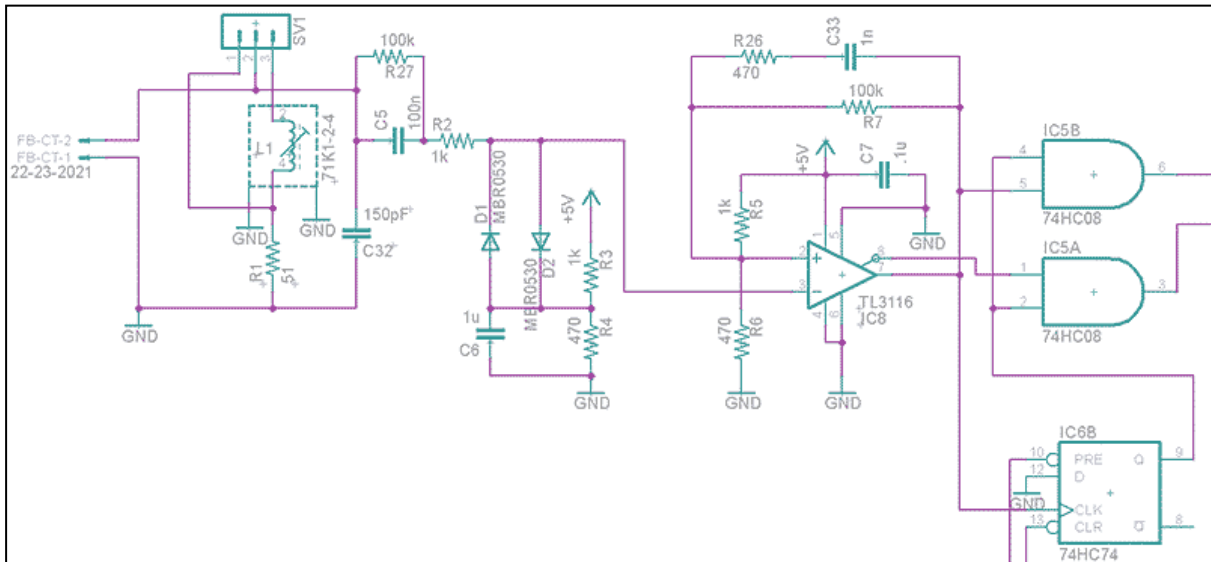


Obr. 6: Schéma řídicího univerzálního obvodu UD2.7

2.1 Zpětná vazba

Zpětná vazba slouží pro správné opětovné naladování rezonanční frekvenci primárního a sekundárního vinutí. Skládá se z ochrany proti přepětí a nadproudům, hradla 74HC14 a přívodu signálu ze zpětné vazby viz obr. 7.

Signál přicházející do obvodu zpětné vazby, je přijímán přes proudové transformátory. Ty jsou z feritového jádra a jsou připojeny na primární stranu cívky. Signál je pak veden přes obvod R1, L1, kde se změní hodnota účinníku a tedy posun mezi napětím a proudem. Diody D1 a D2 slouží pro nastavení napětí na optimálních 5V. Zbytkové napětí z diod je odváděno posléze přes odpory R3, R4. Komparátor IC8 je nastavený na vstupní napětí 1,6V pomocí odporů R5 a R6, jenž tvoří dělič napětí. Pin komparátoru je připojen na napájení 5V. Výstup z komparátoru jde na vstup budičů přes dvě AND hradla. Signál z komparátoru je veden také do vstupu klopného obvodu 74HC74 (viz. Obr. 7), kde slouží jako hodinový impulz. AND bude sepnutý, jen pokud přijde signál jak z komparátoru, tak i z výstupu Q hradla IC6B. Toho lze docílit jen, pokud z optického přerušovače a omezovače proudu přijde nulový signál (vstup 10,13) na hradlo IC6B. Další informace na [11].



Obr. 7: Schéma zpětné vazby

2.2 Aktivní omezovač proudu OCD(Over-Current Detector) a vstupní přerušovač

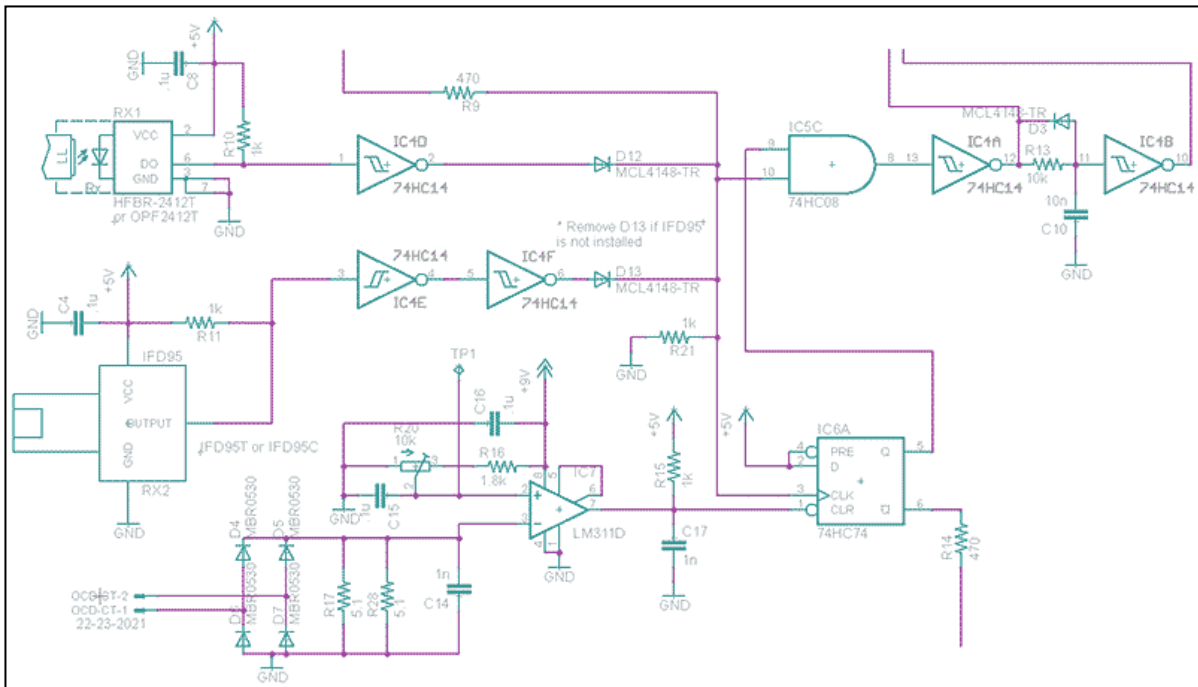
Aktivní omezovač proudu slouží pro nastavení požadované výstupní hodnoty proudu. Signál jde z proudových transformátorů, které jsou kaskádně zapojeny

do usměrňovacích diod D4-D7. Průběh je díky diodám usměrněn. Odpory R17,28 slouží pro doladění vstupního proudu pro komparátor LM311N. Kondenzátor C14 slouží jako filtr pro odstranění šumu ze vstupních signálů. Odstraňuje také střídavou složku a vyhlazuje průběh napětí. Pomocí potenciometru R20 se nastavuje referenční hodnota napětí na komparátoru. K omezení proudu slouží Kondenzátory C15 a C16. R16 slouží jako zpětná vazba hradla a omezení proudu. Komparátor LM311N je zde použito jako komparátor. Ten porovnává dvě vstupní hodnoty, z niž je jedna hodnota referenční a druhá vychází z proudových transformátorů. Když hodnota z proudových transformátorů přesáhne hodnotu referenční, tak výstupní hodnota komparátoru začne klesat do doby, než se obě hodnoty začnou rovnat. Tento signál jde pak dále do hradla 74HC74 klopného obvodu.

Na obr. 9 jsou také ukázány dvě možnosti přijímaného signálu z optického přerušovače. První způsob je pomocí průmyslového optického vlákna. Druhý způsob je optické ST vlákno. Pro svoji řídicí část si zvolil druhou variantu tedy ST vlákno z důvodu lepší přilnavosti vlákna ke vstupu či výstupu optického přerušovače. Přilnavost je zajištěna pomocí pružiny a tím se eliminují ztráty útlumu na minimum. Více informací na [11].

2.3 Ovládání klopného obvodu 74HC74

Klopný obvod IC6A vyše signál do AND pouze je-li signál výstupní z komparátoru a signál z přerušovače roven logické 1. Když je hodnota výstupní z komparátoru nulová, tak se Komparátor resetuje a výstup 5 je také nulový. Výstup z AND jde do zesilovače IC4A, který rozšíří hysterezní smyčku. Signál jde dále do PRE hradla IC6B. Zesilovač IC4B zesiluje hysterezní smyčku a způsobuje zpoždění signálu, který jde do CLR vstupu IC6B. Díky tomu se klopný obvod celý resetuje. Při vynechání hradla IC4B by došel na hradlo IC6B signál do PRE a CLR ve stejnou chvíli a výstup by zůstal nulový a posléze by se nic nedělo. Detailněji popsáno na [11], [12].

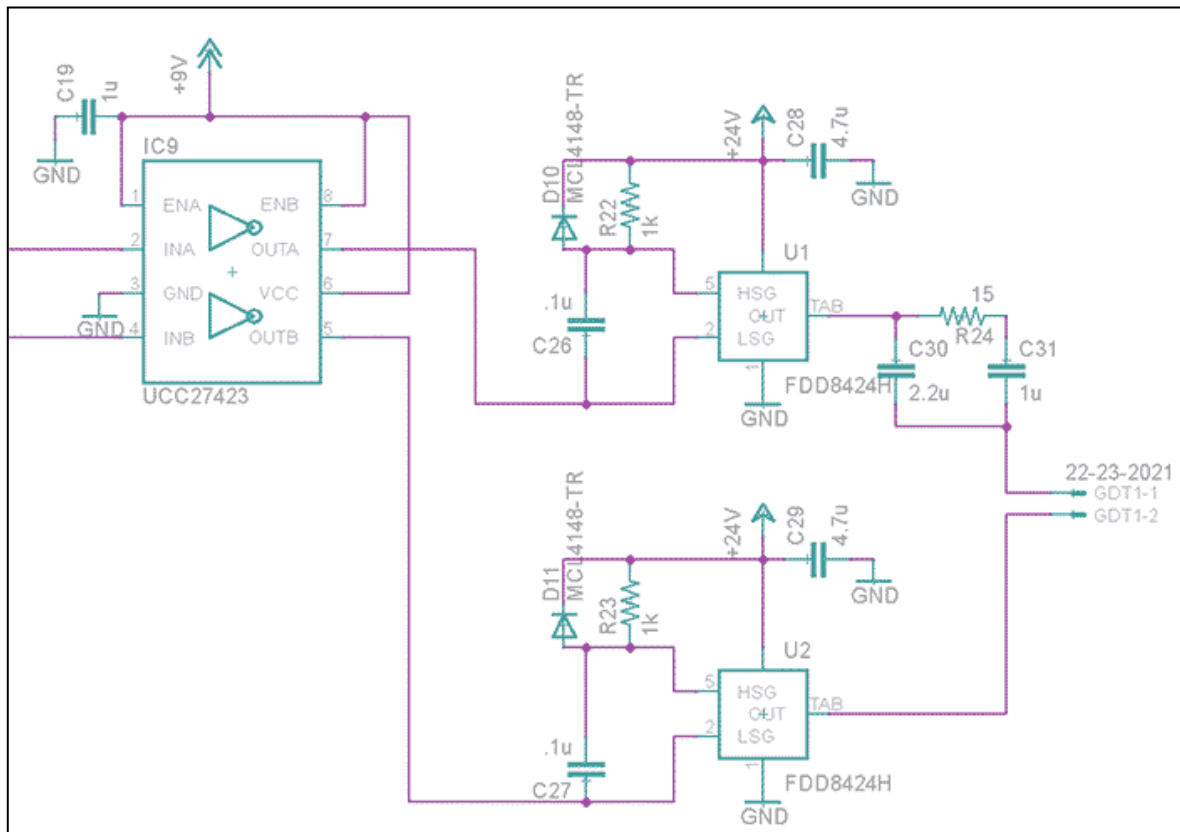


Obr. 8: Schéma aktivního omezovače proudu

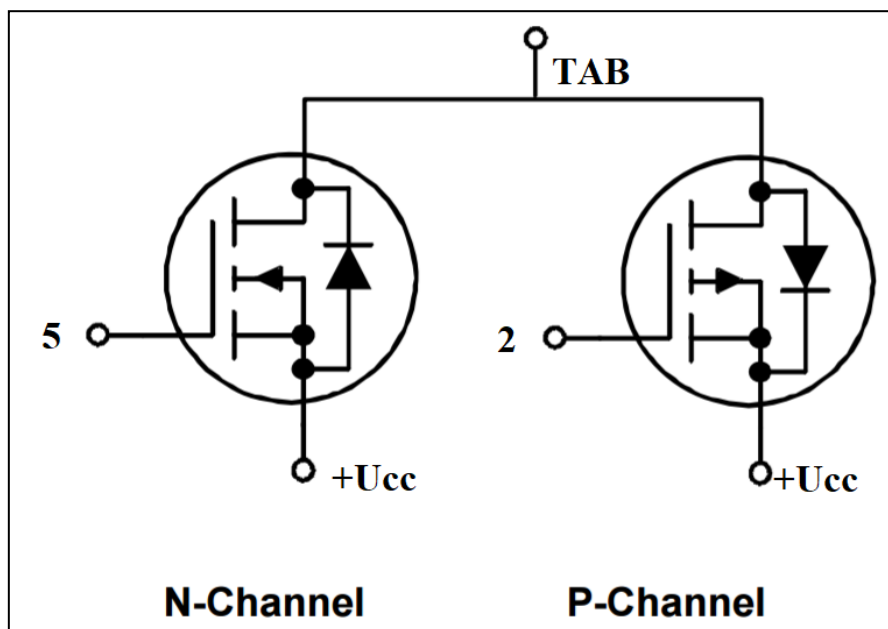
2.4 Ovládání budiče tranzistorů

Ovládání budiče tranzistorů je umožněno pomocí dvou P a dvou N mosfetů. Každý z nich má velmi nízkou hodnotu prahového napětí. Pohybuje se okolo $P=1,7V$ a pro $N=1,6V$. C30-31 kondenzátory slouží pro odebrání stejnosměrné složky. Odpor R24 je v obvodu z toho důvodu, aby omezoval zvlnění proudu rozptylové indukčnosti, které by mohlo způsobit náhodné sepnutí IGBT tranzistorů v silové části. Diody D10-11 slouží jako ochrana jednotlivých mosfetů a odvádí jednotlivé napěťové špičky a omezují napětí na 24V.

Pro vysvětlení principu je obvod zjednodušen. Bereme v úvahu jen horní obvod skládající se z jednoho páru mosfetů, tedy z jednoho N a jednoho P mosfetu viz obr. 11. Pro dolní obvod platí to samé. Vycházíme ze stavu, kdy přes odpor R22 jde veškerý proud. Mosfet P je ve vypnutém stavu a mosfet N je v sepnutém stavu. V případě, že výstup z klopného obvodu má hodnotu logické jedničky, tak signál se spojí mezi N a P přes kondenzátor C26 a tím docílíme obdélníkového průběhu, ale s posunutím o 24V. Zmiňovaná nízká hodnota prahového napětí se vypne u N-mosfetu a sepne mosfet P. Výstupy jsou fázově posunuty o 90° a periodicky se opakují. Další informace na [11].



Obr. 9: Schéma ovládání budiče

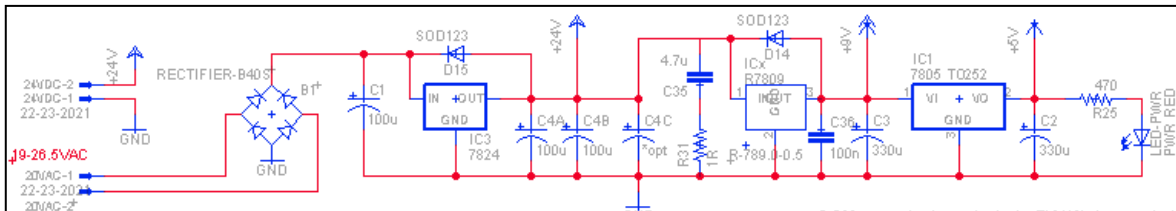


Obr. 10: Schéma součástky FDD8424H

2.5 Pomocné zdroje

Obvod pomocných zdrojů se skládá ze střídavého vstupního napájení, usměrňovače

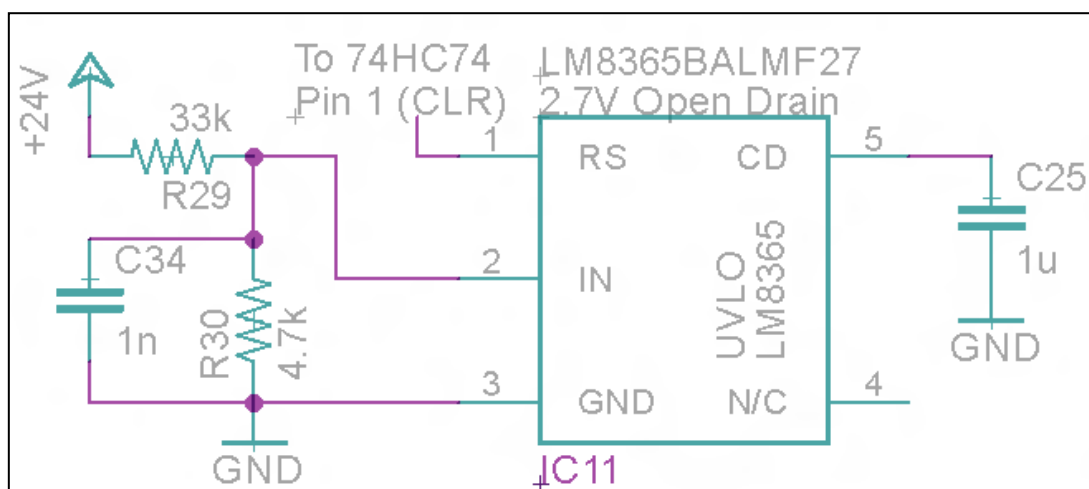
a jednotlivých lineárních stabilizátorů. V našem případě jsou jako usměrňovače použity čtyři usměrňovací diody. Kondenzátory C1, C4A, C4B, C4C, C3, C2 plní zde funkci vyhlazování průběhu napětí. Odstraňují také střídavou složku napětí. Pro celkový obvod nám postačí hlavní napájení a dva lineární stabilizátory. Hodnota jednotlivých stabilizátorů činní +5V, +9V, +24V. D15, D14 jsou zde použity jako reverzní ochrany k jednotlivým lineárním stabilizátorům. Odpor R25 je zde použit z důvodu omezení proudu pro led-diodu, která slouží jako signalizace zapnutí řídicího obvodu. Více informací na [11].



Obr. 11: Schéma zdrojů pro řídicí část

2.6 Ochrana výkonových mosfetů

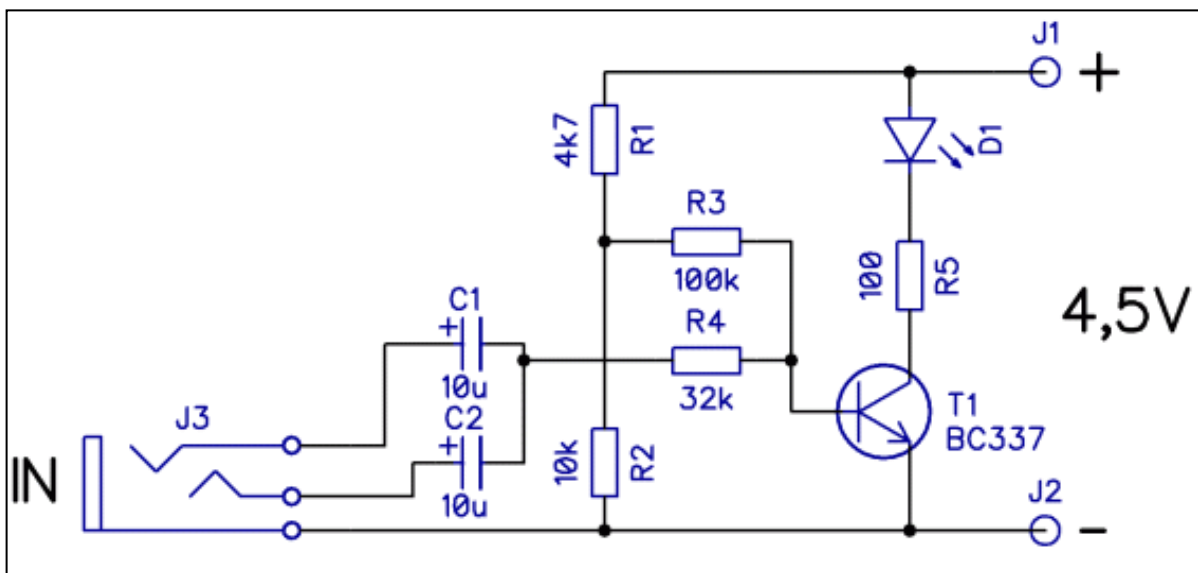
Z důvodu velkého namáhání výkonových mosfetů je zajištěna ochrana pomocí obvodu UVLO LM8365. To zajišťuje v případě nižšího napětí, než které je v rámci povolených mezi možné, pouštět do gatu výkonových tranzistorů, odpojení od řídicí části. V případě vynechání obvodu by mohlo dojít k poškození logických obvodů a náhodnému spínání. Vstup hradla je omezen děličem napětí R29, R30. Když bude napětí na hradle menší než 22V, překročí se limit a obvod sepne. Proti rušení vstupní části je přidán kondenzátor C34. K zajištění obnovy hradla vstupním RS je nutné na výstup přidat kondenzátor C25, který udrží výstupní hodnotu okolo 1 sekundy. Další informace na [11].



Obr. 12: Pomocné zdroje

2.7 Optický přerušovač (interrupter)

Přerušovač je na obr. 14 a slouží k zesílení signálu, který je přiváděn z konektoru Jack a lze ho připojit k jakémukoliv hudebnímu přehrávači se stejným konektorem. Z konektoru jde stereo signál přes kondenzátory C1, C2, kde dojde ke spojení obou signálů. Signál pak dále jde do vstupní báze tranzistoru T1. K nastavení požadované propustné hodnoty proudu slouží odpor R4 a R3. K nastavení propustného napětí mezi bází a kolektorem je použit odpor R1. Podobně jako R1 je použit odpor R2 na nastavení napětí mezi Bázi-Emitorem. Obvod je napájen z 4,5V baterie. Odpor R5 slouží pro nastavení požadovaného proudu na kolektorové straně a je spojen s diodou D1. Ta vysílá optický signál přes optické vlákno do řídicí části přijímače optického přerušovače Obr. 9 RX1. Detailněji na [13].

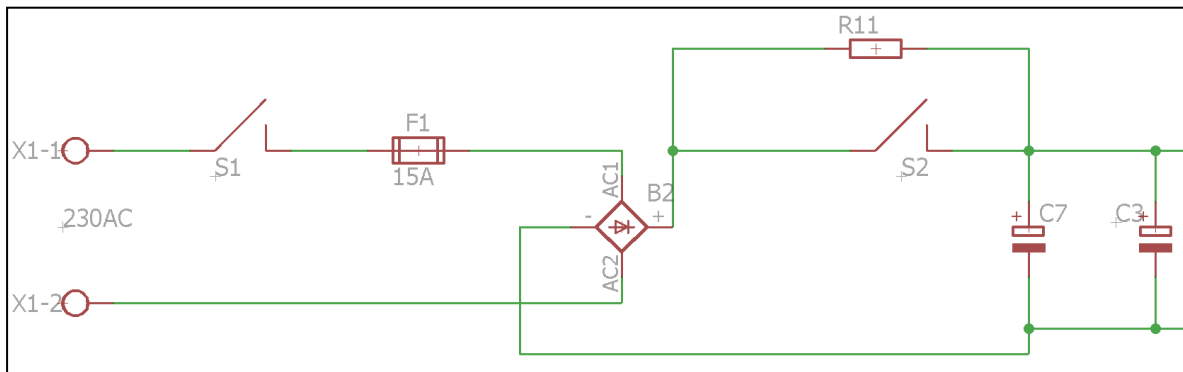


Obr. 13: Vysílač optického signálu

3 Silová část zařízení

3.1 Napájení Silové části stroje

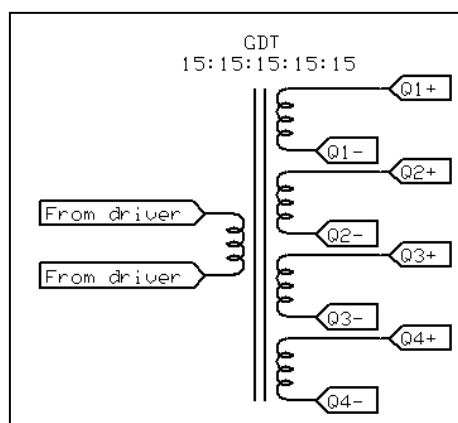
Napájení silové části zajišťuje hlavní přívod energie do primární části cívky Teslova transformátoru. Silová část je napájena ze zásuvky 230AC a zapínána pomocí spínače S1 viz obr. 15. Ochrana proti zkratu je zajištěna pojistkou F1. Výstup z pojistky jde do usměrňovače B2. Usměrňovač je složen ze čtyř diod. Za ním se nachází dvojice paralelně zapojených kondenzátorů C7, C3 pro zjemnění průběhu napětí a pro odstranění střídavé složky. Pro přednabíjení kondenzátorů se při zapínání připojuje odpor R11. Před spouštěním celé části stroje se odpor vyřadí spínačem S2. Více detailů pod odkazem [7].



Obr. 14: Schéma ovládací část stroje

3.2 GDT- transformátor

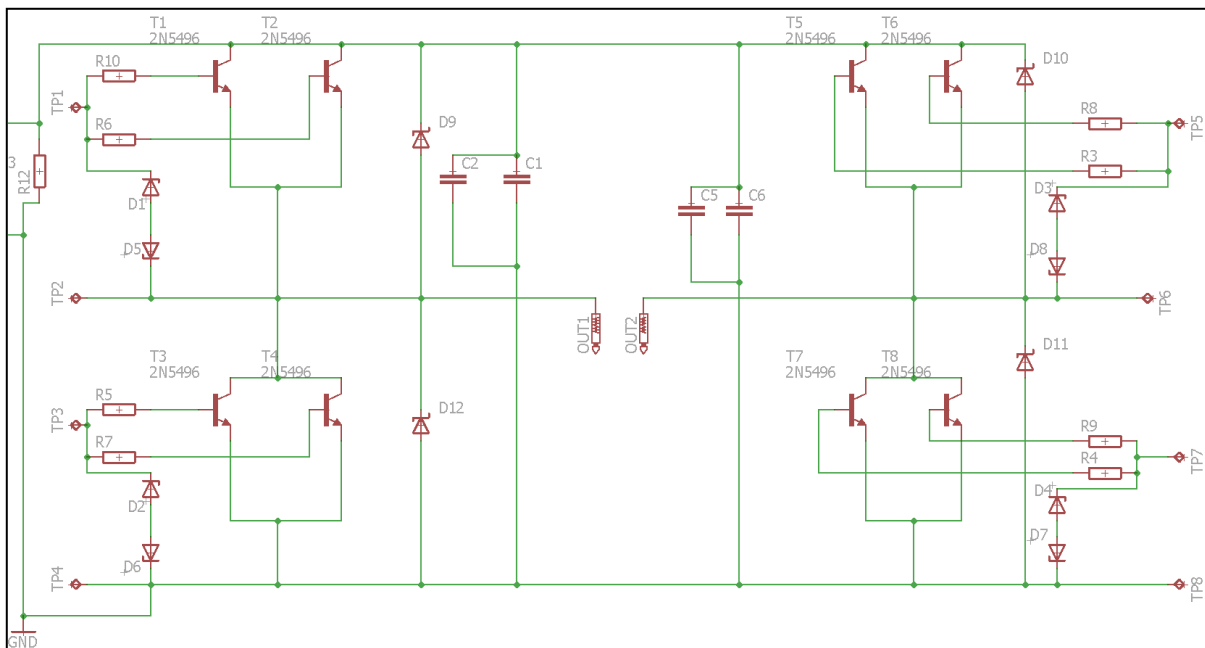
Výstupní signál z řídicí části budiče obr. 15 GDT1-2 je přiváděn na vstupní cívku obr. 16. Ta se skládá z vodiče, který je navinut na prstencovém feritovém jádru. Výstupy jsou čtyři cívky, dány v poměru 1:1:1:1 tedy shodné cívky, které jsou však fázově pootočené tak, aby mosfety spínaly postupně. Více detailů pod odkazem [7].



Obr. 15: GDT- transformátor

3.3 Ovládání silové části stroje

Přívod z napájecí části uvedené na obr. 16 je spojen paralelně s odporem R12. Ten slouží jako ochrana. Při vypnutí obvodu se nahromaděná energie na kondenzátorech C7, C3 vybíjí právě přes odpor R12. Autor bakalářské práce pro svůj transformátor použil variantu H můstku obr. 17, a to z důvodu větších výbojů na sekundární cívce. Jako výkonové spínací součástky použil mosfety (C2M0025120D) T1-T8. Pro jejich ochranu a rozdělení proudu byly použity dva paralelně zapojené mosfety, neboli čtyři na jednu stranu cívky. Ke každé straně cívky jsou zapojeny dva kondenzátory paralelně pro dostatečný přívod energie do cívky. TP1-TP8 jsou výstupy z GDT transformátoru, popsány v kapitole 3.2. Výstup jde přes jednotlivé odpory na gate jednotlivých mosfetů. Odpory slouží pro nastavení požadovaného proudu na gate. Pro ochranu mosfetů proti přepětí jsou k bázi připojeny dvě antiparalelně Zenerovi diody. Jako další ochrana jsou zde použity transily D9-D12. Další informace pod odkazem [7].



Obr. 16: Schéma silové části

3.4 Mechanická část stroje

Přívod k primární cívce je zajištěn pomocí výstupu silové části obr. 16 (Out1, Out2). Přičemž výstup Out1 je propojen s dvěma feritovými jádry sloužící pro omezovač proudu a zpětnou vazbu. Primární cívka je vytvořena z měděné trubičky o průměru 1,1 cm viz obr. 17. Celkový počet závitů je 8. Out1 je tvrdě připojen na spodní část cívky. Out2 je připojen na jezdec. Ten zajišťuje doladování na příslušnou rezonanční frekvenci stroje.

Pro správný tvar a pevnost jsou jednotlivé závity připevněny na polyetylenové žebra, která jsou pomocí šroubů upevněna na dřevěnou desku podstavy obr. 18. Ve středové části desky je otvor pro umístění sekundární cívky. Sekundární cívka je navinutá na PVC trubku s teplotní odolností okolo 170°C. Pro větší odolnost proti oxidaci mědi jsou obě cívky potaženy polyuretanovým lakem, který by měl patřit k nevodivým materiálům.



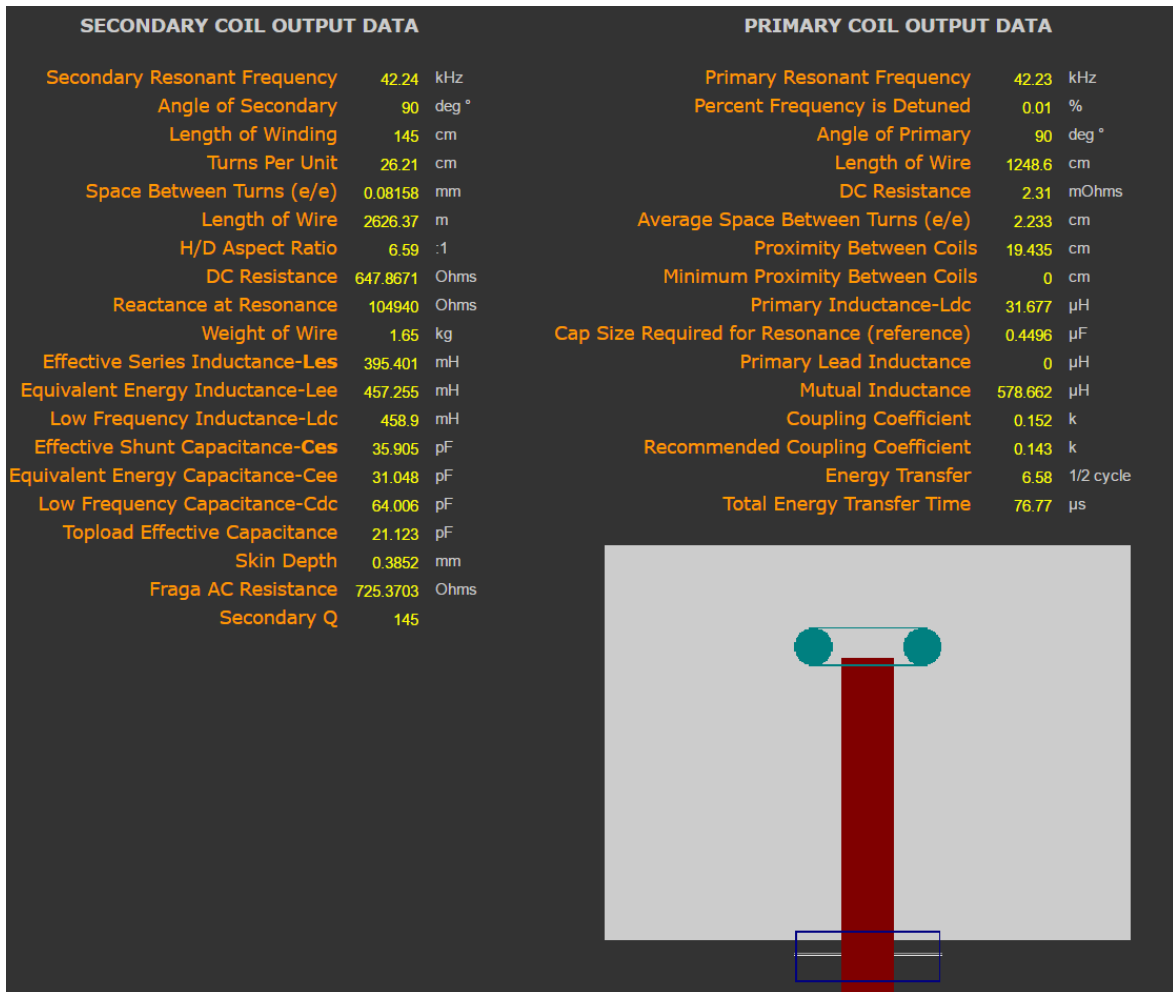
Obr. 18: Primární cívka



Obr. 17: Podstava Teslovy cívky

3.5 Nastavení požadované rezonanční frekvence

Transformátor DRSSTC pracuje na principu naladování rezonanční frekvence, jak na primární, tak na sekundární straně. Pro správné nastavení rezonanční frekvence je zapotřebí nastavit na sekundární cívce přesný počet závitů. Frekvenci ovlivňují složky kapacitní a indukční. Pro získání orientační frekvence autor použil již vytvořený program java. Po zadání parametrů cívky vychází rezonanční frekvence u tohoto transformátoru okolo 42,23kHz. Počet závitů na primární cívce činí tedy 6,4. Sekundární cívka má přibližně 3800 závitů. Další informace pod odkazem číslo [14].



Obr. 19: Ukázka výpočtu programem JAVA

3.6 Toroid

Z důvodu zmenšení hodnoty rezonanční frekvence je použit na sekundární straně toroid. Vyšší hodnota frekvence není možná u všech možných použitých výkonových součástek a tak je tendence jí zmenšovat. Toroid také zamezuje možnosti vytváření výbojů na horní straně sekundární cívky a částečně i na spodní straně. Rozšiřuje celkový Teslův transformátor a tím i možnost spojení výbojů se zemí na vzdálenějším místě, než jen v blízkosti ovládací a silové části. Toroid se chová jako kondenzátor a do jisté míry si ukládá energii, která má pak za následek delší výboje. Toroidy se u transformátorů používají v mnoha tvarech například koule, půlkoule nebo prsteneц celý, plný či částečný. V mém návrhu je použit prstencový toroid celý bez výplně z důvodů lepšího zamezení vznikajících spojů mezi toroidem a sekundární cívkou. Toroid je tvořen z hliníkové trubky, která se používá ve vzduchotechnice. Trubka je spojena do kruhu a tvar udržuje deska z plexiskla. Pomocí hliníkových nýtů a hliníkové pásky je spojen plast s prstencem.

Uprostřed desky je vytvořena pomocná konstrukce pro usazení a vycentrování toroidu na sekundární cívku. Více informací pod odkazem [7].

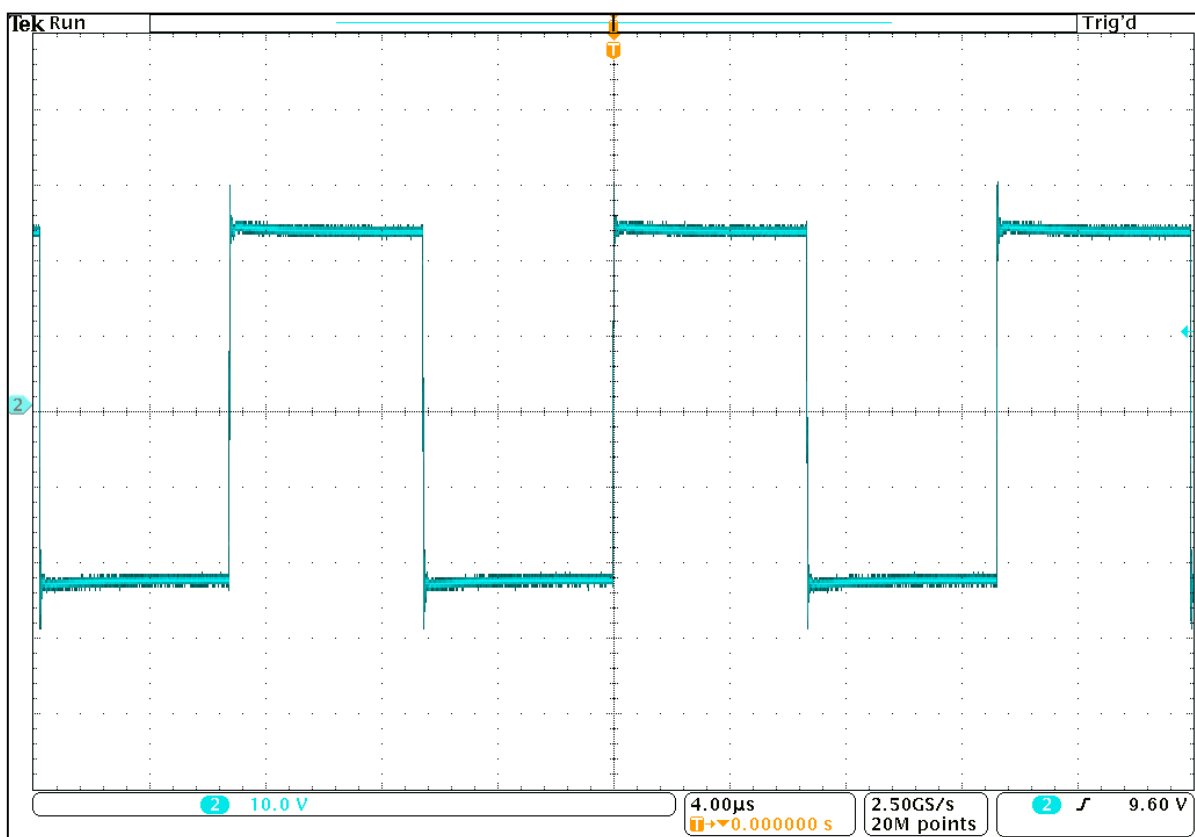


Obr. 20: Toroid

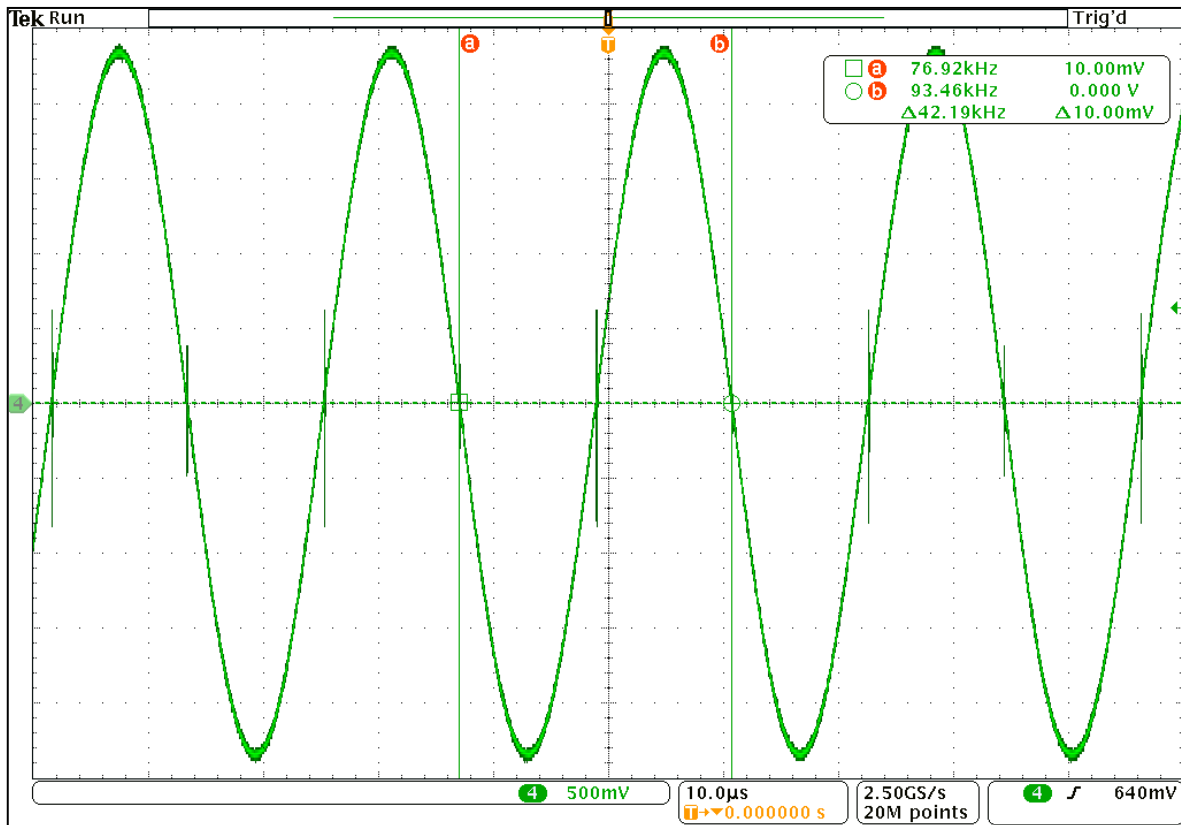
4 Oživování

4.1 Měření řídicí části

Podle schéma zapojení od Steve Ward's viz obr. 6 byl obvod sestaven. Obvod dokáže pracovat v rozmezí frekvence od 12kHz do 1MHz a transformuje sinusový vstupní průběh na výstupní obdélníkový. Po sestavení řídicí části byly změřeny průběhy napětí a proudu na výstupní části obvodu. Podle předpokladů měli průběhy na výstupním pinu GDT1-1 obr. 6 mít obdélníkový charakter. Jeden z pinů měl být oproti druhému pinu pootočen o 180°. Průběhy vycházely dle předpokladů, viz obr. 21, kde vidíme oba výstupní piny fázově pootočený a jejich hodnoty se neliší. Test byl uskutečněn při vstupním napětí z generátoru 5V a frekvenci 42,19kHz viz obr. 22, který vycházel z programu Java, viz kapitola 3.5.



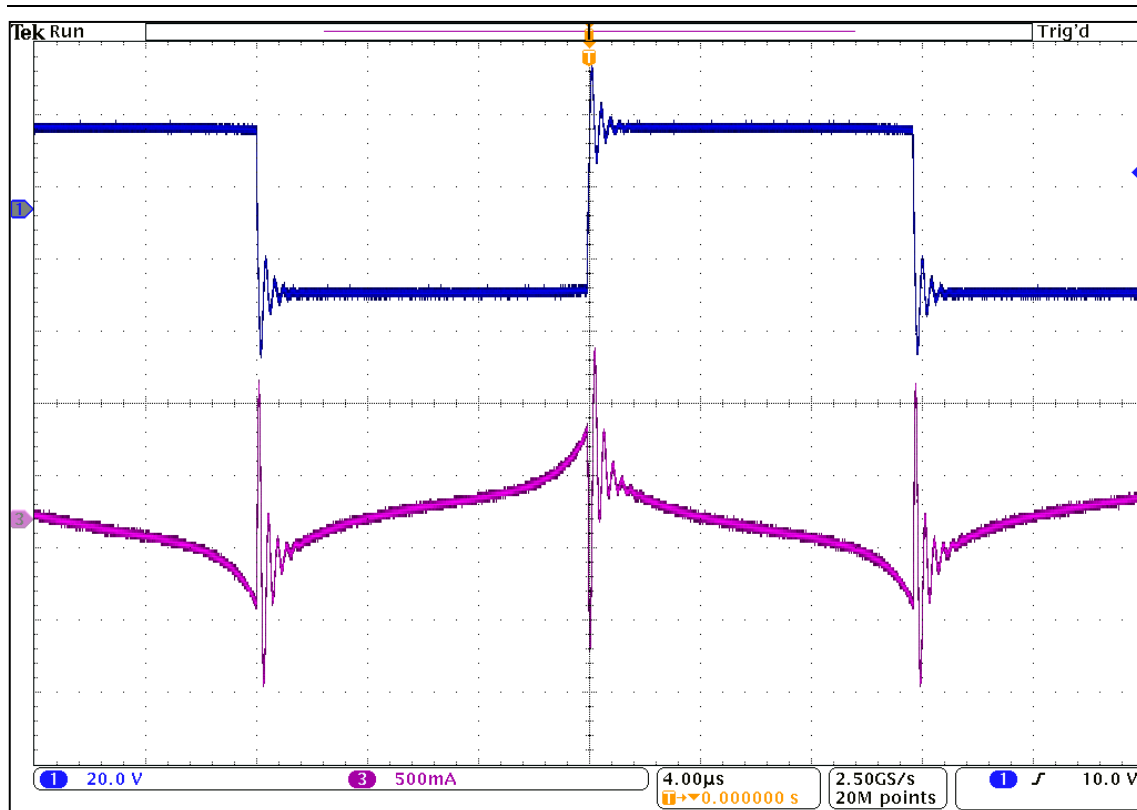
Obr. 21: Výstupní průběh z řídicí části GDT1-1



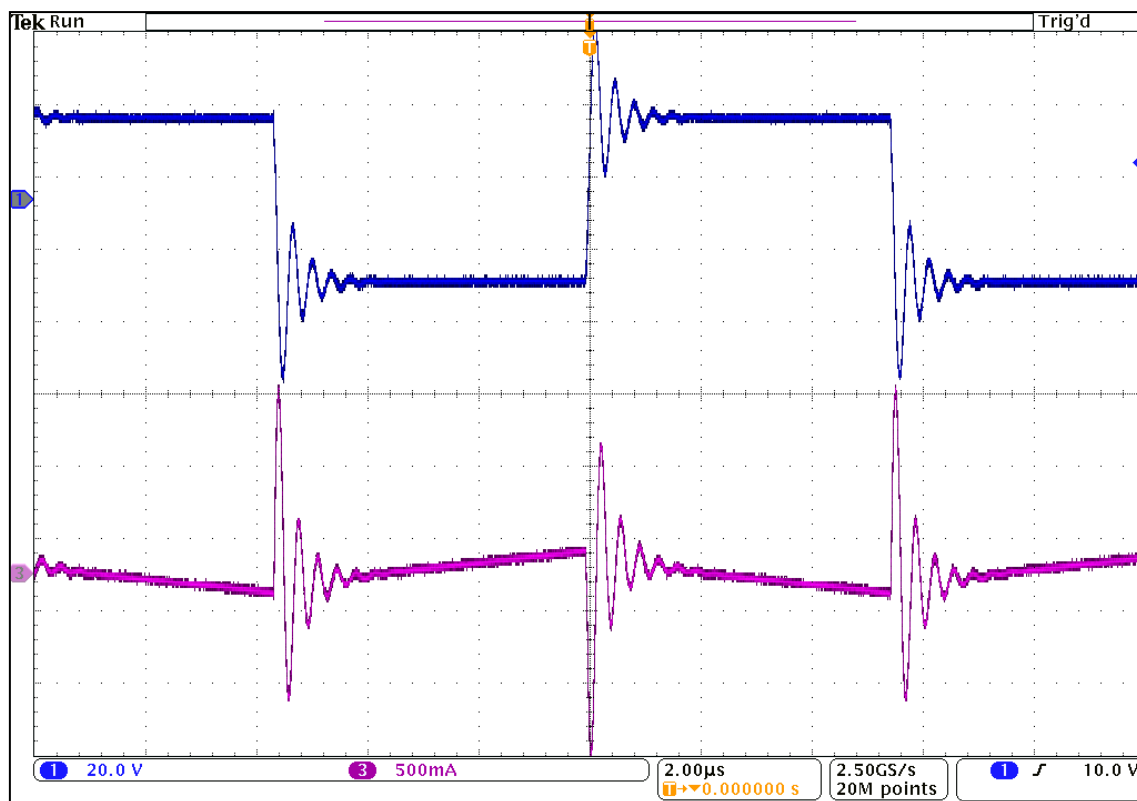
Obr. 22: Výstupní průběh napětí z generátoru při frekvenci 42,19kHz

4.2 Měření silové části s fiktivním obvodem

Před měřením skutečného obvodu silové části byly výstupní svorky z řídicí části připojeny přes GDT transformátor, který je popsán podrobně v kapitole 3.2, připojeny k fiktivnímu obvodu představujícímu vstupní část gate SiC mosfetu. Obvod byl takto měřen z důvodu získání informací pro zvolení vhodného odporu pro vstupní část na gate SiC mosfetu. Obvod se skládal z paralelně řazených odporů o hodnotě 10Ω a k nim byl sériově připojen kondenzátor. První pokus byl měřen při vypočítané frekvenci 42,24kHz programem Java. Výsledný průběh napětí označený modrou barvou na obr. 23 vychází dle předpokladů. Kmity na začátku jednotlivých signálů jsou způsobené z výstupního kondenzátoru, jenž si zachovává energii. Výstupní měřený proud, označen fialovou barvou, nevychází správně. Na průběhu je vidět nasycení feritového jádra. Pro správný chod existuje několik řešení. Jedno z řešení je zvýšit indukčnost GDT transformátoru. Toho lze dosáhnout zvýšením počtu závitů, či nahrazení feritového jádra za jiné s vyšší indukčností. Další ze způsobů je zvýšit frekvenci celého Teslova transformátoru. Byla zvolena varianta pro zvýšení frekvence a to na 60kHz. Výsledný průběhy jsou na obr. 24.



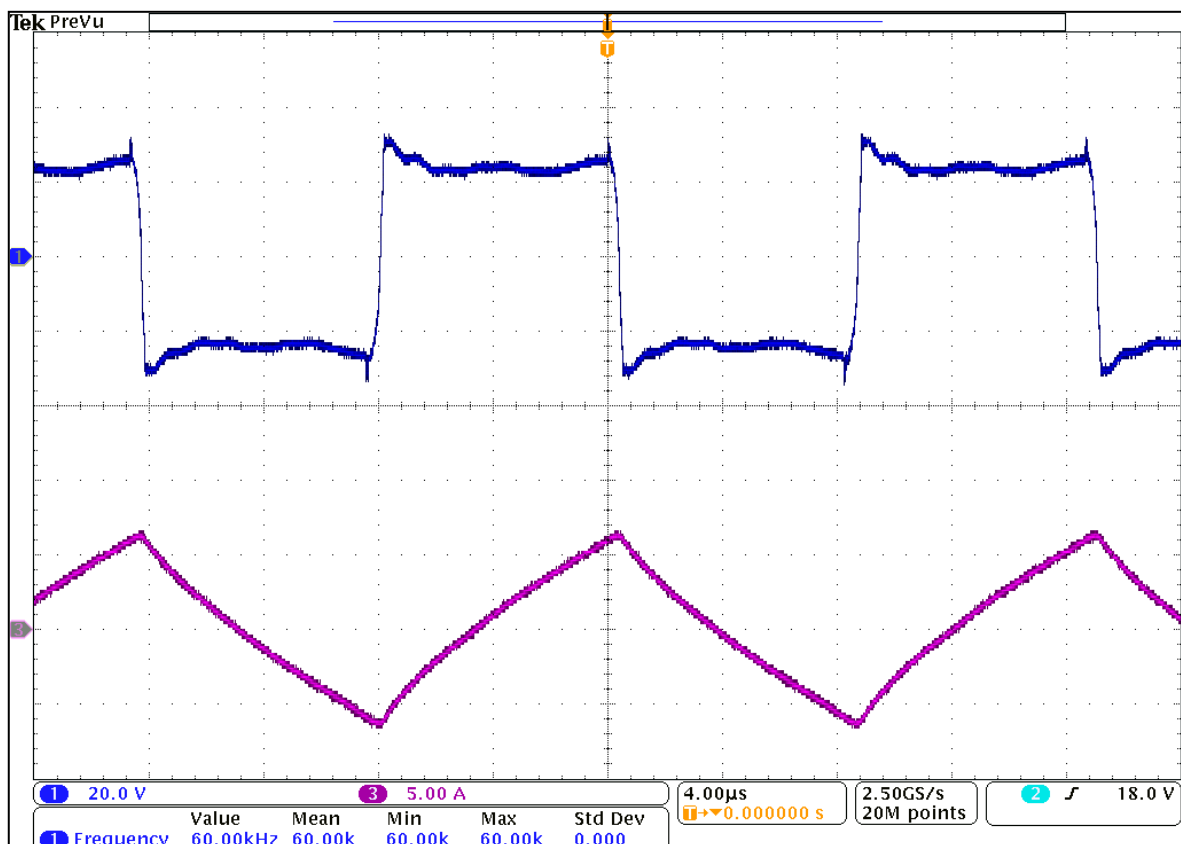
Obr. 23: Průběhy výstupního napětí (modrá barva) a výstupního proud (fialová barva) při fiktivním zapojení pro 42,24kHz.



Obr. 24: Průběhy výstupního napětí (modrá barva) a výstupního proud (fialová barva) při fiktivním zapojení pro 60kHz.

4.3 Měření silové části

Zvolený odpor před přivedením signálu na gate SiC mosfetu má hodnotu 1Ω . Podle schéma zapojení na obr. 16 byl obvod zapojen. Vstupní napájení bylo přivedeno stejnosměrným zdrojem přímo na výstupní části usměrňovače. Napětí bylo nastaveno na maximální možné ze zdroje, což představuje hodnotu 31V bez proudového omezení. Měření bylo prováděno při frekvenci 60kHz. Nejdříve bylo provedeno potenciometrem s celkovou hodnotou odporu 100Ω . Následující měření bylo provedeno s potenciometrem s celkovou hodnotou 5Ω . Oba byli připojeni na výstupní svorky ze silové části. Primární kondenzátor byl z důvodu zlepšení průběhů napětí vyzkratován. Výstupní průběhy jsou možné vidět na obrázku číslo 25. Průběh proudu je označen fialovou barvou. Na průběhu proudu je vidět vlivem indukčnosti nárůst a posléze pokles proudu v exponenciálním tvaru. Napětí je označeno barvou modrou a jeho průběh by měl mít v ideálním případě vzhled obdélníkového průběhu. Oba průběhy oproti vstupnímu průběhu jsou fázově posunuty. Posunutí je způsobeno indukčností výstupního potenciometru. Všechny zapojené části byly v průběhu měření kontrolovány thermokamerou aby nedošlo k přehřátí jednotlivých částí.



Obr. 25: Výstupní průběhy ze silové části.

5 Závěr

Bakalářská práce měla za úkol popsat a navrhnout mechanickou konstrukci Teslova transformátoru a obvodové schéma měniče, realizovat polovodičově buzený Teslův transformátor a ověřit experimentální funkci zařízení. Mechanická část Teslova transformátoru byla bez větších obtíží úspěšně realizována. Jednotlivé stádia stavby jsou vyfotografovány a přidány v příloze. Obvodové schéma měniče bylo díky odborným připomínkám a pomocné odborné literatuře úspěšně navrženo. Všechny části, jak řídicí tak silové, jsou podrobně popsány v kapitolách výše. Výsledné změřené průběhy řídicí a silové části úspěšně vycházejí dle předpokladů. Z důvodu velké časové náročnosti nebyl zkompletován Teslův transformátor. Následovalo by měření při plném napětí v silové části. Dále pak měřeny výstupní průběhy z proudových transformátorů. Posléze měření rezonanční frekvence a následnému spojení všech částí Teslova transformátoru včetně primární a sekundární cívky.

Při realizaci bakalářské práce jsem si uvědomil časovou náročnost montáže strojů, jejich řídicích jednotek a i náročnost sladění všech komponentů v jeden funkční celek. Představy o výsledku, které nás nutí dílo dokončit, se mohou různit v realitě. Přesto jsem si splnil představu o reálnosti montáže polovodičově buzeného transformátoru.

6 Seznam literatury a informačních zdrojů

- [1] Nikola Tesla: Úžasný Dokument cz. *Youtube* [online]. Vepererit Ahehatiro, 2016 [cit. 2017-06-13]. Dostupné z: https://www.youtube.com/watch?v=1X_8k_KrVX4&t=2977s
- [2] Nikola Tesla. In: *Wikipedia: the free encyclopedia* [online]. San Francisco (CA): Wikimedia Foundation, 2001- [cit. 2017-06-13]. Dostupné z: https://cs.wikipedia.org/wiki/Nikola_Tesla
- [3] *BAKALÁŘSKÁ PRÁCE: Polovodičově buzený Teslův transformátor*. Plzeň, 2015. Bakalářská práce. ZČU. Vedoucí práce Aleš Stupka.
- [4] Teslův transformátor. In: *Wikipedia: the free encyclopedia* [online]. San Francisco (CA): Wikimedia Foundation, 2001- [cit. 2017-06-13]. Dostupné z: https://cs.wikipedia.org/wiki/Tesl%C5%AFv_transform%C3%A1tor
- [5] Teslův transformátor. *Elektronika kvalitně* [online]. 2014 [cit. 2017-06-13]. Dostupné z: <http://elektronika.kvalitne.cz/VN/tesla/tesla.html>
- [6] *Teslův transformátor s elektronkovým budičem*. Karlovy Vary, 2011. Středoškolská odborná činnost. První české gymnázium v Karlových Varech. Vedoucí práce Martin Vitek.
- [7] Kaizer Power Electronics: Kaizer DRSSTC I. *Kaizer Power Electronics* [online]. [cit. 2017-06-13]. Dostupné z: <http://kaizerpowerelectronics.dk/tesla-coils/kaizer-drsstc-i/>
- [8] WWW.DRSSTC.COM. *WWW.DRSSTC.COM!* [online]. [cit. 2017-06-13]. Dostupné z: <http://drsstc.com/>
- [9] Loneoceans Laboratories: DRSSTC2. *Lone-oceans) Laboratories* [online]. Gao Guangyan, 2003 [cit. 2017-06-13]. Dostupné z: <http://www.loneoceans.com/labs/drsstc2/>
- [10] Steve Ward. *A General Guide to DRSSTC Design* [online]. Steve Ward, 2005 [cit. 2017-06-13]. Dostupné z: http://stevehv.4hv.org/drsstc_design.htm
- [11] Loneoceans Laboratories: Universal DRSSTC Tesla Coil Driver 2.7 Rev C. *Lone-oceans) Laboratories* [online]. Gao Guangyan, 2003 [cit. 2017-06-13]. Dostupné z: <http://www.loneoceans.com/labs/ud27/>
- [12] Klopný obvod. In: *Wikipedia: the free encyclopedia* [online]. San Francisco (CA): Wikimedia Foundation, 2017 [cit. 2017-06-13]. Dostupné z:

https://cs.wikipedia.org/wiki/Klopn%C3%BD_obvod

[13] Optický přenos zvuku. *Pandatron: Elektrotechnický magazín* [online]. Pandatron, 2000-2017 [cit. 2017-06-13]. Dostupné z:

http://pandatron.cz/?534&opticky_prenos_zvuku

[14] *Classic Tesla: J A V A T C* [online]. Barton B. Anderson, 2014 [cit. 2017-06-09].

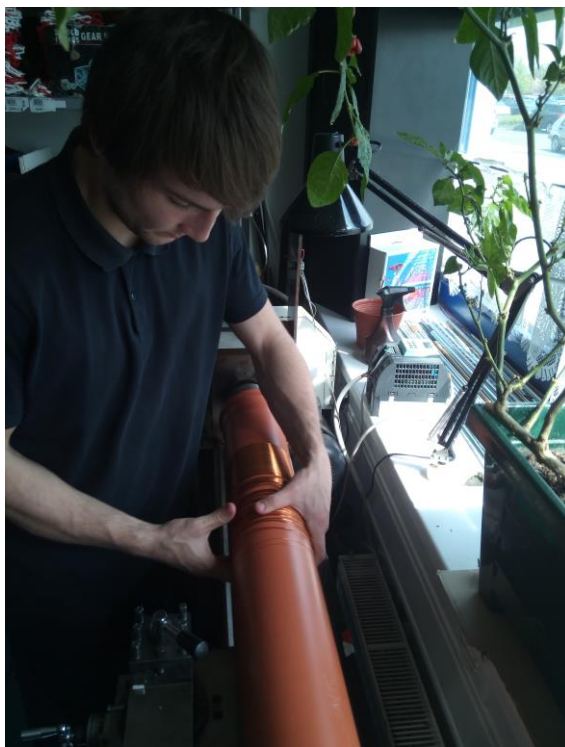
Dostupné z: <http://classictesla.com/java/javatc/javatc.html>

7 Přílohy

Seznam příloh

PŘÍLOHA Č. 1: NAVÍJENÍ SEKUNDÁRNÍ CÍVKY	35
PŘÍLOHA Č. 2: OHÝBÁNÍ PRIMÁRNÍ CÍVKY PŘES ŠPALEK STROMU	35
PŘÍLOHA Č. 3: OPTICKÝ PŘERUŠOVAČ. NA PRAVÉ STRANĚ VSTUP PRO AUDIO MODULACI POMOCÍ KONEKTORU JACK.....	35
PŘÍLOHA Č. 4: ŘÍDÍCÍ ČÁST TESLOVA TRANSFORMÁTORU	35
PŘÍLOHA Č. 6: NA OBRÁZKU JE VIDĚT SPOJENÍ JEDNOTLIVÝCH VÝSTUPŮ Z FERITOVÉHO JÁDRA NA VSTUP GATE SiC MOSFETU A PŘIPOJENÍ VSTUPNÍHO NAPÁJENÍ K USMĚRŇOVAČI.	35
PŘÍLOHA Č. 5: V DOLNÍ STRANĚ NA PRAVÉ STRANĚ KRABÍČKY OPTICKÝ PŘERUŠOVAČ A NAD NÍM ŘÍDÍCÍ ČÁST. NA LEVÉ STRANĚ V ZADNÍ ČÁSTI PAK SILOVÁ ČÁST STROJE, VČETNĚ CHLAZENÍ A NA PRAVÉ ZADNÍ ČÁSTI PRIMÁRNÍ KONDENZÁTORY. PŘED SILOVOU ČÁSTÍ PAK TRANSFORMÁTOR 230/20V.....	35

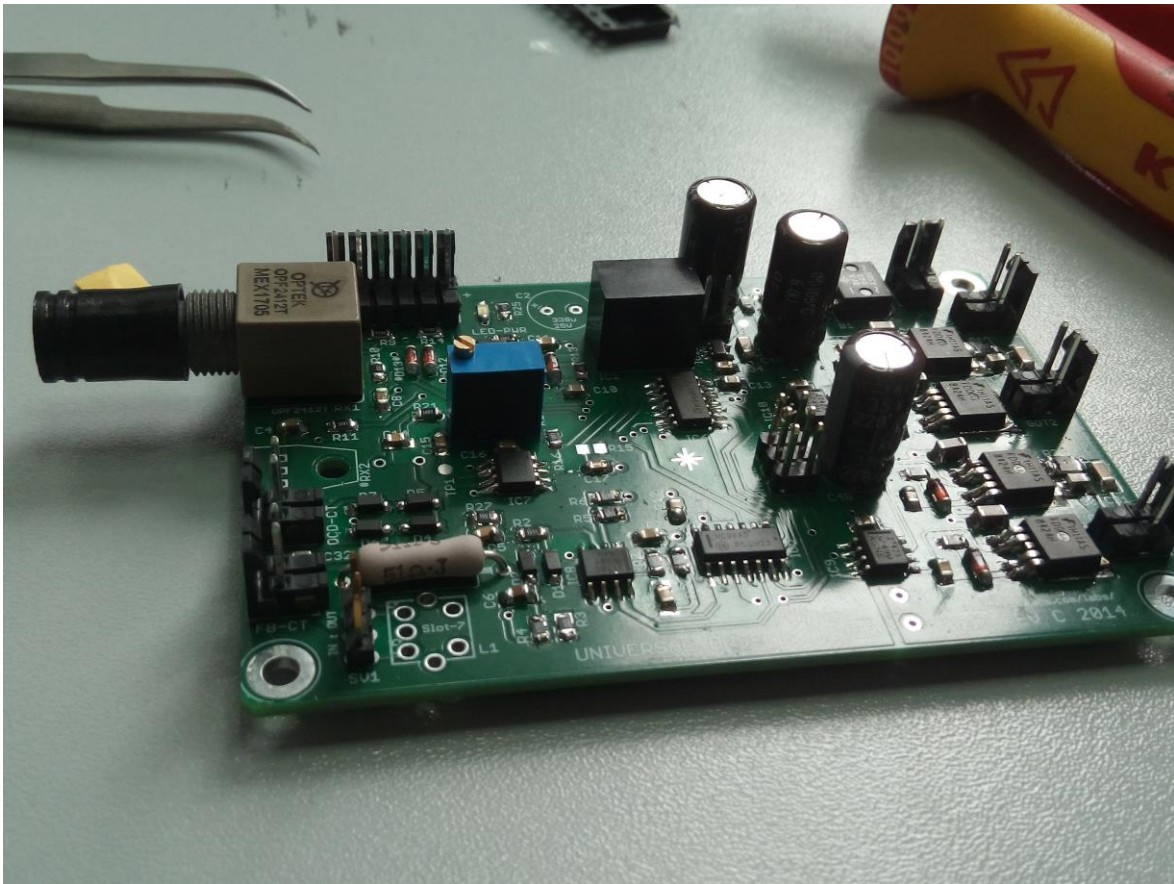
Příloha č. 1: Navíjení sekundární cívky



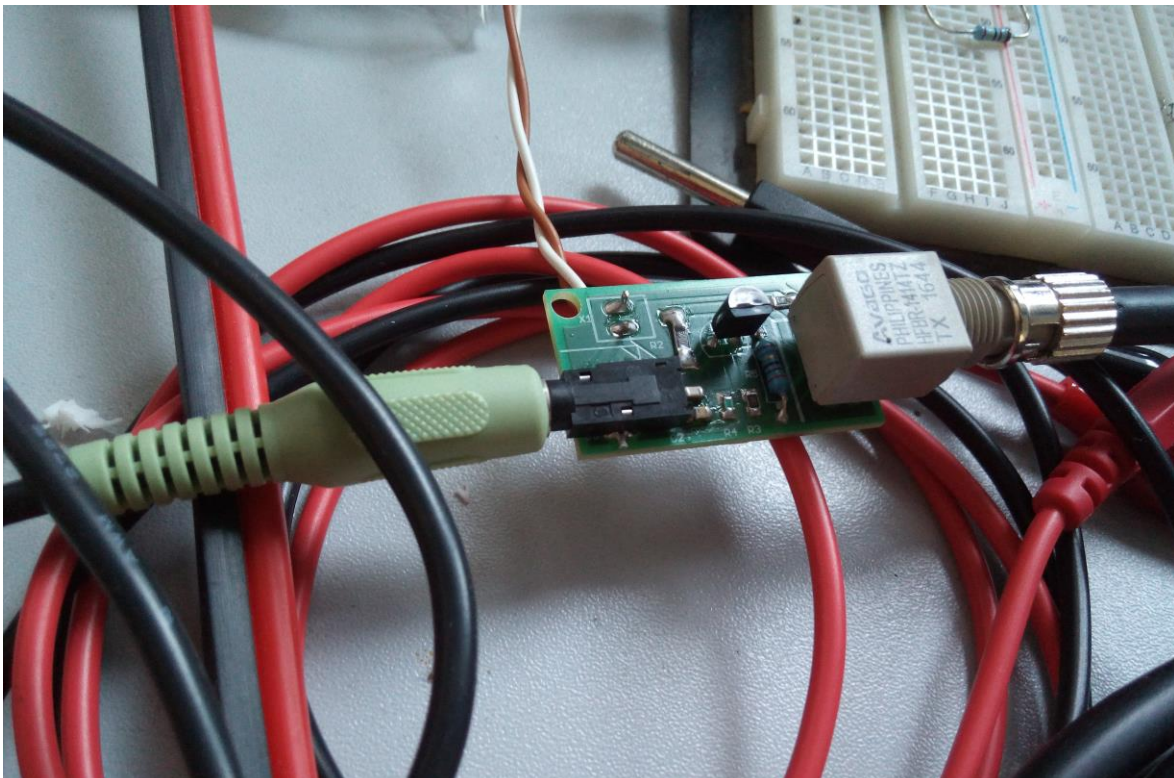
Příloha č. 2: Ohýbání primární cívky přes špalek stromu



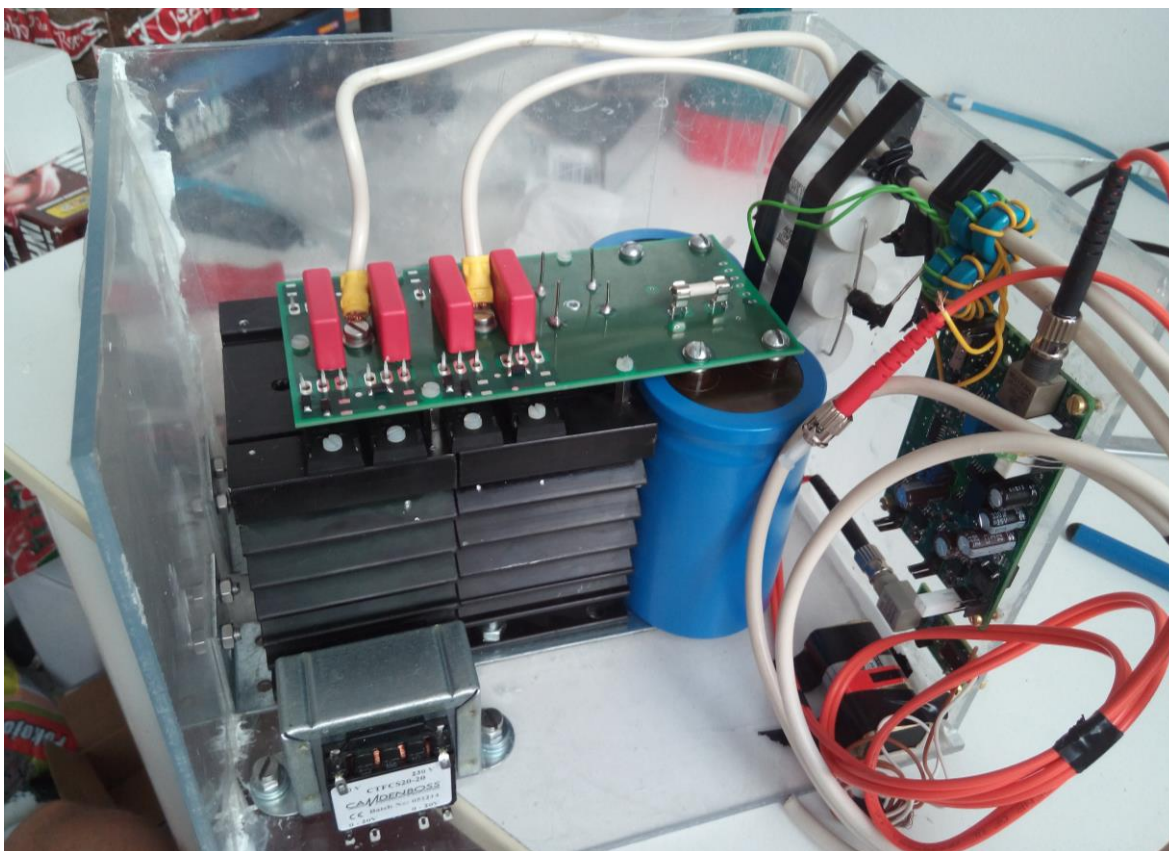
Příloha č. 4: Řídící část Teslova transformátoru



Příloha č. 3: Optický přerušovač. Na pravé straně vstup pro audio modulaci pomocí konektoru Jack.



Příloha č. 6: V dolní straně na pravé straně krabičky optický přerušovač a nad ním řídicí část. Na levé straně v zadní části pak silová část stroje, včetně chlazení a na pravé zadní



Příloha č. 5: Na obrázku je vidět spojení jednotlivých výstupů z feritového jádra na vstup gate SiC mosfetu a připojení vstupního napájení k usměrňovači.

