

**ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI
FAKULTA ELEKTROTECHNICKÁ**

**KATEDRA ELEKTROMECHANIKY
A VÝKONOVÉ ELEKTRONIKY**

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

Polovodičově buzený Teslův transformátor

ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI
Fakulta elektrotechnická
Akademický rok: 2014/2015

ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

(PROJEKTU, UMĚLECKÉHO DÍLA, UMĚLECKÉHO VÝKONU)

Jméno a příjmení: **Aleš STUPKA**
Osobní číslo: **E12B0237P**
Studijní program: **B2644 Aplikovaná elektrotechnika**
Studijní obor: **Aplikovaná elektrotechnika**
Název tématu: **Polovodičově buzený Teslův transformátor**
Zadávací katedra: **Katedra elektromechaniky a výkonové elektroniky**

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

1. Stučně popište princip Teslova transformátoru.
2. Navrhněte mechanickou konstrukci vlastního Teslova transformátoru a obvodové schéma měniče.
3. Realizujte polovodičově buzený Teslův transformátor a experimentálně ověřte jeho funkci.

Rozsah grafických prací: **podle doporučení vedoucího**

Rozsah pracovní zprávy: **20 - 30 stran**

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

Seznam odborné literatury:

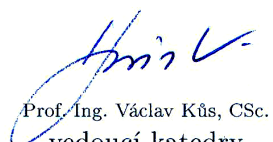
Student si vhodnou literaturu vyhledá v dostupných pramenech podle doporučení vedoucího práce.

Vedoucí bakalářské práce: **Ing. Luboš Streit, Ph.D.**
Regionální inovační centrum elektrotechniky

Datum zadání bakalářské práce: **15. října 2014**
Termín odevzdání bakalářské práce: **8. června 2015**


Doc. Ing. Jiří Hammerbauer, Ph.D.
děkan




Prof. Ing. Václav Kůs, CSc.
vedoucí katedry

V Plzni dne 15. října 2014

Anotace

Tato bakalářská práce se zabývá seznámením s principem, konkrétním návrhem a praktickým ověřením polovodičově buzeného vysokonapětového Teslova transformátoru s audio modulací. První část seznamuje s vynálezem toho zařízení, s principem zařízení a s vizí vynálezce o jeho budoucím využití. Druhá část se zabývá konkrétním návrhem obvodového schématu s několika možnostmi různých modulací, realizací smyčky fázového závěsu, konstrukčním provedením desek plošných spojů a návrhem mechanické konstrukce celého zařízení. Třetí část se zabývá oživením a experimentálním ověřením funkce tohoto zařízení s ukázkou oscilogramů u jednotlivých modulačních módů.

Klíčová slova

Teslův transformátor, řídicí obvod, fázový závěs, audio modulace, obvody pro dead time, stupňový spínač, audio předzesilovač, nízkofrekvenční detektor, přerušovač, modulace pila, proudová ochrana, výkonový tranzistorový měnič, výkonové budiče, deska plošných spojů, stabilizátor napětí, mechanická konstrukce, regulace ventilátoru, schéma zapojení, ověření funkce.

Abstract

This bachelor thesis deals with explanation the principle of concrete proposal and practical verification of a semiconductor excited high-voltage Tesla coil with audio modulation. The first part introduces the inventor of this device, the principle of device and inventor's vision about its future use. The second part deals with the design of circuit scheme with a several options of different modulation, implementation of phase-locked loop, design of printed circuit boards and mechanical structure design of the entire device. The third part deals with getting Tesla coil to work and experimental verification of functions of this device with the illustration of oscillograms for each modulation mode.

Key words

Tesla coil, circuit control, phase-locked loop, audio modulation, circuits for dead time, soft start, audio preamplifier, low-frequency detector, interrupter, saw modulation, overcurrent protection, power transistor inverter drivers, printed circuit board, voltage regulator, mechanical design, fan control, wiring scheme, function check.

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.

.....
podpis

V Plzni dne 26.4.2015

Aleš Stupka

Poděkování

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

0 Obsah

Obsah

OBSAH	9
1 ÚVOD	12
2 PRINCIP TESLOVA TRANSFORMÁTORU	13
2.1 NIKOLA TESLA A JEHO ŽIVOT	13
2.2 PRINCIP TESLOVA TRANSFORMÁTORU	14
2.3 VARIANTY TESLOVÝCH TRANSFORMÁTORŮ	15
2.3.1 SGTC – Spark Gap Tesla Coil	15
2.3.2 VTTC – Vakuum Tube Tesla Coil	16
2.3.3 OLTC – Off Line Tesla Coil	17
2.3.4 SSTC – Solid State Tesla Coil	17
2.3.5 ISSTC – Interrupted Solid State Tesla Coil	19
2.3.6 DRSSTC – Dual Resonant Solid State Tesla Coil	19
2.4 PLÁNOVANÉ VYUŽITÍ TESLOVÝCH TRANSFORMÁTORŮ	20
3 KONSTRUKCE TESLOVA TRANSFORMÁTORU	21
3.1 SEZNÁMENÍ S VLASTNÍM NÁVRHEM	21
3.2 ŘÍDICÍ OBVODY	22
3.2.1 Obvod řízení s fázovým závěsem	22
3.2.2 Obvod pro dead time	27
3.2.3 Budiče + budicí transformátor	28
3.2.4 Proudová ochrana	29
3.2.5 Proudové omezení	30
3.2.6 Audio předzesilovač	31
3.2.7 Modulační přerušovač	32
3.2.8 Nízkofrekvenční detektor	32
3.2.9 Obvod pro klávesy	33
3.2.10 Optický přerušovač	34
3.2.11 Modulační pila	35
3.2.12 Přepínač volby módů	36
3.3 POMOCNÉ OBVODY	38
3.3.1 Síťový filtr, stupňový spínač, usměrnění, filtrace	38
3.3.2 Pomocný transformátor, stabilizátory +15V, -15V, +12V	39
3.3.3 Start-Stop ovládání	41
3.3.4 Regulace ventilátorů	42
3.3.5 Ostatní pomocné obvody	43
3.4 VÝKONOVÁ ČÁST	44
3.4.1 Ochranné obvody buzení	44
3.4.2 Výkonový měnič	45
3.4.3 Zapojení Teslova transformátoru	46
3.5 MECHANICKÁ KONSTRUKCE	48
3.5.1 Zhotovení primární a sekundární cívky	48
3.5.2 Zhotovení kovové skříně zařízení	49
3.5.3 Zhotovení desek plošných spojů	51
4 OVĚŘENÍ FUNKCE TESLOVA TRANSFORMÁTORU	54
4.1 OŽIVENÍ ZAŘÍZENÍ	54
4.2 KONTROLNÍ MĚŘENÍ	56
4.2.1 Měření elektrických veličin	56
4.2.2 Měření neelektrických veličin	60
5 ZÁVĚR	62
6 POUŽITÁ LITERATURA	63

0	Obsah	
7	PŘÍLOHY	1
7.1	SCHÉMATA	1
7.2	FOTOGRAFIE.....	6
7.3	PŘÍLOHY V ELEKTRONICKÉ PODOBĚ.....	8

Seznam obrázků:

OBRÁZEK 1:	NIKOLA TESLA	13
OBRÁZEK 2:	OBEČNÉ SCHÉMA TESLOVA TRANSFORMÁTORU.....	14
OBRÁZEK 3:	OBEČNÉ SCHÉMA VTTC	16
OBRÁZEK 4:	OBEČNÉ SCHÉMA OLTC	17
OBRÁZEK 5:	OBEČNÉ SCHÉMA DVOJČINNÉHO POLOMŮSTKU A PLNÉHO MŮSTKU	18
OBRÁZEK 7:	BLOKOVÉ SCHÉMA ZAŘÍZENÍ.....	21
OBRÁZEK 8:	BLOKOVÉ SCHÉMA FÁZOVÉHO ZÁVĚSU	22
OBRÁZEK 9:	VNITŘNÍ STRUKTURA OBVODU CD4046B	23
OBRÁZEK 10:	UZAMČENÍ SMYČKY FÁZOVÉHO ZÁVĚSU PRO STŘEDNÍ FREKVENCI	24
OBRÁZEK 11:	ZÁVISLOST ZMĚNY FÁZE NA VÝSTUPNÍM NAPĚTÍ LPF	24
OBRÁZEK 12:	OBVOD ŘÍZENÍ S FÁZOVÝM ZÁVĚSEM	25
OBRÁZEK 13:	OBVOD PRO DEAD TIME	27
OBRÁZEK 14:	BUDIČE + BUDICÍ TRANSFORMÁTOR	28
OBRÁZEK 15:	BUDICÍ TRANSFORMÁTOR.....	29
OBRÁZEK 16:	PROUDOVÁ OCHRANA	29
OBRÁZEK 17:	PROUDOVÉ OMEZENÍ	30
OBRÁZEK 18:	AUDIO PŘEDZESILOVAČ.....	31
OBRÁZEK 19:	MODULACE PŘERUŠOVAČ	32
OBRÁZEK 20:	NÍZKOFREKVENČNÍ DETEKTOR.....	32
OBRÁZEK 21:	OBVOD PRO KLÁVESY	33
OBRÁZEK 22:	OPTICKÝ PŘERUŠOVAČ.....	34
OBRÁZEK 23:	MODULACE PILA	35
OBRÁZEK 24:	PŘEPÍNAČ VOLBY MÓDŮ	36
OBRÁZEK 25:	SÍŤOVÝ FILTR, STUPŇOVÝ SPÍNAČ, USMĚRNĚNÍ, FILTRACE	38
OBRÁZEK 26:	POMOCNÝ TRANSFORMÁTOR.....	39
OBRÁZEK 27:	STABILIZÁTOR +15V	39
OBRÁZEK 28:	STABILIZÁTOR -15V.....	40
OBRÁZEK 29:	STABILIZÁTOR +12V.....	40
OBRÁZEK 30:	START-STOP OVLÁDÁNÍ	41
OBRÁZEK 31:	REGULACE VENTILÁTORŮ	42
OBRÁZEK 32:	OSTATNÍ POMOCNÉ OBVODY	43
OBRÁZEK 33:	OCHRANNÉ OBVODY BUZENÍ.....	44
OBRÁZEK 34:	VÝKONOVÝ MĚNIČ	45
OBRÁZEK 35:	ZAPOJENÍ TESLOVA TRANSFORMÁTORU.....	46
OBRÁZEK 36:	NÁKRES PRIMÁRNÍ A SEKUNDÁRNÍ CÍVKY	48
OBRÁZEK 37:	NÁKRES ZÁKLADNÍ KONSTRUKCE	49
OBRÁZEK 38:	NÁKRES PŘEDNÍHO PANELU	49
OBRÁZEK 39:	NÁKRES KONSTRUKCE ŘÍZENÍ	50
OBRÁZEK 40:	NÁKRES CELÉ KONSTRUKCE	51
OBRÁZEK 41:	NÁKRES VÝKONOVÉHO MĚNIČE	51
OBRÁZEK 42:	NÁKRES DESKY PLOŠNÉHO SPOJE ŘÍDICÍ ELEKTRONIKY	52
OBRÁZEK 43:	NÁKRES DESKY PLOŠNÉHO SPOJE POMOCNÝCH OBVODŮ.....	52
OBRÁZEK 44:	FOTOGRAFIE PRAKTICKÉ REALIZACE TESLOVA TRANSFORMÁTORU V CHODU (CW REŽIM).....	54
OBRÁZEK 45:	ZKUŠEBNÍ TESLŮV TRANSFORMÁTOR	54
OBRÁZEK 46:	ROZLADĚNÝ STAV S MAXIMÁLNÍ FREKVENCÍ V CW REŽIMU, MAJORITNÍ INDUKTIVNÍ ZÁTĚŽ	56
OBRÁZEK 47:	NALADĚNÝ STAV BEZ FÁZOVÉHO ZÁVĚSU PŘI MAXIMÁLNÍM PROUDU V CW REŽIMU	56
OBRÁZEK 48:	UKÁZKA MODULACE NF AUDIOSIGNÁLEM V CW REŽIMU PŘI MAXIMÁLNÍM PROUDU	57
OBRÁZEK 49:	MÓD OBDĚLNÍKOVÉHO PŘERUŠOVAČE S VYBAVENÍM NADPROUDOVÉ OCHRANY.....	57
OBRÁZEK 50:	DETAILNÍ PŘÍBLÍŽENÍ PŘI ZAPNUTÍ OBDĚLNÍKOVÉHO PŘERUŠOVAČE	58

1 Úvod

OBRÁZEK 51: DETAILNÍ PŘÍBLÍŽENÍ PŘI VYPNUTÍ OBDÉLNÍKOVÉHO PŘERUŠOVAČE	58
OBRÁZEK 52: VYPNUTÍ V MÓDU OBDÉLNÍKOVÉHO PŘERUŠOVAČE VYBAVENÍM NADPROUDOVÉ OCHRANY	59
OBRÁZEK 53: MODULACE PILOVITÝM SIGNÁLEM.....	59
OBRÁZEK 54: SNÍMEK TESLOVA TRANSFORMÁTORU ZAZNAMENÁN TERMOKAMEROU	60
OBRÁZEK 55: SNÍMEK KOVOVÉ SKŘÍNĚ ZAZNAMENÁN TERMOKAMEROU + SKUTEČNÁ FOTOGRAFIE	61
OBRÁZEK 56: SCHÉMA VÝKONOVÉHO MĚNIČE S TVAROVACÍMI OVBODY.....	1
OBRÁZEK 57: SCHÉMA ŘÍDICÍHO OVBODU, OVBODŮ PRO DEAD TIME, BUDÍČŮ, PLL, PROUDOVÉ OCHRANY	2
OBRÁZEK 58: SCHÉMA START-STOP OVLÁDÁNÍ, REGULACE VENTILÁTORŮ, NF DETEKTORU, STABILIZÁTORU	3
OBRÁZEK 59: SCHÉMA PŘEDZESILOVAČE, OVBODŮ PRO KLÁVESY, PŘERUŠOVAČE, GEN. PILY, PROUD. OMEZENÍ	4
OBRÁZEK 60: SCHÉMA SÍŤOVÉ ČÁSTI, TESLOVA TRANSFORMÁTORU A POMOCNÝCH OVBODŮ	5
OBRÁZEK 61: FOTOGRAFIE CELÉHO ZAŘÍZENÍ	6
OBRÁZEK 62: FOTOGRAFIE KOVOVÉ SKŘÍNĚ S OVLÁDACÍMI PRVKY	6
OBRÁZEK 63: FOTOGRAFIE S DETAILEM ŘÍDICÍ ELEKTRONIKY	6
OBRÁZEK 64: FOTOGRAFIE VÝKONOVÉHO MĚNIČE (STRANA TOP) BEZ CHLADIČE	7
OBRÁZEK 65: FOTOGRAFIE VÝKONOVÉHO MĚNIČE (STRANA BOTTOM) BEZ BLOK. KONDENZÁTORŮ	7
OBRÁZEK 66: FOTOGRAFIE VÝBOJŮ PŘI RŮZNÝCH MODULACÍCH PŘI DÉLCE VÝBOJŮ AŽ 40CM	7

1 Úvod

Tato bakalářská práce vznikla jako závěrečná práce na Fakultě elektrotechnické Západočeské univerzity v Plzni. Práce je rozdělena na 3 hlavní části:

- Princip Teslova transformátoru
- Návrh obvodového schématu a mechanické konstrukce Teslova transformátoru
- Realizace polovodičově buzeného Teslova transformátoru a experimentální ověření jeho funkce.

První část stručně pojednává o autorovi tohoto vynálezu – Nikolu Teslovi, o základním principu funkce, o možnostech různých realizací z hlediska druhu spínacích prvků, topologií a také stručně o Teslovo plánovaném využití popisovaného zařízení.

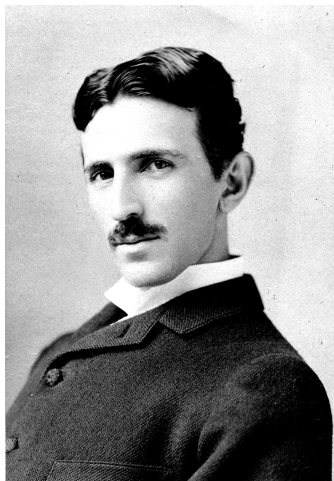
Druhá část se zabývá konkrétním návrhem polovodičově buzeného Teslova transformátoru s audio modulací, s modulací pily a s obdélníkovým přerušovačem. Nejprve popisuje řídicí obvody, princip fázového závěsu, obvody pro dead time, budiče, oddělovací budičí transformátor, proudovou ochranu a proudové omezení, audio předzesilovač, obdélníkový přerušovač, nízkofrekvenční detektor, obvod pro připojení kláves do audio vstupu, optický přerušovač, modulaci pilovitým signálem, síťový filtr, stupňový spínač, pomocné obvody pro stabilizaci napětí, regulaci ventilátorů, Start-Stop ovládání, vlastní výkonový měnič s ochrannými obvody. Obsahuje také návrh a nákres mechanické konstrukce, zhotovení potřebných desek plošných spojů a nákres primární a sekundární cívky Teslova transformátoru.

Třetí část se zabývá praktickým ověřením funkce zařízení, obsahuje snímky z osciloskopu s jejich podrobnějším popisem a naměřené hodnoty elektrických i neelektrických veličin.

V příložené příloze jsou fotografie celé konstrukce, fotografie výbojů při různých modulacích a kopie uceleného schématu všech obvodů z návrhové části této bakalářské práce. K elektronické verzi na CD-ROM je přiložen 3D model celé konstrukce, fotografie ve vysokém rozlišení a také krátké video ukázky výbojů při různých modulacích.

2 Princip Teslova transformátoru

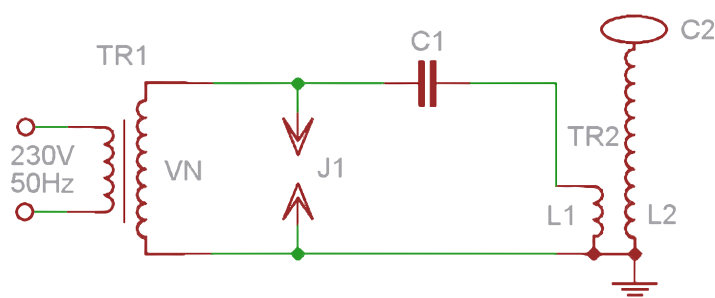
2.1 Nikola Tesla a jeho život



Obrázek 1: Nikola Tesla [1]

Nikola Tesla se narodil 9. července 1856 v rodině srbských rodičů nedaleko města Gospić na území dnešního Chorvatska. V mládí absolvoval nejprve tzv. Normální školu, poté reálné gymnázium a vyšší reálné gymnázium ve městě Karlovac. Po úspěšném absolvování se rozhodl studovat matematiku a fyziku na polytechnické univerzitě ve Štýrském Hradci. Zde se při hodině fyziky nepohodl se svým profesorem, když zpochybňoval efektivnost stejnosměrného komutátorového dynama. Tvrdil, že se v něm až příliš velká část energie vyzařuje do okolí vlivem jiskření v komutátoru. Považoval tento systém za překonaný a byl přesvědčen, že existuje efektivnější řešení. Za toto novátorské myšlení byl vyloučen. Zabýval se elektřinou a především střídavým elektrickým proudem. Dále také studoval filozofii na univerzitě v Praze. Po studiích pracoval v telegrafní společnosti v Budapešti. Poté pracoval v Německu, ve Francii a v roce 1884 se přestěhoval do Spojených států amerických, kde o sedm let později získal americké občanství. V roce 1884 pracoval pro vynálezce Thomase Alvu Edisona, jemuž úspěšně navýšil účinnost jeho stejnosměrných dynam až o 30%. Místo slíbené odměny se Edison Teslovi „vysmál“ a ten od něj odešel. Poté se Tesla mimo jiné zabýval zdokonalením obloukové lampy na střídavý proud, předváděl dynama, vlastní transformátory a asynchronní motory na střídavý proud. Zabýval se též možnostmi přenosu střídavého proudu. O jeho vynálezy projevil zájem americký inženýr a vynálezce George Westinghouse, který od Tesly koupil jeho patenty. V roce 1891 předvedl Tesla svůj Teslův transformátor, při němž demonstroval bezdrátový přenos energie za pomoci rozsvícení fluorescenčních trubíc, a prezentoval svou úvahu o využití bezdrátové energie v celé zemi. Podílel se také na stavbě velké vodní elektrárny na řece Niagaře. V roce 1900 nechal postavit svou laboratoř se svým největším transformátorem, tzv. Wardenclyffe Tower. Při jednom experimentu ovšem došlo k přetížení generátorů v nedaleké elektrárně a jejich vzplanutí. Tesla nezávisle na Roentgenovi objevil také paprsky X, předváděl dálkově ovládaný model lodi, stál za první realizací bezdrátového přenosu signálu a za dalšími objevy. Vlivem nedostatku financí se Tesla ke konci života stáhl do ústraní a své objevy realizoval převážně jen po teoretické stránce. Zemřel 7. ledna 1943 v pokoji hotelu New Yorker. [1],[2]

2 Princip Teslova transformátoru

2.2 Princip Teslova transformátoru**Obrázek 2: Obecné schéma Teslova transformátoru**

Základní schéma Teslova transformátoru uvedené na obrázku 2 se skládá ze zvyšujícího síťového transformátoru s feromagnetickým jádrem TR1, jiskřiště J1, kondenzátoru C1 a z laděného vzduchového vysokofrekvenčního transformátoru TR2, jehož sekundární vinutí je uzemněno.

Síťové napětí je transformováno pomocí vysokonapěťového transformátoru TR1 s velkým rozptylem, díky němuž se transformátor „chová“ jako střídavý zdroj proudu. Po zapnutí narůstá proud kondenzátorem C1 a primárním vinutím Teslova transformátoru L1. Dochází k nabíjení kondenzátoru C1, po překonání zápalného napětí na jiskřišti J1 dojde na jiskřišti k zapálení oblouku a k vytvoření tlumeného paralelního kmitavého obvodu tvořeného prvky C1 a L1, kmitajícího na frekvenci $f_1 = 1/(2\pi(C_1 * L_1)^{1/2})$. Jiskřiště zde plní funkci vysokonapěťového spínače. Vysokofrekvenční kmitý se transformují vzduchovou vazbou také do sekundárního vinutí Teslova transformátoru. Ten je naladěn na shodnou frekvenci jako primární vinutí, platí tedy vztah $f_2 = 1/(2\pi(C_2 * L_2)^{1/2})$ a zároveň platí $f_1 = f_2$. Po vybití kondenzátoru C1 a zaniknutí výboje v jiskřišti J1 dochází opět k cyklickému nabíjení kondenzátoru C1 a celý děj se opakuje. Podmínkou správné činnosti je nabití kondenzátoru C1 za dobu kratší, než je jedna půlperioda síťového kmitočtu.

Výstupní napětí transformátoru TR1 dosahuje řádově jednotek až desítek tisíc voltů. Jiskřiště bývá nejčastěji zhotoveno pomocí 2 kulových elektrod, 2 elektrod ve tvaru trubek, či pomocí regulovatelného rotačního mechanismu. Kondenzátor C1 musí být dimenzován na vrcholovou hodnotu napětí tlumených kmitů a též na hodnotu protékajícího proudu. Primární vinutí Teslova transformátoru tvoří menší počet závitů a je realizováno vzduchovou cívku s dostatečným průřezem vinutí pro minimalizaci vodivostních ztrát. Vlastní cívka bývá nejčastěji ve tvaru solenoidu, kónusu, či rovinná. Cívka ve tvaru solenoidu je vhodná

2 Princip Teslova transformátoru

pro potřeby vyšší magnetické vazby mezi primárním a sekundárním vinutím. Své uplatnění najde například u polovodičových a elektronkových Teslových transformátorů, případně i u audio modulovaných. Kónické a rovinné primární cívky jsou typické svou nižší vzájemnou magnetickou vazbou mezi primárním a sekundárním vinutím a jsou vhodné pro jiskřišťové Teslovy transformátory. Jejich další výhodou je větší vzdálenost mezi primárním a sekundárním vinutím, a tak lepší izolační vzdálenost před nežádoucími napěťovými přeskoky. Sekundární vinutí je vinuto velkým počtem závitů izolovaného vodiče těsně vedle sebe na solenoidovém jádře. Jako konstrukční materiál pro kostru, na kterém je navinuto sekundární vinutí, se často používá materiál s vynikajícími dielektrickými vlastnostmi – např. trubky z polypropylenu, pro lepší tepelnou odolnost z polyvinylchloridu (ten má ovšem vyšší dielektrické ztráty), případně pro nejlepší odvod ztrátového tepla a mnohem vyšší tepelnou odolnost z keramiky či porcelánu. [3]

2.3 Varianty Teslových transformátorů

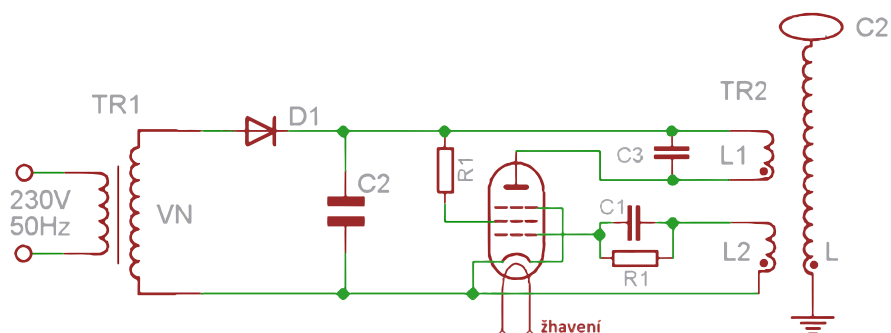
2.3.1 SGTC – Spark Gap Tesla Coil

Zkratkou SGTC se označuje původní Teslova varianta jeho transformátoru s jiskřištěm popsána v kapitole 2.2. Tesla byl v době svých experimentů odkázán výhradně na tuto variantu, neboť v té době nebyly k dispozici dostatečně výkonové elektronkové či tranzistorové vysokonapěťové vysokofrekvenční spínače. Obecnou výhodou těchto jiskřišťových zdrojů je jednoduché dosažení největších možných výkonů Teslových transformátorů. Velkou nevýhodou těchto zdrojů je značné vysokofrekvenční širokopásmové rušení vyzařované především z jejich jiskřišť.

Jak již bylo zmíněno v kapitole 2.2, vlastní jiskřiště mohou být zhotovena několika možnými způsoby. U jiskřiště tvořeného pomocí dvou kulových elektrod lze řídit zápalné napětí vzájemnou vzdáleností elektrod a jejich průměrem. Pro vyšší výkony je vhodnější jiskřiště tvořené pomocí několika vedle sebe řazených trubek. Vzniklý elektrický výboj se poté rozdělí na několik částí, tím je umožněno lepší chlazení a odvod uvolněného tepla. Patrně nejvhodnější variantou je použití rotačního mechanismu, u kterého se navzájem natáčí pár pevných kontaktů a pár kontaktů umístěných na rotačním disku. Otočné kontakty jsou poháněny elektromotorem, který zároveň umožňuje řídit rychlost otáčení a tím i možnost nastavení zápalného napětí. Díky rotaci dochází také ke snížení intenzity ionizovaného vzduchu, protože nedochází k dlouhému tažení elektrického výboje. [3]

2 Princip Teslova transformátoru

2.3.2 VTTC – Vakuum Tube Tesla Coil



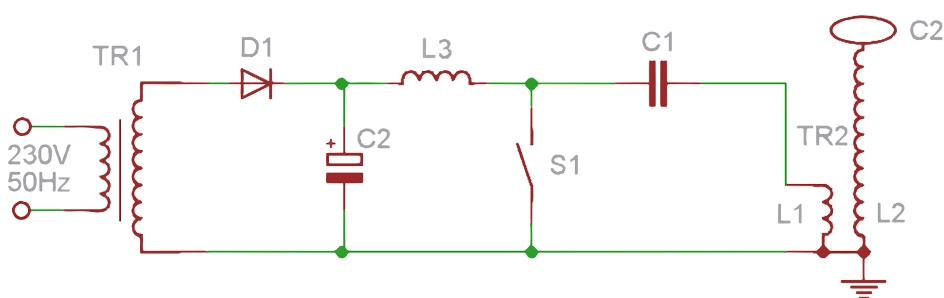
Obrázek 3: Obecné schéma VTTC

Zkratkou VTTC se označují Teslovy transformátory s výkonovou elektronikou ve zpětné vazbě jako výkonovým spínačem. Obvykle se používají triody, tetrody či pentody. Na anodu výkonové elektronky je připojen paralelní LC obvod tvořen primárním vinutím L1 s připojenou paralelní rezonanční kapacitou C3.

Na obrázku 3 je znázorněno schéma s výkonovou pentodou, tedy elektronkou, která vznikla postupným vývojem z triody a tetrody, mající celkem 5 mřížek + žhavicí vinutí. První mřížka, na kterou je připojen paralelní R1C1 obvod, je řídicí. Druhá mřížka, která je připojena na zdroj kladného napětí (zde přímo napájecího), se označuje jako stínící. Třetí mřížka má za úkol bránit zpětné emisi elektronů z anodové elektrody na stínící mřížku. V tomto zapojení je spojena se záporným potenciálem – tedy katodou. Pomocí tohoto zápornému potenciálu odpuzuje elektrony pohybující se nízkou rychlostí, které jsou zpětně emitovány z anody.

Síťové napětí je transformováno pomocí zvyšujícího síťového transformátoru TR1 na napětí jednotek tisíc voltů a usměrněno diodou D1. Kondenzátor C2 zde slouží jako odrušovací, nikoliv vyhlazující toto usměrněné napětí po celou půlperiodu. Za diodou je tedy kladné pulzující napětí o frekvenci 50 Hz. Ze žhavicího vinutí elektronky vyletují elektrony. Díky rozdílnému potenciálu mezi katodou a anodou dopadají na anodu, a tak umožňují vznik anodového proudu. Proud teče rezonančním obvodem tvořeným L1C3 a dochází k tlumeným kmitům o frekvenci dané Thomsonovým vztahem. Část energie je převáděna na sekundární vinutí a zároveň na vinutí zpětnovazební. Kladné naindukované napětí na vinutí L2 prochází filtrem R1C1 do řídicí mřížky výkonové elektronky. Vzniklý kladný potenciál na řídicí mřížce způsobí obtížnější přechod elektronů k anodě tím snížení anodového proudu. Poté se celý děj opakuje. [4]

2 Princip Teslova transformátoru

2.3.3 OLTC – Off Line Tesla Coil

Obrázek 4: Obecné schéma OLTC

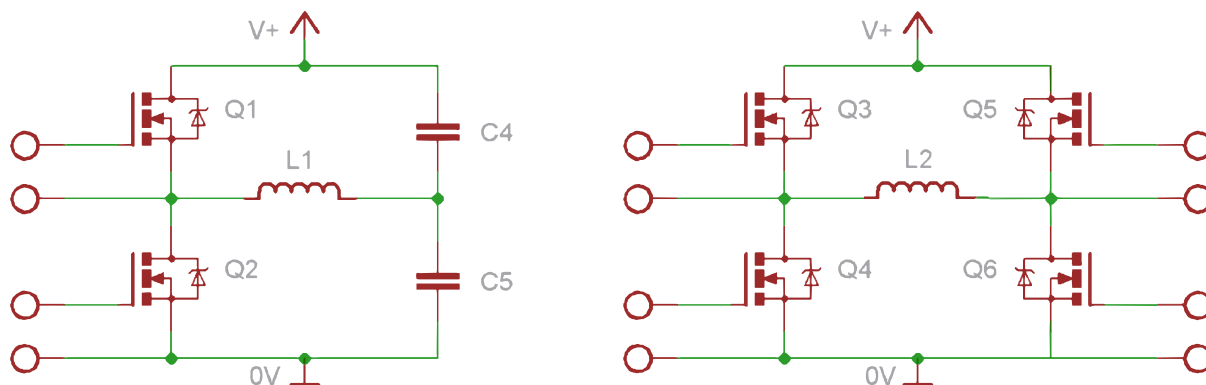
Zkratkou OLTC se označuje Teslův transformátor obdobný SGTC, kde jiskřiště je nahrazeno vysokonapětovým spínačem s cizím buzením, který je sepnut po celou dobu tlumeného kmitavého obvodu. Principiální schéma bez přepětových ochrany je uvedeno na obrázku 4. Jako spínač S1 se dříve používaly především elektronkové deuteriové thyatrony. V dnešní době se nahrazují vysokonapětovými polovodičovými spínači, především IGBT tranzistory. V případě použití polovodičových spínačů se síťové napětí pomocí transformátoru TR1 již příliš nezvyšuje (s ohledem na maximální dovolené napětí použitých spínačů). Střídavé napětí ze sítě je usměrněno diodou D1 (nebo dvoucestným usměrňovačem) a vyhlazeno kondenzátorem C2. Tlumivka L3 zde plní funkci omezovače proudu (analogie s rozptylovým transformátorem TR1 u SGTC). Proud teče tlumivkou L3, kondenzátorem C1 a vinutím L1. Ve vhodný okamžik dojde k vnějšímu sepnutí spínacího prvku S1 a vzniknou tak tlumené kmity (obdobně jako u SGTC), které se přenášejí do sekundárního vinutí. Po zániku kmitů se rozeprve spínací prvek S1 a celý děj je možno opakovat. [3]

2.3.4 SSTC – Solid State Tesla Coil

Zkratkou SSTC se označuje polovodičově buzený Teslův transformátor. Použití polovodičů obecně usnadňuje konstruktérovi ladění rezonanční frekvence, ovšem za cenu značné obvodové složitosti. S použitím polovodičů se nabízejí 2 varianty buzení. Jednak vlastní buzení ze zpětnovazebního vinutí (flyback) nebo cizí buzení, kdy jsou spínací tranzistory řízeny vnějším zdrojem. Obvod se vždy napájí ze stejnosměrného zdroje napětí (z akumulátorových zdrojů, stejnosměrných generátorů, případně usměrněné sítě či řízené usměrněné sítě).

2 Princip Teslova transformátoru

U cizího buzení se nabízejí možnosti použití jednočinného nebo dvojčinného měniče. Jednočinné měniče jsou vhodné pro malé výkony (do 100W). Jsou obvodově jednodušší, nicméně jejich spínací prvek je namáhán napětím až několikanásobně převyšujícím napájecí. Dvojčinné měniče jsou realizovány zpravidla polovičními či plnými můstkovými měniči. Pro poloviční můstek jsou zapotřebí 2 střídavě spínající tranzistory s nulovými diodami a kapacitní dělič. Plný můstek tvoří čtveřice výkonových tranzistorů s jejich nulovými diodami. Schéma měničů je zobrazeno na obrázku 5.



Obrázek 5: Obecné schéma dvojčinného polomůstku (vlevo) a plného můstku (vpravo)

Při rychlém střídavém přepínání tranzistorů je nutné počítat s nenulovým časem potřebným k bezpečnému rozepnutí jednoho tranzistoru před tím, než sepne druhý v protější větvi. Pokud by toto nebylo zajištěno a byly by sepnuty současně oba tranzistory, došlo by ke zkratu na napájecích svorkách měniče. Proto musí být řídicí obvody pro řízení tranzistorů v polovičním i plném můstku vybaveny obvody pro zajištění tzv. „mrtvých časů“, neboli obvody pro dead time. U polovičního můstku kondenzátory C4 a C5 tvoří kapacitní dělič, u něhož platí, že mezi kondenzátory je napětí rovno polovině napájecího $V+$. Při střídavém spínání tranzistorů Q1 a Q2 je na výstup přepínáno napětí $\pm \frac{1}{2} V+$. U plného můstku jsou vždy sepnuty současně tranzistory Q3+Q6 a po jejich rozepnutí tranzistory Q4+Q6. Výstupní napětí je rovno $\pm V+$. Cívky L1 a L2 představují primární vinutí Teslova transformátoru. Střída sepnutí jednotlivých tranzistorů může být v rozsahu prakticky od nuly až do středy blízké se k 50 %. Pro přenos největšího výkonu u SSTC se používá právě nejvyšší možná střída. U SSTC se zpravidla uvádí do rezonance pouze sekundární vinutí, primární vinutí se napájí přímo z polovodičového měniče, který spíná frekvencí shodnou s rezonanční frekvencí sekundárního vinutí. [3]

2 Princip Teslova transformátoru

2.3.5 ISSTC – Interrupted Solid State Tesla Coil

Tento typ rovněž tranzistorového Teslova transformátoru je pouze formálním doplňkem k SSTC. Princip je naprosto shodný, pouze se nevyužívá střída blížící se k 50 %, ale naopak střída spínání v řádu jednotek procent. Tím jsou generovány velice úzké výboje ze sekundární cívky, srovnatelně dlouhé jako u střída téměř 50 %, nicméně střední výkon odebíraný ze zdroje je tolikrát nižší, kolikrát je nižší střída spínání. Polovodičové prvky jsou méně tepelně namáhané, ovšem vždy musí být dimenzovány na špičkový proud z měniče. [3]

2.3.6 DRSSTC – Dual Resonant Solid State Tesla Coil

Zkratkou DRSSTC se označuje polovodičově buzený Teslův transformátor, jenž má do rezonance laděné jak primární, tak i sekundární vinutí. Výhoda tohoto zapojení spočívá v tom, že díky sériové rezonanci se dostává na primární cívku Teslova transformátoru vyšší napětí a tím lze dosahovat také většího výkonu. Rezonanční kondenzátor musí být ovšem dimenzován na velké proudové namáhání a na rychlé změny du/dt . Impedance celého obvodu se také výrazně sníží. V praxi se často tento Teslův transformátor používá s přerušovačem, který sníží střední výkon odebíraný ze zdroje. [3]

2 Princip Teslova transformátoru

2.4 Plánované využití Teslových transformátorů

Obrázek 6: Teslovo Wardencliff Tower [1]

Nikola Tesla věřil, že musí existovat způsob, jak bezdrátově rozvádět střídavou elektrickou energii o určité frekvenci po celé zeměkouli pomocí velkého počtu VF vysílačů. Celá jeho myšlenka byla spojena s velkým množstvím technických problémů. Především velké energetické náročnosti jednotlivých vysílačů. Tento problém chtěl Tesla vyřešit vybudováním elektráren podél velkých říčních toků a v jejich blízkosti vybudováním obrovských vysílačů elektrické energie.

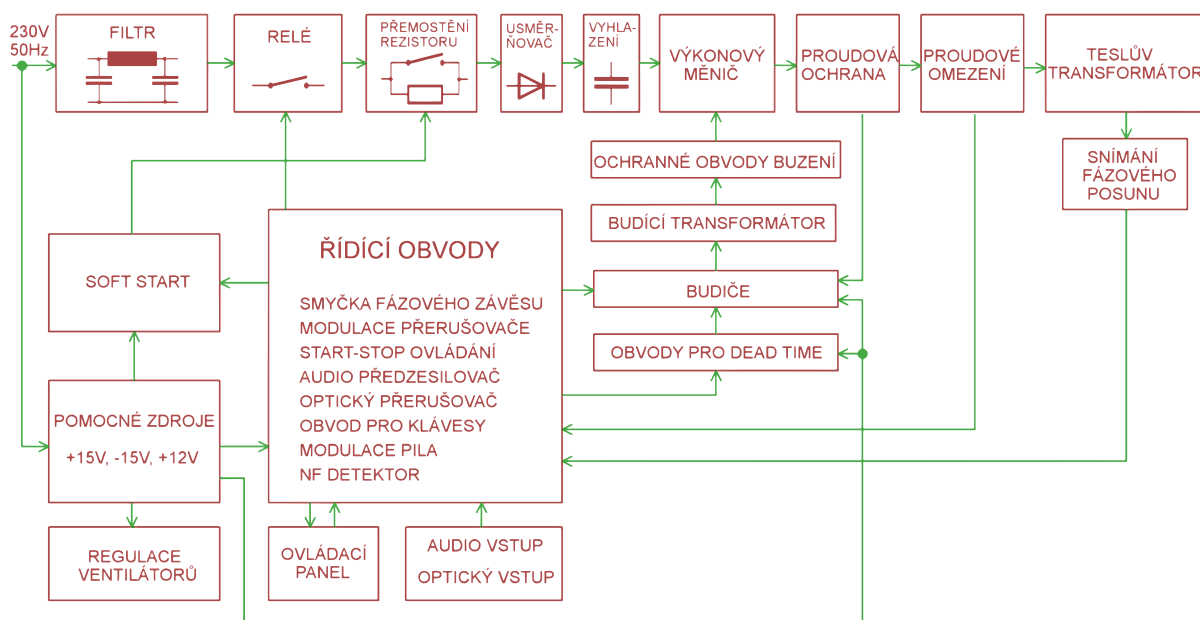
V roce 1900 poskytl investor J. P. Morgan Teslovi částku 150 000 \$ a Tesla začal se stavbou experimentálního zařízení nazvaného Wardencliff Tower vyobrazeného na obrázku 6. Jednalo se o laboratoř společně s vodní elektrárnou, která napájela 57 metrů vysoký vysílač – Teslův transformátor. Vlastní věž měla osmibokou základnu, polokoule na vrchu věže měla průměr 20 metrů. Pod věží byly do země umístěny kovové tyče až do hloubky 36 metrů. Pomocí nich se energie měla přenášet hluboko pod zem a odtud se šířit do svého okolí. Tesla uskutečnil několik svých pokusů, nicméně po žádosti o další finanční prostředky na stavbu silnějšího zařízení se obchodník Morgan rozhodl pro financování Teslova konkurenta Barchese Guglielmo Marconioho. Později byla Teslova laboratoř zničena. Tesla chtěl pomocí těchto vysílačů rozvádět elektřinu pod zemí do statisíců domácností, případně do budoucna posílat bezdrátově i hudbu, radiové přenosy a fotografie. Jeho myšlenky byly nadčasové a v té době technologicky prakticky nemožné. Ukázalo se také, že efektivita jeho vlastních vysílačů nebyla tak vysoká, jaké byly Teslovy vize.

Ve 30. letech 20. století oznámil Tesla koncept nové převratné zbraně založené pravděpodobně na zkušenostech s objevem Teslova transformátoru – tzv. paprsků smrti. Mělo se jednat o vysílače, které měli vystřelovat soustředěné svazky určitých nabitých částic, není však zcela jasné, o jaké částice se mělo jednat. Svou myšlenku se snažil prodat všem mocnostem, které tehdy stály proti nacistickému Německu, ale nikdo o Teslovy plány neprojevil zájem. Po Teslovo smrti se o jeho dokumenty začala zabývat FBI. [1], [2]

3 Konstrukce Teslova transformátoru

3.1 Seznámení s vlastním návrhem

Pro praktický návrh polovodičově buzeného Teslova transformátoru dle zadání bakalářské práce byla zvolena varianta pouze s rezonujícím sekundárním vinutím – tedy SSTC (Solid State Tesla Coil) - doplněná o různé modulační módy, obdélníkový přerušovač, modulaci pilovitým signálem, včetně spojitě i nespojitě audio modulace. Při nespojitě přerušované modulaci může být tento Teslův transformátor označován také jako ISSTC (Interrupted Solid State Tesla Coil). Před vlastním detailním popisem jednotlivých řídicích obvodů a prvků, je na obrázku 7 uvedeno blokové schéma celého zařízení.



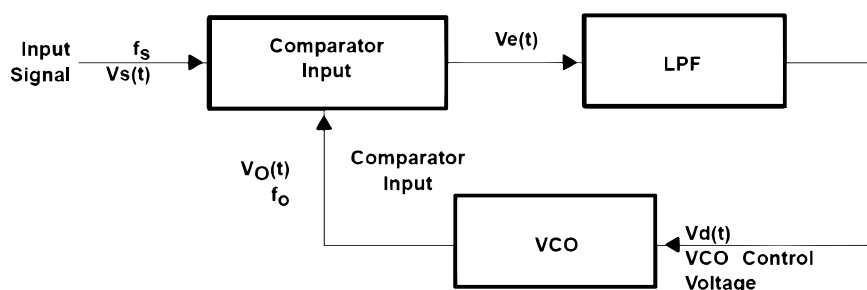
Obrázek 7: Blokové schéma zařízení

Celé zařízení je napájeno z jednofázové sítě o efektivní hodnotě napětí 230V. Z té je napájen malý síťový transformátor pro napájení všech pomocných zdrojů, a také vlastní výkonový můstkový měnič. Napětí silové části je vedeno přes síťový filtr, relé, soft start, diodový můstkový usměrňovač a vyhlazovací kondenzátor na výkonový můstkový měnič. Z měniče dále přes transformátory proudové ochrany a proudového omezení do primární cívky Teslova transformátoru. Napětí pomocných zdrojů +15V, -15V a +12V je rozvedeno do všech potřebných řídicích obvodů. Všechny bloky uvedené v blokovém schématu na obrázku 7 jsou podrobně popsány v kapitole 3.

3.2 Řídicí obvody

3.2.1 Obvod řízení s fázovým závěsem

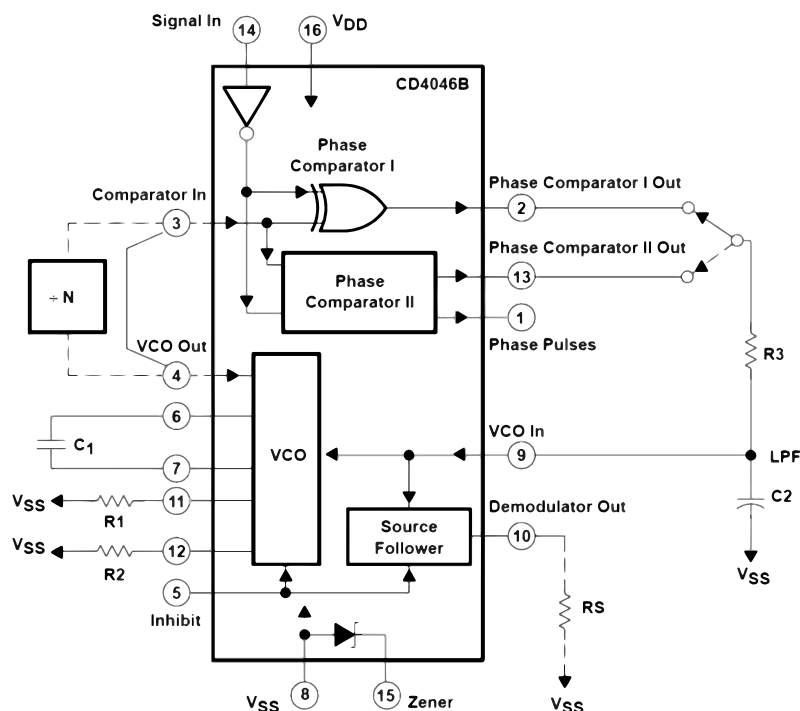
Srdcem celého zařízení je integrovaný obvod CD4046B. Tento obvod obsahuje vlastní oscilační obvod i obvod fázového závěsu. Pokud je sekundární vinutí Teslova transformátoru buzeno na frekvenci shodné s jeho rezonanční, dochází k přenosu největšího činného výkonu a korona srší samovolně z částí s největším gradientem napětím – nejčastěji z ostrého hrotu na vrchu sekundárního vinutí. Rezonanční frekvence je dána Thomsonovým vztahem a je obecně závislá na velikosti indukčnosti a kapacity. Indukčnost sekundárního vinutí je téměř neměnná, ale kapacita této vzduchové válcové cívky je silně závislá na okolním prostředí, na pohybu vzduchu, pohybu předmětů a osob v okolí, tvaru výbojů, tažení výbojů proti zemi, na vlhkosti vzduchu a podobně. Z těchto důvodů je vhodné využít fázového závěsu, který zajistí neustálé doladování frekvence na frekvenci shodnou s rezonanční sekundárního vinutí. Smyčka fázového závěsu se obecně skládá ze tří hlavních částí. Těmi jsou fázový komparátor, filtr realizovaný dolní propustí (LPF) a napětím řízený oscilátor (VCO). Všechny tři části jsou spojeny a tvoří tak uzavřenou regulační smyčku. Na druhý vstup fázového komparátoru je přiveden zpětnovazební signál (Input Signal).



Obrázek 8: Blokové schéma fázového závěsu [6]

Blokové schéma fázového závěsu převzaté z aplikační zprávy výrobce obvodu CD4046B [6] je zobrazeno na obrázku 8. Základní pochopení funkce vlastního integrovaného obvodu CD4046B nejlépe vystihuje následující blokové schéma vnitřní struktury obvodu CD4046B zobrazené na obrázku 9.

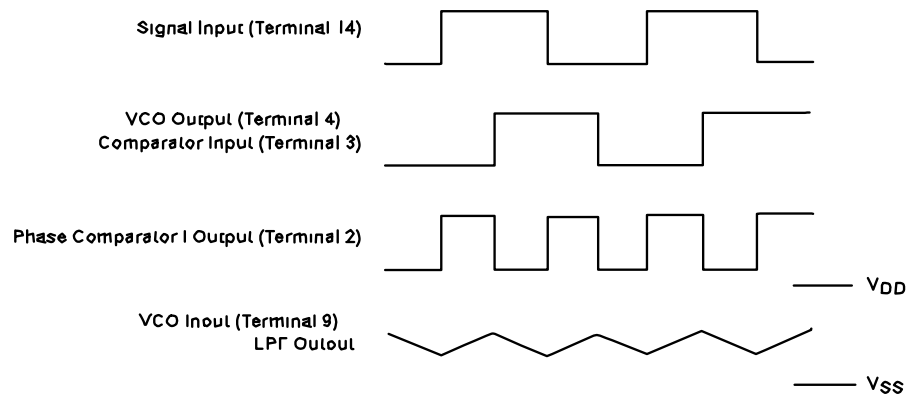
3 Konstrukce Teslova transformátoru



Obrázek 9: Vnitřní struktura obvodu CD4046B [6]

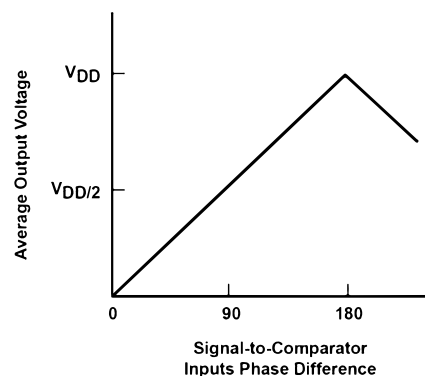
Frekvence vlastního vnitřního oscilátoru obvodu je tvořena kombinací rezistoru mezi pinem č. 11 a zemí a kondenzátorem mezi piny č. 6 a 7. Pokud je rezistor mezi pinem č. 12 a zemí nepřipojen, lze napětím na vstupu VCO řídit frekvenci od frekvence blízké se nule až do maximální nastavené, přičemž střední frekvence je dána frekvencí vnitřního oscilátoru. Pokud je zapojen rezistor mezi pinem č.12 a zemí, lze jím nastavit frekvenční ofset, jinak řečeno frekvenční okno, ve kterém se bude frekvence pohybovat. Oscilátor bude poté kmitat mezi minimální nenulovou frekvencí a maximální danou velikostí nastaveného frekvenčního ofsetu. Střední hodnota frekvence nastává při polovině napájecího napětí na vstupu VCO. Výstup VCO oscilátoru je spojen se vstupem fázového komparátoru, který tento signál porovnává se signálem ze zpětné vazby regulační smyčky. Kombinace prvků znázorněná na obrázku 9 jako R3 a C2 tvoří filtr dolní frekvenční propusti (LPF) pro signál z výstupu fázového komparátoru, který je připojen externě k integrovanému obvodu. Předpokladem pro řízení regulované soustavy pomocí fázového závěsu je změna fázového posunu mezi řídicím signálem a signálem ze zpětné vazby této soustavy při změně frekvence – zpětnou vazbou je zde myšlen signál ze sekundárního vinutí Teslova transformátoru. Při použití fázového komparátoru typu 1 platí při uzamčení fázového závěsu pro střední frekvenci následující průběhy z obrázku 10.

3 Konstrukce Teslova transformátoru



Obrázek 10: Uzamčení smyčky fázového závěsu pro střední frekvenci [6]

Fázový komparátor typu 1 je tvořen hradlem XOR. Při rozdílných vstupních logických úrovních zpětnovazebního signálu a vstupu komparátoru bude fázový komparátor překlopen do stavu logické 1. Při souhlasných do logické 0. Logická 1 na výstupu fázového komparátoru způsobí zvyšování napětí na vstupu VCO (upravené dolní propustí) a tím dojde na výstupu VCO ke zvýšení frekvence obdélníkového signálu. Naopak shoda signálů způsobí snižování napětí na vstupu VCO a tím také snížení frekvence signálu na výstupu VCO.

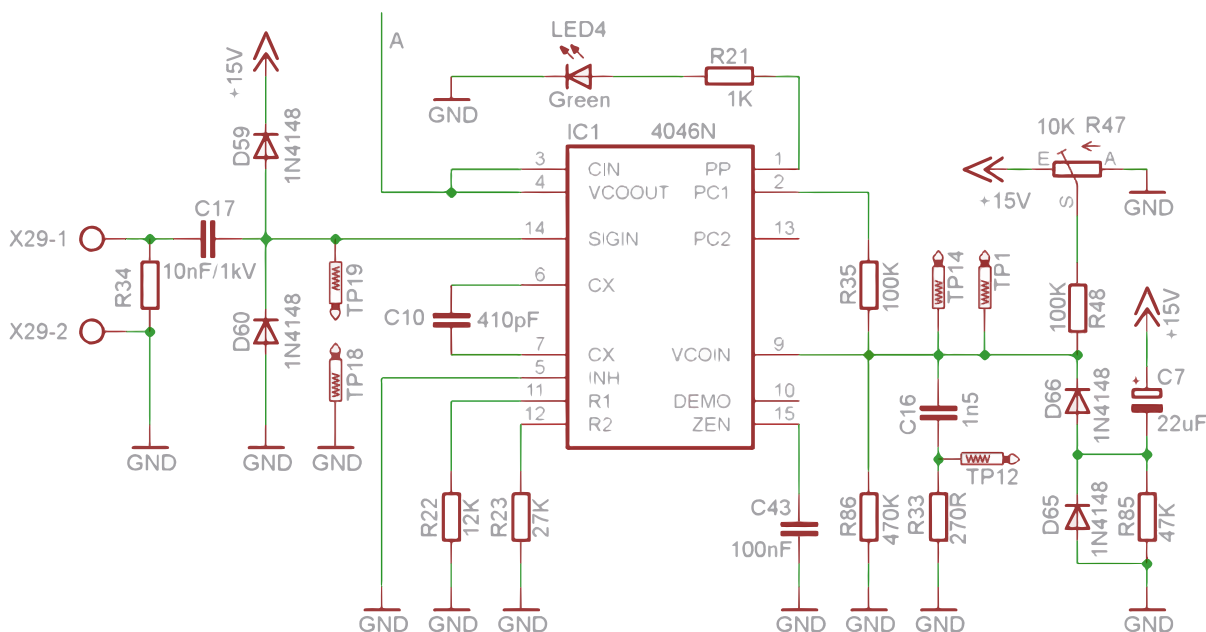


Obrázek 11: Závislost změny fáze na výstupním napětí LPF [6]

Ze závislosti změny fáze mezi vstupem fázového komparátoru a zpětnovazebním signálem na výstupním napětí dolní propusti zobrazené na obrázku 11 je patrné, že fázový posun mezi zpětnovazebním signálem a vstupním signálem komparátoru je navzájem posunut o 90° právě po přivedení poloviny napájecího napětí na vstup VCO. V dolní hranici fázového zámku je fázový posun blízký se 0° , naopak v horní mezi se blíží 180° . Pokud je tedy řízena soustava, která vykazuje změnu fázového posunu vlivem změny frekvence, je možné vytvořit převodník fázového posunu na frekvenci. Pokud dojde ke změně fázového posunu v regulované soustavě, regulační obvod upraví změnou napětí na vstupu napětím řízeného oscilátoru (VCO) frekvenci na takovou hodnotu, aby se fázový posun mezi zpětnovazebním signálem a vstupem VCO opět dorovnal na rozdíl právě 90° . Pro bezproblémové zachycení

3 Konstrukce Teslova transformátoru

fázového závěsu je potřeba navrhnut správné hodnoty low pass filtru, neboli již zmiňované dolní propusti, na takovou hodnotu, aby při rezonanční frekvenci Teslova transformátoru byla na vstupu VCO střední hodnota napětí přibližně rovna polovině napájecího. To lze provést výpočtem z katalogového listu, experimentálně, případně navržením této propusti s použitím regulovatelných součástek R nebo C. [5]



Obrázek 12: Obvod řízení s fázovým závěsem

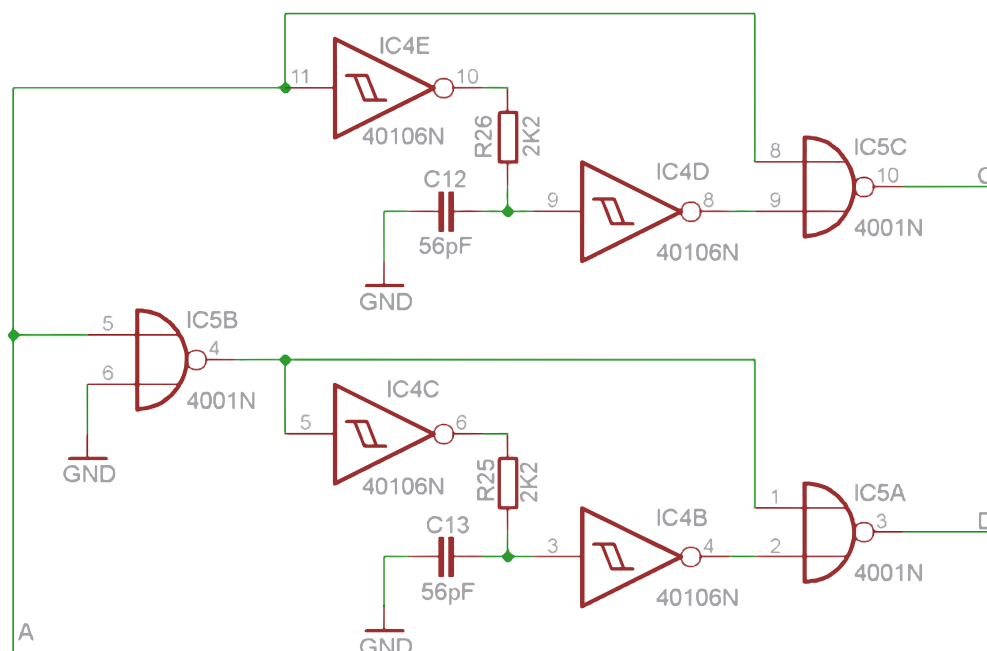
Nyní je možné podrobněji popsat schéma na obrázku 12 s obvodem řídicího integrovaného obvodu CD4046B. Frekvence oscilátoru je dána rezistorem R22 a kondenzátorem C10. Frekvenční offset zajišťuje rezistor R23. S hodnotami součástek ve schématu je možné rozlaďovat frekvenci napětím na vstupu VCO v mezích od 275 kHz do 480 kHz, přičemž rezonance sekundárního vinutí Teslova transformátoru je přibližně rovna 379 kHz. Funkci dolní propusti zde tvoří rezistor R35 a kondenzátor C16. Rezistor R33 má minimální vliv. Vstup napětím řízeného oscilátoru má vysokou vstupní impedanci a lze proto použít externí součástky v širokém rozsahu hodnot. Rezistor R86 slouží ke snížení vstupní impedance a tím ke snížení případného indukovaného rušení. Rezistor R33 slouží rovněž jako bočník pro přivedený audiosignál na pin TP12, který vede z přepínače volby módů (podrobněji popsáno v 3.2.12). Kondenzátor C7 společně s rezistorem R85 zajistí při zapnutí náběh od horní meze spínací frekvence směrem dolů do zachycení smyčky fázového závěsu. Tím je zajištěn snížený odběr proudu z hlavního filtračního kondenzátoru, který se po zapnutí nabíjí přes stupňový spínač pomocí předřazeného sériového rezistoru. Přemostění nabíjecího rezistoru je nastaveno přibližně po 1s po zapnutí (podrobněji v obvodu

3 Konstrukce Teslova transformátoru

pro soft start v 3.3.1). Dioda D65 slouží k rychlému vybití kondenzátoru C7 po odpojení napájení. Dioda D66 zabraňuje vlivu tohoto obvodu při běhu regulační smyčky. Potenciometr R47 slouží k ruční částečné úpravě napětí na vstupu VCO a tím i změně hloubky modulace modulovaného signálu. Rezistor R48 slouží k omezení vlivu tohoto potenciometru. Nezanedbatelnou částí je zde také vstup zpětné vazby z regulované smyčky. Signál je odebírán ze spodní části sekundárního vinutí Teslova transformátoru (znázorněno ve schématu v 3.4.3) pomocí feritového proudového měřicího transformátorku na prstencovém jádře s 30 závity sekundárního vinutí. Toto sekundární vinutí je vedeno na kondenzátor C17 pro oddělení stejnosměrné složky a omezeno diodami D59 a D60 kvůli ochraně vstupního pinu č. 14 integrovaného obvodu CD4046B. Rezistor R34 je nezapojen. Výstupní signál z řídicího obvodu je vyveden vodičem označeným ve schématu písmenem A na pinech č. 3 a č. 4 obvodu CD4046B. Pin TP1 slouží k přímému spojení vodiče s obvodem proudového omezení (podrobněji v 3.2.5) a pin TP14 je přiveden na přepínač volby módů (podrobněji popsán v 3.2.12). LED dioda připojená k pinu č. 1 slouží k indikaci zamčeného fázového závěsu. Uvnitř integrovaného obvodu se nachází hradlo NOR, na jehož vstupy je přiveden signál z komparátoru a vstup zpětnovazebního signálu. Na výstupu hradla NOR je filtr tvořen dolní propustí prvky R a C. Následuje schmittův klopný obvod a hradlo invertoru. Vše kromě kondenzátoru je uvnitř obvodu. Čím bude frekvence bližší rezonanční (fázový posun mezi zpětnovazebním signálem a výstupem VCO se bude přibližovat 90°), tím bude střída logické 1 na výstupu hradla NOR větší. V krajních polohách fázového závěsu téměř nulová. Podle střidy signálu bude kolísat napětí na kondenzátoru v dolní propusti, které je vyhodnocováno komparátorem tvořeným schmittovým hradlem. Kondenzátor v zmiňované dolní propusti je realizován externě prostřednictvím kondenzátoru C43. LED dioda poté bude indikovat uzamčení smyčky fázového závěsu. Piny TP18 a TP19 jsou připojeny na spínač, jehož sepnutím je možné vyřadit z provozu obvod fázového závěsu a umožní tak ladění frekvence ručně potenciometrem R47.

3 Konstrukce Teslova transformátoru

3.2.2 Obvod pro dead time

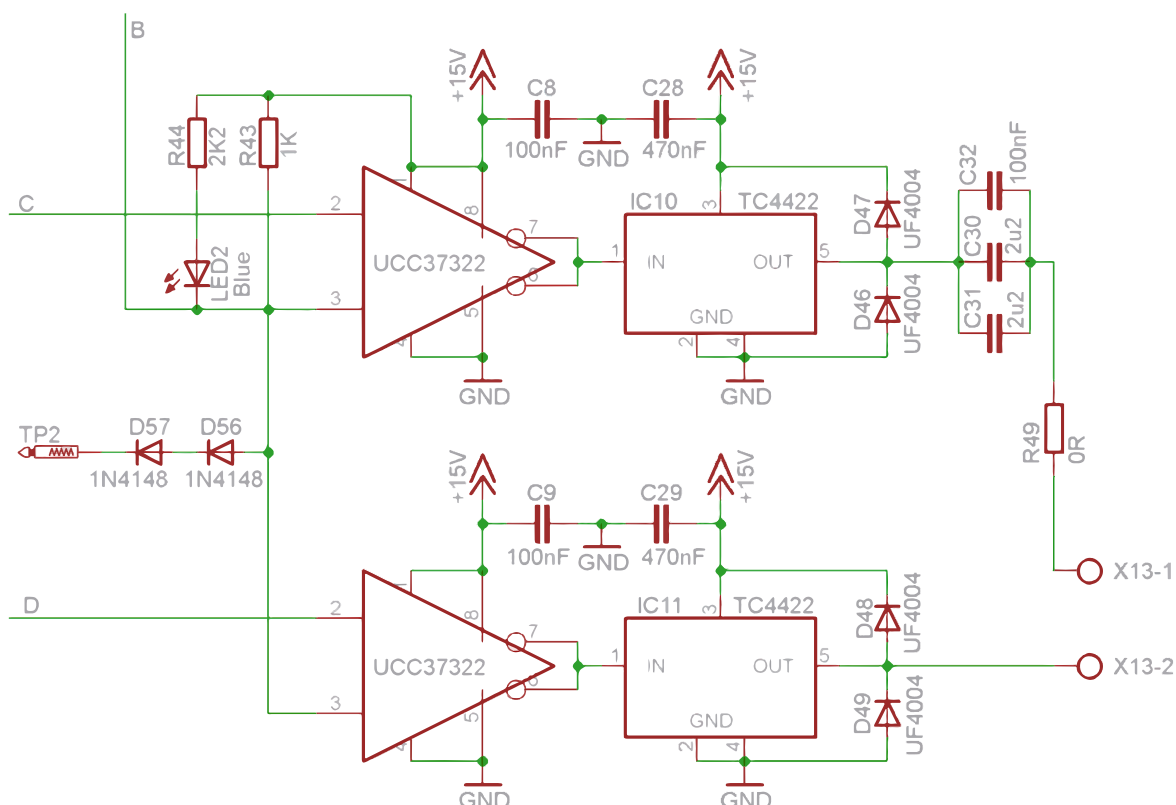


Obrázek 13: Obvod pro dead time

Obvod pro dead time, neboli obvod pro zajištění tzv. „mrtvých časů“, schématicky znázorněný na obrázku 13, zajišťuje časovou rezervu pro bezpečné rozepnutí výkonových tranzistorů (podrobněji popsáno v 3.4.2) mezi jejich vzájemným střídavým spínáním a zabraňuje sepnutí tranzistorů v jedné větvi střídače a tudíž větrovému zkratu. Po přivedení log. 1 na vodič A se s určitým zpožděním dostane na vodič C log. 0 a na vodiči D bude log. 1. Po přivedení log. 0 na vodič A se se zpožděním dostane log. 1 na vodič C a log. 0 na vodič D. Dojde tedy k inverzi signálů z předchozího stavu s určitým časovým zpožděním. S danými hodnotami součástek je zpoždění dané prvky R26, C12, R25, C13 a částečně i hradly schmittových obvodů přibližně 100 ns.

3 Konstrukce Teslova transformátoru

3.2.3 Budiče + budicí transformátor

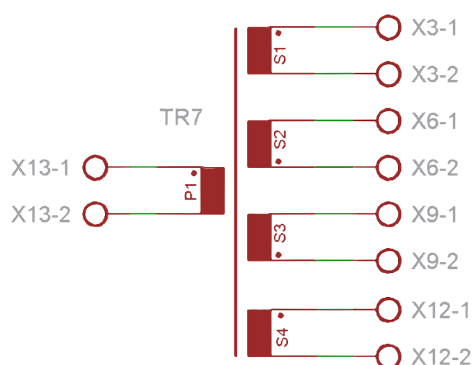


Obrázek 14: Budiče + budicí transformátor

Budiče a jejich zapojení uvedené na obrázku 14 slouží k proudovému posílení výstupního signálu z řídicího obvodu fázového závěsu CD4046, respektive výstupu obvodu pro dead time. Budicí transformátor připojený k výstupu budičů slouží ke galvanickému oddělení řídicí části a výkonového měniče. Rezistor R43 slouží jako pull-up rezistor pro povolení činnosti budičů, jímž jsou enable vstupy budičů připojeny ke kladnému napájecímu napětí. Indikační LED dioda LED2 indikuje činnost spínání budičů a tím i činnost výkonového měniče. Enable vstupy budičů na pinech č. 3 neinvertujících budičů UCC37322 jsou ovládány primárně proudovou ochranou přivedenou na vodič B, ale je možné je ovládat i různými modulacemi a to prostřednictvím pinu TP2. Diody D56 a D57 zabraňují v případě zablokování měniče tyristorem T4 v proudové ochraně (podrobněji popsáno v 3.2.4) rozepnutí tohoto tyristoru modulačními obvody. Tyto 2 diody vytvoří úbytek napětí dostatečně veliký na to, aby se hodnota proudu tyristorem udržela nad hodnotou přídržného a nedošlo k samovolnému rozepnutí tyristoru. Vodiče C a D z obvodu pro dead time jsou přivedeny na vstupy neinvertujících budičů UCC37322 a z jejich výstupů následně na vstupy výkonových neinvertujících budičů IC10 a IC11 - TC4422. Budiče jsou opatřeny blokovacími

3 Konstrukce Teslova transformátoru

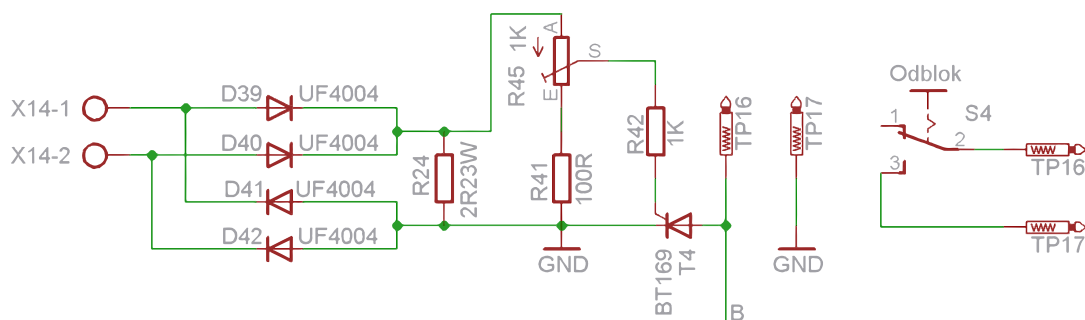
kondenzátory v bezindukčním provedení a chráněny rychlými diodami D46-49 proti přepětí. Kondenzátory C30-32 slouží k oddělení stejnosměrné složky a rezistor R49 je nahrazen drátovou propojkou. Hodnota kapacity kondenzátorů je zvolena tak, aby při dané frekvenci výrazně neomezovala protékající proud svou kapacitní reaktancí. Zakreslení rezistoru R49 na desce plošného spoje je z důvodu případného doladění průběhu napětí na budicím transformátoru a možnosti v určitých mezích ovlivnit rychlost a tvar náběhu napětí na gatech výkonových MOSFET tranzistorů. Svorka X13 je dále spojena s již zmiňovaným budicím oddělovacím feritovým transformátorem, v anglické literatuře často označovaném jako GDT (gate driver transformer). Zapojení oddělovacího transformátoru je uvedeno na obrázku 15.



Obrázek 15: Budicí transformátor

Budicí feritový transformátor obsahuje jedno primární vinutí a 4 sekundární vinutí. Je navinut na toroidním feritovém jádře o vnějším průměru 32 mm, vnitřním průměru 18 mm a délce 13 mm s Al konstantou jádra 6950 nH. Primární i sekundární vinutí tvoří 8 závitů vinutých tenkým izolovaným vodičem. Všechna vinutí jsou svinuta a rovnoměrně navinuta na prstencovém jádře, jež je upevněno k desce plošného spoje výkonového měniče. Celková indukčnost primárního vinutí je rovna přibližně 450 μ H.

3.2.4 Proudová ochrana

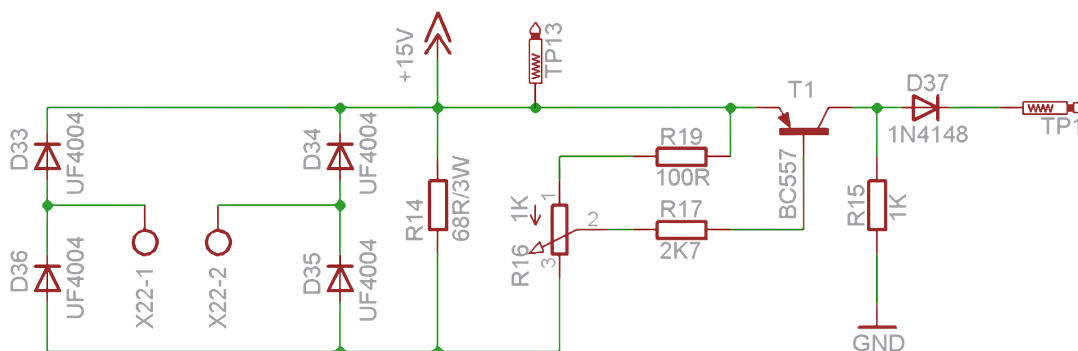


Obrázek 16: Proudová ochrana

3 Konstrukce Teslova transformátoru

Proudová ochrana (či nadproudová ochrana) uvedená ve schématu na obrázku 16 slouží k ochraně výkonového měniče v případě, že by proudové omezení selhalo, případně by byl nastaven nedostatečný frekvenční rozsah fázového závěsu pro bezpečné rozladění frekvence a tím zvýšení impedance vlastního Teslova transformátoru pomocí regulovatelného proudového omezení (popsané v 3.2.5) a došlo by k proudovému přetížení měniče. Tato ochrana slouží k trvalému zablokování měniče do okamžiku, než je mechanicky odblokován tlačítkem S4 na svorkách TP16 a TP17 umístěném na předním panelu skříně řízení Teslova transformátoru. Na svorku X14 je připojeno sekundární vinutí proudového měřicího transformátoru TR3 (podrobněji popsáno v 3.4.3). Signál z proudového transformátoru je usměrněn dvoucestným můstkovým usměrňovačem tvořeným rychlými diodami D39-42 a zatížen bočником R24, aby nedošlo k přesycení proudového transformátoru. Díky dvoucestnému usměrňovači nezáleží na orientaci vinutí transformátoru. Trimrem R45 je nastavena bezpečná špičková hodnota proudu výkonovým měničem, při které sepne tyristor T4 a zablokuje měnič. Při praktickém ověření funkce v kapitole 4.2 byla maximální naměřená špičková hodnota proudu 26 A. Tato ochrana je nadřazená všem módům přerušovače a také regulovatelnému proudovému omezení.

3.2.5 Proudové omezení



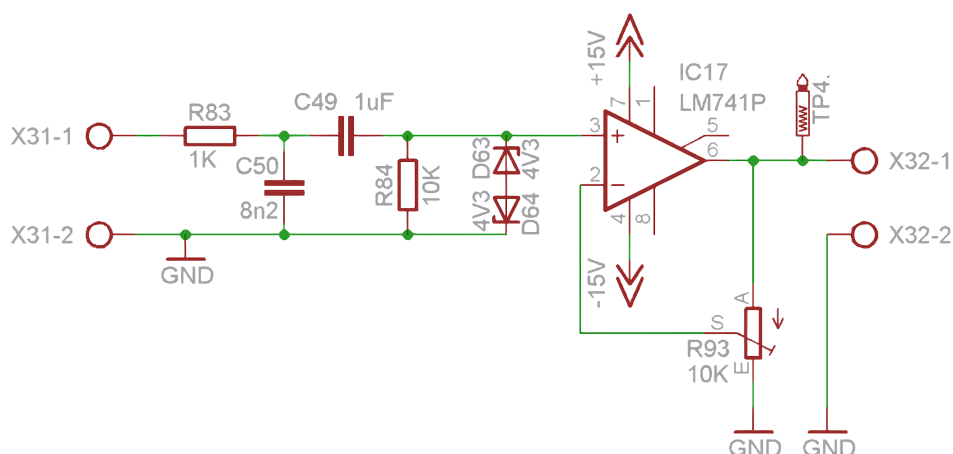
Obrázek 17: Proudové omezení

Proudové omezení uvedené ve schématu na obrázku 17 slouží k plynule nastavitelné regulaci špičkového výstupního proudu tekoucího z výkonového měniče pomocí rozladění frekvence směrem vzhůru do oblasti induktivní zátěže. Na svorku X22 je připojeno sekundární vinutí z proudového měřicího transformátoru TR1 (podrobněji popsáno v 3.4.3). Signál z proudového transformátoru je usměrněn dvoucestným můstkovým usměrňovačem z rychlých diod D33-36. Díky dvoucestnému usměrňovači nezáleží na orientaci vinutí proudového transformátoru. Sekundární vinutí je poté zatíženo bočником R14, aby nedošlo

3 Konstrukce Teslova transformátoru

k přesycení proudového transformátoru. Na rezistoru R14 vzniká napěťový úbytek úměrný proudu tekoucím výkonovým měničem, který lze regulovat potenciometrem R16 vyvedeném na předním panelu. Potenciometrem se nastaví, při jak velké hodnotě proudu (úbytku napětí na R14) dojde k otevření tranzistoru T1 a tím přivedení napájecího napětí na pin TP1. Tento pin je přímo spojen se vstupem napětím řízeného oscilátoru v obvodu CD4046 (podrobněji popsáno v 3.2.1). Rezistor R19 slouží pro nastavení nejvyšší možné velikosti proudu. Rezistor R15 slouží pro uzemnění kolektoru tranzistoru T1, aby se tranzistor T1 nenalézal ve stavu vysoké impedance. Pinem TP13 je připojena deska plošného spoje proudového omezení k desce stabilizátoru +15 V.

3.2.6 Audio předzesilovač

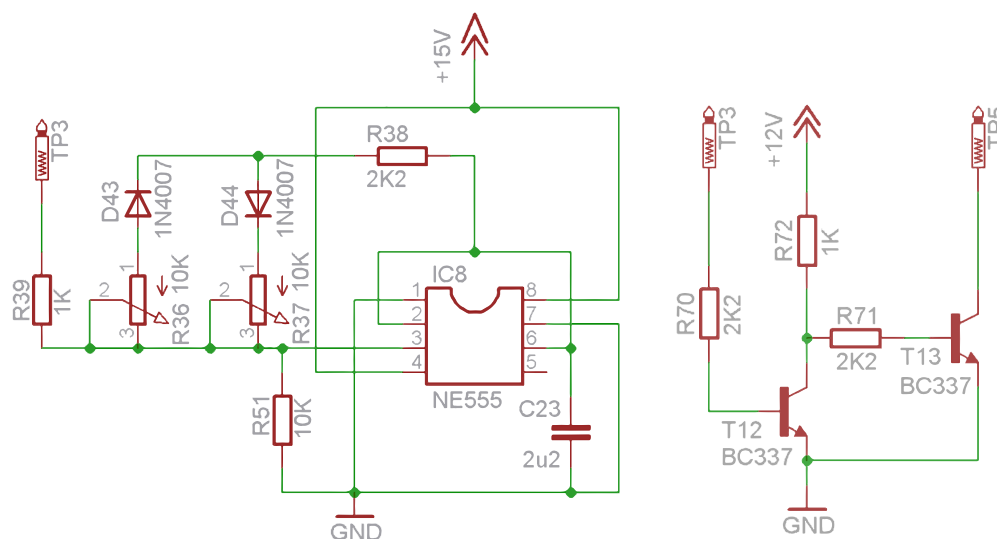


Obrázek 18: Audio předzesilovač

Obvod audio předzesilovače, uvedeném ve schématu na obrázku 18, slouží k mírnému zesílení vstupního spojitého audiosignálu. Velikost zesílení operačního zesilovače IC17 se nastavuje pomocí trimru R93. Předpokládaná velikost zesílení je rovna třem, nicméně je možné trimrem nastavit požadovanou hodnotu podle použitého vstupního signálu. Filtr tvořen rezistorem R83 a kondenzátorem C50 tvoří dolní frekvenční propust audiosignálu s mezní frekvencí 19 kHz. Kondenzátor C49 s rezistorem R84 tvoří horní frekvenční propust s mezní frekvencí 16 Hz. Při mezní frekvenci dochází k poklesu amplitudy signálu o 3dB. Zenerovy diody D64 a D63 chrání operační zesilovač proti přepětí většímu než přibližně 5V. Výstup signálu na svorce X32 (pin TP4) je dále rozveden na nízkofrekvenční detektor, na vstup napětím řízeného oscilátoru a na obvod pro klávesy. V cestě tomuto signálu je ještě přepínač volby módů (podrobněji popsán v 3.2.12).

3 Konstrukce Teslova transformátoru

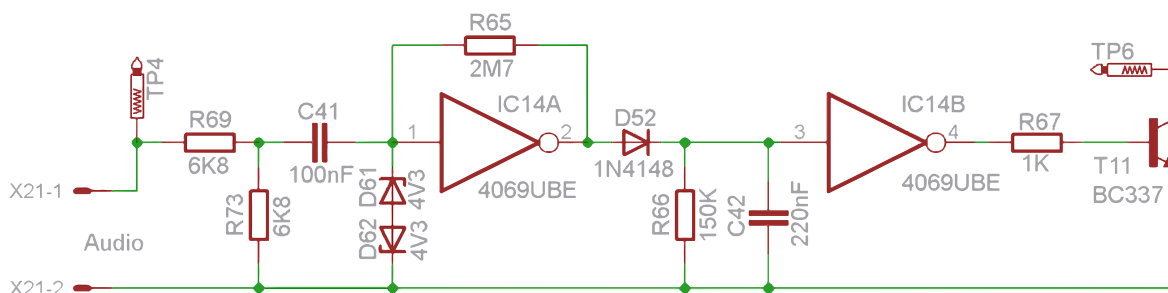
3.2.7 Modulační přerušovač



Obrázek 19: Modulační přerušovač

Modulací obdélkového přerušovače uvedené ve schématu na obrázku 19 lze řídit střidu a frekvenci přerušování enable vstupů budičů UCC37322 a tím řídit nespojitě výkonový měnič. Potenciometry R36 a R37 lze řídit frekvenci a střidu překlápění komparátoru v obvodu IC8. Frekvenci určuje časovací kondenzátor C23 společně s těmito potenciometry a rezistorem R38. Přes rezistor R39 je výstupní signál veden na tranzistory T12 a T13, které zajišťují na pinu TP5 dva stavy. Prvním je přizemnění k zemi GND a druhým stav vysoké impedance.

3.2.8 Nízkofrekvenční detektor



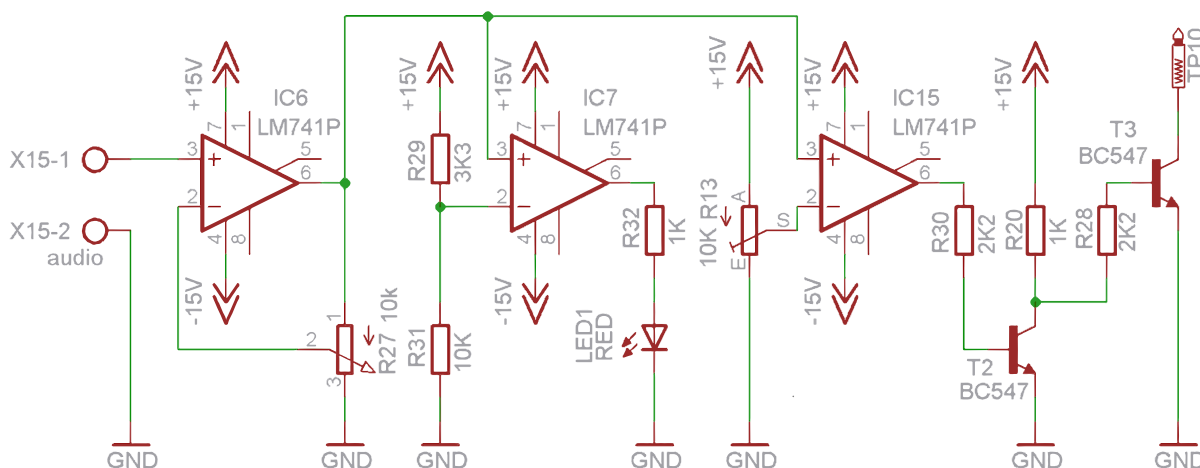
Obrázek 20: Nízkofrekvenční detektor

Nízkofrekvenční detektor ve schématu na obrázku 20 slouží k vypnutí činnosti Teslova transformátoru po určitém čase bez přítomnosti vstupního spojitěho audiosignálu. Vstupní svorka X21 je připojena k výstupu audio předzesilovače (popsaném v 3.2.6). Následuje odporový dělič z rezistorů R69 a R73 pro zmenšení citlivosti hradla IC14A a kondenzátor C41 pro oddělení stejnosměrné složky. S hodnotami součástek odporového děliče je citlivost hradla při napájení 5V přibližně rovna 60 mV. Antiparalelní zapojení zenerových diod D62

3 Konstrukce Teslova transformátoru

a D61 je z důvodu ochrany hradla IC14A. Toto hradlo slouží jako pomocný zesilovač. Dioda D52 slouží k usměrnění signálu a stejnosměrnému posuvu. Hodnotami R66 a C42 se mění časová konstanta, která udává, po jakém čase bez nepřítomnosti audiosignálu dojde k zablokování budičů. V klidovém stavu je na výstupu hradla IC14B napájecí napětí +5V a tím je pomocí tranzistoru T11 přizemněn pin TP6, který je součástí přepínače volba módů (podrobněji popsán v 3.2.12). Obvod IC14 je použit s typovým označením CD4069UBE. Písmeno U (unbuffered) značí obvod tvořen jednou komplementární dvojicí tranzistorů MOS. Tento obvod je napájen napětím 5V, které je realizováno úbytkem napětí na zenerově diodě D53 (zakreslené ve schématu v 3.3.5). Napětí 5V bylo zvoleno z důvodu největší citlivosti hradel právě při tomto napájecím napětí.

3.2.9 Obvod pro klávesy



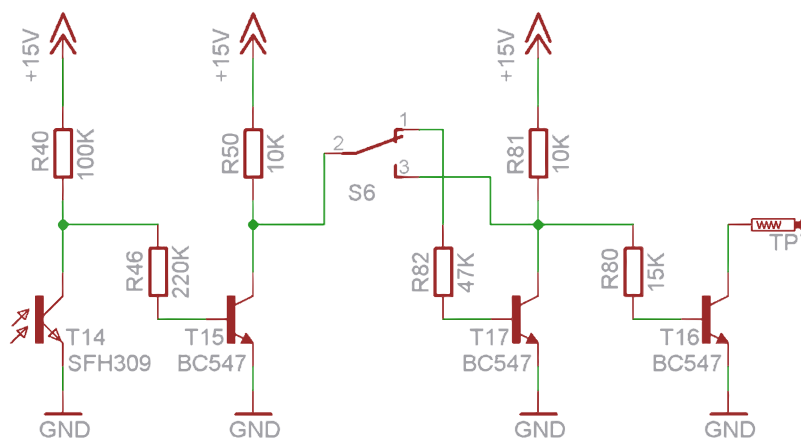
Obrázek 21: Obvod pro klávesy

Obvod pro klávesy uvedený na obrázku 21 slouží k reprodukci audiosignálu z elektronických kláves prostřednictvím spojitého, nebo i nespojitého vstupního audiosignálu (lze použít signál prakticky jakéhokoliv charakteru). Tento mód umožňuje reprodukci audiosignálu spíše v podobě jednotlivých tónů, není příliš vhodný pro polyfonní melodie. Signál není modulován jako spojitý, ale je komparátorem rozstřídan na obdélníkové pulzy, proto vždy dochází k určitému zkreslení. Vstupní svorka X15 je připojena na výstup předzesilovače audiosignálu (podrobněji popsáno v 3.2.6). Signál vstupuje do operačního zesilovače IC6. Potenciometrem R27 vyvedeném na přední panel pod označením „zesílení klávesy“ lze regulovat zesílení zesilovače. Dále je signál veden na další operační zesilovač IC7 zapojeném jako komparátor, který slouží k indikaci audiosignálu při limitaci signálu, tedy při příliš velkém zesílení, kde by mohlo docházet ke zkreslení signálu. LED dioda

3 Konstrukce Teslova transformátoru

je vyvedena na přední panel pod názvem „indikace klávesy“. Napětíová úroveň rozsvícení LED diody je dána napětíovým děličem R29 a R31. V tomto případě je úroveň překlopení nastavena při dosažení přibližně 11V na vstupu komparátoru. Současně je audiosignál veden na další komparátor IC15. Nastavením trimru R13 je možno nastavit úroveň překlopení komparátoru IC15. Po praktických zkušenostech je nastaven téměř k nulové hodnotě, tedy komparátor bude překlápět blízko nuly. Z výstupu IC15 je nyní již nespojitý signál veden na tranzistor T2 a poté T3. Tyto tranzistory zajišťují pin TP10 buď přizemněn, nebo ve stavu vysoké impedance. Pin TP10 je dále připojen na přepínač volby módů (podrobněji popsáno v 3.2.12).

3.2.10 Optický přerušovač



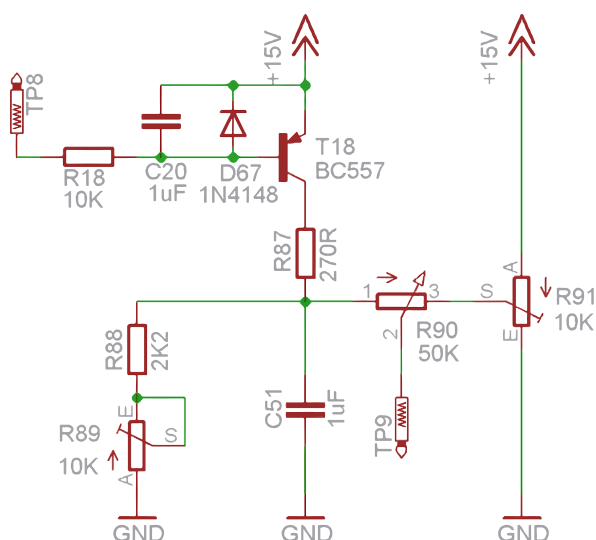
Obrázek 22: Optický přerušovač

Optický přerušovač slouží k individuální možnosti rozšíření dalších funkcí modulace Teslova transformátoru. Schéma přerušovače je uvedeno na obrázku 22. Řízení optickým signálem bylo zvoleno pro své výhodné vlastnosti. Optickým signálem je zajištěno galvanické oddělení, eliminace jakéhokoliv elektrostatického a elektromagnetického rušení a také nemožnost poškození elektroniky externím řídicím obvodem. V krajním případě nemusí být použit pouze optický kabel pro připojení s externím zařízením, ale může být použit i obyčejný světelný paprsek zaměřený do konektoru optického vstupu na předním panelu schránky pro osvětlení fotocitlivého snímače. Při dopadu světelného paprsku na fototranzistor T14, který zde slouží jako přijímač světelného záření, dojde k otevření fototranzistoru T14 a tím rozepnutí tranzistoru T15. Na pinu č. 2 přepínače S6 bude tedy velikost napájecího napětí. Přepínač S6 slouží k invertování signálu z optického vstupu. Z pinu č. 1 přepínače S6 je signál veden na tranzistor T17, který se otevře a tím bude tranzistor T16 uzavřen a pin TP7 ve stavu vysoké impedance. Pin TP7 je veden do přepínače „volba módů“ (podrobněji popsáno v 3.2.12) a následně do enable vstupu budičů. Z toho vyplývá, že při dopadu

3 Konstrukce Teslova transformátoru

světelného záření na fototranzistor dojde k odblokování budičů výkonového měniče. V případě přepnutí přepínače S6 do druhé polohy (spojení pinu 2 a 3) dojde k invertování signálu. Poté při dopadu světelného záření na fototranzistor dochází naopak k zablokování budičů, při nepřítomnosti světelného záření jsou tedy v činnosti.

3.2.11 Modulace pila

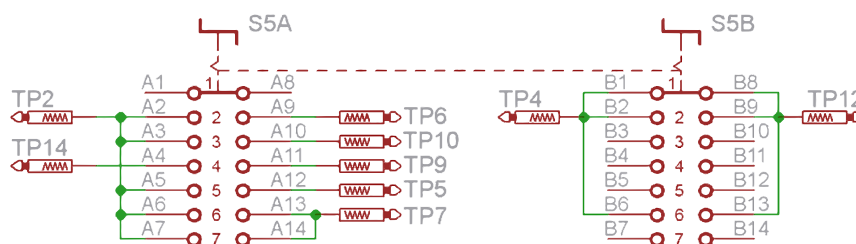


Obrázek 23: Modulace pila

Modulace pilou ve schématu na obrázku 23 je typická rozvětveným „stroměčkovitým“ tvarem výbojů. Pilovitý průběh se zde snímá na kondenzátu C51. Pin TP8 je připojen před dvoucestným můstkovým usměrňovačem (zakresleno ve schématu pomocného transformátoru v 3.3.2). Toto střídavé napětí prochází rezistorem R18 a v rytmu frekvence 50 Hz moduluje tranzistor T18, který přes rezistor R87 rychle nabíjí kondenzátor C51. Kondenzátor C20 slouží jako filtrace a dioda D67 jako ochrana báze tranzistoru T18. Kondenzátor C51 je tedy rychle nabit a vybíjí se postupně převážně přes rezistor R88 a trimr R89. Trimrem R89 lze nastavit rychlost vybíjení kondenzátoru C51. Potenciometr R90 je vyveden na přední panel skříně řízení Teslova transformátoru pod názvem „modulace pily“ a regulací lze měnit hloubku této modulace. V poloze 1 je hloubka modulace největší. Trimrem R91 lze nastavit velikost stejnosměrného offsetu. Trimry R89 a R91 jsou nastaveny víceméně experimentálně pro nastavení tvaru výbojů dle vlastního uvážení.

3 Konstrukce Teslova transformátoru

3.2.12 Přepínač volby módů



Obrázek 24: Přepínač volby módů

Přepínač volby módů slouží k přepínání všech modulačních obvodů, které již byly popsány výše. Schématické zapojení přepínače je uvedeno na obrázku 24. Tedy modulace přerušovače, nízkofrekvenčního detektoru, obvodu pro klávesy, optického přerušovače a modulace pily. Nyní budou popsány podrobněji jednotlivé polohy dvojitého přepínače S5 na společné hřídeli od první polohy (ve schématu sepnuty piny A1+A8 a B1+B8) až k poslední sedmé poloze (A7+A14 a B7+B14).

1. poloha: Označení „CW“ na předním panelu. Tento mód slouží k čisté reprodukci spojitého audiosignálu přivedeného na svorku X31 audio předzesilovače. Spínač S5B připojuje audiosignál ke vstupu VCO na rezistor R33. Módy všech přerušovačů jsou odpojeny (kromě proudových ochran). Výkon lze řídit pomocí proudového omezení (podrobněji popsáno v 3.2.5) při zamčeném fázovém závěsu, ale kvalita reprodukováného audiosignálu se díky výraznému rozladování frekvence značně zhorší. Druhou možností pro čistší reprodukci audiosignálu je možno vypnout smyčku fázového závěsu přepínačem S4, který přizemní zpětnou vazbu z regulované smyčky do obvodu CD4046 na pinu č.14. Regulace výkonu a tím i frekvence se pak provádí ručně potenciometrem R47 (označeném jako „hloubka modulace“), kterým se v uzamčené smyčce fázového závěsu doladuje hloubka modulace. Označení CW je zkratka z angličtiny „continuous wave“, označující tuto modulaci.

2. poloha: Označení „CW – NF detekt.“ na předním panelu. Tento mód je určen rovněž pro čistou reprodukci audiosignálu, platí pro něj to samé jako pro polohu č. 1, ale umožňuje vypnutí Teslova transformátoru (výkonového měniče a tím i sršící korony) v případě nedetekovaného vstupního audiosignálu po určitém čase nastaveným rezistorem R66 a kondenzátorem C42 (podrobněji popsáno v 3.2.8).

3 Konstrukce Teslova transformátoru

3. poloha: Označení „Klávesy“ na předním panelu. Tento mód umožňuje reprodukci audiosignálu v podobě jednotlivých tónů – například z elektronických kláves nebo signál podobného charakteru. Tento mód není vhodný pro polyfonní melodie, ale spíše o jednodušší audiosignál. Audiosignál je přiváděn opět na svorku X31, nicméně není přiváděn na vstup VCO, ale pouze do obvodů podrobněji popsanych v 3.2.9. Tam je zesílen a komparátorem rozstřídan na obdélníkový signál, který řídí enable vstupy budičů. V tomto režimu vždy dochází k určitému zkreslení vstupního signálu.

4. poloha: Označení „Modulace pila“ na předním panelu. Tento mód slouží k modulaci vstupu VCO signálem podobajícím se pile. Audiosignál je v tomto módu přepínačem odpojen. Vstup VCO je modulován pilou v rytmu 50Hz frekvence. Generátor pilovitého průběhu je podrobněji popsán v 3.2.11.

5. poloha: Označení „Přeruš.“ na předním panelu. Tento mód slouží k modulaci enable vstupů budičů obdélníkovým signálem o nastavitelné frekvenci a šířce impulsů v určitém nastavitelném rozpětí s využitím časovače NE555. Audiosignál je v tomto módu odpojen. Bližší popis obvodu přerušovače je uveden v 3.2.7.

6. poloha: Označení „Optika + CW“ na předním panelu. Tento mód umožňuje univerzální řízení Teslova transformátoru. Je možno prostřednictvím optického vstupu – nespojitým signálem – řídit enable vstupy budičů externím přerušovačem. Dále je možno modulovat vstup VCO spojitým audiosignálem přivedeným na svorky X31. Optický přerušovač umožňuje signál invertovat přepínačem S6. Optický přerušovač je podrobněji popsán v 3.2.10.

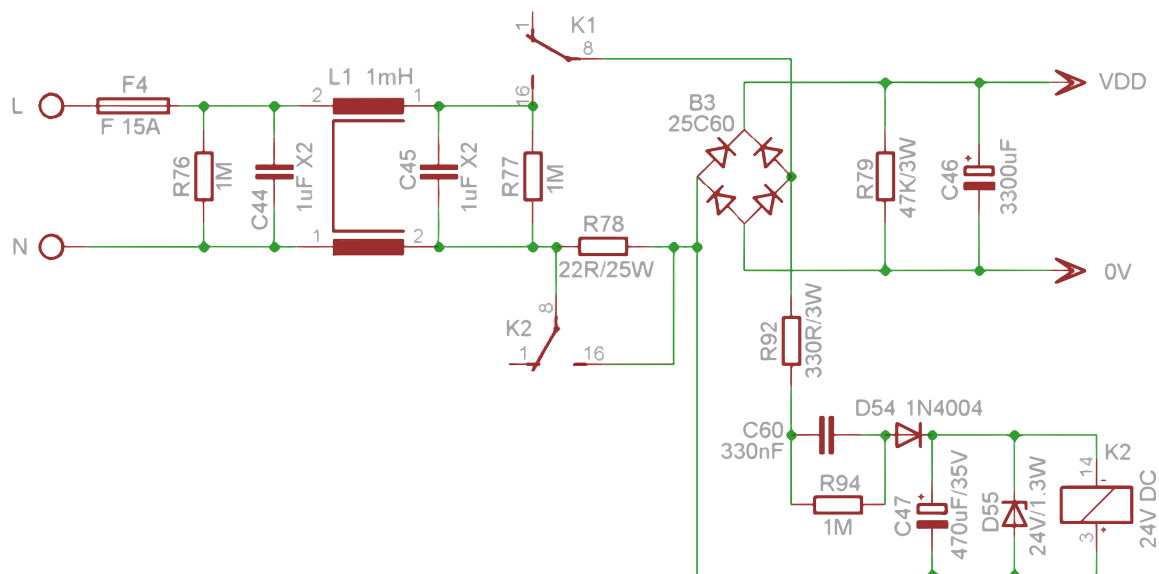
7. poloha: Označení „Optika“ na předním panelu. Tento mód je shodný s módem předchozím, nicméně je zde přepínačem S5B odpojen spojitý audiosignál. Je tedy možné využít pouze optického vstupu přerušovače (popsaném v 3.2.10).

Patrně nemá význam další rozšiřování přepínače, neboť v poloze č. 6 jsou prakticky všechny možnosti řízení obsaženy. Nicméně zůstává stále možnost dalšího rozšíření o další polohy přepínače, který je nyní západkou omezen na poloh sedm.

3 Konstrukce Teslova transformátoru

3.3 Pomocné obvody

3.3.1 Síťový filtr, stupňový spínač, usměrnění, filtrace

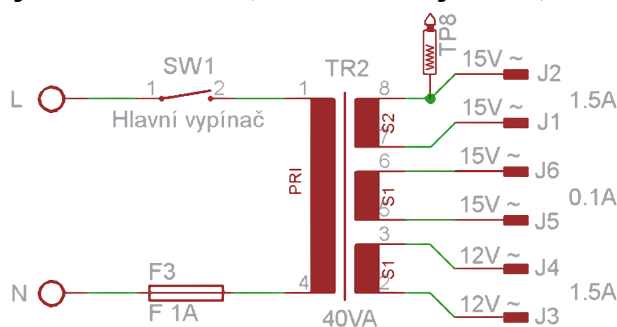


Obrázek 25: Síťový filtr, stupňový spínač, usměrnění, filtrace

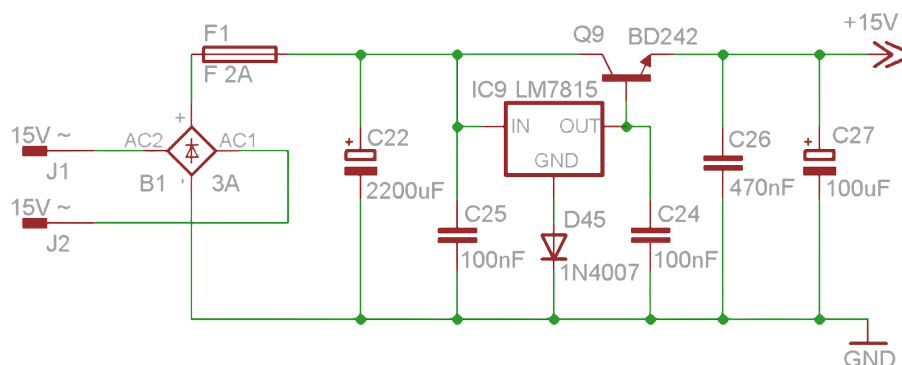
Celé zařízení je napájeno z jednofázové střídavé sítě o efektivní hodnotě napětí 230 V. Schéma silové části před výkonovým měničem je uvedeno ve schématu na obrázku 25. Napětí je vedeno rychlou tavnou trubičkovou pojistkou F4 přes síťový odrušovací filtr tvořený tlumivkou L1 na prstencovém feritovém jádře, odrušovacími kondenzátory C44 a C45 a vybíjecími rezistory R76 a R77. Při sepnutí relé K1 pomocí tlačítka start (podrobněji popsáno v 3.3.3) je napětí vedeno do stupňového spínače a dvoucestného usměrňovacího můstku B3. Usměrněným napětím je nabíjen filtrační kondenzátor C46. Pro omezení proudového impulsu při nabíjení kondenzátoru C46 při zapnutí slouží rezistor R78, který omezuje hodnotu špičkového proudu přibližně na 14 A a je po nabití kondenzátoru přemostěn pomocí relé K2.

Stupňový spínač tvoří součástky R78, K2, R94, C60, R92, D54, C47, D55 a K2. Rezistor R92 slouží k omezení proudového impulsu obvodem stupňového spínače při zapnutí na špičkovou hodnotu přibližně 1 A. Kondenzátor C60 omezuje procházející proud daný jeho reaktancí. Při frekvenci sítě 50 Hz je reaktance kondenzátoru C60 rovna 9,65 k Ω , vliv rezistoru R92 je zde zanedbatelný. Proud tekoucí diodou D54 do filtračního kondenzátoru C47 je poté roven efektivní hodnotě přibližně 24 mA. Zenerova dioda D55 slouží k omezení postupně rostoucího napětí na kondenzátoru C47 na hodnotu 24V potřebnou pro napájení cívky relé K2. Zpoždění sepnutí relé K2 s danými hodnotami součástek činí přibližně 1 s. Rezistor R94 slouží k případnému vybití kondenzátoru C60 po vypnutí.

3 Konstrukce Teslova transformátoru

3.3.2 Pomocný transformátor, stabilizátory +15V, -15V, +12V**Obrázek 26: Pomocný transformátor**

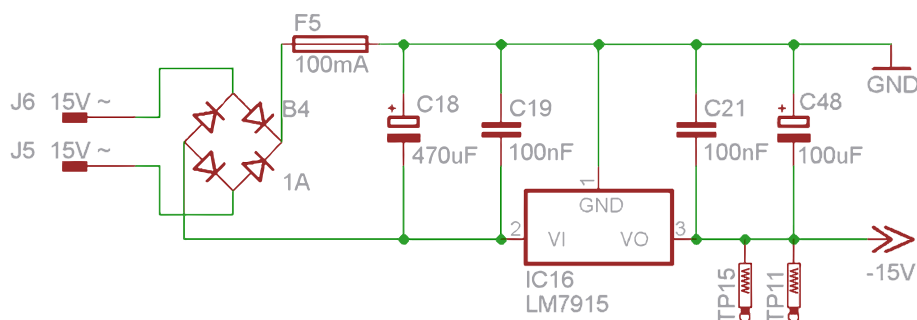
Napájení všech řídicích a pomocných obvodů celého zařízení je zajištěno pomocí pomocného síťového transformátoru o výkonu 40 VA. Zapojení transformátoru je uvedeno na obrázku 26. Primární vinutí je napájeno z jednofázové sítě o efektivní hodnotě napětí 230V. Hlavním vypínačem SW1 se celé zařízení uvede do chodu. Dále je transformátor jištěn trubičkovou tavnou pojistkou 1A. Sekundární část tvoří 3 vinutí. První sekundární vinutí s výstupním napětím o efektivní hodnotě 15V s trvalým zatížením 1,5 A slouží k napájení stabilizátoru s výstupním napětím +15V, druhé vinutí s napětím o efektivní hodnotě 15V s trvalým zatížením 0,1 A slouží k napájení stabilizátoru s výstupním napětím -15V a poslední vinutí o efektivní hodnotě napětí 12 V s trvalým zatížením až 1,5 A slouží k napájení stabilizátoru s výstupním napětím +12 V. Pin TP8 je připojen k obvodu modulace pily (podrobněji popsáno v 3.2.11). Na obrázku 27 je uvedeno schéma 15V stabilizátoru napětí s kladným výstupním napětím.

**Obrázek 27: Stabilizátor +15V**

Napětí z prvního sekundárního vinutí pomocného transformátoru o efektivní hodnotě napětí 15V je usměrněno dvoucestným můstkovým usměrňovačem B1, jištěno trubičkovou pojistkou F1 a filtrováno kondenzátorem C22. O stabilizaci napětí se stará lineární integrovaný stabilizátor LM7815 – IC9. Integrovaný stabilizátor je posílen bipolárním PNP tranzistorem Q9 pro vyšší proudové zatížení. Tento tranzistor je nutné umístit na chladič.

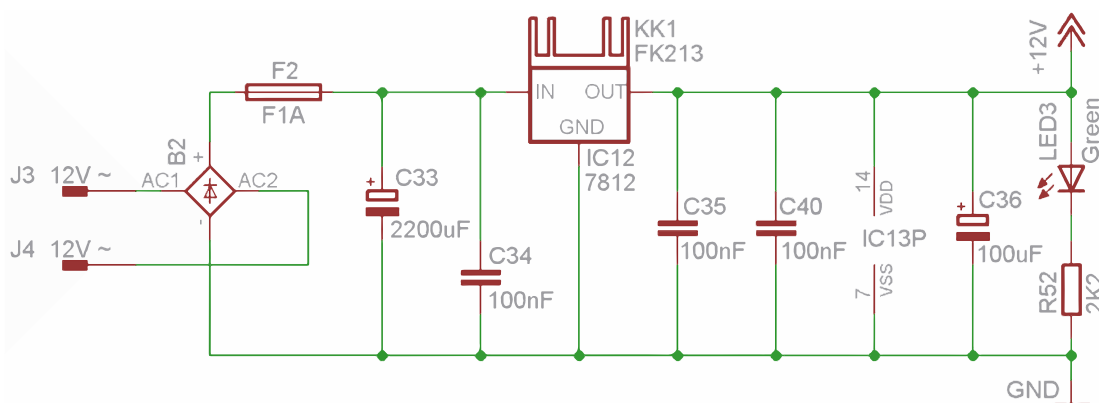
3 Konstrukce Teslova transformátoru

Dioda D45 slouží k navýšení výstupního napětí integrovaného stabilizátoru IC9 o prahové napětí diody D45, které kompenzuje úbytek napětí na bázi tranzistoru Q9. Výstupní napětí na emitoru tranzistoru Q9 je poté přibližně rovno 15V. Blokovací kondenzátory C25, C24, C26 a C27 zabraňují případnému rozkmitání stabilizátoru. Na obrázku 28 je uvedeno schéma 15V stabilizátoru napětí se záporným výstupním napětím.



Obrázek 28: Stabilizátor -15V

Napětí z druhého sekundárního vinutí pomocného transformátoru o efektivní hodnotě napětí 15V je usměrněno dvoucestným můstkovým usměrňovačem B4, jištěno tavnou pojistkou F5 a filtrováno kondenzátorem C18. O stabilizaci napětí -15V se stará lineární integrovaný stabilizátor LM7915 – IC16. Blokovací kondenzátory C19, C21 a C48 zabraňují případnému rozkmitání stabilizátoru. Pin TP11 je umístěn na plošném spoji obvodu stabilizátoru a pin TP15 na plošném spoji s obvodu pro klávesy (popsané v 3.2.9). Tyto piny slouží pouze ke vzájemnému spojení. Na následujícím obrázku 29 je uvedeno schéma 12V stabilizátoru napětí s kladným výstupním napětím.



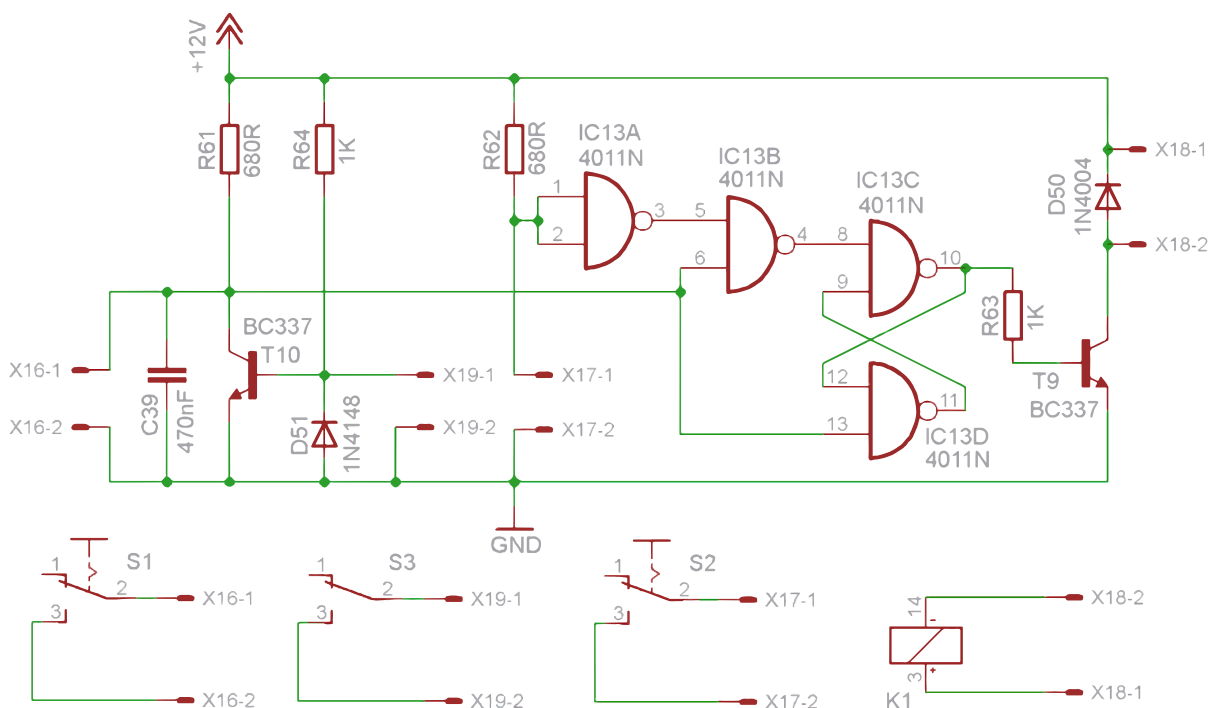
Obrázek 29: Stabilizátor +12V

Napětí ze třetího sekundárního vinutí pomocného transformátoru o efektivní hodnotě napětí 12V je usměrněno dvoucestným můstkovým usměrňovačem B2, jištěno tavnou trubičkovou pojistkou F2 a filtrováno kondenzátorem C33. O stabilizaci napětí +12V se stará lineární stabilizátor LM7812 – IC12. Stabilizátor je nutné umístit na chladič. Blokovací

3 Konstrukce Teslova transformátoru

kondenzátory C34, C35 a C36 zabraňují případnému rozkmitání stabilizátoru. Led dioda LED3 slouží k indikaci obvodu pod napětím. Rezistor R52 omezuje proud tekoucí LED diodou na 5mA. Zakreslené napájení integrovaného obvodu IC13P a blokovací kondenzátor C40 slouží pro obvod Start-Stop ovládání (podrobněji popsáno v 3.3.3).

3.3.3 Start-Stop ovládání



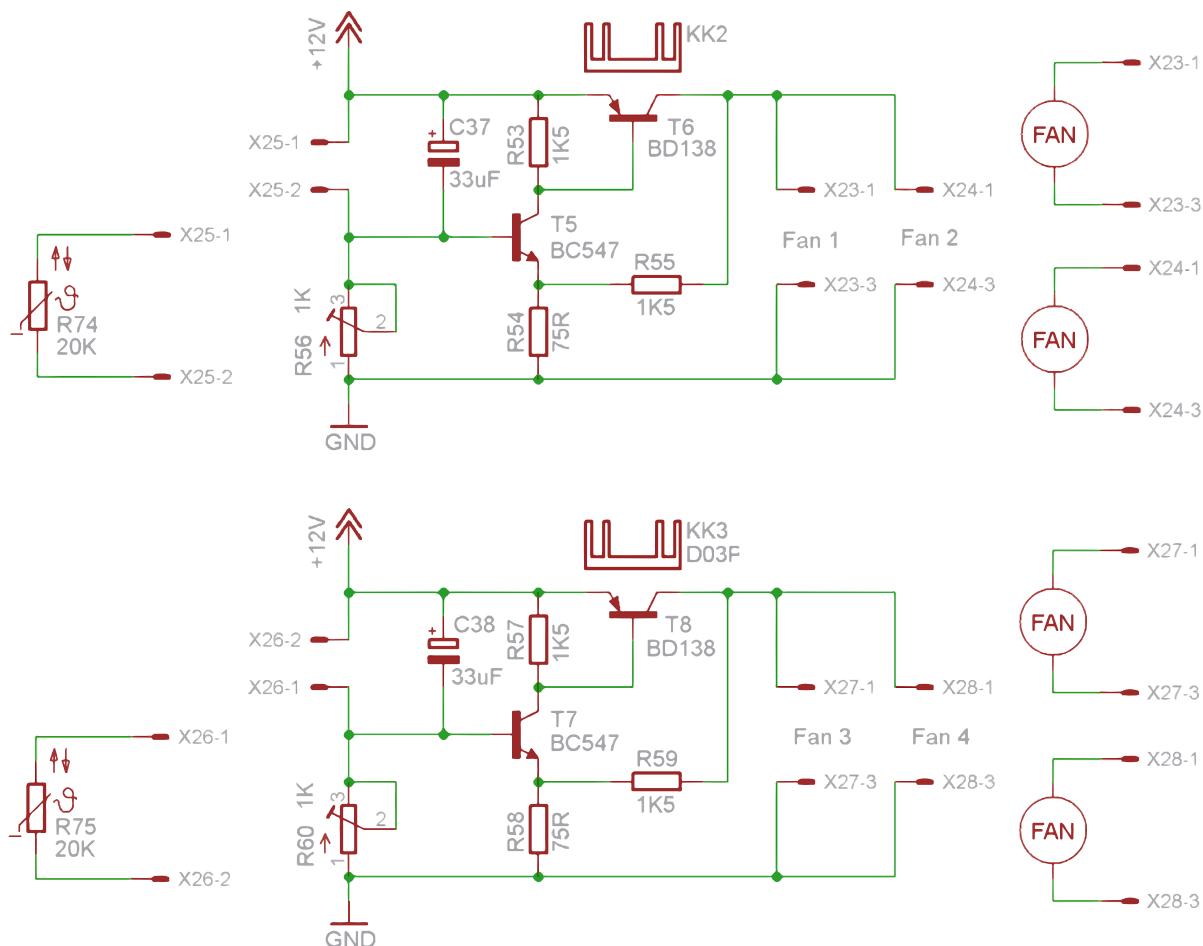
Obrázek 30: Start-Stop ovládání

Obvod Start-Stop ovládání uvedený ve schématu na obrázku 30 se skládá ze tří ovládacích prvků a jednoho ovládaného – cívky relé. Sepnutí relé K1 na svorce X18 je podmíněno stisknutím tlačítka START na svorce X17 a zároveň sepnutím blokovacího tlačítka na svorce X19. Blokovací tlačítko je realizováno prostřednictvím spínacího kontaktu v zámku na klíček. Rozepnutý kontakt bezpečnostního zámku otevírá tranzistor T10 proudem do báze, který teče přes rezistor R64, a tím uzemňuje resetovací vstup RS klopného obvodu tvořeného hradly IC13C a IC13D. Dioda D51 slouží k ochraně báze tranzistoru. Kondenzátor C39 slouží k automatickému přizemnění resetovacího vstupu RS klopného obvodu při zapnutí napájení. Tím se vylučuje náhodný stav sepnutí relé při připojení napájení obvodu. Pokud je stisknuto START tlačítko, je vstup hradla IC13A uzemněn (log. 0), na výstupu invertoru IC13A je +12V (log. 1) – tedy na pinu č. 5 hradla NAND IC13B a na pinu č. 6 taktéž +12V (log. 1), poté na výstupu bude úroveň log. 0 a dojde k nastavení RS klopného obvodu tvořeného hradly NAND IC13C a IC13D. Tím je přiveden proud na bázi tranzistoru T9, který

3 Konstrukce Teslova transformátoru

je omezen rezistorem R63 a dojde k následnému sepnutí tranzistoru a tím i relé K1 na svorce X18. Dioda D50 slouží k omezení napěťových špiček při rozpínání cívky relé, která má především induktivní charakter.

3.3.4 Regulace ventilátorů



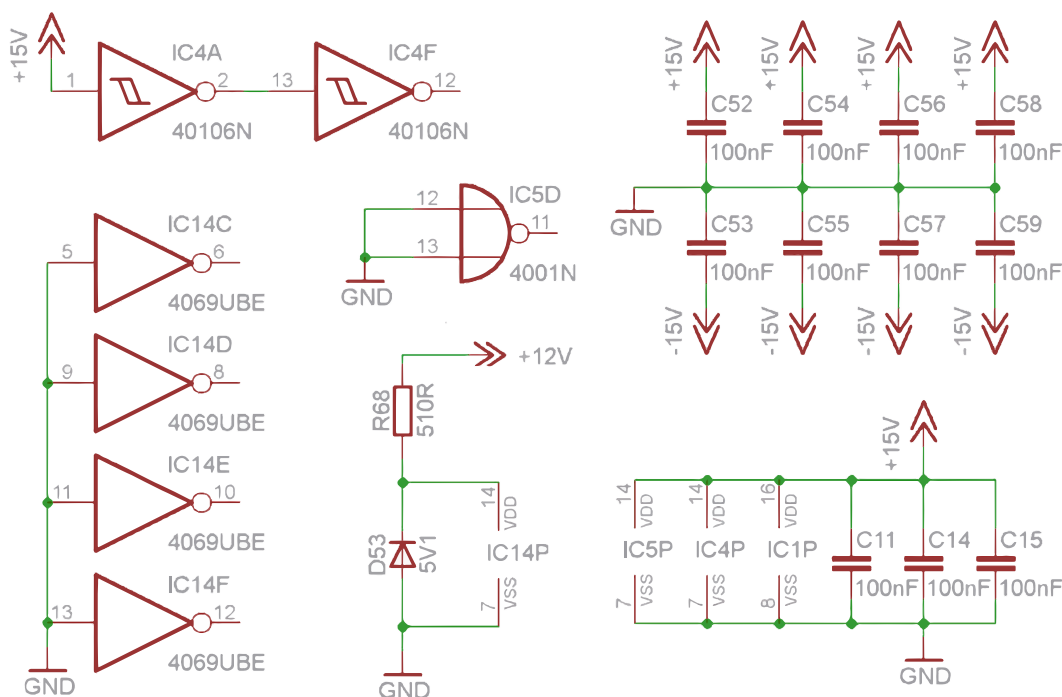
Obrázek 31: Regulace ventilátorů

Chlazení celého zařízení je zajištěno pomocí několika duralových žebrovaných chladičů. Nejvíce namáhané polovodičové součástky je potřeba chladit intenzivněji pomocí aktivního chlazení s využitím ventilátorů. Ve schématu na obrázku 31 je uveden regulační obvod pro regulaci ventilátorů v závislosti na teplotě. Obě schémata jsou identická, proto bude popisováno pouze horní schéma. Regulace DC ventilátoru je zajištěna změnou napětí na ventilátoru přotevřením, respektive přizavřením, tranzistoru T6, který pracuje v lineárním režimu a musí být umístěn na chladič. Termistor R74 s negativní teplotní závislostí a trimr R56 tvoří napěťový dělič, který určuje klidový proud tekoucí do báze tranzistoru T5. Nastavením trimru je možno nastavit optimální otáčky ventilátoru při pokojové teplotě. Při zvyšování teploty a ohřívání NTC termistoru R74 se odpor termistoru snižuje a roste

3 Konstrukce Teslova transformátoru

proud do báze tranzistoru T5 a tím nepřímo i otáčky ventilátoru. Otevírání tranzistoru T5 způsobí částečné přizemnění báze tranzistoru T6 a tím i přotevření PNP tranzistoru T6. Kondenzátor C37 slouží při zapnutí ke krátkodobému „zkratu“ termistoru, otevření obou tranzistorů a tím i počáteční vyšší proud do ventilátorů pro jejich bezproblémové roztočení. Trimr je nastaven tak, aby při pokojové teplotě došlo vždy k roztočení ventilátoru, při vzrůstající teplotě poté otáčky ventilátoru postupně rostou. Ventilátory jsou zapojeny 2 paralelně na stejnosměrné napájení 12 V, s průměrem lopatek 60 mm a maximálním odebraným proudem každého ventilátoru 0,15 A. Jedna dvojice ventilátorů je určena pro chlazení výkonového měniče (podrobněji popsáno v 3.4.2) a druhá dvojice pro chlazení výkonových budičů TC4422 (podrobněji popsáno v 3.2.3) a tranzistoru Q9 (popsáno v 3.3.2).

3.3.5 Ostatní pomocné obvody



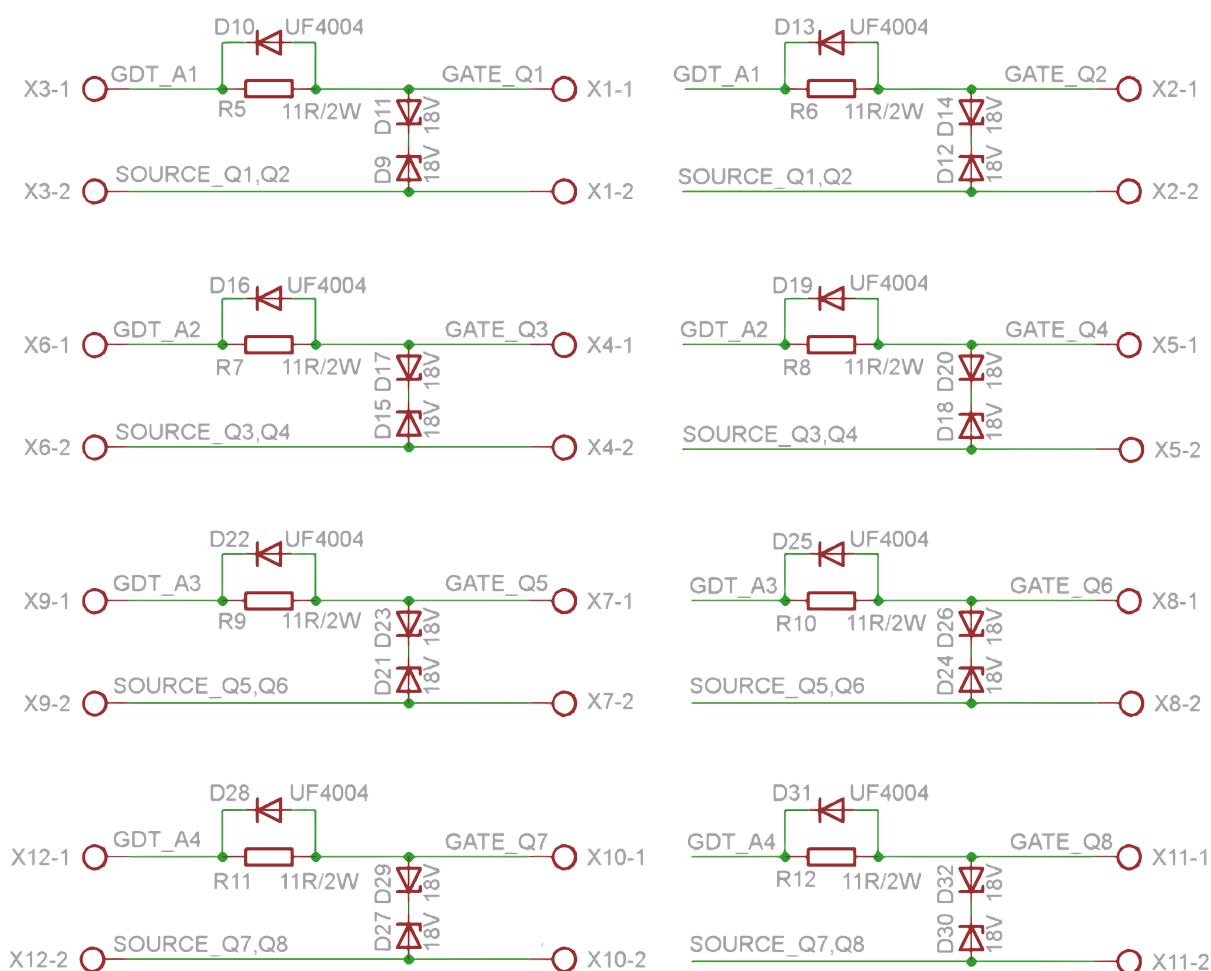
Obrázek 32: Ostatní pomocné obvody

Na obrázku 32 jsou pro úplnost schémat zakreslena nevyužitá hradla integrovaných obvodů, stabilizátor se Zenerovo diodou pro obvod CD4069UBE (použitý v 3.2.8), napájení použitých logických obvodů a jejich blokovací kondenzátory a blokovací kondenzátory operačních zesilovačů.

3 Konstrukce Teslova transformátoru

3.4 Výkonová část

3.4.1 Ochranné obvody buzení

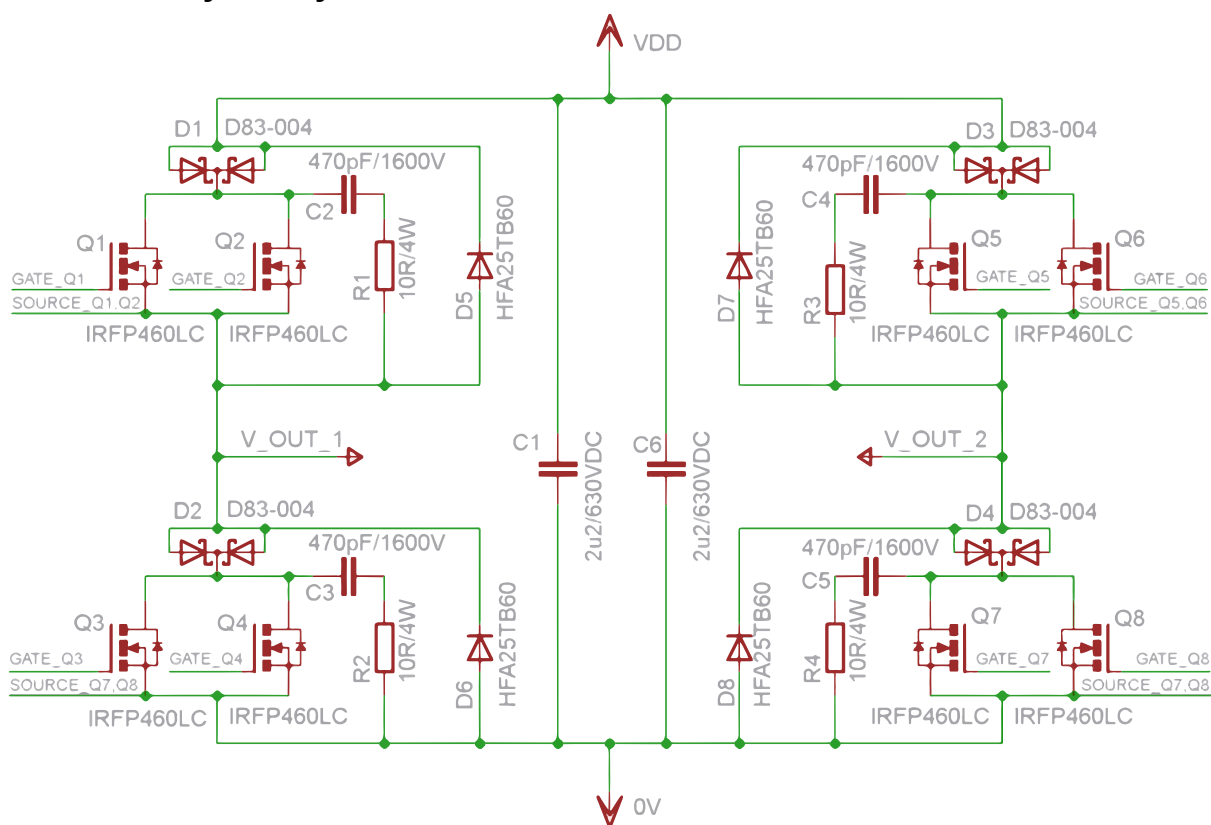


Obrázek 33: Ochranné obvody buzení

Ve schématu na obrázku 33 jsou uvedeny tvarovací obvody pro řízení tranzistorů MOSFET. Signál z budicího feritového transformátoru (podrobněji popsáno v 3.2.3) je veden přes rezistor R5 na hradlo MOSFET tranzistoru (tranzistory jsou popsány v 3.4.2). Když je na svorce X3-1 kladné napětí, dioda D10 je polarizována v závěrném směru a dochází k nabíjení hradla výkonového MOSFET tranzistoru. Po přepólování napětí na sekundární straně budicího transformátoru je na svorce X3-1 záporné napětí a náboj z hradla MOSFET tranzistoru je rychleji odčerpáván nyní propustně polarizovanou diodou D10, než je tomu při nabíjení hradla. Zenerovy diody D11 a D15 zapojené antiparalelně chrání hradlo MOSFET tranzistoru proti přepětí. Velikost napětí ořezu signálu je rovna přibližně 18,6 V. Sčítá se zde velikost Zenerova napětí 18 V a úbytku druhé Zenerovy diody v propustném směru. U ostatních 7 tranzistorů jsou obvody identické.

3 Konstrukce Teslova transformátoru

3.4.2 Výkonový měnič



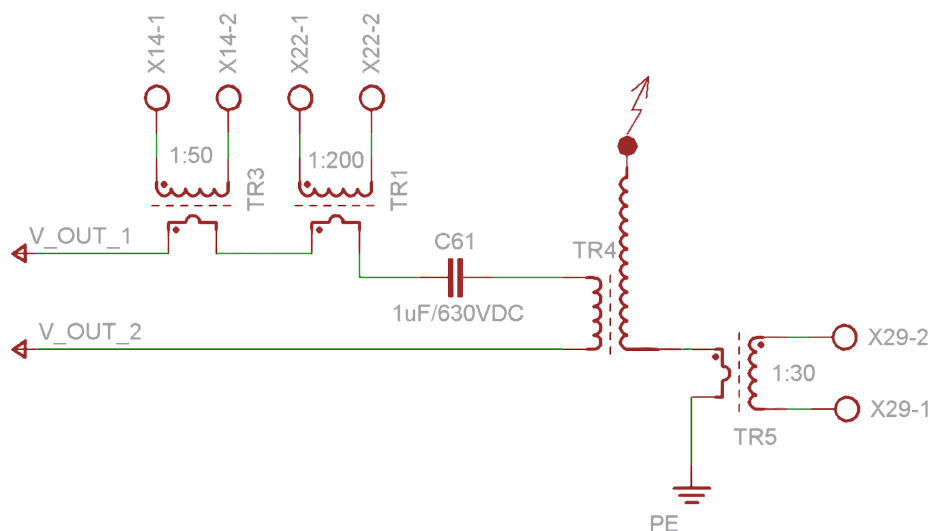
Obrázek 34: Výkonový měnič

Hlavním obvodem pro přenos energie do Teslova transformátoru je výkonový měnič. Jeho schéma je uvedeno na obrázku 34. Jedná se o plný můstek (H-bridge), kde jednotlivé tranzistory jsou pro proudové posílení řazeny 2 paralelně. Vždy střídavě spínají tranzistory Q1+Q2+Q7+Q8 s tranzistory Q3+Q4+Q5+Q6. Nikdy nesmí dojít k sepnutí tranzistorů pod sebou, jinak by došlo (v případě tvrdého napájecího zdroje - tedy i v tomto případě) k destrukci měniče. O správné řízení se stará obvod pro dead time, budicí obvody, oddělovací budicí transformátor a ochranné obvody MOSFET tranzistorů (podrobněji popsány v 3.2.2 a 3.2.3). Jelikož použité tranzistory IRFP460LC mají pomalejší zpětné diody, je v tomto zapojení těmto diodám znemožněno se otevřít. O to se starají Schottkyho diody D1-D4, které sice zvýší součet celkového napětí v sepnutém stavu na tranzistorech + Schottkyho diodách, ale tím přeberou rychlejší diody nyní s nižším prahovým napětím D5-D8 funkci zpětných diod tranzistorů Q1-Q8. Žádné tranzistory se ovšem neuzavírají okamžitě, jejich rychlému zavření navíc brání i parazitní Millerova kapacita mezi gatem a drainem. Příliš velká strmost du/dt způsobuje díky Millerově kapacitě velký zpětný proud do gatu a vzniká tendence částečné pootevření MOSFETu v době, kdy má bezpečně přejít do nevodivého stavu a tím dochází k nárůstu špičkové tepelné ztráty tranzistoru. Pro omezení rychlosti nárůstu du/dt

3 Konstrukce Teslova transformátoru

mezi drainem a sourcem v čase, kdy tranzistor přechází z vodivého stavu do nevodivého, se starají ochranné RC snubbery. Ty jsou tvořeny rezistory R1-R4 a kondenzátory C2-C5. Díky těmto RC snubberům dochází k mnohem pomalejšímu nárůstu napětí mezi drainem a sourcem v obvodě, než by tomu bylo u samotného tranzistoru MOSFET bez ochrany při přechodu z vodivého do nevodivého stavu. Díky tomu jsou tranzistory MOSFET zcela uzavřeny v době, kdy je na přechodu mezi drainem a sourcem pouze zlomek napětí, než při uzavřeném tranzistoru. Hodnoty součástek byly zvoleny experimentálně. Kondenzátory musí mít vysokou impulsní odolnost a nejlépe v bezindukčním provedení. Rezistory byly použity metaloxidové. Další nepostradatelnou součástí jsou kondenzátorové snubbery na napájení celého můstku. Tyto kondenzátory také slouží k omezení nárůstu du/dt a stejně jako RC snubbery musí být umístěny co nejbližší k MOSFET tranzistorům. Kondenzátory C1 a C6 byly zvoleny svitkové WIMA MKS4. Výstup tranzistorového můstku je vyveden na svorky V_OUT_1 a V_OUT_2.

3.4.3 Zapojení Teslova transformátoru



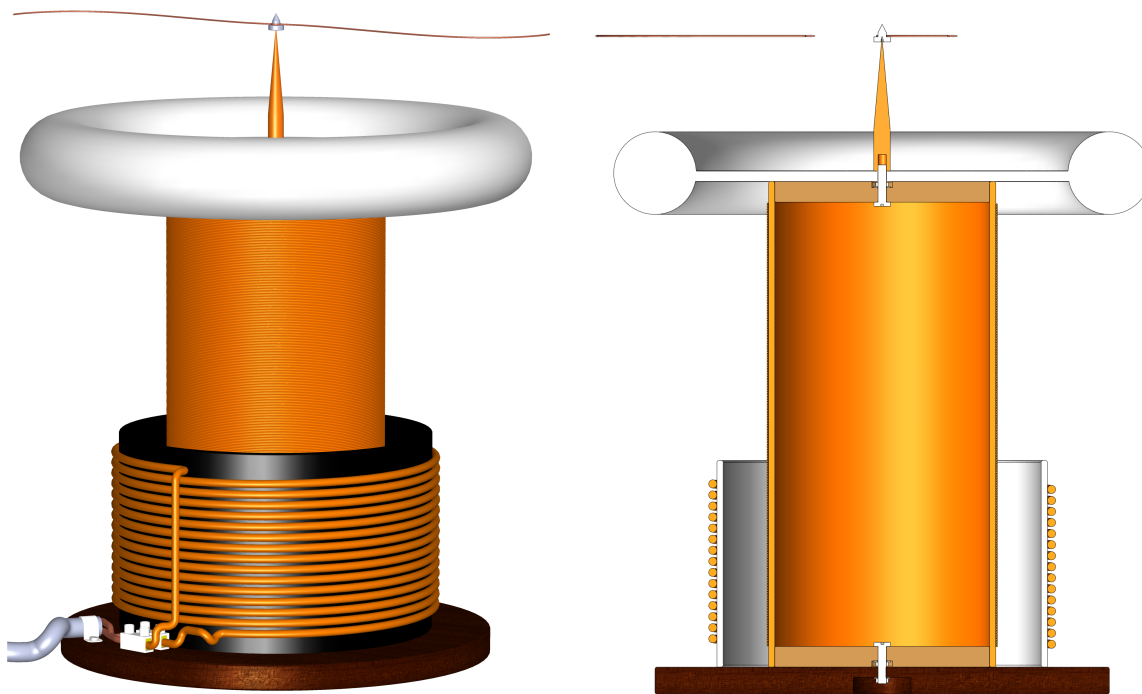
Obrázek 35: Zapojení Teslova transformátoru

Teslův transformátor je napájen z výkonového tranzistorového můstku. Schéma výkonové části za měničem je uvedeno ve schématu na obrázku 35. V sérii s výkonovým můstkem a primárním vinutím Teslova transformátoru jsou umístěny 2 proudové měřicí transformátory. Proudové transformátorky jsou navinuty na feritovém prstencovém jádře a navlečeny na jednom z vodičů z výkonového můstku, tímto provlečením se vytvoří jeden závit. Sekundární vinutí prvního proudového transformátoru TR3 tvoří 50 závitů

3 Konstrukce Teslova transformátoru

na prstencovém jádře o průměru 18 mm, následně je toto vinutí připojeno na svorku X14, která je spojena s proudovou ochranou (podrobněji popsanou v 3.2.4). Sekundární vinutí druhého proudového transformátoru tvoří 200 závitů na prstencovém feritovém jádře o průměru 18 mm. Toto sekundární vinutí je připojeno na konektor X22, který je připojen do proudového omezení pro plynulou regulaci výstupního proudu (podrobněji popsanou v 3.2.5). V sérii s primárním vinutím Teslova transformátoru TR3 je též kondenzátor C61, který slouží pouze k oddělení případné stejnosměrné složky. Jeho kapacita je zvolena tak, aby nedocházelo k sériové rezonanci s primárním vinutím Teslova transformátoru a aby svou kapacitní reaktancí příliš neomezoval proud ve výkonovém obvodu. Konstrukce primárního a sekundárního vinutí Teslova transformátoru TR4 je popsána v 3.5.1. Pod sekundárním vinutím je umístěn třetí proudový měřicí transformátor TR5 na feritovém prstencovém jádře o průměru 18 mm, který snímá fázový posuv sekundárního vinutí Teslova transformátoru TR4 a slouží tak jako zpětná vazba pro obvod fázového závěsu obvodu IC1 - CD4046 (podrobněji popsáno v 3.2.1). Sekundární vinutí Teslova transformátoru musí být uzemněno k vodiči PE v TN-S síti, případně PEN v TN-C síti. Je možné sekundární vinutí uzemnit s větším uzemněným předmětem např. k ústřednímu topení a podobně.

3 Konstrukce Teslova transformátoru

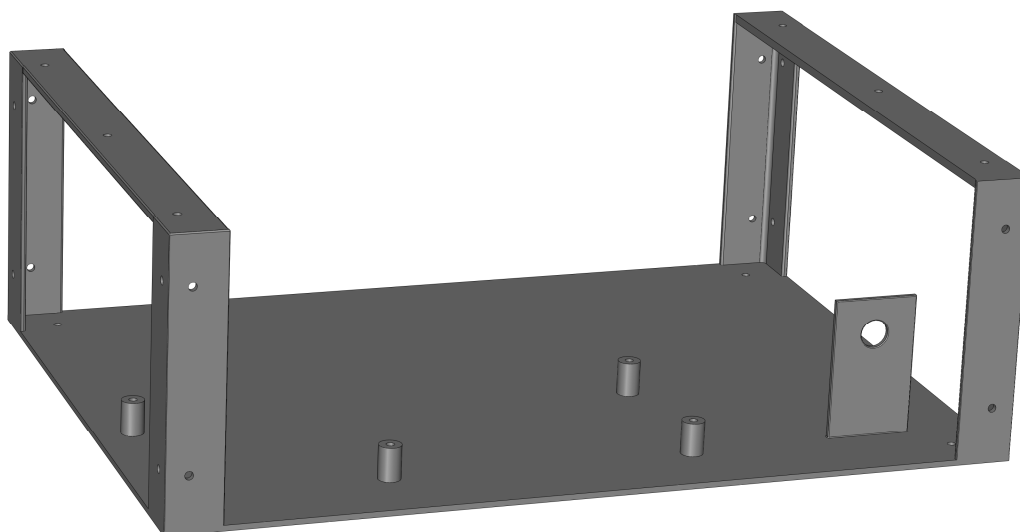
3.5 Mechanická konstrukce**3.5.1 Zhotovení primární a sekundární cívky**

Obrázek 36: Nákres primární a sekundární cívky

Na obrázku 36 je znázorněn PC model konstrukce Teslova transformátoru nakreslený v programu Solidworks 2010. Primární vinutí je navinuto 15 závitů měděného drátu průřezu $2,5 \text{ mm}^2$ na novodurové trubce o průměru 160 mm délky 100 mm. Vinutí je navinuto v jedné vrstvě a je roztaženo na délku 80 mm. Jeho konce jsou upevněny do svorkovnice, která je spojuje s přívodním třížilovým vodičem. Sekundární vinutí je navinuto 637 závitů průměru 0,3 mm na novodurové trubce o průměru 110 mm délky 240 mm. Samotné vinutí má délku 225 mm. Na celé sekundární vinutí je pro lepší elektrickou a mechanickou odolnost nanášeno 8 vrstev dvousložkového akrylátového laku. Na vrchu sekundární cívky bude v reálné konstrukci místo toroidu kvůli snazší mechanické výrobě umístěn hliníkový plech o průměru 220 mm tloušťky 4 mm se zaoblenými hranami kvůli eliminaci sršení korony z ostrých hran. Hliníkový plech na vrchu sekundární cívky zvětšuje kapacitu LC rezonančního obvodu a tím snižuje rezonanční frekvenci sekundárního vinutí. S výše popsanými parametry odpovídá rezonanční frekvence sekundárního vinutí Teslova transformátoru přibližně 379 kHz. Obě cívky jsou upevněny k podkladní dřevěné desce o průměru 220 mm tloušťky 10 mm.

3 Konstrukce Teslova transformátoru

3.5.2 Zhotovení kovové skříně zařízení



Obrázek 37: Nákres základní konstrukce

Základna skříně pro elektroniku je znázorněna na obrázku 37 a je zhotovena z plechu tloušťky 1,5 mm o rozměrech 300x220 mm, na který jsou v rozích přivařeny tenkostěnné otevřené profily typu L o rozměrech 15x15 mm tloušťky 2 mm a délky 100 mm. Ty jsou pro lepší mechanickou odolnost na vrchní straně spojeny plocháči 15x2 mm délky 220 mm. Uvnitř schránky jsou dále přivařeny válečky pro uchycení plošných spojů a přivařen plocháč pro upevnění hlavního elektrolytického kondenzátoru C46. Ostatní prvky jsou k této základní konstrukci šroubované. Rozměry celé kovové skříně jsou tedy 300x220x100 mm. Na následujícím obrázku 38 je uveden nákres předního ovládacího panelu.

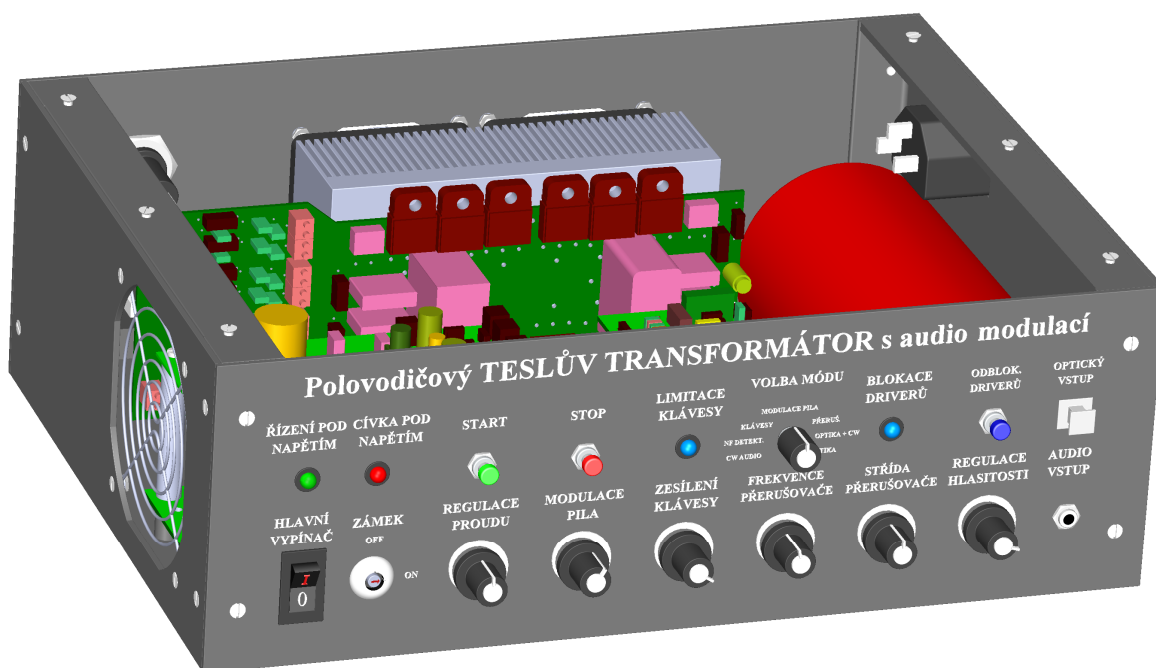


Obrázek 38: Nákres předního panelu

Většina nastavovacích prvků je umístěna na předním panelu skříně zařízení. Hlavní vypínač, zámek pro odblokování, audio vstup, optický vstup, START a STOP ovládání, tlačítko odblokování a indikace zablokování driverů, indikace limitace audiosignálu v módu klávesy, hlavní přepínač všech módů modulace, indikace Teslova transformátoru

3 Konstrukce Teslova transformátoru

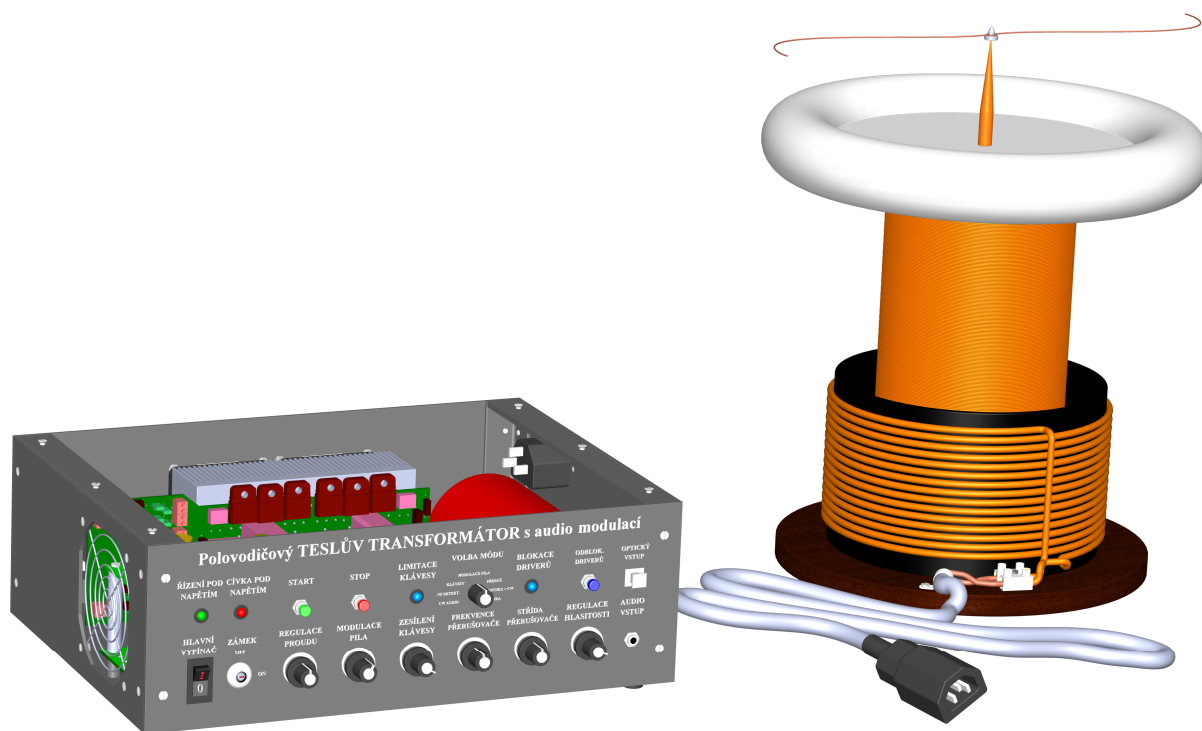
pod napětím, indikace řízení pod napětím a také šestice potenciometrů pro regulaci proudu, modulace pily, zesílení audiosignálu při módu klávesy, regulace střída a frekvence při módu obdélníkového přerušovače a regulace hlasitosti vstupního audiosignálu. Ostatní nastavovací prvky jsou umístěny na pravém boku skříně. Těmi jsou hloubka modulace, negace optického vstupu, vypínač zámku fázového závěsu a indikace uzamčeného fázového závěsu. Na obrázku 39 je pro úplnost vyobrazeno předpokládané umístění hlavních prvků v kovové skříně.



Obrázek 39: Náskres konstrukce řízení

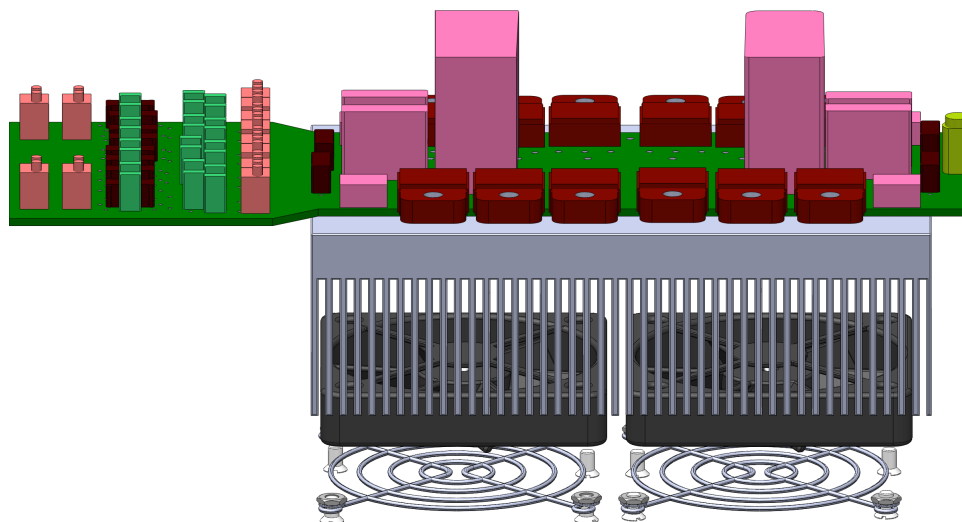
Předběžný náskres konstrukce v programu Solidworks 2010 je pouze orientační a slouží k uvědomění si rozměrů jednotlivých součástí a estetickému rozvržení. Je zde vidět přední panel, uvnitř výkonový měnič, hlavní filtrační kondenzátor, část řídicích obvodů a konektorů. Všechny boční stěny jsou k základní konstrukci přišroubovány zapuštěnými šrouby M3, taktéž mřížky ventilátorů k zadní a levé stěně. Přívodní napájecí konektor se nalézá na zadní stěně a výstup z měniče do Teslova transformátoru v zadní části na pravé stěně. Na obrázku 40 je znázorněna celá konstrukce – tedy vlastní náskres primární i sekundární cívky společně s nákresem konstrukce řízení.

3 Konstrukce Tesla transformátoru



Obrázek 40: Nákres celé konstrukce

3.5.3 Zhotovení desek plošných spojů

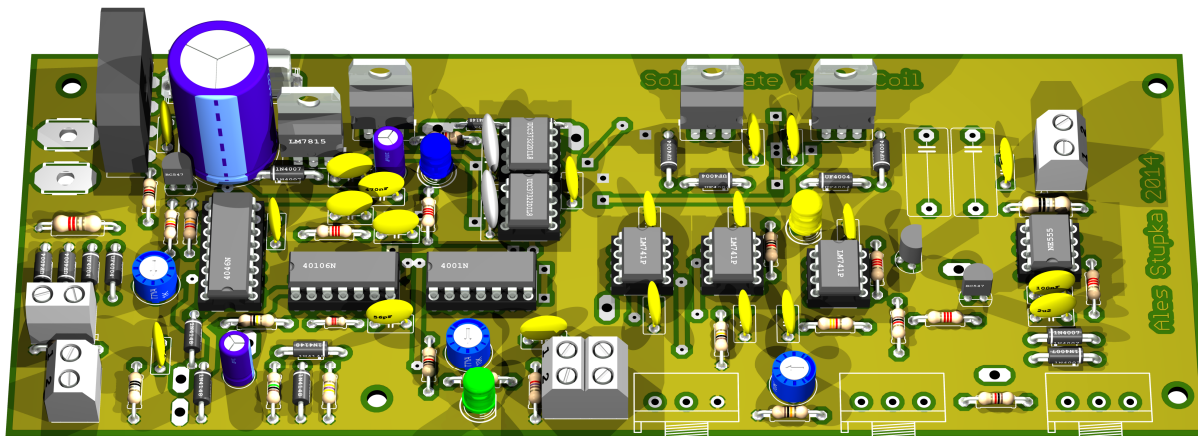


Obrázek 41: Nákres výkonového měniče

Obvod výkonového měniče je uveden na obrázku 41. Obvod je navržen na jednostranné desce plošných spojů o rozměrech 200x70 mm. Na této desce je umístěn výkonový měnič, ochranné obvody tranzistorů MOSFET a také oddělovací budicí transformátor. Výkonové tranzistory jsou přišroubovány šrouby M3 k duralovému žebrovanému chladiči o rozměrech 130x80x38 mm. Mezi tranzistory a chladičem jsou umístěny izolační podložky

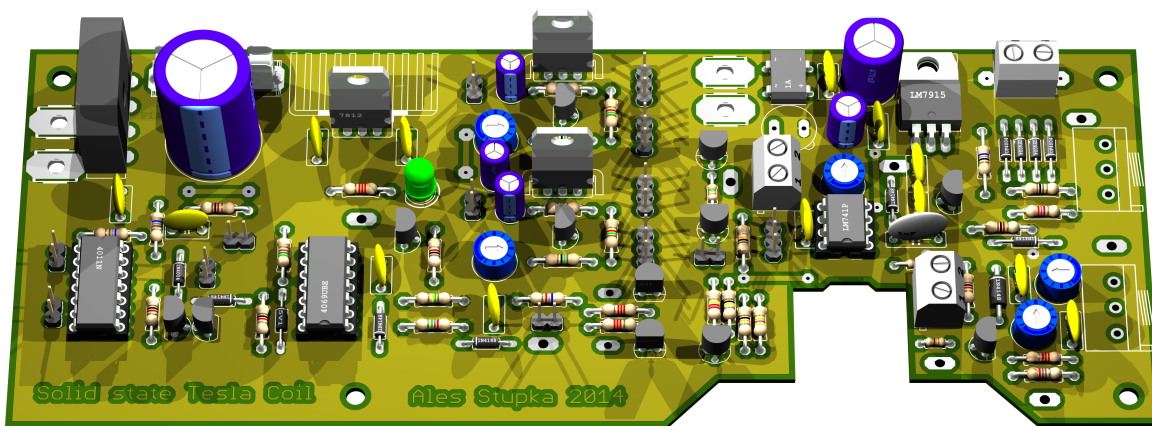
3 Konstrukce Teslova transformátoru

s teplovodivou pastou. O aktivní chlazení se stará dvojice ventilátorů o průměru lopatek 60 mm, které vhání vzduch na žebra chladiče. Vniku cizích předmětů brání ochranné mřížky před ventilátory umístěné na zadní stěně kovové skříně. Nasávaný vzduch uvnitř skříně proudí ven kovovou mřížkou pro ventilátor průměru 80 mm na levém boku skříně.



Obrázek 42: Návrh desky plošného spoje řídicí elektroniky

Deska řídicí elektroniky je zhotovena na dvoustranné desce plošných spojů. Na obrázku 42 je znázorněn vyrenderovaný model desky plošných spojů z programu EAGLE. Většina vodivých cest je realizována na spodní straně bottom – na straně pájení. Vrchní strana slouží k realizaci propojek a převážně jako stínící vrstva proti rušení. Vylití mědi na obou stranách je vodivě spojeno se zemí GND. Na nákrese desky plošného spoje řídicí elektroniky se nachází hlavní řídicí obvody, obvod fázového závěsu CD4046, proudová ochrana, obvod pro dead time, budiče s enable vstupy budičů UCC37322 a výkonové budiče TC4422, dále obvod pro klávesy, obvod obdélníkového přerušovače a stabilizátor +15V. Některé součástky nejsou v nákrese korektně zobrazeny. Především potenciometry, 2 kondenzátory, konektor a chladič výkonových budičů a stabilizátoru +15V. Na následujícím obrázku 43 je znázorněn také model desky plošných spojů pomocných obvodů.



Obrázek 43: Návrh desky plošného spoje pomocných obvodů

4 Ověření funkce Teslova transformátoru

Deska pomocných obvodů je realizována obdobně jako deska řídicí elektroniky na dvoustranné desce plošného spoje. Na nákresu desky plošného spoje pomocných obvodů se nachází stabilizátory +12V, -15V, obvod Start-Stop ovládání, obvod NF detektoru, obvody pro regulaci ventilátorů, audio předzesilovač, proudové omezení, obvod modulace pily a obvod pro optický přerušovač. V tomto nákresu nejsou opět korektně zobrazeny všechny součástky. Především napájecí konektory, 2 potenciometry, pojistka a 3 menší chladiče.

Všechny desky plošných spojů jsou navrženy s ohledem pro montáž THT součástek. Jednak pro snadnou amatérskou výrobu desek plošných spojů, osazování, pájení, ale především pro snadnou opravitelnost, modifikovatelnost a diagnostiku.

4 Ověření funkce Teslova transformátoru

4 Ověření funkce Teslova transformátoru

4.1 Oživení zařízení



Obrázek 44: Fotografie praktické realizace Teslova transformátoru v chodu (CW režim)

Na obrázku 44 je uvedena fotografie vlastní praktické realizace Teslova Transformátoru s audio modulací. Ověření funkce jednotlivých obvodů řízení probíhalo postupně již v průběhu návrhu obvodů na nepájivém poli. Byla ověřena funkčnost navržených obvodů řízení, fázového závěsu, obvodů pro zpoždění, budičů, ovládacích obvodů, soft startu, pomocných stabilizátorů, obvodů pro různé modulace a audio předzesilovače. Poté byl vyroben výkonový měnič a také zmenšený model Teslova transformátoru, na kterém byly otestovány zpětnovazební obvody fázového závěsu a principiálně také proudové ochranné vazby. Tento zkušební transformátor s výškou pouhých 12 cm byl naladěn na rezonanční frekvenci 1 MHz a musel pro něj být zhotoven i jiný tranzistorový měnič s rychlejšími MOSFET tranzistory. Fotografie zkušebního Teslova transformátoru je uvedena na obrázku 45.



Obrázek 45: Zkušební Teslův transformátor

4 Ověření funkce Teslova transformátoru

Po bezproblémovém chodu všech dílčích obvodů byly navrženy desky plošných spojů popsaných v kapitole 3.5.3 s ohledem na předpokládané rozměry kovové skříně pro všechny řídicí a spínací obvody. Pro řídicí a ovládací obvody byly vyčleněny 2 desky plošných spojů umístěných nad sebou a spojených distančními sloupky. Tyto desky byly opět po jednotlivých částech odzkoušeny. Poté byla již zhotovena kovová skříň podrobněji popsána v kapitole 3.5.2 a do ní byly umístěny plošné spoje, výkonový měnič, pomocný síťový transformátor, síťový filtr, usměrňovač, hlavní filtrační kondenzátor, ventilátory a ovládací prvky a všechny ostatní komponenty. Nakonec byla také zhotovena i finální primární a sekundární cívka Teslova transformátoru, jež je podrobněji popsána v kapitole 3.5.1.

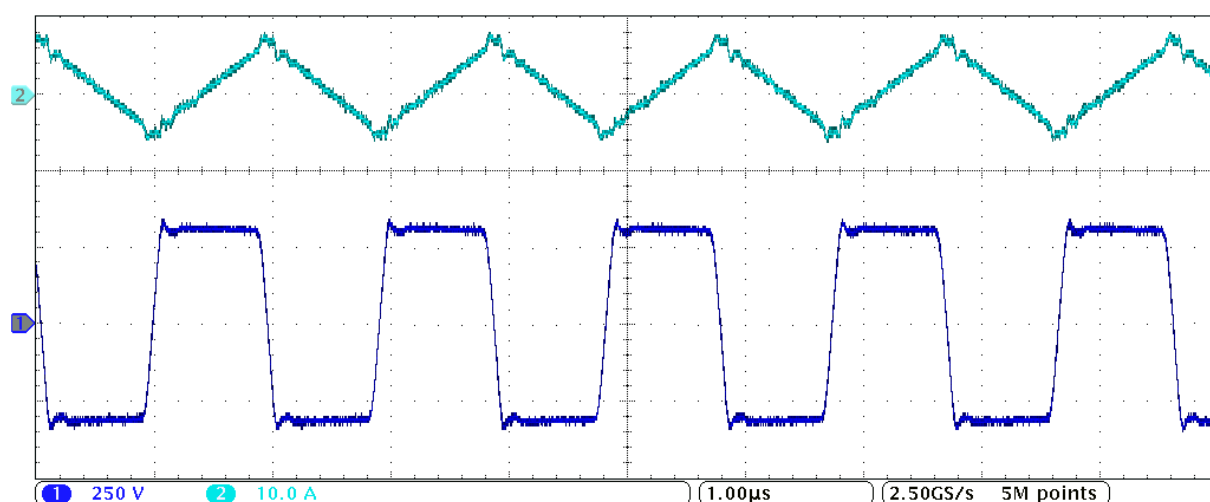
Oživování celého zařízení probíhalo s pomocí regulačního autotransformátoru (variaku), ze kterého bylo přiváděno napětí na výkonový měnič. Napájení pomocného transformátoru, který napájí veškerou elektroniku, bylo realizováno přímým připojením na elektrickou síť. Za současného přidávání napětí pomocí variaku a tím i zvyšování výkonu do měniče, kontroly odebíraného proudu z výkonového můstkového měniče, kontroly překmitů na tranzistorech, průběhů napětí na gatech tranzistorů pomocí osciloskopu, bylo zařízení úspěšně odzkoušeno. Taktéž byly sledovány teploty všech kritických, především výkonových, obvodů. Po doladění všech obvodů a impedančním přizpůsobení primární cívky pro optimální odebíraný proud měničem, bylo celé zařízení rozebráno, nabarveno a opět sesazeno. Všechny vodiče byly zkráceny přesně na míru a zkrouceny pro potlačení případného VF rušení.

4 Ověření funkce Teslova transformátoru

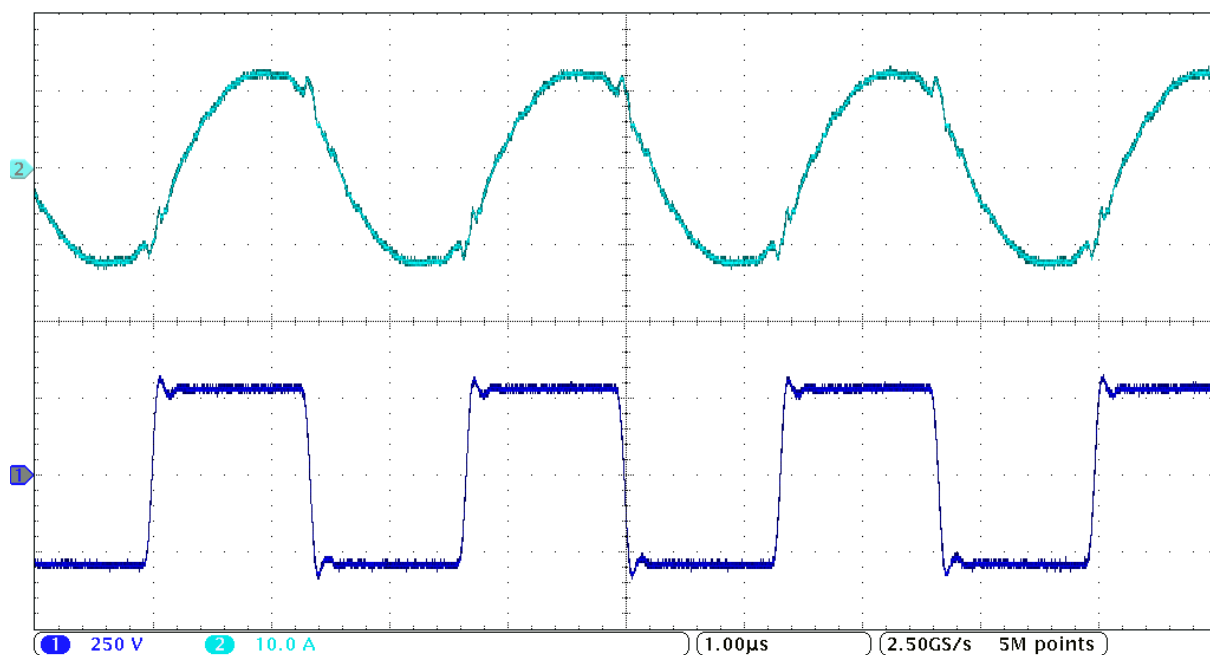
4.2 Kontrolní měření

4.2.1 Měření elektrických veličin

Kompletní zařízení bylo proměřeno ve školní laboratoři pomocí digitálního osciloskopu s diferenciálními napěťovými vstupy a proudovou sondou s Rogowského potenciometrem. Některé z vybraných modulačních módů jsou se stručným popisem zachyceny na následujících osmi oscilogramech s průběhy napětí na výstupu výkonového tranzistorového měniče (označené ①) a proudu tekoucího z výkonového měniče (označené ②). Na obrázku 46 je zachycen stav při rozladění v oblasti induktivní zátěže, na obrázku 47 režim při rezonanci a na obrázku 48 ukázka NF audio modulace.

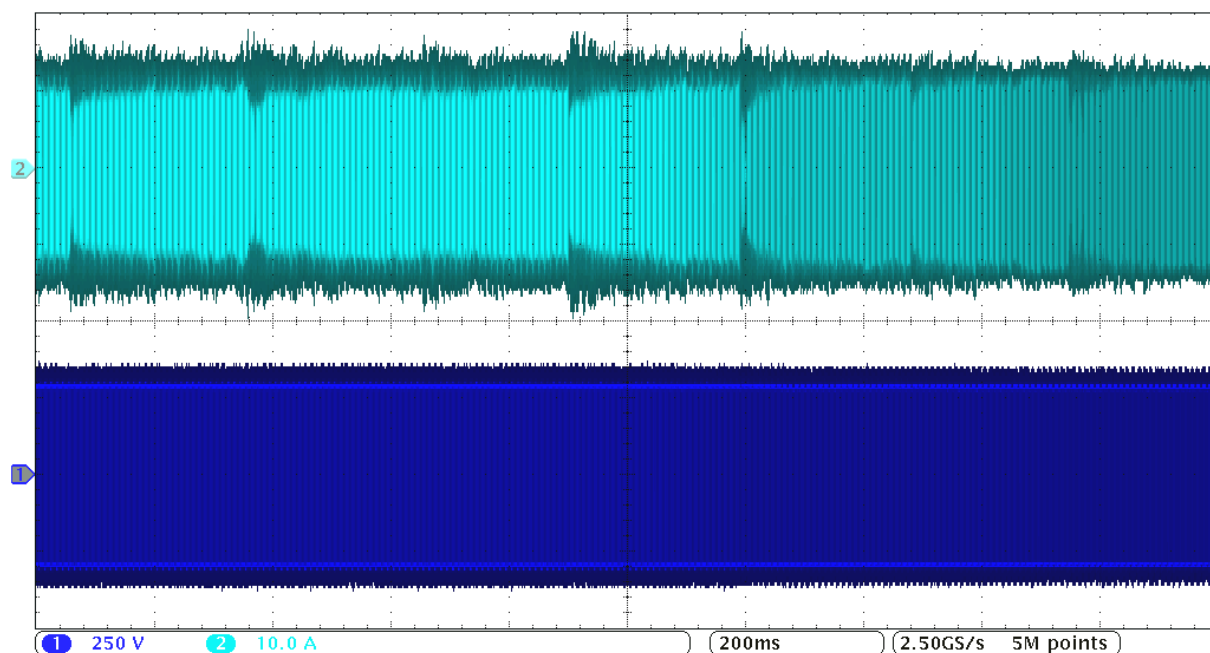


Obrázek 46: Rozladěný stav s maximální frekvencí v CW režimu, majoritní induktivní zátěž



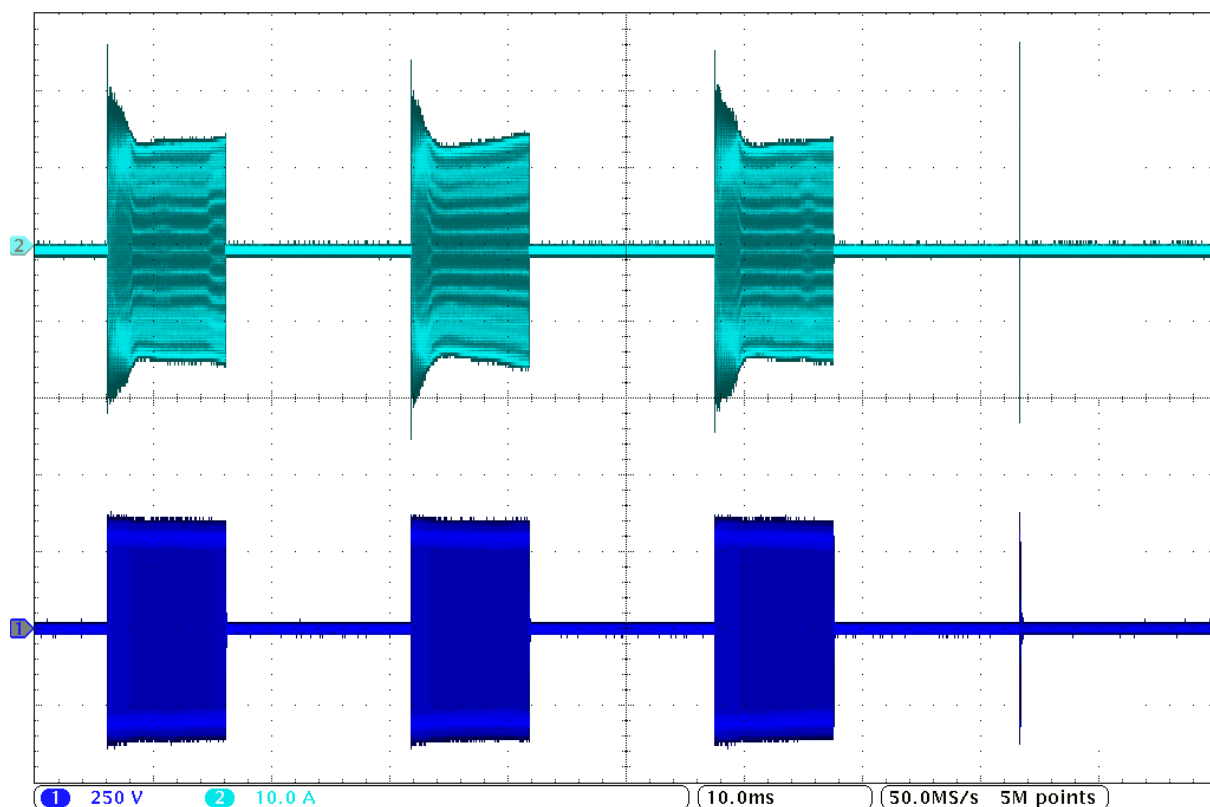
Obrázek 47: Naladěný stav bez fázového závěsu při maximálním proudu v CW režimu

4 Ověření funkce Teslova transformátoru



Obrázek 48: Ukázka modulace NF audiosignálem v CW režimu při maximálním proudu

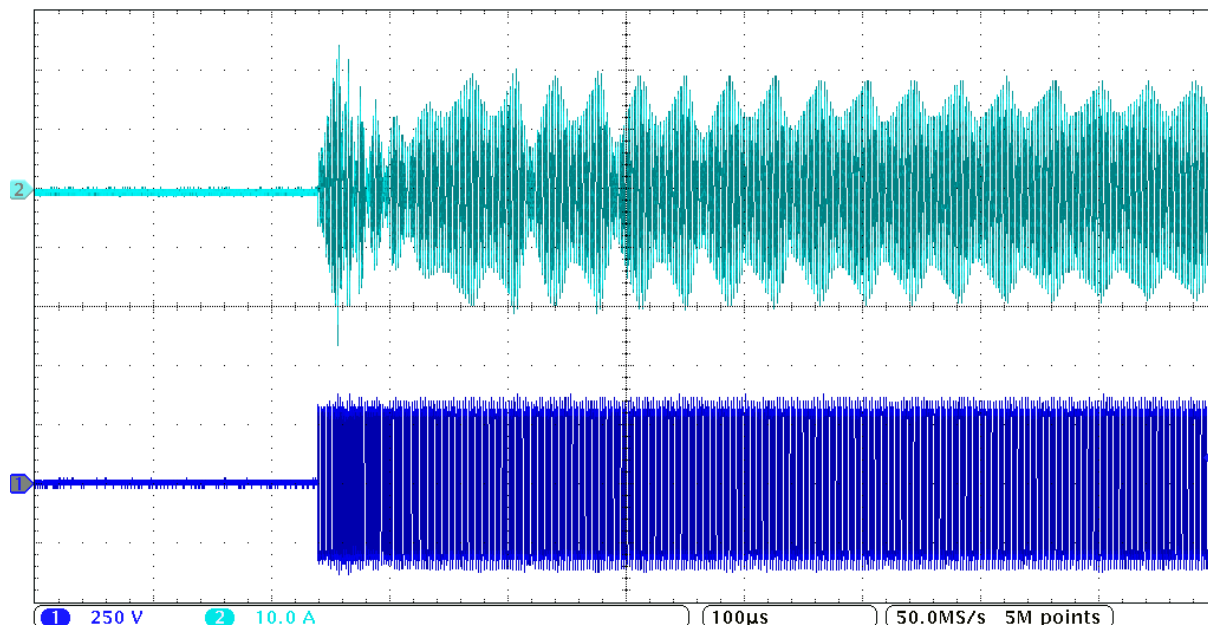
Dále je možno vidět na oscilogramu na obrázku 49 mód obdélníkového přerušovače, kdy je při čtvrtém obdélníkovém pulzu vidět vybavení nadproudové ochrany (podrobněji popsané v kapitole 3.2.4) při vrcholové hodnotě proudu téměř 26A (proudu z měniče).



Obrázek 49: Mód obdélníkového přerušovače s vybavením nadproudové ochrany

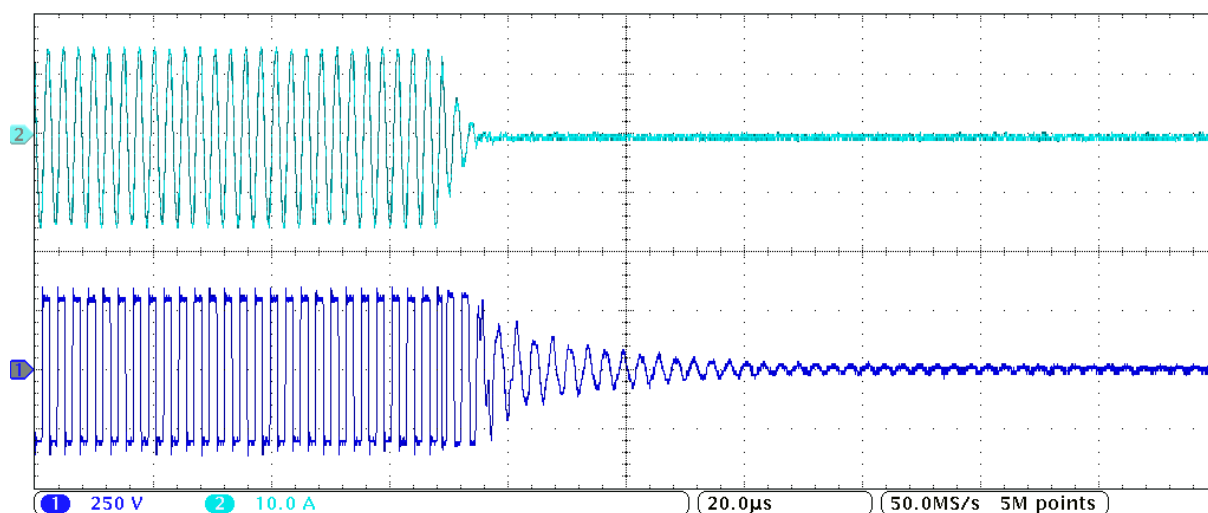
4 Ověření funkce Teslova transformátoru

Na následujícím oscilogramu na obrázku 50 je zobrazen náběh napětí a proudu tekoucího z měniče. U průběhu proudu je patrný překmit proudu na špičkovou hodnotu proudu až 24A způsoben tvrdým spínáním výkonových tranzistorů. Naopak žádný výraznější krátkodobý překmit napětí, díky blokovacím kondenzátorům na tranzistorovém můstku, patrný není. Maximální špičková hodnota napětí činí přibližně 350V.



Obrázek 50: Detailní přiblížení při zapnutí obdélníkového přerušovače

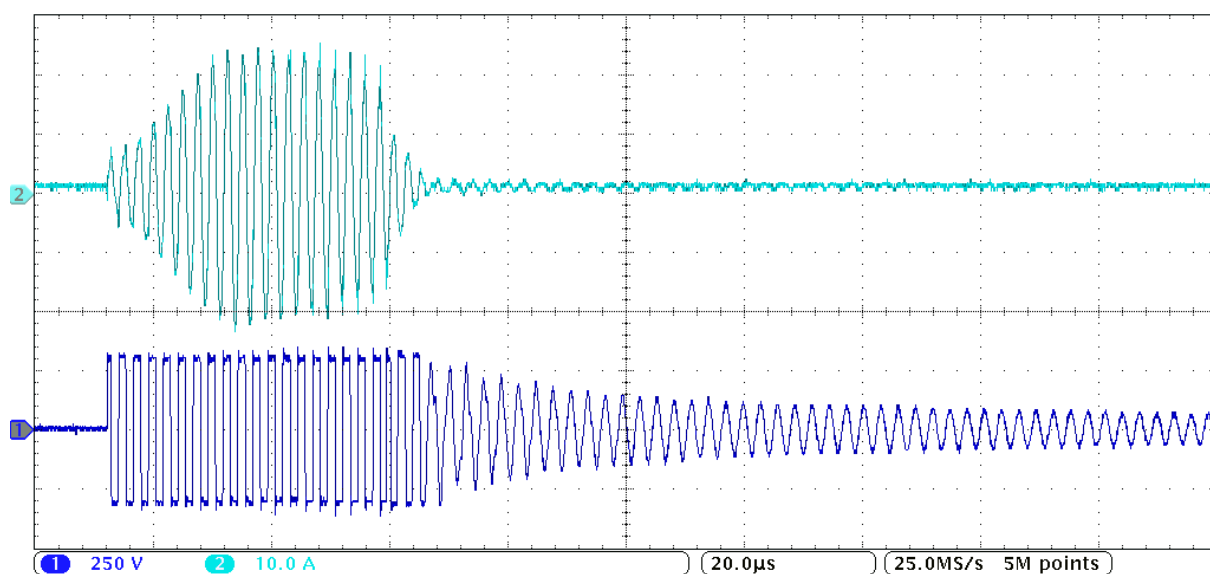
Na oscilogramu na obrázku 51 je zobrazeno detailní vypnutí v módu obdélníkového přerušovače.



Obrázek 51: Detailní přiblížení při vypnutí obdélníkového přerušovače

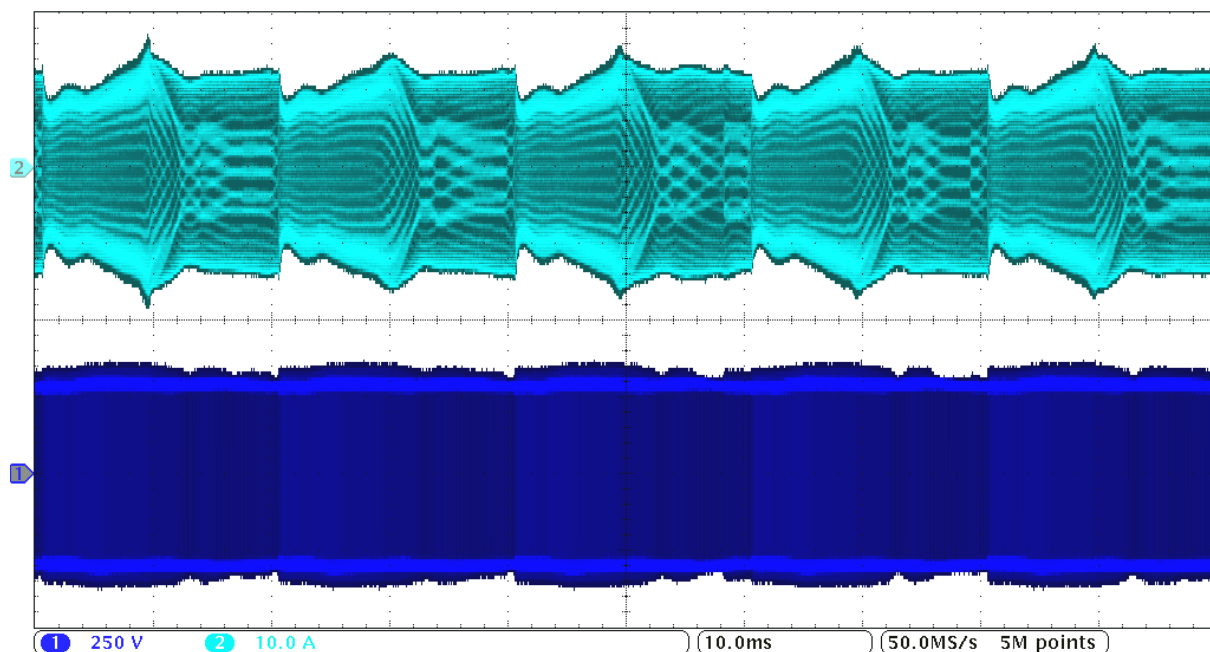
4 Ověření funkce Teslova transformátoru

Na obrázku 52 je pro úplnost zachyceno nucené vypnutí v módu obdélníkového přerušovače vlivem vybavení nadproudové ochrany. Po zapnutí začne růst proud primárním vinutím Teslova transformátoru, dokud nedosáhne vrcholové hodnoty proudu 26A, poté je obdélníkový přerušovač předčasně přerušen zablokováním výkonových budičů tranzistorů přizemněním jejich enable vstupů pomocí tyristoru k zemi. Proud společně s napětím na cívce primárního vinutí začne exponenciálně klesat.



Obrázek 52: Vypnutí v módu obdélníkového přerušovače vybavením nadproudové ochrany

Na posledním oscilogramu na obrázku 53 je zachycen poněkud zašuměný průběh při modulaci pilovitým signálem (podrobněji popsáno v kapitole 3.2.11) s periodou modulační pily přibližně 20ms.

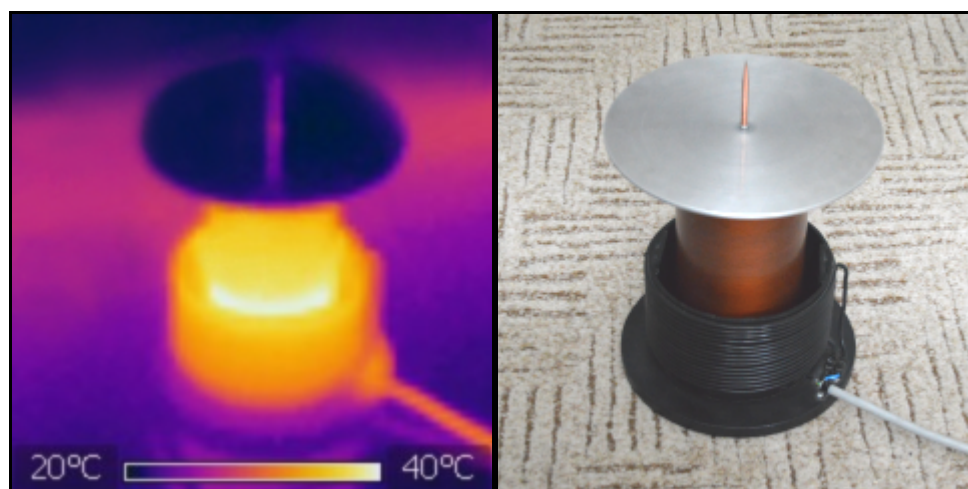


Obrázek 53: Modulace pilovitým signálem

4 Ověření funkce Teslova transformátoru

4.2.2 Měření neelektrických veličin

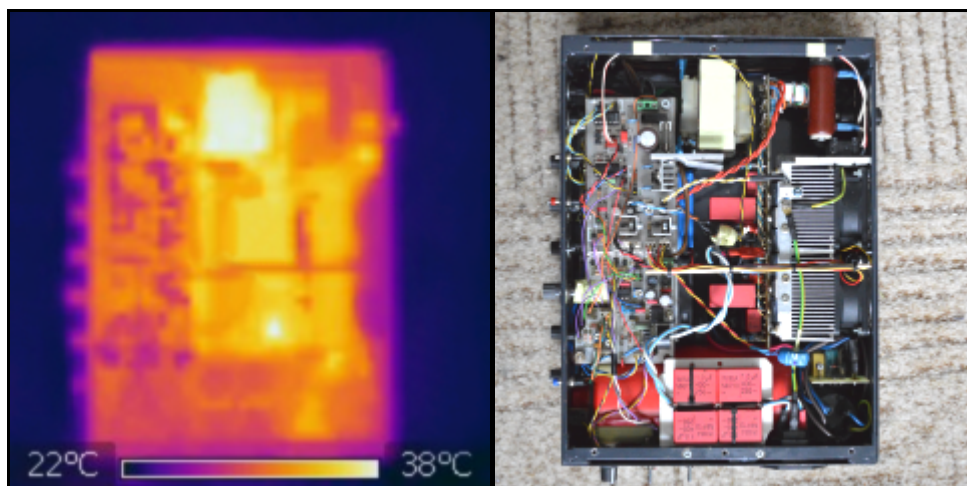
Po naměření průběhů napětí a proudů z výkonového měniče při různých modulacích byly pořízeny 2 fotografie termokamerou při vypnutém stavu Teslova transformátoru. Na obrázku 54 je zobrazen vlastní Teslův transformátor (primární a sekundární vinutí s přidavnou kapacitou na vrchu sekundárního vinutí). V levé části je vidět největší tepelné namáhání v oblasti sekundární cívky v místě pod primárním vinutím, kde dochází k největší transformaci energie do sekundárního vinutí a také k největším tepelným ztrátám. Právě exponenciálně stále rostoucí teplota sekundární cívky je u tohoto zařízení patrně jediným omezujícím faktorem pro dlouhodobý provoz. Po necelých pěti minutách nepřetržitého provozu při plném výkonu je tato teplota již na hranici měknutí či degradace PVC trubky, na které je sekundární vinutí navinuto. Taktéž je z fotografie patrné tepelné namáhání přívodního vodiče mezi výkonovým měničem a primární cívkou, kterou zejména při tvrdém spínání v režimu přerušovače tečou nemalé neharmonické složky výkonu. V pravé části je přiložena skutečná fotografie pro lepší názornost.



Obrázek 54: Snímek Teslova transformátoru zaznamenaný termokamerou (vlevo) + skutečná fotografie (vpravo)

4 Ověření funkce Teslova transformátoru

Na obrázku 55 je v levé části zaznamenané termokamerou znázorněna kovová skříň s veškerou řídicí elektronikou. Z fotografie je vidět, že chlazení všech součástek, výkonového tranzistorového měniče a výkonových budičů tranzistorů pomocí ventilátorů, je vyhovující a dostatečné. Nejteplejší prvek zde představuje pomocný síťový transformátor pro napájení všech řídicích a ovládacích obvodů s přijatelnou teplotou 38 °C. Přibližně obdobnou teplotu má také diodový usměrňovací jednofázový můstek umístěný na fotografii v dolní části, přibližně uprostřed.



Obrázek 55: Snímek kovové skříně zaznamenaný termokamerou (vlevo) + skutečná fotografie (vpravo)

5 Závěr

Podstatou této bakalářské práce bylo navrhnout funkční obvodové schéma, zhotovit vlastní Teslův transformátor, navrhnout mechanickou konstrukci a ověřit funkčnost celého zařízení. Všechny body zadání byly úspěšně splněny bez významnějších komplikací. V kapitole ověření funkce Teslova transformátoru byly ukázány elektrické průběhy při jednotlivých modulacích. Celé zařízení se podařilo oživit prakticky na první pokus. Odebíraný maximální příkon v módu audio modulace činí přibližně 2600 W, v módu obdélníkového přerušovače se střídou 1:1 odebírá 900 W a při modulaci pilovitým signálem 800 W. Spotřeba vlastní elektroniky je necelých 40 W. Délka výbojů v rezonanci, sršících do vzduchu při maximálním výkonu v módu audio modulace, dosahuje až 26 cm, při modulaci pilovitým signálem 34 cm a v režimu přerušovače s optimální střídou až 40 cm. Všechny údaje o délce výbojů byly odměřeny nepřímo z pořízených fotografií srovnáním s rozměry přídavného disku pro zvýšení kapacity na vrchu sekundárního vinutí. Maximální efektivní proud tekoucí sekundárním vinutím při vyladění je roven 680 mA, při uzemnění výboje teče tímto vodičem efektivní proud 85 mA. Dle nařízení vlády o ochraně zdraví před neionizujícím zářením ze dne 12.12.2007 [7] je stanovena referenční úroveň dotykového efektivního proudu pro frekvenci 380 kHz na 40 mA pro zaměstnance a 20 mA pro ostatní osoby. Tuto hodnotu dané zařízení více než 2x převyšuje. Pro frekvence nad 100 kHz by bylo vhodnější provést spíše měření na hodnotu měrného absorbovaného výkonu, jehož maximální dovolené hodnoty podléhají v České republice taktéž tomuto nařízení vlády. Výstupní výkon, společně s délkou výbojů, lze plynule regulovat pomocí příslušného potenciometru. Při aktivovaném fázovém závěsu je patrné vyšší zkreslení reprodukováného signálu, pravděpodobně z důvodu směšování audiosignálu, výstupu z fázového filtru a signálu sekundární zpětné vazby, jež má za úkol rozladění obvodu při nadproudu. Při nastaveném maximálním výkonu a tedy kontinuálním režimu bez ovlivnění sekundární zpětné vazby je výsledný reprodukováný signál čistší. Pro potřeby regulace výkonu s menším zkreslením byl přidán vypínač pro deaktivaci fázového závěsu. Jediným omezujícím faktorem pro dlouhodobý provoz je růst teploty cívky, především sekundárního vinutí.

6 Použitá literatura

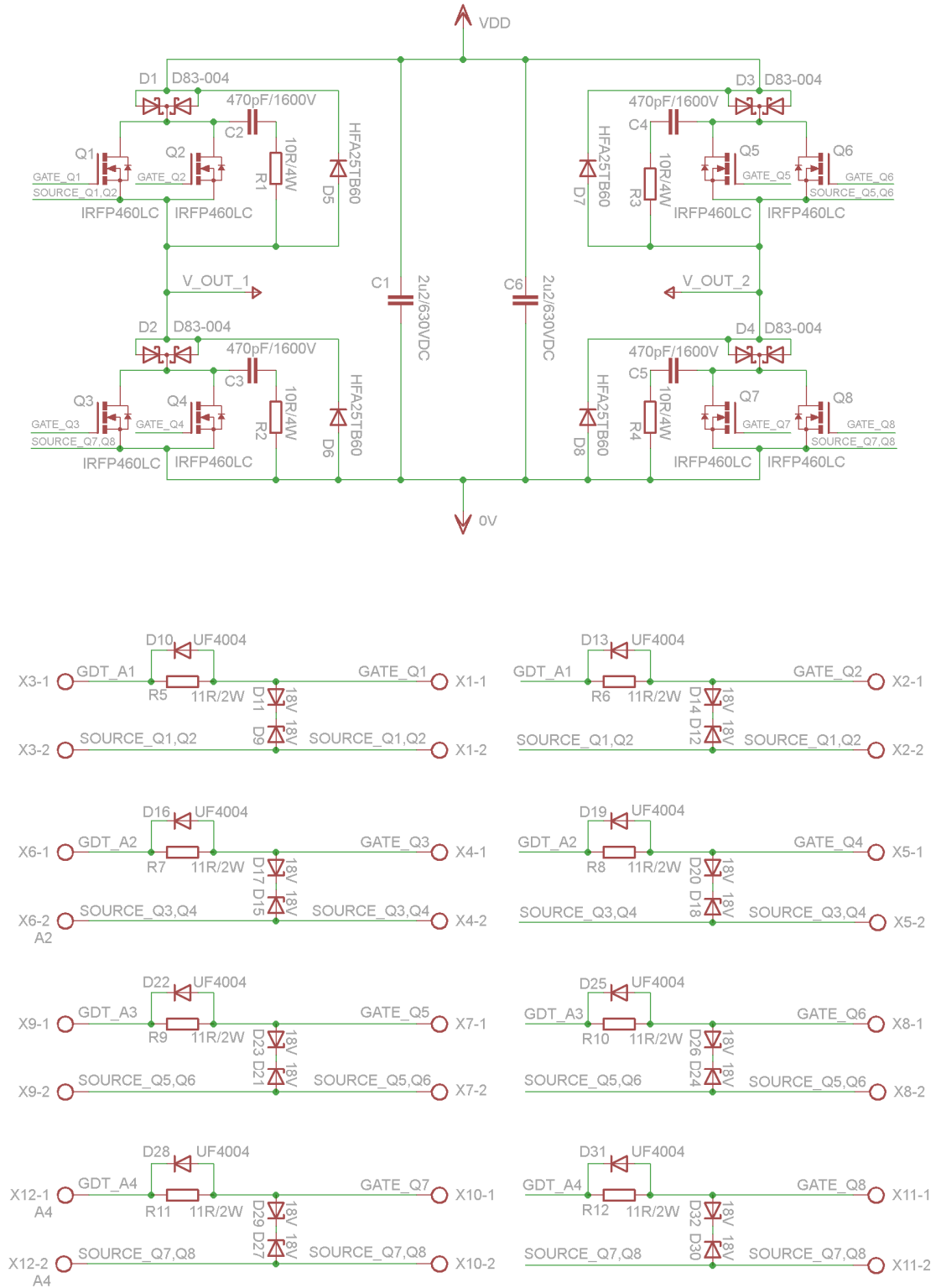
6 Použitá literatura

- [1] Tesla, N. Dostupné z: http://en.wikipedia.org/wiki/Nikola_Tesla, 10.02.2015
- [2] Wise, T. Tesla. Frýdek-Místek, nakladatelství ALPRESS, 1997.
- [3] Mašlan, S. Teslův transformátor.
Dostupné z: <http://elektronika.kvalitne.cz/VN/tesla/tesla.html#audiosstc>, 10.02.2015
- [4] Řehák, M. VTTC. Dostupné z: <http://rayer.g6.cz/teslatr/vttc.htm>, 10.02.2015
- [5] Texas Instruments. Katalogový list integrovaného obvodu CD4046B.
Dostupné z: <http://www.ti.com/lit/ds/symlink/cd4046b.pdf>, 10.02.2015
- [6] Texas Instruments. Aplikační zpráva k integrovanému obvodu CD4046B.
Dostupné z: <http://www.ti.com/lit/an/scha002a/scha002a.pdf>, 10.02.2015
- [7] Sbírka zákonů ČR. Nařízení vlády ze dne 12. prosince 2007 o ochraně zdraví před neionizujícím zářením. Dostupné z:
<http://aplikace.mvcr.cz/sbirka-zakonu/ViewFile.aspx?type=c&id=5226>, 20.02.2015

7 Přílohy

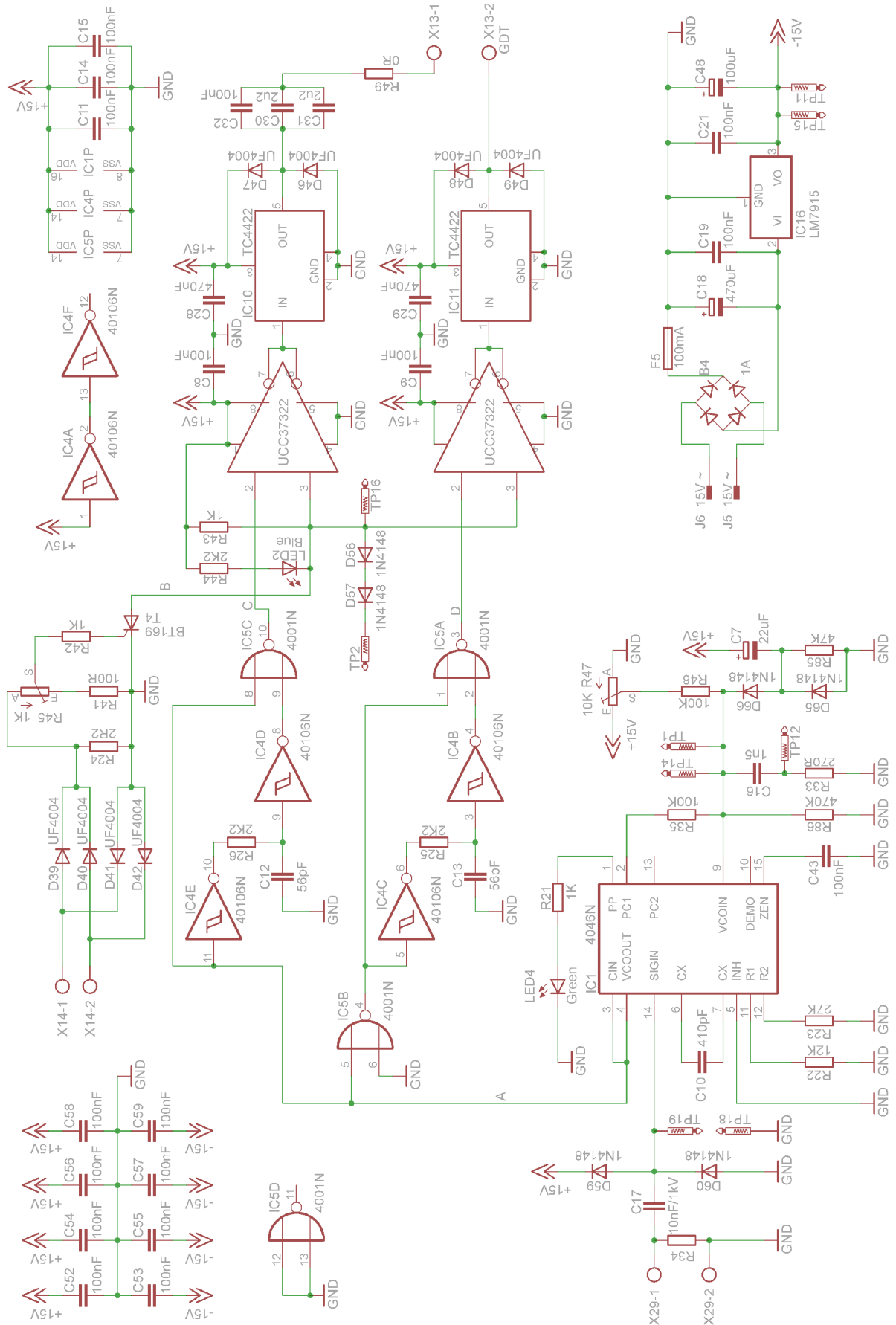
7 Přílohy

7.1 Schémata



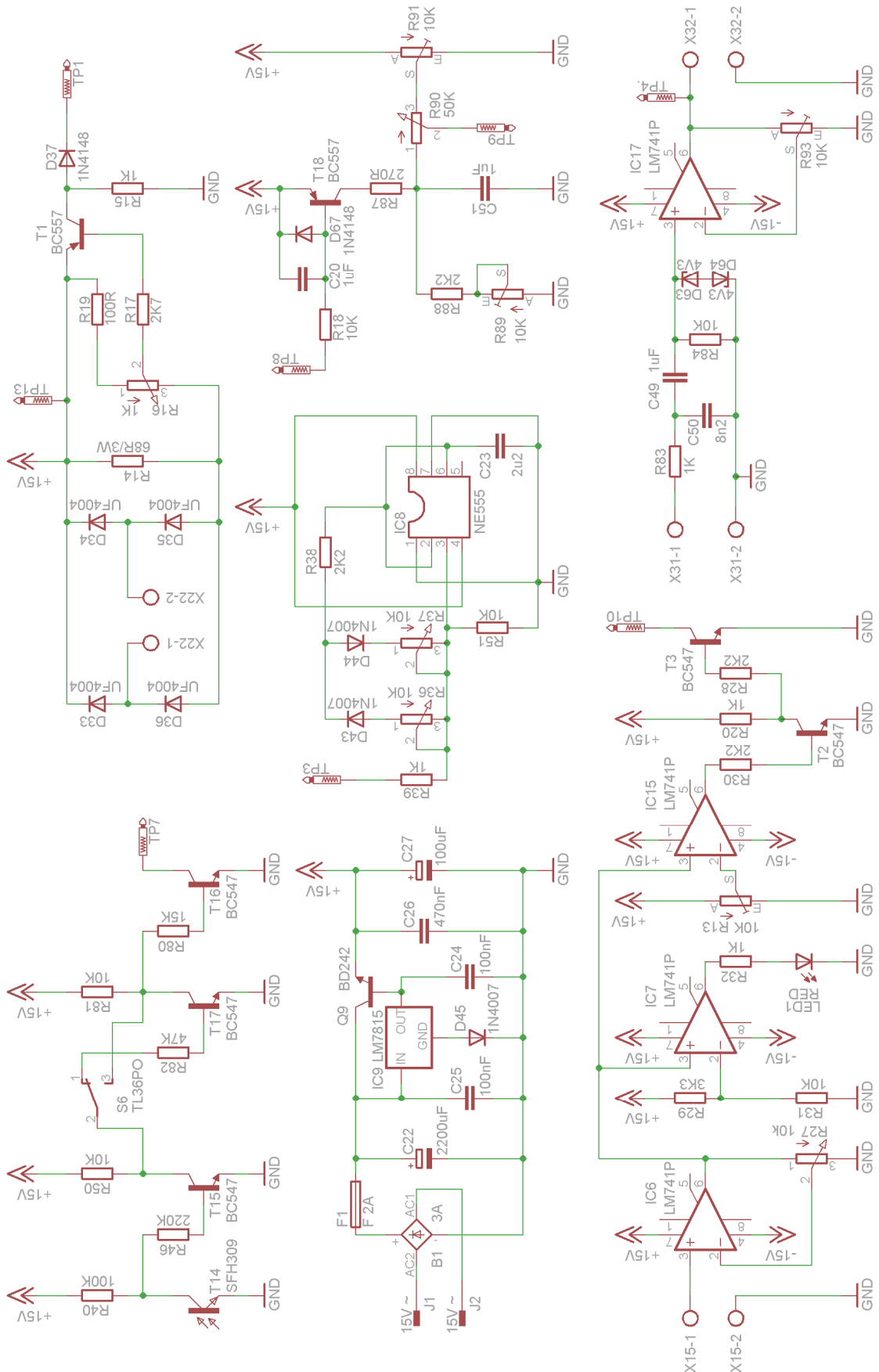
Obrázek 56: Schéma výkonového měniče s tvarovacími obvody

7 Přílohy



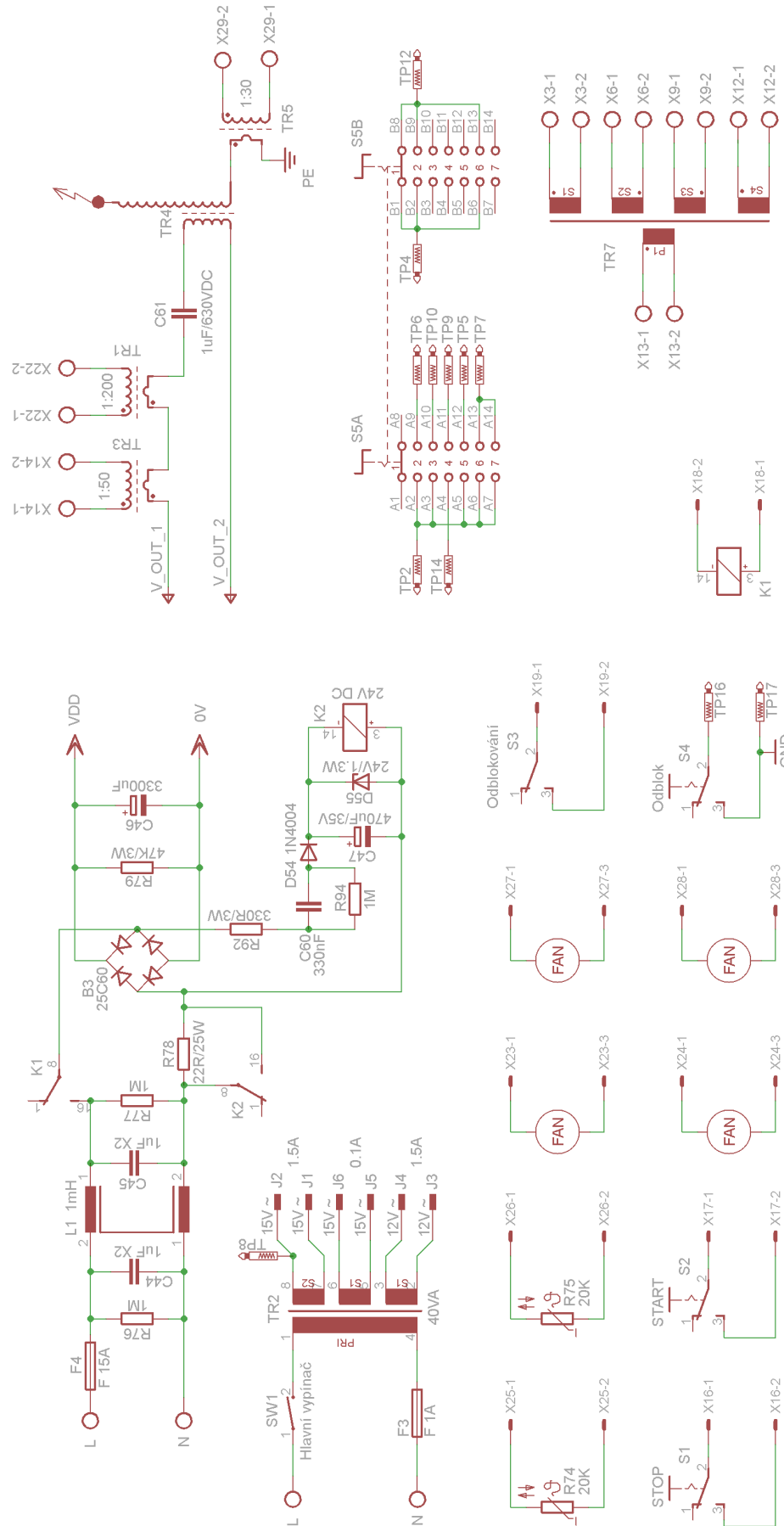
Obrázek 57: Schéma řídicího obvodu, obvodů pro dead time, buzení, PLL, proudové ochrany

7 Přílohy



Obrázek 59: Schéma předzesilovače, obvodů pro klávesy, přerušovače, gen. pily, proud. omezení

7 Přílohy



Obrázek 60: Schéma síťové části, Teslaova transformátoru a pomocných obvodů

7 Přílohy

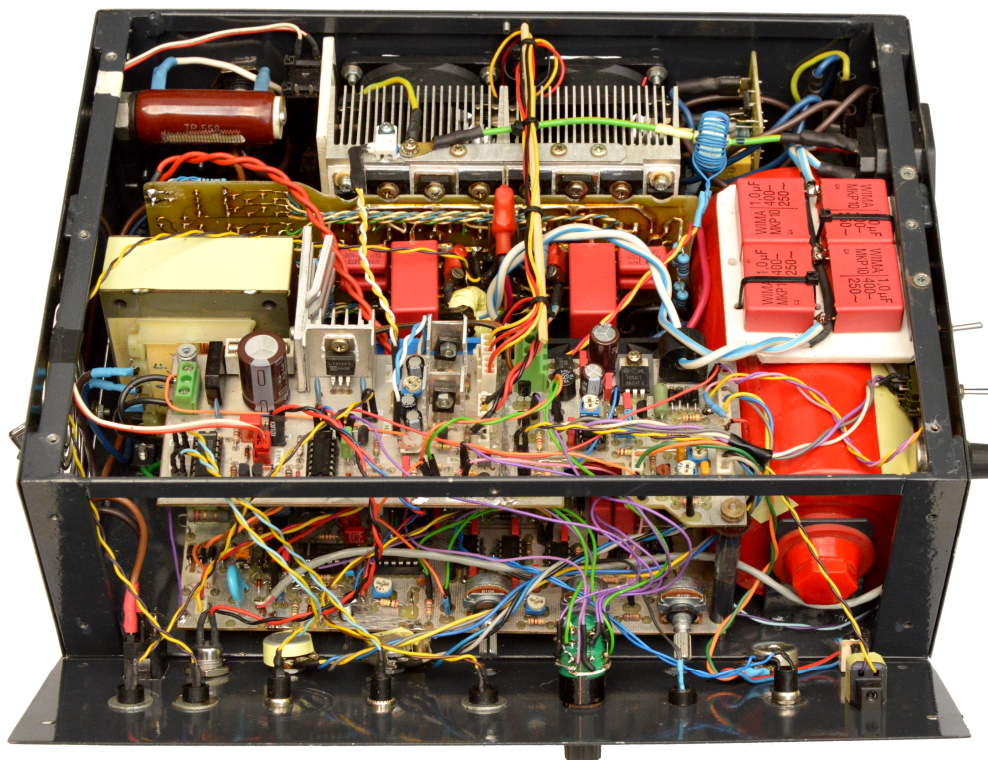
7.2 Fotografie



Obrázek 61: Fotografie celého zařízení

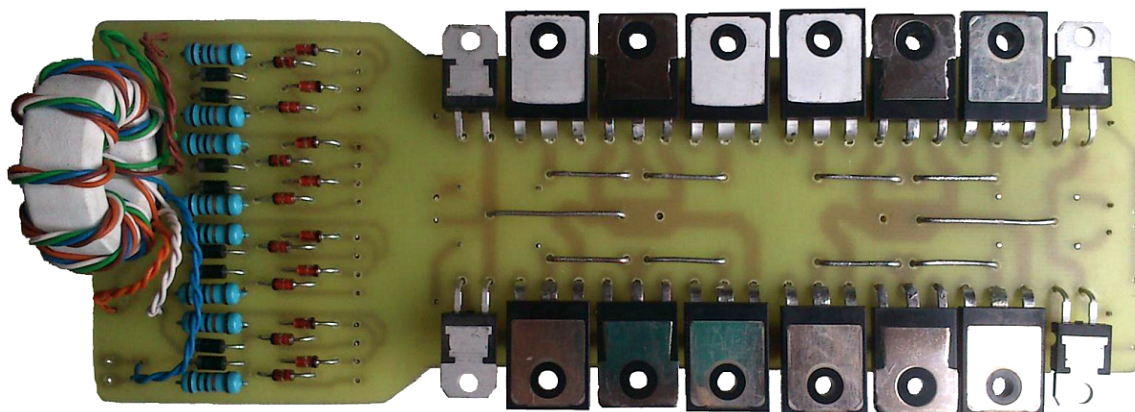


Obrázek 62: Fotografie kovové skříně s ovládacími prvky

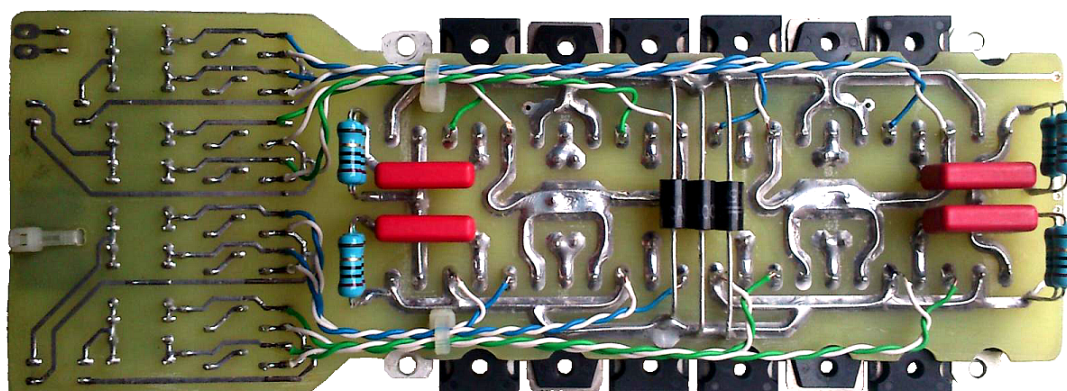


Obrázek 63: Fotografie s detailem řídicí elektroniky

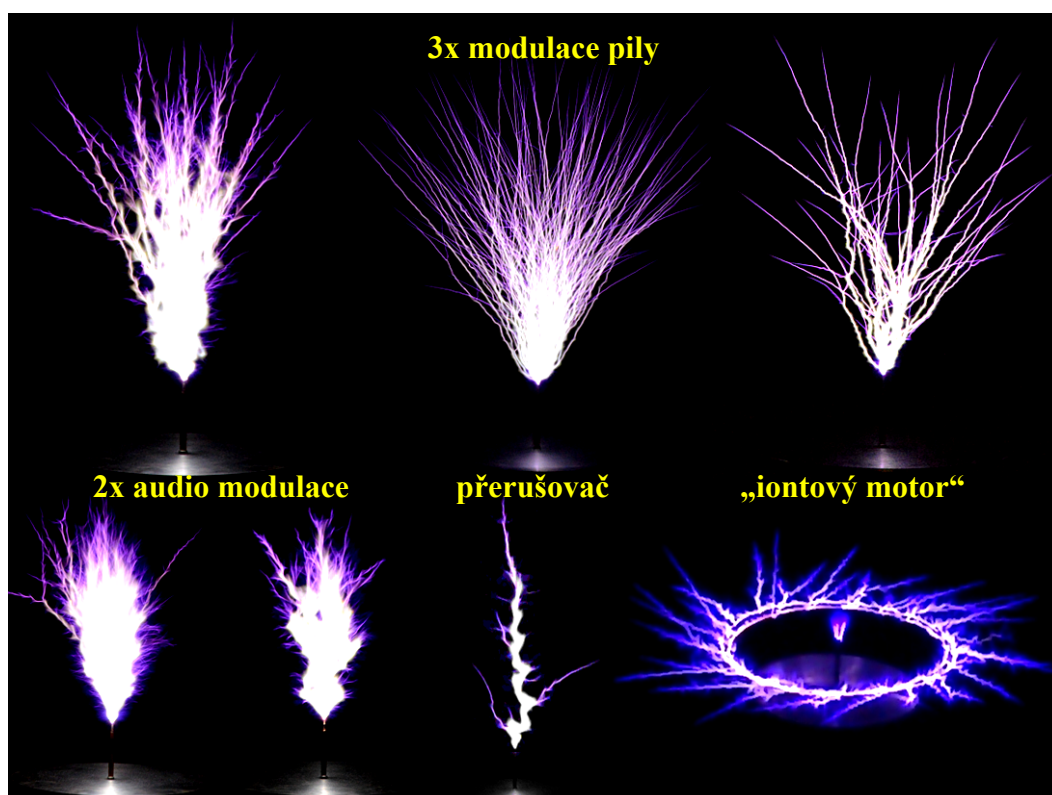
7 Přílohy



Obrázek 64: Fotografie výkonového měniče (strana TOP) bez chladiče



Obrázek 65: Fotografie výkonového měniče (strana BOTTOM) bez blok. kondenzátorů



Obrázek 66: Fotografie výbojů při různých modulacích při délce výbojů až 40cm

7.3 Přílohy v elektronické podobě

Součástí elektronické verze na CD-ROM jsou následující položky:

- 1) Vlastní bakalářská práce ve formátu PDF.
- 2) 3D model celé konstrukce ve spustitelném formátu EXE (SolidWorks eDrawings).
- 3) Fotografie zařízení obsažené v přílohách ve vysokém rozlišení.
- 4) Fotografie výbojů při různých modulacích ve vysokém rozlišení.
- 5) Oscilogramy a snímky z termokamery použité v kapitole 4.2.
- 6) Nákresy zařízení z programu Solidworks 2010 a DPS z programu Eagle ve vysokém rozlišení použité v kapitole 3.5.
- 7) Použitá literatura ve formátu PDF (pouze volně dostupné katalogové listy).
- 8) Schémata ve formátu PNG ve vysokém rozlišení.
- 9) Krátké videoukázky jednotlivých modulací ve formátu MP4 (PAL).