

VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

Fakulta elektrotechniky
a komunikačních technologií

DIPLOMOVÁ PRÁCE

Brno, 2016

Bc. Jiří Kalus



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA ELEKTROTECHNIKY A KOMUNIKAČNÍCH TECHNOLOGIÍ

FACULTY OF ELECTRICAL ENGINEERING AND COMMUNICATION

ÚSTAV VÝKONOVÉ ELEKTROTECHNIKY A ELEKTRONIKY

DEPARTMENT OF POWER ELECTRICAL AND ELECTRONIC ENGINEERING

NAPÁJECÍ ZDROJ PRO KYSLÍKOVODÍKOVOU SVÁŘEČKU

POWER SUPPLY FOR OXY-HYDROGEN WELDING TORCH

DIPLOMOVÁ PRÁCE

MASTER'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

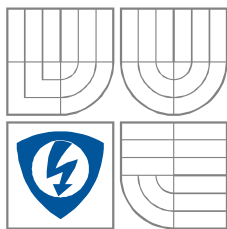
Bc. Jiří Kalus

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

Ing. Jan Knobloch

BRNO 2016



VYSOKÉ UČENÍ
TECHNICKÉ V BRNĚ

Fakulta elektrotechniky
a komunikačních technologií

Ústav výkonové elektrotechniky a elektroniky

Diplomová práce

magisterský studijní obor
Silnoproudá elektrotechnika a výkonová elektronika

Student: Jiří Kalus

Ročník: 2

ID: 144103

Akademický rok: 2015/16

NÁZEV TÉMATU:

Napájecí zdroj pro kyslíkovodíkovou svářečku

POKYNY PRO VYPRACOVÁNÍ:

1. Navrhněte řídicí obvody pro spínaný zdroj.
2. Navrhněte konkrétní schéma zapojení a desky plošných spojů.
3. Zařízení realizujte a proveďte ověření parametrů.

DOPORUČENÁ LITERATURA:

- [1] PATOČKA, Miroslav. Magnetické jevy a obvody ve výkonové elektronice, měřicí technice a silnoproudé elektrotechnice. 1. vyd. V Brně: VUTIUM, 2011, 564 s. ISBN 978-80-214-4003-6.
- [2] Dokumentace použitých součástek.

Termín zadání: 21. 9. 2015

Termín odevzdání: 24. 5. 2016

Vedoucí projektu: Ing. Jan Knobloch

doc. Ing. Petr Toman, Ph.D.

Předseda oborové rady

UPOZORNĚNÍ:

Autor semestrální práce nesmí při vytváření semestrální práce porušit autorská práva třetích osob, zejména nesmí zasahovat nedovoleným způsobem do cizích autorských práv osobnostních a musí si být plně vědom následků porušení ustanovení 11 a následujících autorského zákona č. 121/2000 Sb., včetně možných trestněprávních důsledků vyplývajících z ustanovení § 152 trestního zákona č. 140/1961 Sb.

Abstrakt

Diplomová práce se zabývá problematikou návrhu napájecího zdroje elektrolyzéro pro plynovou svářečku na bázi vodíku a kyslíku. Hlavní náplní práce je návrh tohoto zdroje, který bude realizován jako spínaný. Což vede k menším rozměrům a hmotnosti. Práce obsahuje návrh DPS a naměřené parametry zdroje.

Abstract

Master's thesis deals with design of oxy-hydrogen generator power supply for gas welder. Main topic of this thesis is a design of switching mode power supply, which leads to smaller dimensions and weight. Thesis includes design PCB and final measured parameters of this power supply.

Klíčová slova

Elektrolyzér; spínaný zdroj; řídicí obvod; odrušovací filtr; impulsní transformátor, kyslíkovodíková svářečka.

Keywords

Electrolyzer, switched source, control circuit, interference filter, pulsed transformer, oxy-hydrogen welding torch.

Bibliografická citace

Kalus, J. Napájecí zdroj pro kyslíkovodíkovou svářečku, Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, 2016. 72 s. Vedoucí diplomové práce Ing. Jan Knobloch.

Prohlášení

Prohlašuji, že svoji diplomovou práci na téma Napájecí zdroj pro kyslíkovodíkovou svářečku jsem vypracoval samostatně pod vedením vedoucího diplomové práce a s použitím odborné literatury a dalších informačních zdrojů, které jsou všechny citovány v práci a uvedeny v seznamu literatury na konci práce.

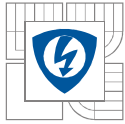
Jako autor uvedené diplomové práce dále prohlašuji, že v souvislosti s vytvořením této diplomové práce jsem neporušil autorská práva třetích osob, zejména jsem nezasáhl nedovoleným způsobem do cizích autorských práv osobnostních a jsem si plně vědom následků porušení ustanovení § 11 a následujících autorského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

V Brně dne Podpis autora

Poděkování

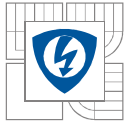
Děkuji vedoucímu diplomové práce Ing. Janu Knoblochovi za účinnou metodickou, pedagogickou a odbornou pomoc a další cenné rady při zpracování mého semestrálního projektu a rodině za podporu a cenné rady. Dále bych chtěl poděkovat Ing. Janu Martišovi, za odborné rady.

V Brně dne Podpis autora

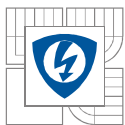


OBSAH

1 ÚVOD	15
2 KYSLÍKOVODÍKOVÁ SVÁŘEČKA	16
2.1 VLASTNOSTI VODÍKU A KYSLÍKU	16
2.1.1 VODÍK	16
2.1.2 KYSLÍK	16
2.1.3 ELEKTROLÝZA	17
2.1.4 ELEKTROLYT	17
2.2 POPIS PŘÍSTROJE	18
2.3 POPIS JEDNOTLIVÝCH ČÁSTÍ	19
2.3.1 BIPOLÁRNÍ ELEKTROLYZÉR	19
2.3.2 SLUČOVAČ	20
2.3.3 REGULÁTOR TLAKU	20
2.3.4 POJISTKA PROTI ZPĚTNÉMU ŠLEHNUTÍ PLAMENE	20
2.3.5 HOŘÁK	21
3 BLOKOVÉ SCHÉMA	22
4 PARAMETRY ZDROJE	23
6 NÁVRH ZDROJE PRO ŘÍZENÍ	24
6.1.1 ZDROJ PRO ŘÍZENÍ	24
6.2 POPIS FUNKCE INTEGROVANÉHO OBVODU UC3845	24
7 NÁVRH SPÍNANÉHO ZDROJE	27
7.1 NÁVRH ŠESTIPULSNÍHO MŮSTKOVÉHO USMĚRŇOVAČE	27
7.2 JEDNOČINNÝ PROPUSTNÝ MĚNIČ	29
7.2.1 NÁVRH TRANSFORMÁTORU	30
7.2.2 NÁVRH SEKUNDÁRNÍHO USMĚRŇOVAČE	33
7.2.3 NÁVRH VÝSTUPNÍHO LC - FILTRU	34
7.3 ŘÍDICÍ ČÁST	36
7.3.1 NÁVRH BUDICÍHO TRANSFORMÁTORU	36
7.3.2 NASTAVENÍ PRACOVNÍ FREKVENCE	37
7.3.3 NÁVRH MĚŘICÍHO TRANSFORMÁTORU PROUDU	38
8 VÝPOČET ZTRÁT A NÁVRH CHLADIČE	40
8.1 ZTRÁTY A CHLAZENÍ VÝKONOVÉHO TRANZISTORU	40
9 DESKY PLOŠNÝCH SPOJŮ	43
10 VÝROBA INDUKČNÍCH SOUČÁSTEK	44
10.1 VÝROBA VÝKONOVÉHO TRANSFORMÁTORU	44
10.2 VÝROBA TRANSFORMÁTORU PROUDU	44

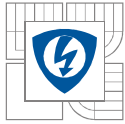


10.3 VÝROBA BUDICÍHO TRANSFORMÁTORU	45
10.4 VÝROBA TLUMIVKY VÝSTUPNÍHO LC - FILTRU	45
11 CHLADÍCÍ SOUSTAVA.....	46
12 KONSTRUKČNÍ USPOŘÁDÁNÍ	47
13 NAMĚŘENÉ PARAMETRY	48
13.1 NAMĚŘENÉ HODNOTY NA ZDROJI.....	48
14 ZÁVĚR.....	56
LITERATURA	57
SEZNAM KOMPONENT	58
PŘÍLOHA A – SCHÉMATA	60
PŘÍLOHA B – DESKY PLOŠNÝCH SPOJŮ	65

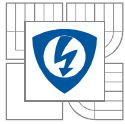


SEZNAM OBRÁZKŮ

<i>Obrázek 1: Blokové schéma kyslíkovodíkové svářečky</i>	19
<i>Obrázek 2: Fotografie elektrolyzérů</i>	20
<i>Obrázek 3: Pojistka pro zpětnému šlehnutí plamene</i>	20
<i>Obrázek 4: Plynový hořák</i>	21
<i>Obrázek 5: Detail hořáku - pojistka proti zpětnému šlehnutí</i>	21
<i>Obrázek 6: Blokové schéma spínaného zdroje</i>	22
<i>Obrázek 7: Schéma zdroje pro řízení</i>	24
<i>Obrázek 8: Rozšířené schéma obvodu UC3845 se základními externími součástkami [1]</i>	25
<i>Obrázek 9: Šesti pulsní usměrňovač s kondenzátorem</i>	27
<i>Obrázek 10: Jednočinný propustný měnič</i>	30
<i>Obrázek 11: Náčrt toroidního jádra [6]</i>	31
<i>Obrázek 12: Kmitočtová charakteristika LC-filtru [2]</i>	35
<i>Obrázek 13: Určení velikostí součástek pro nastavení pracovního kmitočtu [1]</i>	37
<i>Obrázek 14: Závislost přepínacích ztrát na proudu kolektoru</i>	40
<i>Obrázek 15: Náhradní obvod tepelných přechodů</i>	42
<i>Obrázek 16: Znázornění drátových propojek mezi budiči a tranzistory</i>	43
<i>Obrázek 17: Fotografie navinutého primárního vinutí</i>	44
<i>Obrázek 18: Fotografie navinutého výkonového transformátoru</i>	44
<i>Obrázek 19: Fotografie proudového transformátoru</i>	45
<i>Obrázek 20: Fotografie měřicího transformátoru proudu</i>	45
<i>Obrázek 21: Fotografie znázorňující profukování elektrické části</i>	46
<i>Obrázek 22: Detail měniče</i>	47
<i>Obrázek 23: Fotografie celkové konstrukce svářečky</i>	47
<i>Obrázek 24: Průběh napětí U_{GE} při $U_d = 0V$</i>	48
<i>Obrázek 25: Detail průběhu náběžné hrany U_{GE} při $U_d = 0V$</i>	48
<i>Obrázek 26: Detail průběhu sestupné hrany U_{GE} při $U_d = 0V$</i>	49
<i>Obrázek 27: Průběh napětí U_{GE} při $U_d = 565V$</i>	49
<i>Obrázek 28: Detail průběhu náběžné hrany U_{GE} při $U_d = 565V$</i>	49
<i>Obrázek 29: Detail průběhu sestupné hrany U_{GE} při $U_d = 565V$</i>	50

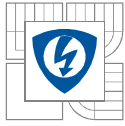


<i>Obrázek 30: Průběh signálu na bočníku (měřícím transformátoru proudu, na sekundární straně)</i>	50
<i>Obrázek 31: Celkové průběhy napětí a proudů (1. U_{GE}, 2. I_z, 3. U_{CE} na spodním tranzistoru)</i>	51
<i>Obrázek 32: Detail vypínacího děje (1. U_{GE}, 2. I_z, 3. U_{CE} na spodním tranzistoru)</i>	51
<i>Obrázek 33: Detail zapínacího děje (1. U_{GE}, 2. I_z, 3. U_{CE} na spodním tranzistoru)</i>	51
<i>Obrázek 34: Průběh napětí na nulové diodě při $U_z = 35,7V$ a $I_z = 31A$ (2. I_z, 3. U_{D0} na sekundární straně měniče)</i>	52
<i>Obrázek 35: Průběh napětí na nulové diodě při $U_z = 46,94V$ a $I_z = 40,7A$ (2. I_z, 3. U_{D0} na sekundární straně měniče)</i>	52
<i>Obrázek 36: Průběh napětí na nulové diodě při $U_z = 57,9V$ a $I_z = 50,3A$ (2. I_z, 3. U_{D0} na sekundární straně měniče)</i>	52
<i>Obrázek 37: Detail průběhu proudu na tlumivce a napětí U_{CE} (2. I_z, 3. U_{CE} na sekundární straně měniče)</i>	53
<i>Obrázek 38: Graf závislosti účinnosti na proudu zátěže</i>	54
<i>Obrázek 39: Fotografie měřícího pracoviště</i>	55
<i>Obrázek 40: USM - rozložení součástek</i>	65
<i>Obrázek 41: USM - TOP</i>	65
<i>Obrázek 42: USM - BOTTOM</i>	66
<i>Obrázek 43: Primární obvod - rozložení součástek</i>	66
<i>Obrázek 44: Primární obvod - BOTTOM</i>	67
<i>Obrázek 45: Sekundární obvod - rozložení součástek</i>	67
<i>Obrázek 46: : Sekundární obvod - BOTTOM</i>	68
<i>Obrázek 47: Sekundární obvod - TOP</i>	68
<i>Obrázek 48: Řídící obvod - rozložení součástek</i>	69
<i>Obrázek 49: Řídící obvod - TOP</i>	69
<i>Obrázek 50: Řídící obvod – BOTTOM</i>	70
<i>Obrázek 51: Pomocný zdroj pro řízení - rozložení součástek</i>	70
<i>Obrázek 52: Pomocný zdroj pro řízení - TOP</i>	71
<i>Obrázek 53: Pomocný zdroj pro řízení - BOTTOM</i>	71



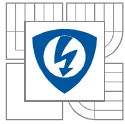
SEZNAM TABULEK

<i>Tabulka 1: Hodnoty pro výpočet šesti – pulsního usměrňovače</i>	<i>28</i>
<i>Tabulka 2: Hodnoty pro výpočet jednočinného měniče</i>	<i>31</i>
<i>Tabulka 3: Tabulka s hodnotami parametry jádra CF139LJT8022C [7]</i>	<i>31</i>
<i>Tabulka 4: Hodnoty pro výpočet LC- filtru.....</i>	<i>34</i>
<i>Tabulka 5: Hodnoty pro výpočet budicího transformátoru.....</i>	<i>36</i>
<i>Tabulka 6: Tabulka s hodnotami parametry jádra T1505 [6]</i>	<i>36</i>
<i>Tabulka 7: Hodnoty pro výpočet měřicího transformátoru proudu.....</i>	<i>38</i>
<i>Tabulka 8: Tabulka s hodnotami parametry jádra T1505 [6]</i>	<i>38</i>
<i>Tabulka 9: Naměřené parametry pro různá zatížení.....</i>	<i>54</i>
<i>Tabulka 10: Seznam součástí zdroje [8], [9], [13], [14], [15], [16], [17].....</i>	<i>58</i>

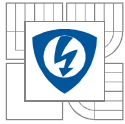


SEZNAM SYMBOLŮ A ZKRATEK

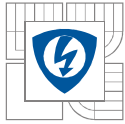
MOS – FET	unipolární tranzistor (řízený polem)
U_{cc}	napájecí napětí
S_{max}	maximální střída
PWM	pulsní šířková modulace
U_d	mezilehlé napětí
P_d	výkon v mezilehlém obvodu
U_{ef}	efektivní hodnota napětí
ΔU	dovolené zvlnění napětí
ΔI	dovolené zvlnění proudu
f	pracovní frekvence
T	perioda signálu
U_m	amplituda napětí
I_d	střední mezilehlý proud
δ	relativní pokles napětí
C	kapacita kondenzátoru
I_{CEf}	efektivní hodnota celkového kapacitního proudu na kondenzátoru
t_n	délka nabíjecího intervalu kondenzátoru
I_{max}	špičková (maximální) hodnota proudu
I_{fef}	efektivní hodnota fázového proudu na kondenzátoru
$I_{DSTŘ}$	střední hodnota proudu diodou
I_{Def}	efektivní hodnota proudu diodou
I_{DMAX}	špičkový opakovatelný proud diodou
$u_1(t)$	okamžitá hodnota napětí na primárním vinutí
U_1	primární napětí
U_2	sekundární napětí
I_1	sekundární proud
I_2	primární proud
μ_o	permeabilita vakua
μ_{FE}	permeabilita materiálu



k_p	činitel plnění
σ	proudová hustota
B	magnetická indukce
s	střída
L_e	střední délka siločáry jádra
A_e, S_{Fe}	průřez feromagnetického jádra
V_e	objem feromagnetického jádra
A_L	konstanta indukčnosti feromagnetického jádra
H_{MAX}	maximální pracovní intenzita
N_1	počet primárních závitů
N_2	počet sekundárních závitů
I_{ef2}	efektivní hodnota sekundárního proudu
I_{ef1}	efektivní hodnota primárního proudu
S_{Cu1}	průřez primárního vodiče
d_{Cu1}	průměr primárního vodiče
S_{Cu2}	průřez sekundárního vodiče
d_{Cu2}	průměr sekundárního vodiče
$I_{\mu max}$	špičková (maximální) hodnota magnetizačního proudu
$I_{D0\dot{S}P}$	špičkový proud nulovou diodou
$I_{D0\dot{S}T\dot{R}}$	střední proud nulovou diodou
I_{D0ef}	efektivní proud nulové diodě
U_{KAmax}	maximální napětí mezi katodou a anodou na nulové diodě
$I_{CE\dot{S}P}$	špičková hodnota proudu tranzistoru
$I_{CE\dot{S}T\dot{R}}$	střední hodnota proudu tranzistoru
U_{CEMAX}	maximální napětí mezi kolektorem a emitorem na tranzistoru
$I_{D3\dot{S}P}$	špičková hodnota proudu na sekundární usměrňovací diodě
$I_{D3\dot{S}T\dot{R}}$	střední hodnota proudu na sekundární usměrňovací diodě
I_{D3ef}	efektivní hodnota proudu na sekundární usměrňovací diodě
U_{KA2MAX}	maximální napětí mezi katodou a anodou na sekundární diodě
$I_{D04\dot{S}P}$	špičkový proud na sekundární nulové diodě



I_{D04STR}	střední proud na sekundární nulové diodě
I_{D04ef}	efektivní proud na sekundární nulové diodě
$U_{KA04max}$	maximální napětí mezi katodou a anodou na sekundární nulové diodě
BOTOM	zadní strana desky
TOP	přední strana desky
D	označení kolektoru unipolárního tranzistoru
S	označení emitoru unipolárního tranzistoru
G	označení báze unipolárního tranzistoru
B	označení báze bipolárního tranzistoru
E	označení emitoru bipolárního tranzistoru
C	označení kolektoru bipolárního tranzistoru
SMD	zkratka pro součástku pro povrchovou montáž plošných spojů
DPS	deska plošného spoje
UVLO	obvod – reagující na podpětí napájení
NRO	nelineární referenční obvod
VFB	označení pro napěťový vstup zpětné vazby
OZ	operační zesilovač
ΔT	dovolené oteplení
I_z	proud zátěží
U_z	napětí zátěží
P_z	výkon zátěže
P_d	střední výkon měniče
η	účinnost



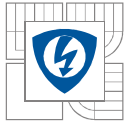
1 ÚVOD

Autogenní svařování je velice potřebná technologie pro domácí kutily, kteří chtějí svařovat tenké plechy (zejména pro automobilisty) a je velice těžko dostupná pro tyto kutily. Svařovat může školený odborník, při práci se používá tlaková nádoba s kyslíkem a acetylem, které není snadné si opatřit. Svařování kyslíkopropanbutanovou soupravou, která se prodává, je vhodná spíše pro pájení natvrdo, pro svařování nemá dostatečnou teplotu plamene. Další nevýhodou je nutnost školení a práce s tlakovou láhví.

Tato myšlenka mě vedla k zamyšlení se nad touto problematikou a hledáním různých alternativ. A proto jsem dospěl k závěru, že výhodným řešením může být elektrická kyslíkovodíková svářečka. Tímto přístrojem je možno svařovat i řezat plechy o tloušťce menší než 0,1 mm až do 6 mm, proto je vhodná i na opravy karosérií automobilů a ostatní běžné svařování, pájení natvrdo i kalení drobných součástí. Podle této škály využití lze poukázat na její užitečnost v praxi a to nejen v automobilovém průmyslu, ale i dalších odvětví, mezi které můžeme zařadit ocelářský průmysl, ale i různé výrobní závody, kde je potřeba oprav na výrobních zařízeních. Kyslíkovodíková svářečka na tuzemském trhu není dostupná a v zahraničí ji lze jen obtížně sehnat, pokud je produkt na trhu dostupný, jedná se většinou o svářečku s malým výkonem.

Na rozdíl od klasického (autogenního) svařování pracuje přístroj bez tlakových nádob, takže zcela odpadá největší nebezpečí, které vzniká při manipulaci s tlakovými nádobami.

Přístroj pracuje na principu rozkladu destilované vody elektrickým proudem. Vznikající plyny a to kyslík s vodíkem se používají jako palivo pro svařování. Pro zlepšení vlastností plamene se přidává malé množství butanu. Množství vyvinutého plynu a s tím i velikost plamene lze plynule elektricky regulovat pomocí řídicího obvodu. Základním napáječem pro elektrolyzéry je spínaný zdroj, jehož návrh je předmětem diplomové práce. Měníč bude napájet dva elektrolyzéry.



2 KYSLÍKOVODÍKOVÁ SVÁŘEČKA

Pro svařování kyslíkovodíkové svářečky je využíván vodíkový plamen vznikající spalováním vodíku vyvíjeného přímo ve svářečce elektrolyzou vody. Tento plyn bude smícháván propanbutanem, aby bylo stabilizováno jeho složení a tím pádem i plamen. Kyslíkovodíková svářečka pracuje bez tlakových nádob, takže všechen vyvinutý plyn se spálí a odpadá nebezpečí při manipulaci s tlakovými nádobami. Pro tuto svářečku není nutný školený odborník. Svářečka je vhodná pro opravu karosérií aut, pájení natvrdo, kalení drobných součástí, řezání plechů do tloušťky 6mm a běžné svařování.

2.1 Vlastnosti vodíku a kyslíku

2.1.1 Vodík

Objeven byl roku 1766 britským fyzikem a chemikem Henrym Cavendishem. Vodík je bezbarvý, bez zápachu a chuti, lehký plyn. Vytváří sloučeniny se všemi prvky periodické tabulky s výjimkou vzácných plynů [9].

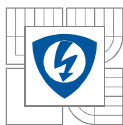
Vodík může tvořit zvláštní typ chemické vazby tzv. vodíková vazba nebo vodíkový můstek, kdy vázaný atom vodíku vykazuje afinitu i k dalším atomům, s nimiž není poután klasickou chemickou vazbou. Velice silná vodíková vazba je s atomy kyslíku, což vysvětluje vlastnosti vody [9] [10].

Vodík je na Zemi přítomen vzácně. Plynný vodík se v našem prostředí vyskytuje ve formě dvouatomových molekul H_2 a to ve vyšších vrstvách zemské atmosféry.

Nejvíce je vodík obsažen ve vodě, která je v moři, oceánech a řekách, která pokrývá 2/3 zemského povrchu. Dále se vyskytuje v organických sloučeninách. Vodík současně s uhlíkem, kyslíkem a dusíkem tvoří tzv. biogenní prvky, které tvoří základní stavební kameny všech živých organismů. Dále se vodík vyskytuje v celém vesmíru, vyskytuje se ve všech svítících hvězdách i v mezigalaktickém prostoru.

2.1.2 Kyslík

Objeven byl roku 1772 švédským chemikem Carlem Wilhelmem Scheelem. Kyslík je bezbarvý plyn, bez chuti a bez zápachu, má větší hustotu než vzduch, podporuje hoření. Volný kyslík tvoří dvouatomové molekuly O_2 , které obsahují dva nepárové elektrony a jsou za obyčejné teploty paramagnetické. Přírodní kyslík je směsí tří izotopů. Kyslík je součástí vzduchu, vody a části zemské kůry, kde je obsažen v oxidech a kyslíkatých solích. Na stavbě zemské kůry včetně atmosféry se kyslík podílí asi 49,4 %. Kyslík je velmi reaktivní prvek, který slučuje s výjimkou halogenů, vzácných plynů a některých ušlechtilých kovů se všemi prvky přímo. Tyto reakce (oxidace) probíhají po zahřátí na určitou zápalnou teplotu obvykle za značného vývoje tepla a světla, popřípadě i explozivně. Sloučeniny kyslíku jsou například oxidy, peroxidy, ozón apod [10].



2.1.3 Elektrolýza

Elektrolýza je fyzikálně – chemický jev, způsobený průchodem stejnosměrného elektrického proudu kapalinou, při kterém dochází k chemickým změnám na elektrodách. Elektricky vodivá kapalina obsahuje směs kladných a záporných iontů, vzniklých v kapalině disociací. Průchodem elektrického proudu dochází k pohybu kladných iontů k záporné elektrodě a záporných iontů ke kladné elektrodě. Na elektrodách může dojít k reakcím mezi ionty a elektrodou, mezi ionty samotnými nebo mezi ionty a kapalinou [11][12].

Elektrolýza se využívá v průmyslu pro galvanické pokování, rozklad chemických látek, galvanické leptání, elektrometalurgie a elektrolytické čištění kovů. Pro náš účel se elektrolýza používá hlavně za účelem výroby vodíku. Vodík získaný elektrolýzou se vyznačuje velmi vysokou čistotou oproti výrobě z fosilních paliv. Podmínkou pro ekonomicky výhodnou výrobu vodíku elektrolýzou je levná elektrická energie [12].

2.1.4 Elektrolyt

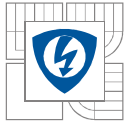
Použitím nejvhodnějšího elektrolytu záleží na mnoha faktorech a to vzdálenosti mezi deskami elektrod. Pro elektrody s malou vzdálenou mezi deskami elektrodami postačí voda z vodovodu. Pro větší vzdálenosti mezi elektrodami bude vhodnější použít destilovanou vodu. Rozdíl těchto kapalin je v čistotě. Voda z vodovodu je dobře dostupná, nízká cena a bezpečná manipulace je s ní a nevýhody jsou zanesením elektrod (snížení účinnosti elektrolyzátoru). Voda pro svoji malou vodivost neumožňuje vysoký výkon HHO plynu a proto je pro praktické použití nevhodná, proto je nutnost použít nějakou sloučeninu.

Kyselina – bílý ocet je vhodná pro střední vzdálenost elektrod. Mezi její výhody patří cena, bezpečnost, dostupnost a nezanáší elektrody. Jako nevýhoda je kyselé aroma a při vyvíjení se vytváří oxid uhličitý a některé další plyny [11][12].

Jedlá soda má za následek potažení elektrod a hnědnutí vody. Z tohoto důvodu se vyplatí používat na krátkodobé experimenty a pokusy. Mezi její výhody patří dostupnost, nízká cena a bezpečnost. Jako nevýhoda je zanesení elektrod, produkce CO₂ (30%) a CO (4%), proto se nedoporučuje její použití [11][12].

Hydroxid sodný (louh) v čistém provedení je bílá pevná látka, k dispozici je v peletkách, vločkách, granulích a nebo jako 50 % nasycený roztok. Snadno absorbuje oxid uhličitý ze vzduchu, proto by jeho skladování mělo být ve vzduchotěsné nádobě. Hydroxid draselný je velmi snadno rozpustitelný ve vodě se současným vývojem tepla. Pro výrobu elektrolytu je vhodné jej použít s destilovanou vodou. Roztok se připravuje v koncentraci 30 až 40 %. Mezi výhody patří čisté elektrody, nízká cena, dostupnost a generuje až 95 % čistého plynu HHO. Jako nevýhoda je, že se jedná o žíravinu a je nutná opatrnost při manipulaci [11][12].

Hydroxid draselný se doporučuje pro výrobu velmi kvalitního elektrolytu. Používá se s destilovanou vodou. Při úbytku se doplňuje pouze destilovanou vodou. Roztok se připravuje v koncentraci 1 až 28 % podle velikosti proudu. Při manipulaci se doporučuje používat ochranné brýle. Pro neutralizaci se používá ocet. Jako výhody jsou zanesení elektrod, generace plynu až 95 %, silný a čistý elektrolyt. Tato chemikálie se doporučuje pro tuto aplikaci [11][12].



Uhlíčan draselný (potaš) je bezpečný pro manipulaci, velmi efektivní, maximálně vyvíjí plyn, elektrody zůstávají čisté a produkuje velmi čistý plyn. Jeho nevýhody jsou špatná dostupnost a je nutná kombinace s trochou hydroxidu sodného pro zvýšení odběru elektrického proudu [11][12].

Elektrolyt je tvořen destilovanou vodou s příměsí hydroxidu draselného (KOH). Pro nízký odpor elektrolytu se použila tato směs. Zvýšením koncentrace směsi se sníží odpor elektrolytu. Závislost odporu elektrolytu na koncentraci příměsi se odhadne experimentálně.

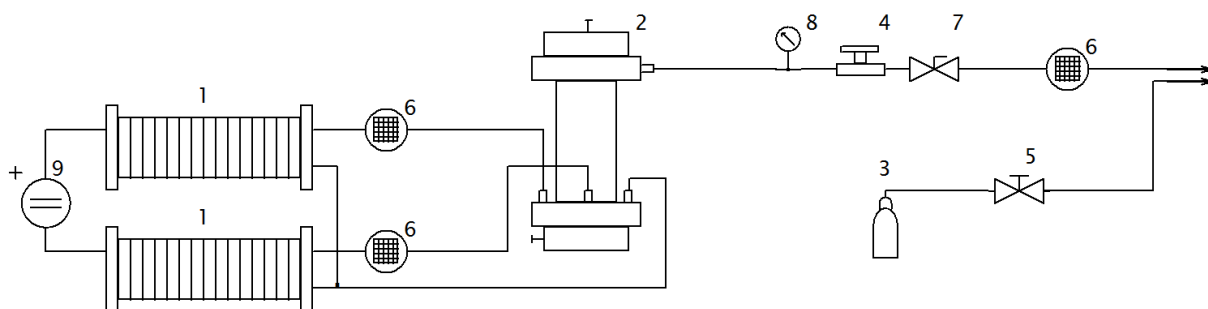
2.2 Popis přístroje

Kyslíkovodíková svářečka se odlišuje tím, že pracuje bez tlakových nádob, tímto odpadá zcela největší nebezpečí, které vzniká při manipulaci s tlakovými nádobami. Přístroj pracuje na principu rozkladu vody elektrickým proudem – tzv. elektrolýzy. Vznikající plyny kyslík a vodík jsou palivem pro hoření plamen při svařování. Pro stálější hoření plamene se do této směsi přimíchává malé množství butanu z tlakové nádoby. Tlaková nádoba se používá pro malé vařiče a je běžně k dostání. Jedna náplň by měla vystačit na několik hodin práce v závislosti na velikosti plamene a tloušťky materiálu.

Množství vyvinutého plynu a tím i velikost plamene lze plynule regulovat, což umožňuje svařet plechy i tenčí než 0,1 mm. Vyvinutý plyn proudí z pracovního válce (elektrolyzéry) do slučovacího dílu, kde se filtrují a dále přes průtokoměr do rozbočky, kde se přivádí butan a dále přes pojistku zpětného šlehnutí plamene do hořáku. Tlak se kontroluje manometrem.

Pro bezpečnější svařování je proudícímu plynu v cestě proudění dvě pojistky proti zpětnému šlehnutí plamene. První pojistka se nachází na výstupu z přístroje a druhá v rukojeti hořáku. Tyto pojistky mají znemožnit vniknutí plamene do přístroje a zabraňují možné havárii.

Hlavní zdroj energie pro svařování poskytuje třífázová elektrická síť 400V s frekvencí 50 Hz s proudem do 20 A. Z toho vyplývá maximální výkon 6000 W. Pro vlastní elektrolýzu je nutno střídavý proud usměrnit a upravit na vhodné regulovatelné napětí. To je provedeno pomocí jednočinného propustného měniče. Z měniče se stejnosměrný proud se přivádí na kruhové elektrody elektrolyzéry.



Obrázek 1: Blokové schéma kyslíkovodíkové svářečky

Legenda k blokovému schématu:

- 1 – elektrolyzér
- 2 – slučovač
- 3 – láhev butanu
- 4 – snímač tlaku
- 5 – regulační ventil
- 6 – pojistka proti zpětnému šlehnutí plamene
- 7 – jednocestný ventil
- 8 – manometr
- 9 – elektrický zdroj energie

2.3 Popis jednotlivých částí

Jednotlivé konstrukční součásti budou uloženy v plechové nádobě, přičemž část elektrická je uložena v prostoru odděleném od vyvíječe. Nádoba bude uzavřena.

2.3.1 Bipolární elektrolyzér

Elektrolyzér slouží k elektrickému vyvíjení plynné směsi a to kyslíkovodíkové. Konstrukce elektrolyzérova je z tří prvků. Hlavní části jsou jeho elektrody, které jsou z materiálu 1.4404. Je to nerezová ocel, která má mechanické vlastnosti s rostoucí teplotou výrazně klesá odpor, odolnost proti korozi v průmyslovém prostředí a hlavně při přítomnosti chloridů. Tato ocel je vhodná pro konstrukce v agresivním prostředí a je použita pro tento účel. Mezi elektrody se vkládá těsnicí kroužek z materiálu EPDM o tloušťce 3 mm. Tento materiál je vhodný na horkou vodu a páru, odolný kyselinám a louhům, ozónu, proti ultrafialovým paprskům, stárnutí a povětrnostním vlivům. Materiál je vhodný k tlakovým kapalinám. Pracovní teplota je od -30° do 140°C . Elektrolyzér bude pracovat kolem 40°C . Bočnice elektrolyzérova jsou z čirého plexiskla, kde na jedné straně jsou otvory pro vývod plynu a přívod elektrolytu. Celá konstrukce je stažena osmi šroubovicemi.



Obrázek 2: Fotografie elektrolyzérů

2.3.2 Slučovač

Jako slučovač je použita přetlaková nádoba na chladicí kapalinu z auta. Je na něm přívod pro plynou směs, plnicí otvor se zátkou a odvod plynu do hadice na svařování.

2.3.3 Regulátor tlaku

Regulace tlaku je realizována zpětnovazebně pomocí senzoru tlaku a elektronického regulátoru. Akční veličinou tohoto regulátoru je žádaná hodnota proudu ze spínaného zdroje do vyvíječe.

2.3.4 Pojistka proti zpětnému šlehnutí plamene

Před vstupem plyné směsi do hořáku je instalována na hadici pojistka proti zpětnému šlehnutí plamene do systému svářečky. Druhá pojistka proti zpětnému šlehnutí je instalována před elektrolyzér. Pojistka se sestává ze dvou sešroubovaných dílů, do kterých je vložen váleček z porézního materiálu.



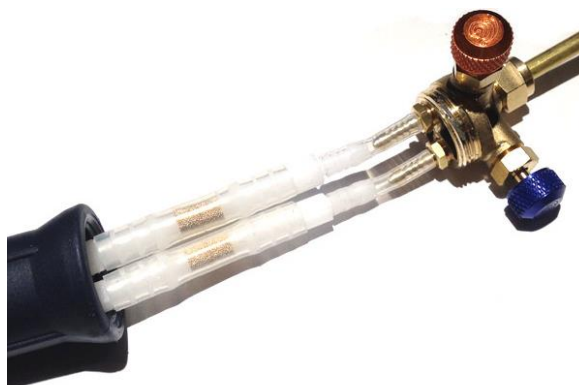
Obrázek 3: Pojistka pro zpětnému šlehnutí plamene

2.3.5 Hořák

Hořák obsahuje dva přívody, které slouží k přívodu plynné směsi ze svářečky a druhý k přívodu butanu. Hořák je včetně nástavce a hubice. Je možnost nastavení intenzity plamene pomocí regulačních ventilů. V rukojeti je umístěna pojistka proti zpětnému šlehnutí plamene.



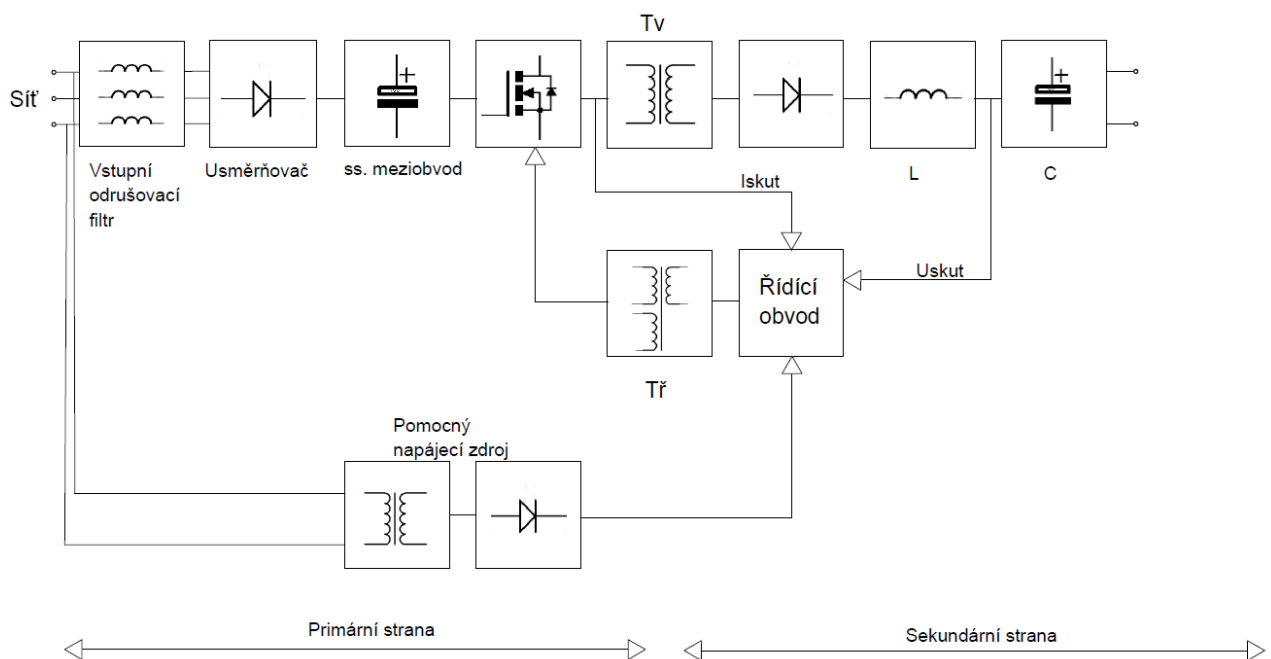
Obrázek 4: Plynový hořák



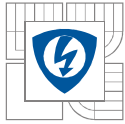
Obrázek 5: Detail hořáku - pojistka proti zpětnému šlehnutí

3 BLOKOVÉ SCHÉMA

Na základě požadavků uvedených v zadání práce bylo navrhnut blokové schéma spínaného zdroje. Nejdůležitější částí celého zdroje je hlavní měnič tvořen primární a sekundární částí. Řízení tohoto měniče je zajištěno obvodem UC3845. Ten zpracovává měřené napětí na výstupu a snímaný proud na primární straně měniče a na základě snímaných hodnot reguluje výstupní proud a napětí. Toto ovládání je uskutečněno skrze galvanicky odděleného budiče. Napájení dílčích obvodů síťového spínaného zdroje zajišťuje pomocným zdrojem. Na vstupu zdroje je EMC filtr z důvodu potlačení rušení, které je způsobeno impulsním provozem měniče. Usměrňovač je neřízený a poskytuje usměrněné napětí nutné pro správnou funkci zdroje.



Obrázek 6: Blokované schéma spínaného zdroje



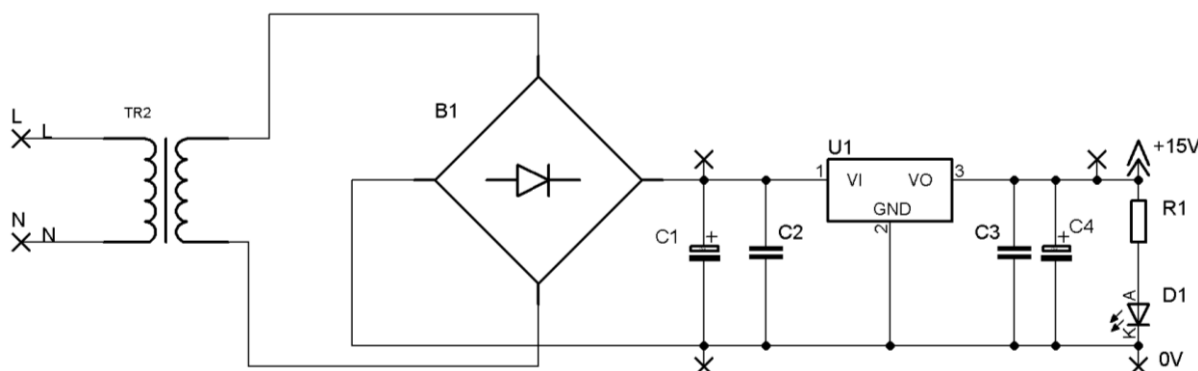
4 PARAMETRY ZDROJE

Zvolené parametry pro zdroj:

Primární napětí	400 V AC
Jmenovité výstupní napětí	60 V DC
Jmenovitý výstupní proud	100 A DC
Tolerance primárního napětí	+/- 10 %
Jmenovitý výkon	6 kW
Pracovní kmitočet	40 kHz
Pracovní střída	0,35

6 NÁVRH ZDROJE PRO ŘÍZENÍ

6.1.1 Zdroj pro řízení



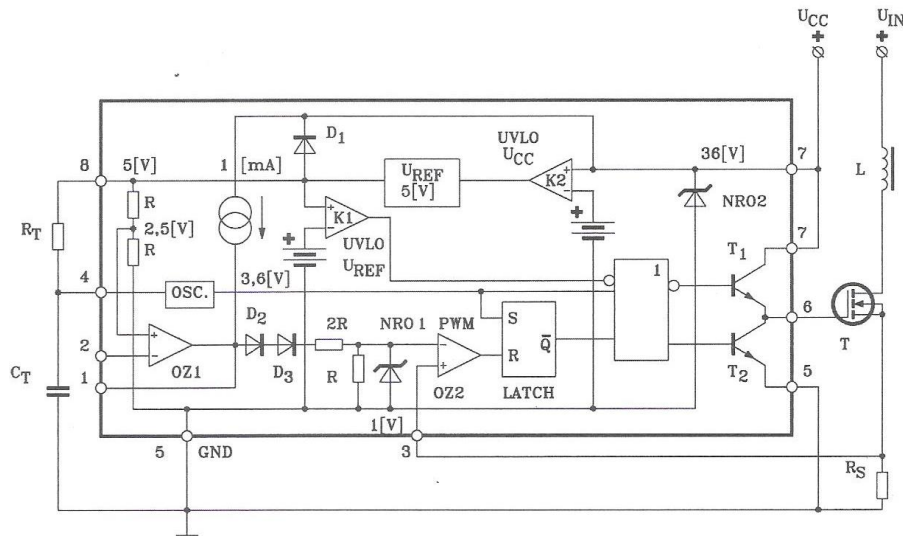
Obrázek 7: Schéma zdroje pro řízení

Síťové napětí je sníženo pomocí transformátoru TR2 na hodnotu 15 V. Transformátor je o výkonu 3 VA a maximální výstupní proud může být 200 mA. Pro napájení řídicího obvodu je tento proud dostačující a je možná i volba napájení menšího ventilátoru pro chlazení (do 100 mA). Typový transformátor byl zvolen BV EI 305 2053.

Síťové napětí se usměrní na můstku B1 a přivede se do stejnosměrného meziobvodu. Pro tento účel je volena součástka s označením B560C2000. Tam je vyhlazeno elektrolytickým kondenzátorem C1 (1000 μ /25V). Pomocí lineárního stabilizátoru je napětí U1 (78S15) stabilizované. Vstup na stabilizátoru 78S15 je označen 1 a výstup 3, zem 2 a na kontakty mezi 1, 2 a 3,2 se připojují keramický kondenzátory C2 a C3 (100n/50V), který brání v rozkmitání stabilizátoru. Je vhodné je připojit co nejbližší k stabilizátoru. Na výstupu zdroje je připojen elektrolytický kondenzátor C4 (100 μ /25V). Na vstup stabilizátoru napětí je možno přivádět nejvýše 35 V za předpokladu přeměny tyto energie na teplo. Celý obvod je chráněn na vstupu pojistkou o hodnotě 1 A/250 V. Na konci obvodu je dioda D1 (5 mm/GREEN LED) pro signalizaci zapnutí zdroje. Rezistor R1 (500R) nastavuje pracovní proud do signalizující diody.

6.2 Popis funkce integrovaného obvodu UC3845

Obvod UC3845 je z řady UC38XX, jeho vnitřní struktura je naznačena na Obrázek 8 **Chyba! Nenalezen zdroj odkazů.** Součástka je provedena v pouzdře DIP 8. Obvod UC3845 je pro spínané zdroje s pevnou pracovní frekvencí, která se nastavuje pomocí rezistoru R_T a kondenzátoru C_T . Patří do skupiny obvodů s velmi složitou vnitřní strukturou, ale malým počtem vývodů a malým počtem externích součástek. Referenční napětí je 5 V a je teplotně kompenzováno. Obvod obsahuje operační zesilovač pro realizaci regulátoru [1].



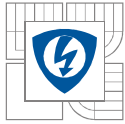
Obrázek 8: Rozšířené schéma obvodu UC3845 se základními externími součástkami [1]

Obvod bude budit tranzistory IGBT. Obvod obsahuje dva UVLO (UNDERVOLTAGE LOCKOUT) obvody jednak pro hlídání poklesu napájecího napětí, jednak pro napětí referenční. Časování obvodu zajišťuje interní oscilátor, který může pracovat až do frekvence 500 kHz. Časová frekvence se nastavuje odporem R_T a kondenzátorem C_T , které se připojí externě na svorky 4 a 8. Napětí na kondenzátoru má přibližně trojúhelníkový průběh a amplitudou $U = 1,6$ V. Z referenčního zdroje je nabíjen přes odpor R_T na napětí 2,8 V a vybíjen vnitřním zdrojem proudu až na napětí 1,2 V. Frekvence oscilátoru může být dosaženo různými kombinacemi hodnot obou prvků. Na hodnotě kondenzátoru C_T závisí doba rozeptnutí tranzistoru T (DEAD TIME). Nejprve zvolíme hodnotu požadované frekvence, potom z maximální požadované doby rozeptnutí nebo septnutí určíme hodnotu kondenzátoru C_T a nakonec hodnotu R_T .

Nastavení pracovní frekvence je velmi stabilní. Samotné napájecí napětí U_{CC} je kontrolováno vnitřním obvodem UVLO, který kontroluje, zda U_{CC} leží v pracovním intervalu $10 \text{ V} < U_{CC} < 36 \text{ V}$. Obvod má zavedenou hysterezi a začíná pracovat od 16 V. Klesne-li napětí pod 10 V, obvod přestane pracovat. Proti napěťovému přetížení je obvod chráněn napěťovým referenčním obvodem (NRO2) s napětím 36 V, kterým může protékat proud 25 mA. Klidový odběr je od 13 mA do 15 mA pro napájení 36 V. NRO2 je možno využít jako vnitřní stabilizátor napětí 36 V a obvod napájet do svorky U_{CC} přes sériový odpor i z mnohem vyššího napětí. Odpor vnějšího sériového odporu měl proud v rozmezí od 15 mA do 25 mA [1].

Výstup je tvořen dvojicí NPN tranzistorů, které pracují ve funkci zdroje napětí. Z tohoto plyne vhodnost buzení pro tranzistory MOSFET. Budič je schopen vydat proud o hodnotě až 1 A při době náběhu menší než 50 ns [1].

Zpětnovazební smyčka pro nastavení výstupního napětí se uzavírá přes invertující vstup OZ1 (svorka 2 VFB) a napětí se porovnává s polovinou referenčního napětí 2,5 V. Výstupní napětí na OZ1 je posunuto o úbytek na diodách $D1$ a $D2$ o cca 1,4 V a potom vyděleno děličem $2R - R$ na



jednu třetinu. Potom je přivedeno upravené napětí na invertující vstup PWM komparátoru OZ2. Zde se porovnává s napětím, které vznikne na externím odporu R_s průchodem spínaného proudu. To nám zaručí výstupní napětí na OZ1 3V a pak nebude třeba velké napětí na vstupu 3, ani na odporu R_s [1].

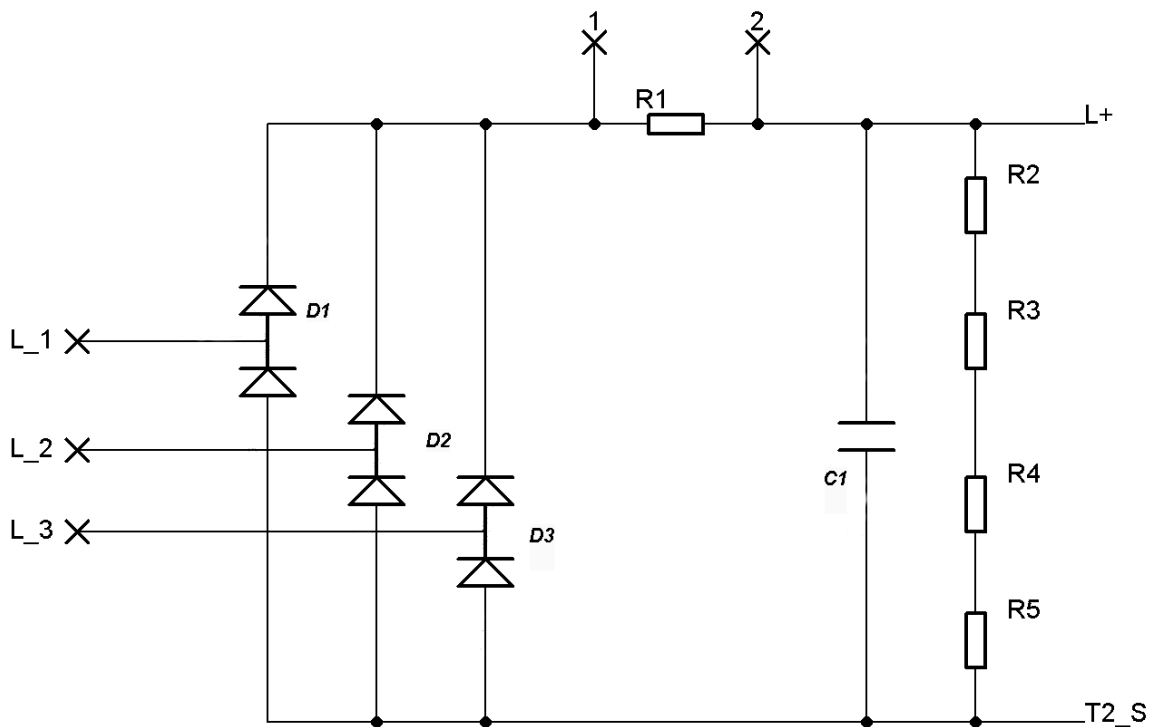
Svorku 1 lze užít pro zavedení kmitočtové kompenzace OZ1 i pro ovládání vstupu PWM komparátoru. Velikost zpětnovazebního odporu zesilovače OZ1 je omezena velikostí proudu proudového zdroje 0,5 mA na výstupu OZ1 a maximálního výstupního napětí OZ1, které požadujeme 3 V pro odpor $R_f = 8,8 \text{ k}\Omega$. Napětí na invertujícím vstupu PWM komparátoru OZ2 nesmí být vyšší než 1 V [1].

7 NÁVRH SPÍNANÉHO ZDROJE

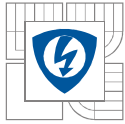
Výkon zdroje pro kyslíkovodíkovou svářečku byl zvolen 6 kW. Na výstupu bude možnost regulace napětí v rozsahu 14 až 60 V a proudu 30 až 100 A. Pro konstrukci je použit jednočinný propustný měnič. Spínací frekvence byla zvolena 40 kHz a spínací součástky typu IGBT. V následujících podkapitolách je postupný návrh a dimenzování jednotlivých součástí zdroje. Celý postup návrhu zdroje vyplývá z použité literatury [2][5].

7.1 Návrh šestipulsního můstkového usměrňovače

Vstupní napětí je střídavé o hladině napětí 400 V ze sítě. V ideálním případě se napěťový meziobvod chová jako zdroj konstantního mezilehlého napětí U_d s nulovým vnitřním odporem. Mezilehlý napěťový zdroj je složen jednoho fóliového kondenzátoru, umístěného mezi můstkovým usměrňovačem a pulsním měničem. Krátkodobě dokáže energii akumulovat. Ve střední hodnotě se musí dodaná energie rovnat energii výstupní. Pro hodnotu síťového napětí 400 V je výstupní napětí usměrňovače 565 V.



Obrázek 9: Šesti pulsní usměrňovač s kondenzátorem



Tabulka 1: Hodnoty pro výpočet šesti – pulsního usměrňovače

Veličina	Hodnota
P_d	6000 W
U_{ef}	3 x 400 V
ΔU	75 V
f	50 Hz
T	20 ms

Střední hodnota napětí šesti – pulsního usměrňovače

$$U_d = U_m \cdot \frac{\Delta U}{3} = 565 \cdot \frac{75}{3} = 540 \text{ V} \quad (7.1-1)$$

Střední hodnota nabíjecího proudu

$$I_{1stř} = I_d = 11,12 \text{ A} \quad (7.1-2)$$

Relativní pokles napětí

$$\delta = \frac{\Delta U}{U_m} = \frac{75}{565} = 0,132 \quad (7.1-3)$$

Doba nabíjení

$$t_n = \frac{T}{2\pi} \arccos(1-\delta) = \frac{20 \cdot 10^{-3}}{2\pi} \arccos(1-0,132) = 94,8 \text{ ms} \quad (7.1-4)$$

Velikost kapacity kondenzátoru

$$C = \frac{T I_d}{2 \Delta U} \left[\frac{1}{3} - \frac{1}{\pi} \arccos(1-\delta) \right] \quad (7.1-5)$$

$$C = \frac{20 \cdot 10^{-3}}{2} \frac{11,12}{75} \left[\frac{1}{3} - \frac{1}{\pi} \arccos(1-0,13) \right] = 248,29 \text{ } \mu\text{F}$$

Relativní špičková hodnota

$$I_{max} = I_d + I_d \frac{\pi}{\delta} \left[\frac{1}{3} - \frac{1}{\pi} \arccos(1-\delta) \right] \sin(\arccos(1-\delta)) \quad (7.1-6)$$

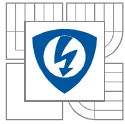
$$I_{max} = 11,12 + 11,12 \frac{\pi}{0,132} \left[\frac{1}{3} - \frac{1}{\pi} \arccos(1-0,132) \right] \sin(\arccos(1-0,132)) = 33,06 \text{ A}$$

Relativní efektivní hodnota proudu

$$I_{1ef} = \sqrt{\frac{3}{4} \frac{\pi}{\delta^2} \left[\frac{1}{3} - \frac{1}{\pi} \arccos(1-\delta) \right]^2 [2 \cdot \arccos(1-\delta) - \sin(2 \cdot \arccos(1-\delta))] + 2 \cdot \frac{3}{\pi} \arccos(1-\delta)}$$

$$I_{1ef} = 16,39 \text{ A}$$

(7.1-7)



Efektivní hodnota fázového proudu odebíraného ze sítě

$$I_{\text{fef}} = I_{1\text{ef}} \sqrt{\frac{2}{3}} = 16,39 \cdot \sqrt{\frac{2}{3}} = 13,38 \text{ A} \quad (7.1-8)$$

Proudu jedné diody obsahuje dva impulsy ze šesti.

Velikost střední hodnoty v jedné diodě

$$I_{\text{Dstr}} = \frac{I_{1\text{str}}}{3} = \frac{11,12}{3} = 3,71 \text{ A} \quad (7.1-9)$$

Velikost efektivní hodnoty v jedné diodě

$$I_{\text{Def}} = \frac{I_{1\text{ef}}}{\sqrt{3}} = \frac{16,39}{\sqrt{3}} = 9,46 \text{ A} \quad (7.1-10)$$

Velikost špičkového proudu v jedné diodě

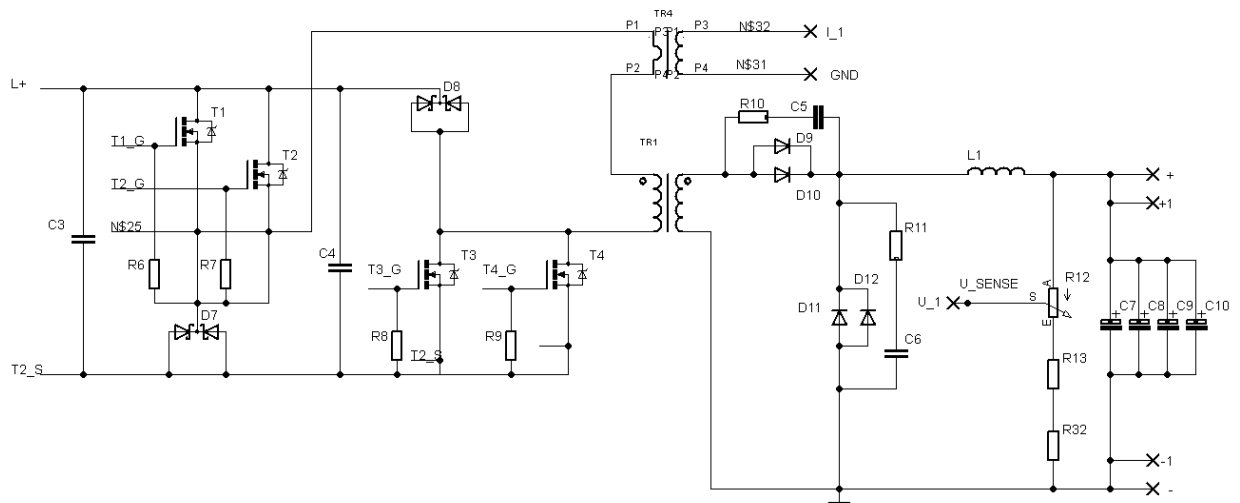
$$I_{\text{Dmax}} = I_{\text{max}} = 33,06 \text{ A} \quad (7.1-11)$$

Pro bezpečný chod diody je nutné ověřit, zda není žádný z těchto proudů překračován. Napětově musí být diody dimenzovány na závěrné napětí dostatečně větší, než je amplituda U_m sdruženého napětí. Pro síť 3 x 400 V musí být závěrné napětí větší než 800 V s ohledem na toleranci síťového napětí a náhodná přepětí v síti. Pro šesti – pulsní usměrňovač se volí hodnota závěrného napětí 1000 V (1200 V). Ze zvoleného návrhu se volí usměrňovací můstek BR3510W, který má závěrné napětí 1000 V a efektivní proud 35 A. Volba tohoto můstku je za účelem ceny. Velikost fóliového kondenzátoru 250 μF . Jeden kondenzátor je použit za účelem lepšího účinníku, odebíraný proud ze sítě se bude blížit k sinusovce. Rezistory R2, R3, R4 a R5 jsou pro vybíjení kondenzátoru. Rezistory jsou o výkonu 2 W a hodnota odporu je 2,2 k Ω . Rezistor R1 je pro snížení nabíjecího proudu kondenzátoru (47R/5W). Svorčky 1 a 2 jsou pro připojení časového relé, které po dobu nabíjení kondenzátorů odpojí od sítě řídicí obvod.

7.2 Jednočinný propustný měnič

Z usměrněného napětí o velikosti 3 x 400 V vznikne na sběracím kondenzátoru stejnosměrné mezilehlé napětí o hladině přibližně 565 V. Pro tuto hladinu napětí se dimenzují tranzistory IGBT se závěrným napětím 1200 V. Zvyšující se pracovní kmitočet vede ke zmenšování objemu transformátoru i výstupní tlumivky, proto je použit kmitočet v řádu kHz. Tranzistory IGBT pracují na spínacím kmitočtu od 25 kHz do 60 kHz, tento kmitočet je omezen přepínacími ztrátami v tranzistoru. Pro návrh se volí kmitočet o velikosti 40 kHz [2].

Budeme – li předpokládat výstupní tlumivku LC filtru, která má nekonečnou indukčnost. Proud tlumivky i_L je hladký, málo zvlněný a tudíž je roven proudu zátěže $i_L(t) = I_z = \text{konstantní}$. Pro návrh v prvním přiblížení předpokládáme, že transformátor má dokonalou magnetickou vazbu $k = 1$. Neexistuje pak výstupní rozptylová indukčnost [2].



Obrázek 10: Jednočinný propustný měnič

V jednočinném měničích pracují oba primární tranzistory současně. Během doby sepnutí tranzistorů je začátek primárního vinutí transformátoru připojen na $+U_d/2$ a konec je připojen na $-U_d/2$. Na primárním napětí se tak objeví $+U_d$ a vinutím protéká pracovní i magnetizační proud. V době vypnutí tranzistorů protéká primárním vinutím magnetizační proud, který postupně zaniká (probíhá demagnetizace). Začátek primárního vinutí je po tuto dobu připojen na napětí $-U_d/2$ a konec na $+U_d/2$ prostřednictvím nulových diod D1 a D2. Na primárním vinutí se objeví $-U_d$. Jakmile zanikne magnetizační proud (dokončí se demagnetizace), je primární vinutí odpojeno od meziobvodu U_d . Doba zapnutí nesmí překročit polovinu periody, jinak by došlo k lavinovému přesycení transformátoru. Po zapnutí tranzistorů je primární napětí konstantní

$$u_1(t) = +U_d$$

Na sekundární straně transformátoru je usměrňovač s diodou D9, D10 a nulovou diodou D11, D12, který je vysvětlen v další kapitole.

7.2.1 Návrh transformátoru

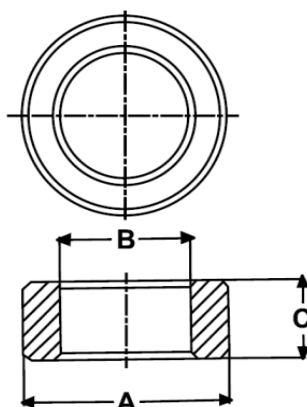
Impulsní transformátor je navrhnout pro požadované hodnoty, které jsou uvedeny v tab. 2. Magnetická indukce a permeabilita materiálu je konstantou použitého typu jádra. Zvolené hodnoty: proudová hustota, pracovní frekvence, střída. Návrh vysokofrekvenčního transformátoru je proveden pro toroidní jádro.

Tabulka 2: Hodnoty pro výpočet jednočinného měniče

Veličina		Hodnota
Usměrněné napětí	U_d	565 V
Napětí na zátěži	U_z	60 V
Proud na zátěži	I_z	100 A
Permeabilita prostředí	μ_o	$4 \cdot \pi \cdot 10^{-7}$
Permeabilita materiálu	μ_{FE}	2100
Činitel plnění	k_{pCu}	0,2
Proudová hustota	σ	3 A/mm ²
Pracovní frekvence	f	40 kHz
Magnetická indukce	$(B_{max}-B_r)$	0,25 T
Střída	s	0,35

Tabulka 3: Tabulka s hodnotami parametry jádra CF139LJT8022C [7]

Průřez jádra	A_e	330 mm ²
--------------	-------	---------------------



Obrázek 11: Náčrt toroidního jádra [6]

Vlastní výpočet:

Počet primárních závitů

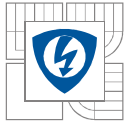
$$N_1 = \frac{U_d}{2f(B_{max}-B_r)S_{Fe}} = \frac{565}{2 \cdot 40 \cdot 10^3 \cdot 0,25 \cdot 632 \cdot 10^{-6}} = 45 \quad (7.2-1)$$

Počet sekundárních závitů

$$N_2 = \frac{U_z N_1}{U_d s} = \frac{60 \cdot 45}{565 \cdot 0,35} = 14 \quad (7.2-2)$$

Pro efektivní hodnotu sekundárního proudu se vychází z předpokladu, že sekundární proud $i(t)$ má tvar pravoúhlých proudových impulsů o výšce I_z a o střídě s . Pak efektivní hodnota sekundárního proudu:

$$I_{ef2} = I_z \sqrt{s} = 100 \cdot \sqrt{0,35} = 59,16 \text{ A} \quad (7.2-3)$$



Předpokládáme – li, že magnetizační proud je zanedbatelně malý oproti proudu zátěže, pak platí vztah pro výpočet hodnoty primárního proudu

$$I_{ef1}N_1 = I_{ef2}N_2 \rightarrow I_{ef1} = \frac{I_{ef2}N_2}{N_1} = \frac{59,16 \cdot 14}{45} = 18,4 \text{ A} \quad (7.2-4)$$

Proudovou hustotu volíme o stejné hodnoty pro primární a sekundární vodiče.

Průřez a průměr primárního vodiče

$$S_{Cu1} = \frac{I_{ef1}}{\sigma} = \frac{18,4}{3 \cdot 10^6} = 6,14 \text{ mm}^2$$
$$d_{Cu1} = \sqrt{\frac{4S_{Cu1}}{\pi}} = \sqrt{\frac{4 \cdot 6,14}{\pi}} = 2,79 \text{ mm} \quad (7.2-5)$$

Průřez a průměr sekundárního vodiče

$$S_{Cu2} = \frac{I_{ef2}}{\sigma} = \frac{59,16}{3 \cdot 10^6} = 19,7 \text{ mm}^2$$
$$d_{Cu2} = \sqrt{\frac{4S_{Cu2}}{\pi}} = \sqrt{\frac{4 \cdot 19,7}{\pi}} = 5,01 \text{ mm} \quad (7.2-6)$$

Typ jádra je toroid 2x LJT8022C/CF139. Primární vinutí má 45 závitů a vypočtený průřez vodiče 6,14 mm², které je složeno ze dvou vysokofrekvenčních svazků. Sekundární vinutí má 14 závitů a z vypočtený průřez vodiče je 19,7 mm².

Proudové a napěťové dimenzování polovodičů

Polovodičové součástky pracují ve spínaném režimu a pro určení typu součástky je nutno vypočítat špičkovou, střední a efektivní hodnotu protékajícího proudu. Střední a efektivní hodnota slouží k výpočtu ztrát způsobených vedením proudu.

Špičková hodnota magnetizačního proudu

$$I_{\mu max} = \frac{2f(B_{max} - B_r)^2 I_{Fe} S_{Fe}}{U_d \mu_0 \mu_{rFe}} = \frac{2 \cdot 40 \cdot 10^3 \cdot 0,25^2 \cdot 0,204 \cdot 632 \cdot 10^{-6}}{565 \cdot 4 \cdot 10^{-7} \cdot \pi \cdot 2100} = 0,43 \text{ A} \quad (7.2-7)$$

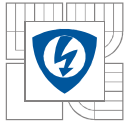
Primární nulové diody D7 a D8:

Špičkový proud nulovou diodou

$$I_{Došp} = I_{\mu max} + I_z \frac{N_2}{N_1} = 0,43 + 100 \cdot \frac{14}{45} = 31,91 \text{ A} \quad (7.2-8)$$

Střední proud nulovou diodou

$$I_{Dostr} = I_{\mu max} \frac{s}{2} = 0,43 \cdot \frac{0,35}{2} = 0,139 \text{ A} \quad (7.2-9)$$



Efektivní proud nulové diody

$$I_{D0ef} = I_{\mu max} \sqrt{\frac{s}{2}} = 0,43 \cdot \sqrt{\frac{0,35}{2}} = 0,33 \text{ A} \quad (7.2-10)$$

Maximální napětí mezi katodou a anodou na nulové diodě

$$U_{KAmax} = U_d = 565 \text{ V} \quad (7.2-11)$$

Z katalogu se vybrali primární nulové diody 2x STTH1512PI s velikostí napětí 1200 V/15 A.

Dimenzování tranzistorů T1, T2, T3 a T4

Pro výpočet hodnoty efektivního a středního proudu je zanedbán magnetizační proud.

Špičková hodnota proudu tranzistoru

$$I_{CE\dot{s}p} = I_{\mu max} + I_z \frac{N_2}{N_1} = 0,43 + 100 \cdot \frac{14}{45} = 31,54 \text{ A} \quad (7.2-12)$$

Střední hodnota proudu tranzistoru

$$I_{CEst\ddot{r}} = I_z \frac{N_2}{N_1} s = 100 \cdot \frac{14}{45} \cdot 0,35 = 10,88 \text{ A} \quad (7.2-13)$$

Efektivní hodnota proudu tranzistoru

$$I_{CEef} = I_z \frac{N_2}{N_1} \sqrt{s} = 100 \cdot \frac{14}{45} \cdot \sqrt{0,35} = 18,41 \text{ A} \quad (7.2-14)$$

Napětí mezi kolektorem a emitorem na tranzistoru

$$U_{CEmax} = U_d = 565 \text{ V} \quad (7.2-15)$$

Pro vypočtené hodnoty odpovídá v katalogu tranzistor FGH40N120AN. Z důvodu velkého výkonu se připojí vždy dva paralelně na jednu větev. Tranzistory společně s diodami budou chlazeny na společném chladiči.

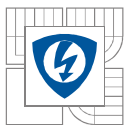
7.2.2 Návrh sekundárního usměrňovače

Dioda D9 a D10 usměrňuje výstupní napětí. Kondenzátor C5 a C6 odstraňuje střídavou složku. Rezistor R10 a kondenzátor C5 slouží k odlehčení vypínacího děje usměrňovacích diod D9 a D10, obdobně rezistor R11 a kondenzátor C6 pro nulové diody D11 a D14. Výstupní tlumivka L1 a kondenzátory C7, C8, C9 a C10 představují filtr typu dolní propust druhého řádu.

Proudové a napět'ové dimenzování polovodičů

Špičková hodnota proudu sekundární usměrňovací diody D9 a D10

$$I_{D\dot{s}p} = I_z = 100 \text{ A} \quad (7.2-16)$$



Střední hodnota proudu sekundární usměrňovací diody D9 a D10

$$I_{Dstř} = I_z s = 100 \cdot 0,35 = 35 \text{ A} \quad (7.2-17)$$

Efektivní hodnota proudu sekundární usměrňovací diody D9 a D10

$$I_{Def} = I_z \sqrt{s} = 100 \cdot \sqrt{0,35} = 59,16 \text{ A} \quad (7.2-18)$$

Maximální napětí mezi anodou a katodou na sekundární usměrňovací diodě D9 a D10

$$U_{KAmax} = \frac{U_z}{s} = \frac{60}{0,35} = 171,43 \text{ V} \quad (7.2-19)$$

Špičková hodnota proudu na sekundární nulové diodě D11 a D12

$$I_{Dšp} = I_z = 100 \text{ A} \quad (7.2-20)$$

Střední hodnota proudu na sekundární nulové diodě D11 a D12

$$I_{Dstř} = I_z (1 - s) = 100 \cdot (1 - 0,35) = 65 \text{ A} \quad (7.2-21)$$

Efektivní hodnota proudu na sekundární nulové diodě D11 a D12

$$I_{Def} = I_z \sqrt{1-s} = 100 \cdot \sqrt{1-0,35} = 80,62 \text{ A} \quad (7.2-22)$$

Maximální napětí mezi anodou a katodou na sekundární nulové diodě D11 a D12

$$U_{KAmax} = \frac{U_z}{s} = \frac{60}{0,35} = 171,43 \text{ V} \quad (7.2-23)$$

Z navržených hodnot pro diodu odpovídá nejvhodněji v katalogu dioda s označením DSE160-06A. V zapojení budou použity vždy dvě paralelně pro rozložení proudu z hlediska velkého výkonu a lepšího chlazení součástek.

7.2.3 Návrh výstupního LC - filtru

Tabulka 4: Hodnoty pro výpočet LC- filtru

U_z	60 V
f	40 kHz
ΔI	3 A
s	0,35
ΔU	0,5 V
$kpFE$	0,96
$kpCu$	0,2
B_{max}	0,35
σ	3 A/mm ²
μrFe	1500

Velikost filtrační tlumivky

$$L = \frac{U_{sp}}{2f\Delta I} (1-s)s = \frac{171,42}{2 \cdot 10^3 \cdot 3} \cdot (1-0,35) \cdot 0,35 = 162,5 \mu\text{H} \quad (7.2-24)$$

Velikost filtračního kondenzátoru

$$C = \frac{\Delta I}{8f\Delta U} = \frac{3}{8 \cdot 100 \cdot 10^3 \cdot 5 \cdot 10^{-3}} = 18,75 \mu\text{F} \quad (7.2-25)$$

Efektivní hodnota kapacitního proudu

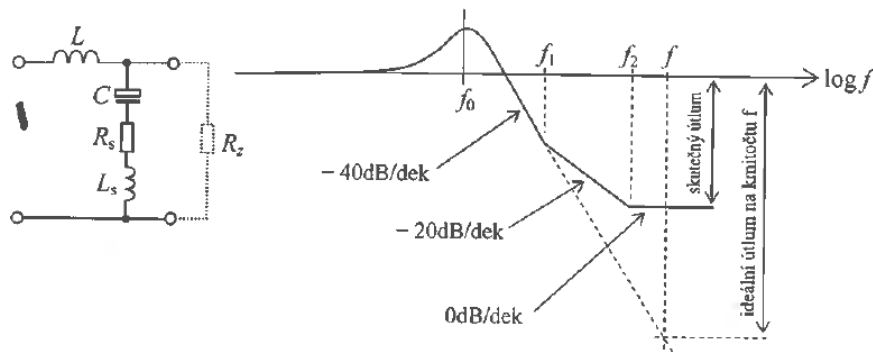
$$I_{\text{Cef}} = \frac{\Delta I}{\sqrt{3}} = \frac{3}{\sqrt{3}} = 1,73 \text{ A} \quad (7.2-26)$$

Ověření návrhu

Návrh je správný za předpokladu, že $f_o \ll f$.

$$f_o = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}} = \frac{1}{2 \cdot \pi \cdot \sqrt{162,5 \cdot 10^{-6} \cdot 18,75 \cdot 10^{-6}}} = 2883,32 \text{ Hz} \quad (7.2-27)$$

Návrh LC – filtru splňuje podmínku, a proto je správný a ve výpočtu lze dále pokračovat v postupu.



Obrázek 12: Kmitočtová charakteristika LC-filtru [2]

Maximální proud tlumivkou

$$I_{\text{max}} = I_z + \Delta I = 100 + 3 = 103 \text{ A} \quad (7.2-28)$$

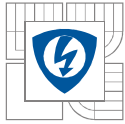
Počet závitů tlumivky

$$N = \frac{L \cdot I_{\text{max}}}{B_{\text{max}} \cdot S_{fe}} = \frac{162,5 \cdot 10^{-6} \cdot 103}{0,35 \cdot 1,122 \cdot 10^{-3}} = 43 \quad (7.2-29)$$

Průřez vodiče

$$S_{cu} = \frac{I_{ef2}}{\sigma} = \frac{59,16}{3 \cdot 10^6} = 19,7 \text{ mm}^2 \quad (7.2-30)$$

Vypočtená indukčnost tlumivky L_l je 162,5 μH . Počet závitů na tlumivce je 43. Z vypočtených hodnot se zvolila velikost jádra 3x LJF T250 52 MI. Průřez vodiče je 19,7 mm^2 . Typ jádra je toroid. Z vypočtených hodnot lze vyrobit tlumivku po požadované hodnotu indukčnosti.



7.3 Řídicí část

7.3.1 Návrh budicího transformátoru

Tabulka 5: Hodnoty pro výpočet budicího transformátoru

Veličina		Hodnota
Primární napětí	U_1	13 V
Sekundární napětí	U_2	17 V
Sekundární proud	I_{ef2}	0,4 A
Permeabilita prostředí	μ_0	$4 \cdot \pi \cdot 10^{-7}$
Permeabilita materiálu	μ_{FE}	2100
Činitel plnění	k_{pCu}	0,2
Proudová hustota	σ	3 A/mm ²
Pracovní frekvence	f	40 kHz
Magnetická indukce	$(B_{max}-B_r)$	0,2 T
Střída	s	1

Tabulka 6: Tabulka s hodnotami parametry jádra T1505 [6]

Střední délka siločáry	L_e	39,3 mm
Průřez jádra	A_e	13,25 mm ²

Vlastní výpočet:

Počet primárních závitů

$$N_1 = \frac{U_1}{2f(B_{max}-B_r)S_{Fe}} = \frac{13}{2 \cdot 40 \cdot 10^3 \cdot 0,2 \cdot 26,5 \cdot 10^{-6}} = 33 \quad (7.3-1)$$

Počet sekundárních závitů

$$N_2 = \frac{U_2 N_1}{U_1 s} = \frac{17 \cdot 25}{13 \cdot 1} = 44 \quad (7.3-2)$$

Efektivní hodnota proudu na sekundární straně je 0,4 A.

$$I_{ef1} N_1 = I_{ef2} N_2 \rightarrow I_{ef1} = \frac{I_{ef2} N_2}{N_1} = \frac{0,4 \cdot 44}{25} = 0,71 \text{ A} \quad (7.3-3)$$

Průřez a průměr primárního vodiče

$$S_{Cu1} = \frac{I_{ef1}}{\sigma} = \frac{0,71}{3 \cdot 10^6} = 0,237 \text{ mm}^2 \quad (7.3-4)$$
$$d_{Cu1} = \sqrt{\frac{4S_{Cu1}}{\pi}} = \sqrt{\frac{4 \cdot 0,237 \cdot 10^{-6}}{\pi}} = 0,5 \text{ mm}$$

Průřez a průměr sekundárního vodiče

$$S_{Cu2} = \frac{I_{ef2}}{\sigma} = \frac{0,4}{3 \cdot 10^6} = 0,133 \text{ mm}^2$$

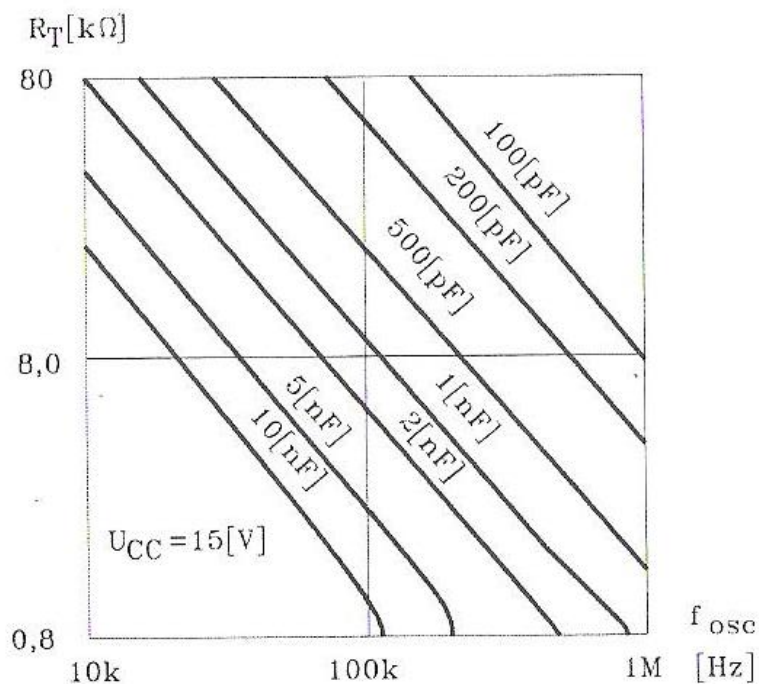
$$d_{Cu2} = \sqrt{\frac{4S_{Cu2}}{\pi}} = \sqrt{\frac{4 \cdot 0,133 \cdot 10^{-6}}{\pi}} = 0,4 \text{ mm} \quad (7.3-5)$$

Typ jádra je toroid 2x T1505/CF139. Vysokofrekvenční svazek je složen ze tří vinutí. Primární vinutí má 25 závitů a podle vypočteného průřezu volíme vodič o průměru 0,6 mm. Sekundární vinutí má 44 závitů a z vypočtených parametrů volíme vodič 0,4 mm. Budicí transformátor se vyrobí z toroidních dvou jader přilepených k sobě. Na nich bude navinuto vinutí z teflonových drátků.

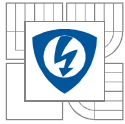
7.3.2 Nastavení pracovní frekvence

Řídící obvod je nejdůležitější část zdroje. Tento obvod generuje impulsy pro spínání IGBT tranzistorů ve výkonové části. Pomocí něho se reguluje napětí a proud na výstupu zdroje. Samostatné řízení vyplývá z topologie spínaných zdrojů, pro spínání je použit integrovaný obvod UC3845. Tento obvod je v pouzdře DIL8 s maximálním spínacím kmitočtem 500 kHz. Maximální omezení propustného pulzu je 50 %.

Obvod je napájen z pomocného zdroje 15 V. Pracovní frekvence obvodu UC3845 je nastavena pomocí rezistoru R20 a kondenzátor C14 na frekvenci 40 kHz. Výstup je určen pro spínání IGBT tranzistorů T1 až T4. Pro galvanické oddělení řídicího signálu je použit transformátor TR3.



Obrázek 13: Určení velikostí součástek pro nastavení pracovního kmitočtu [1]



Pro frekvenci 40 kHz se volí hodnota odporu $R_{20} = 4k7$.

$$f_{osc} = \frac{1,72}{R_T C_T} \rightarrow C_T = \frac{1,72}{R_T f_{osc}} = \frac{1,72}{4,7 \cdot 10^3 \cdot 40 \cdot 10^3} = 4,7 \text{ nF} \quad (7.3-6)$$

Z katalogu se vybere kondenzátor C14 o kapacitě 4,7 nF pro napětí 50 V.

7.3.3 Návrh měřicího transformátoru proudu

Důležitý požadavek snímačů střídavého proudu je kladen na galvanické oddělení výstupního měřonosného signálu od silového obvodu, kterým protéká vstupní měřený signál. Ve všech případech snímačů střídavého proudu je dosaženo galvanického oddělení magnetickou vazbou: měřicím transformátorem proudu, čidlem proudu s Hallovou sondou nebo Rogowského cívkou. Návrh bude proveden pro měřicí transformátor proudu TR4, který je zapojen do série s primárním vinutím impulsního transformátoru TR1.

Tabulka 7: Hodnoty pro výpočet měřicího transformátoru proudu

Veličina		Hodnota
Sekundární napětí	U_2	4 V
Počet primárních závitů	N_1	1
Počet sekundárních závitů	N_2	43
Primární proud	I_1	18,4 A
Sekundární proud	I_2	0,1 A
Pracovní frekvence	f	40 kHz

Tabulka 8: Tabulka s hodnotami parametry jádra T1505 [6]

Střední délka siločáry	L_e	39,3 mm
Průřez jádra	A_e	26,5 mm ²
Indukčnost jádra	A_L	1250 nH

Kontrolní výpočet zvolených hodnot pro jádro T1505:

Indukčnost sekundárního vinutí

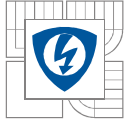
$$L_2 = N^2 A_L = 43^2 \cdot 1250 \cdot 10^{-9} = 2,3 \text{ mH} \quad (7.3-7)$$

Magnetizační proud v sekundárním vinutí

$$I_\mu = \frac{U_2}{2fL_2} = \frac{4}{2 \cdot 40 \cdot 10^3 \cdot 2,3 \cdot 10^{-3}} = 21,7 \text{ mA} \quad (7.3-8)$$

Při zanedbání odporu sekundárního vinutí je zatěžovací odpor obvodu

$$R_2 = \frac{U_2}{I_2} = \frac{4}{0,1} = 40 \Omega \quad (7.3-9)$$



Kontrola sycení jádra

$$B_{max} = \frac{U_2}{2fN_2S_{Fe}} = \frac{4}{2 \cdot 40 \cdot 10^3 \cdot 40 \cdot 14,6 \cdot 10^{-6}} = 79,64 \text{ mT} \quad (7.3-10)$$

Průřez a průměr sekundárního vodiče

$$S_{Cu2} = \frac{I_2}{\sigma} = \frac{0,1}{3 \cdot 10^6} = 0,03 \text{ mm}^2 \quad (7.3-11)$$

$$d_{Cu2} = \sqrt{\frac{4S_{Cu2}}{\pi}} = \sqrt{\frac{4 \cdot 0,03 \cdot 10^{-6}}{\pi}} = 0,2 \text{ mm}$$

Z kontrolního výpočtu je patrné, že se jádro toroidu nebude přesycovat. Chyba způsobena magnetizací jádra je 6,2 %. Návrh měřicího transformátoru proudu je proveden pro typ jádra 2x LJT 1505/CF139. Sekundární vinutí má 43 závitů, průměr sekundárního vodiče je minimálně 0,2 mm. Při realizaci bude použit podle možností větší průměr. Primární vinutí tvoří jeden průvlek vodiče o průměru 1 mm, který bude navléknut do silikonové bužírky pro zajištění izolační pevnosti.

8 VÝPOČET ZTRÁT A NÁVRH CHLADIČE

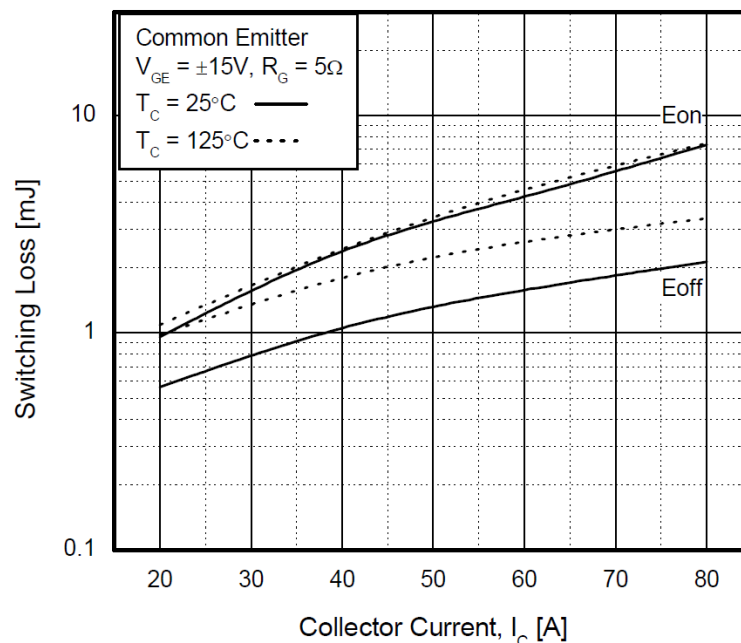
8.1 Ztráty a chlazení výkonového tranzistoru

Výkonový prvek pro měnič byl vybrán tranzistor IGBT FGH40N120AN, jehož výhoda byla cena v poměru jmenovitých parametrů. V měničích jsou vždy dva tranzistory zapojeny paralelně. Do tranzistoru je připojeno budící napětí o velikosti 17 V. Výpočet velikosti ztrátového výkonu na součástce je uveden níže [16].

Ztrátový výkon přepínací na jednom tranzistoru

$$P_{ztrpř} = \frac{f \cdot (W_{on} + W_{off})}{2} = \frac{40 \cdot 10^3 \cdot (1,1 \cdot 10^{-3} + 1 \cdot 10^{-3})}{2} = 42 \text{ W} \quad (8.1-1)$$

Velikost zapínací a vypínací energie vzniklé při těchto dějích byly vyčteny z datového listu. Přepínací ztráty jsou poloviční kvůli odečítání hodnot z grafu z datového listu, protože hodnota proudu na tranzistoru je poloviční než v grafu na Obrázek 14.



Obrázek 14: Závislost přepínacích ztrát na proudu kolektoru

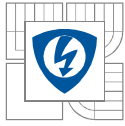
Ztrátový výkon vedením

$$P_{ztrved} = \frac{I_{CEef}}{2} \cdot s \cdot U_{CE} = \frac{18,41}{2} \cdot 0,35 \cdot 2,6 = 8,38 \text{ W} \quad (8.1-2)$$

Celkový ztrátový výkon na tranzistoru

$$P_{ztrcel} = P_{ztrpř} + P_{ztrved} = 42 + 8,38 = 50,38 \text{ W} \quad (8.1-3)$$

Celkové vypočtené ztráty na jednom tranzistoru jsou 50,38 W.



Nulové diody na primární straně měniče pro tranzistory jsou použity dvě paralelně zapojeny diody 2x STTH1512PI. Maximální závěrné napětí diody je 1200V a velikost proudu diody je 15A. Dovolené oteplení je 65°C. Dynamický odpor diody je 0,027Ω [15].

Ztrátový výkon na nulové diodě

$$P_{ztrpD} = U_p \cdot \frac{I_{stř}}{2} + R_d \cdot \frac{I_{ef}^2}{2} = 1,4 \cdot \frac{0,139}{2} + 0,027 \cdot \frac{0,33^2}{2} = 98,77mW \quad (8.1-4)$$

Na sekundární straně jsou použity diody DSEI60-06A, která má závěrné napětí 600V a velikost proudu diodou 60A. Dovolené oteplení na diod je 70°C. Tepelný odpor mezi čipem a pouzdem je 0,75°C/W. Všechny hodnoty jsou vyčteny z datového listu [14].

$$P_{ztrsD} = U_p \cdot \frac{I_{stř}}{2} + R_d \cdot \frac{I_{ef}^2}{2} = 1,13 \cdot \frac{35}{2} + 0,0047 \cdot \frac{59,16^2}{2} = 28 W \quad (8.1-5)$$

$$P_{ztrsD0} = U_p \cdot \frac{I_{stř}}{2} + R_d \cdot \frac{I_{ef}^2}{2} = 1,13 \cdot \frac{65}{2} + 0,0047 \cdot \frac{80,62^2}{2} = 52 W \quad (8.1-6)$$

Výpočet tepelného odporu chladiče

$$R_{vH} = \frac{\Delta T}{4 \cdot P_{ztrcel} + 4 \cdot P_{ztrpD} + 2 \cdot P_{ztrsD} + 2 \cdot P_{ztrsD0}} - \frac{R_{vJC}}{12} - \frac{R_{vCH}}{12}$$
$$R_{vH} = \frac{110 - 40}{4 \cdot 50,38 + 4 \cdot 98,77 \cdot 10^{-3} + 2 \cdot 28 + 2 \cdot 52} - \frac{0,75}{12} - \frac{0,25}{12} \quad (8.1-7)$$
$$R_{vH} = 0,11 \frac{^{\circ}C}{W}$$

Výsledná hodnota R_{vH} je maximální přípustný tepelný odpor chladiče. Z dostupných součástek byl použit chladič z frekvenčního měniče, který byl nevyužit. Tyto součástky budou chlazeny aktivně.

Výpočet ztrátového výkonu usměrňovače v meziobvodu. Pro usměrnění mezilehlého napětí jsou použity tři usměrňovací můstky BR35005W. Na jednu fázi jsou zapojeny dvě diody paralelně. Tato součástka byla vybrána z důvodu ceny a lepšího chlazení součástky. Usměrňovací můstek má závěrné napětí 1000V a velikost proudu 35A [17].

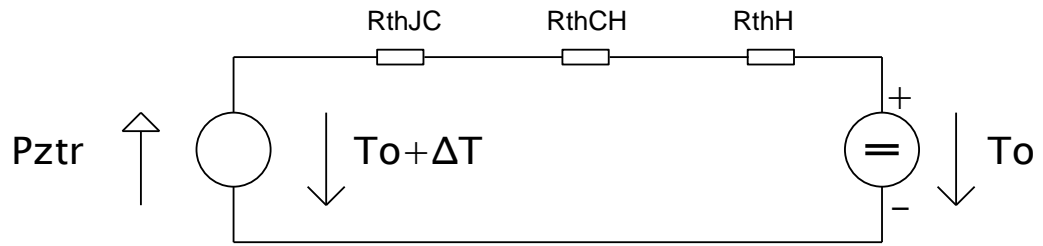
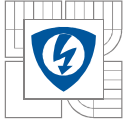
Výpočet ztrátového výkonu usměrňovače

$$P_{ztrpUSM} = U_p \cdot I_{stř} + R_d \cdot I_{ef}^2 = 1,1 \cdot 3,71 + 0,05 \cdot 9,46^2 = 8,56W \quad (8.1-8)$$

Výpočet tepelného odporu chladiče

$$R_{vH} = \frac{\Delta T}{3 \cdot P_{ztrpUSM}} - \frac{R_{vJC}}{3} - \frac{R_{vCH}}{3} \quad (8.1-9)$$
$$R_{vH} = \frac{110 - 40}{3 \cdot 8,56} - \frac{1,5}{3} - \frac{0,2}{3} = 2,16 \frac{^{\circ}C}{W}$$

Z dostupných součástek byly zvoleny dva aktivní chladiče původně určené pro chlazení procesoru počítače. Pro napájení ventilátorů je použit počítačový zdroj.



Obrázek 15: Náhradní obvod tepelných přechodů

Výpočet účinnosti měniče

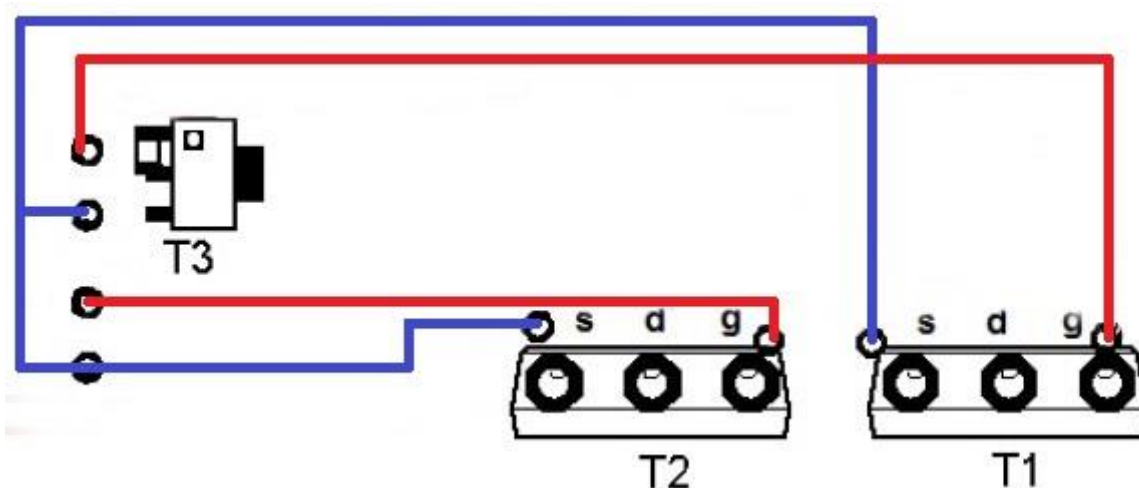
$$\eta = \frac{P_z}{P_d} = \frac{I_z \cdot U_z}{I_d \cdot U_d + P_{ztrc}} = \frac{100 \cdot 60}{11,12 \cdot 540 + 387,475} = 0,9386 \quad (8.1-10)$$

Teoretická účinnost měniče je 93,96 %. Tato účinnost je vypočtena pro stejnosměrný měnič bez použití usměrňovače.

9 DESKY PLOŠNÝCH SPOJŮ

DPS byly vyrobeny ve škole a to z oboustranných fotocitlivých desek. Největším problémem při samotném návrhu bylo dodržet minimální izolační vzdálenosti. Pro běžnou DPS musí být izolační vzdálenosti mezi vysokonapěťovou a nízkonapěťovou částí minimálně 7 mm. Z tohoto důvodu tyto desky dosahují větších rozměrů. Z důvodu velkého proudového namáhání byly vodivé cesty zesíleny pomocí cínu a přidavných měděných vodičů

Seznam běžně dostupných součástek je uveden v příloze. Výroba specifických součástek je popsána v následující kapitole 10. Kvůli dodržení již zmíněných izolačních vzdáleností bylo nutné desku opatřit drátovými propojkami. Ty vedou vždy od budiče k příslušnému tranzistoru, dle Obrázek 16 avšak jsou v provedení kroucené dvoulinky.



Obrázek 16: Znárodnění drátových propojek mezi budiči a tranzistory

10 VÝROBA INDUKČNÍCH SOUČÁSTEK

10.1 Výroba výkonového transformátoru

Samotný transformátor je tvořen primárním vinutím, které je navinuto dvěma paralelními vodiči o celkovém průřezu $S_{cu1} = 6,3 \text{ mm}^2$ a $N_1 = 45$. Na toto vinutí byla z bezpečnostních důvodů nalepena izolační páska, aby bylo primární vinutí dostatečně izolované od sekundárního vinutí. Sekundární vinutí bylo navinuto z vodiče o průřezu $S_{cu2} = 18,8 \text{ mm}^2$ a $N_2 = 14$. Pro toto vinutí byl použit vysokofrekvenční lanko se zesílenou izolací (RUPALIT SAFATY). Na fotografiích Obrázek 17 a Obrázek 18 je vidět sled operací při vinutí transformátoru. Pro výkonový transformátor byla použita dvě spleená toroidní jádra 2x CF139-LJT8022C na sebe.



Obrázek 17: Fotografie navinutého primárního vinutí



Obrázek 18: Fotografie navinutého výkonového transformátoru

10.2 Výroba transformátoru proudu

Základem měřicího transformátoru proudu je jádro CF139-LJT2510C, které je na fotografii. Primární vinutí je tvořeno jedním průvlekem z výkonového transformátoru. Sekundární vinutí je tvořeno $N_2 = 50$ závitů. Konce sekundárního vinutí jsou dlouhé asi 7 cm, které jsou zkroucené a přivedené na řídicí desku.



Obrázek 19: Fotografie proudového transformátoru

10.3 Výroba budicího transformátoru

Pro výrobu tohoto transformátoru bylo použito vysokofrekvenční jádro z odrušovacího filtru. Na toto jádro bylo navinuto primární vinutí rovnoměrně po celém obvodu. Na tuto první vrstvu se obdobným způsobem navinula obě sekundární vinutí. Toto provedení je nutné pro dosažení co nejtěsnější vazby mezi primárním a sekundárním vinutím, tedy minimalizace rozptylové indukčnosti. Tato indukčnost totiž zmenšuje strmost hran budicího napětí. Primární vinutí $N_1 = 13$ závitů a dvě sekundární vinutí po $N_2 = 15$ závitů..



Obrázek 20: Fotografie měřícího transformátoru proudu

10.4 Výroba tlumivky výstupního LC - filtru

Vyrobění této indukčnosti spočívá v tom, že se k sobě přilepí dvě jádra typu železo – prach a na ně se navine vysokofrekvenčním vodičem se zesílenou izolací vinutí o parametrech $N = 14$ závitů a průřezu vodiče $S_{cu} = 18,8 \text{ mm}^2$.

11 CHLADÍCÍ SOUSTAVA

Chladicí soustava kyslíkovodíkové svářečky představuje veškeré prvky zajišťující bezpečnou teplotu jednotlivých součástek během provozu. Mezi největší tepelné zdroje patří výkonové tranzistory, dále diody v propustném měniči, výkonový usměrňovač, usměrňovací diody na sekundární straně měniče a tlumivka.

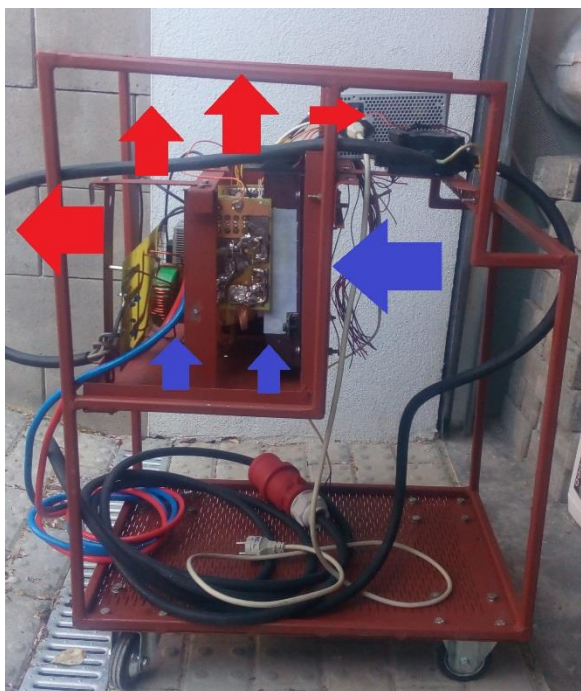
K chlazení polovodičových součástek se v tomto zařízení používá hliníkový chladič 150x250x40. K tomuto chladičímu prvku jsou upevněny následující součástky: T1, T2, T3, T4, D1, D2, D3, D4, D5, D6, D7 a D8. Jednotlivé součástky se upevní následovně:

- Mezi tranzistory a chladič se umístí keramická podložka, po obou stranách potřená silikonovou pastou. Na šroubu musí být navlíknuta izolační podložka tvaru hříbu.
- Stejný postup práce je i pro diody.

Chladič se k hlavní desce uchopí tak, že se přišroubuje dvěma distančními sloupky skrze vyznačené otvory v desce. Chladič je k desce umístěn o 90° (v kolmém směru) ze strany BOTTOM. Mezi chladič a přesahující desku se nalepí izolační podložka. Podložka může být například z kuprexitu. Tato operace se provede i pro sekundární desku, která se přimontuje z opačné strany chladiče. Na středu chladiče jsou přimontovány plastové držáky, které slouží k uchycení výkonového transformátoru a filtrační tlumivky.

Z bezpečnostních důvodů je chladič uzemněn. Pro tento účel je na chladiči vytvořena zemnicí svorka pro připojení ochranného vodiče.

Ventilátory se sepnou, jakmile nabíječka překročí provozní teplotu a ta je nastavena na 40°C. V praxi by tyto ventilátory měli běžet v nepřetržitém režimu, protože zdroj bude dodávat výkon větší než 2 kW.



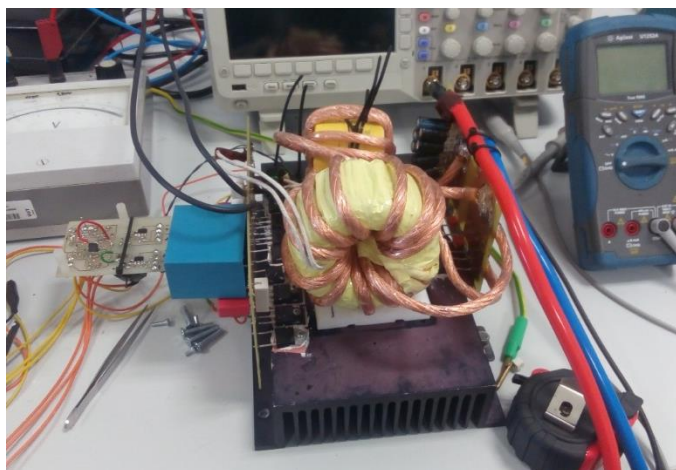
Obrázek 21: Fotografie znázorňující profukování elektrické části

12 KONSTRUKČNÍ USPOŘÁDÁNÍ

Mechanickou část tvoří přístrojová skříňka a všechny prvky, které přidržují jednotlivé komponenty. Měnič je rozdělen do několika bloků:

- Výkonová část – primární a sekundární deska
- Řídicí část
- Zdroj pro řízení
- Vstupní EMC filtr

Na hlavní chladič je připevněna výkonová část měniče. Tuto konstrukci vidíme na Obrázek 21. Celková konstrukce svářečky je zobrazena na Obrázek 22. Kde lze vidět, oddělení elektrické části od plynové. Celá konstrukce na kolečkách pro snadnou manipulaci a transport. Tento vozík byl sestaven amatérsky v domácích podmínkách, tomu odpovídá jeho kvalita.



Obrázek 22: Detail měniče



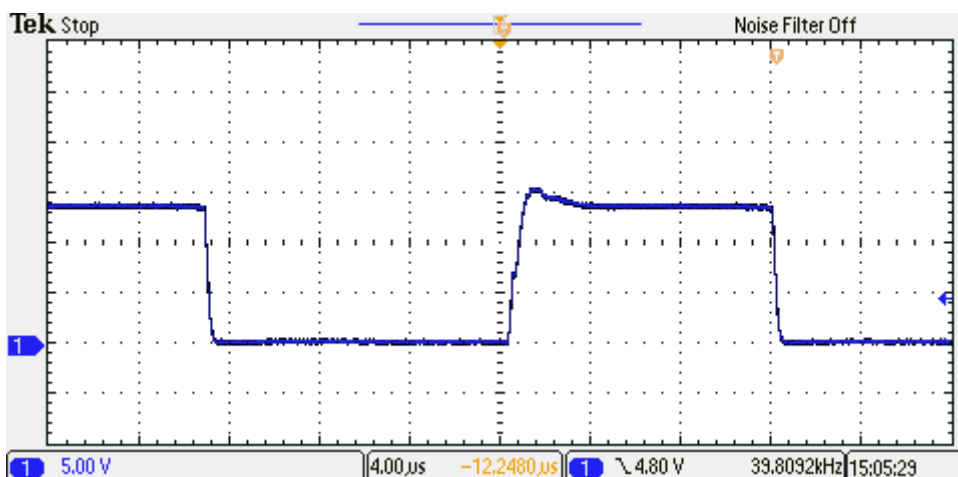
Obrázek 23: Fotografie celkové konstrukce svářečky

13 NAMĚŘENÉ PARAMETRY

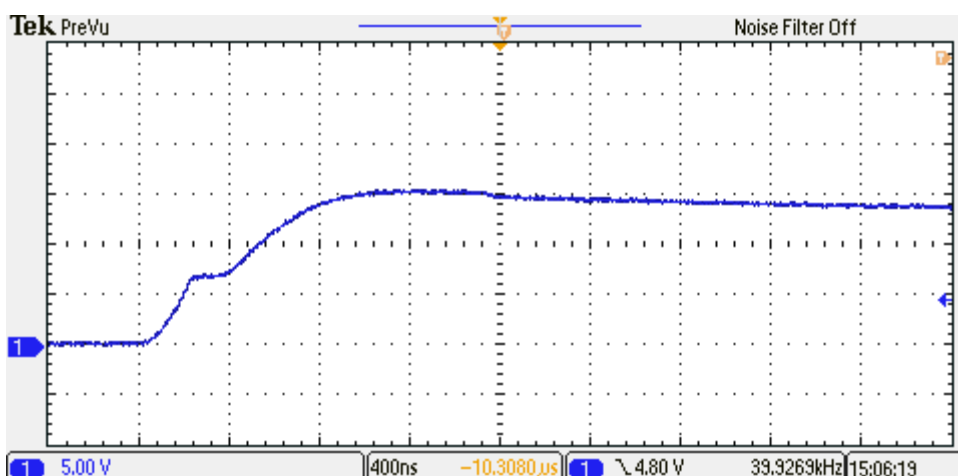
Prvním odzkoušeným obvodem byl pomocný zdroj pro řízení. Připojením napájecího napětí na řídicí obvod se pozorovali průběhy na výstupu z obvodu UC3845, kde byly zjištěny chyby a nedostatky v návrhu původní verze desky a byla proto navržena a zhotovena nová deska. Po odladění řídicího obvodu se přivedlo stejnosměrné napájecí napětí do primárního obvodu, který se testoval od nulového napětí do plného napětí mezilehlého obvodu. Při tomto testování bylo nutné vyměnit silikonové podložky za keramické, které měli nedostatečnou izolační vzdálenost.

13.1 Naměřené hodnoty na zdroji

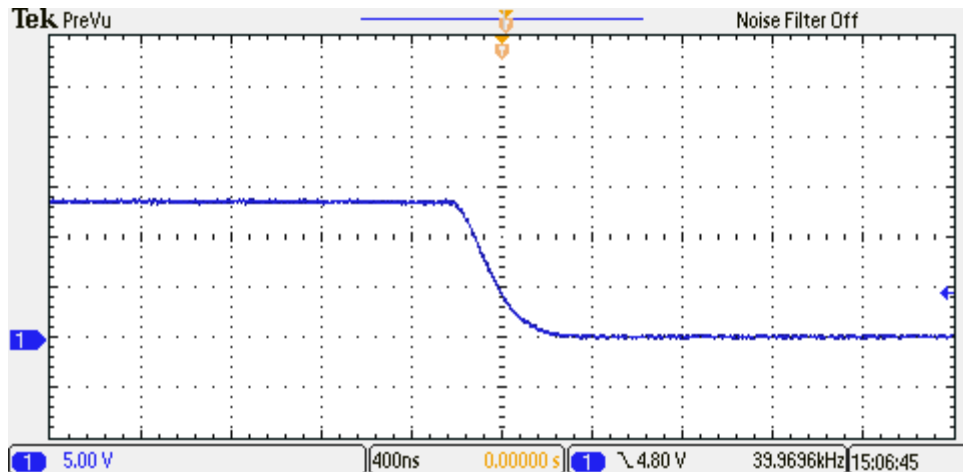
Na Obrázek 24 je vidět průběh napětí pro spínání dolního tranzistoru. Na Obrázek 25 je zobrazen detail průběhu náběžné hrany. Na Obrázek 26 je zobrazen detail sestupné hrany. Doba náběhu je 800 ns a doba sestupu je 400ns.



Obrázek 24: Průběh napětí U_{GE} při $U_d = 0V$

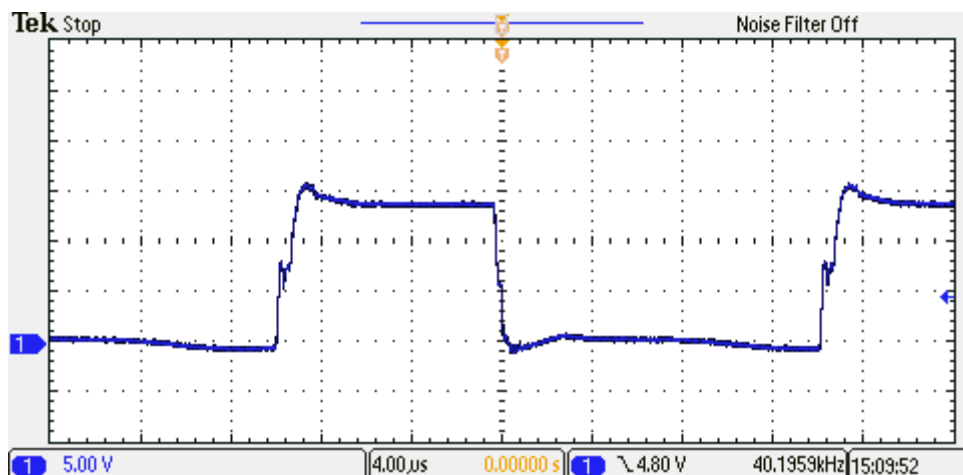


Obrázek 25: Detail průběhu náběžné hrany U_{GE} při $U_d = 0V$

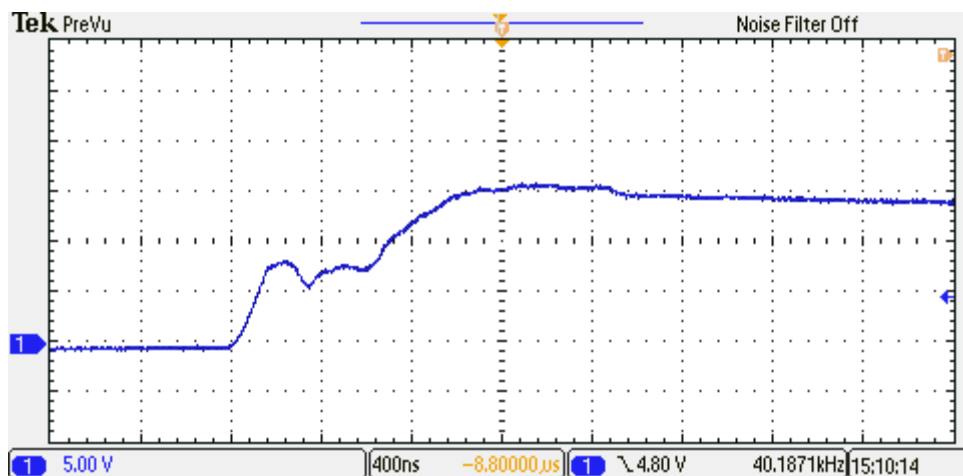


Obrázek 26: Detail průběhu sestupné hrany U_{GE} při $U_d = 0V$

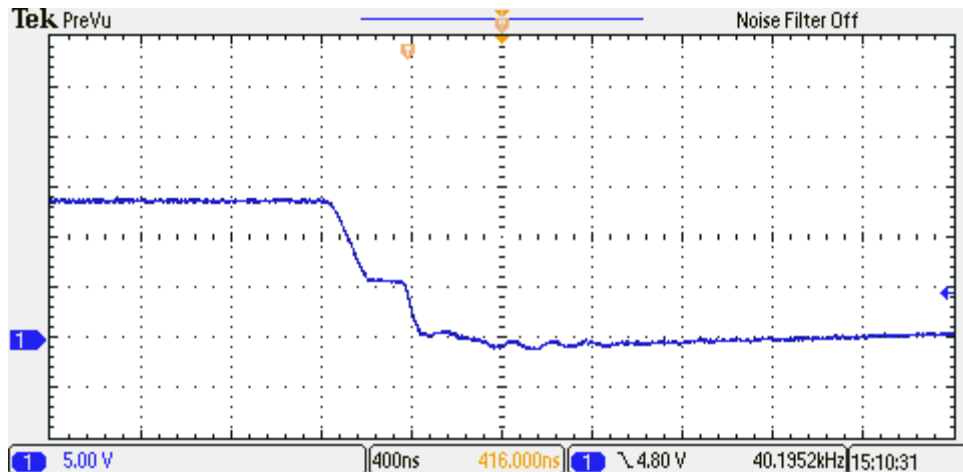
Zobrazení průběhů mezi řídicí elektrodou tranzistoru a emitorem při plném napětí v meziobvodu $U_d = 565V$. Na Obrázek 27 je vidět celkový průběh řídicího signálu. Na Obrázek 28 je vidět detail náběžné hrany a na Obrázek 29 je detail sestupné hrany.



Obrázek 27: Průběh napětí U_{GE} při $U_d = 565V$



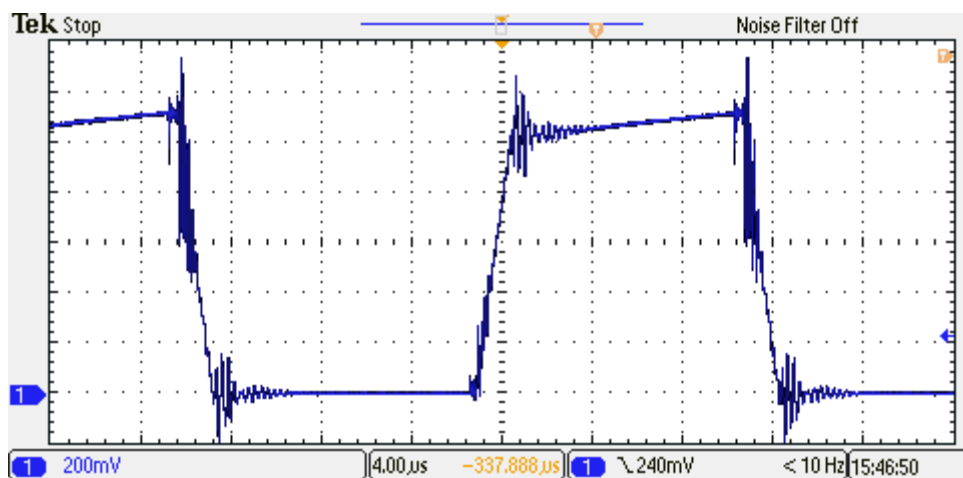
Obrázek 28: Detail průběhu náběžné hrany U_{GE} při $U_d = 565V$



Obrázek 29: Detail průběhu sestupné hrany U_{GE} při $U_d = 565V$

Zobrazené průběhy bez napětí v meziobvodu jsou mnohem čistější a bez schodku při náběžné a sestupné hraně. Připojením meziobvodu do napětí 550V se na průběhu zobrazují schodky a to je způsobeno vypnutím a zapnutím tranzistoru. Tyto průběhy jsou zobrazovány pro nezatížený zdroj.

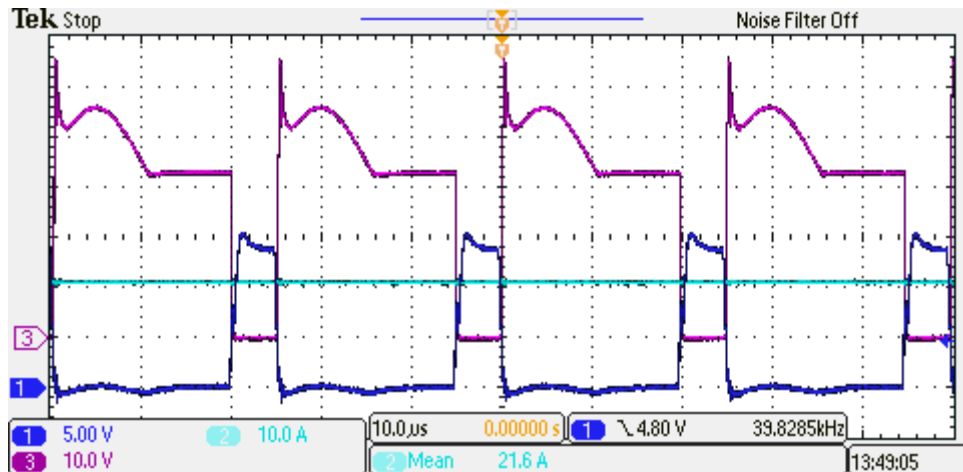
Na Obrázek 30 je zobrazen průběh proudu na bočníku při velikosti proudu na zátěži $I_z = 40A$. Bude-li na zátěži proud 30 A potom bude na primárním vinutí proud o velikosti 6,13 A a na bočníku bude snímáno napětí o velikosti 1,3 V.



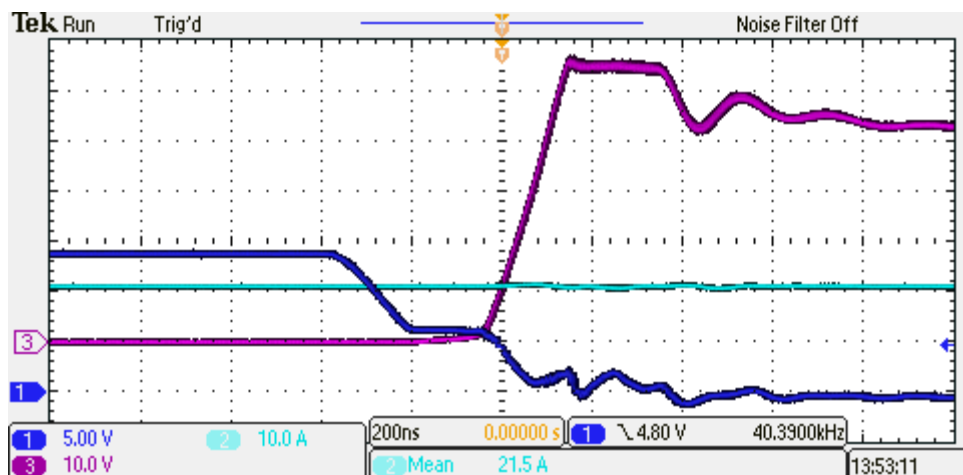
Obrázek 30: Průběh signálu na bočníku (měřícím transformátoru proudu, na sekundární straně)

Následující obrázky zobrazují průběhy napětí a proudu na dolním tranzistoru při těchto parametrech:

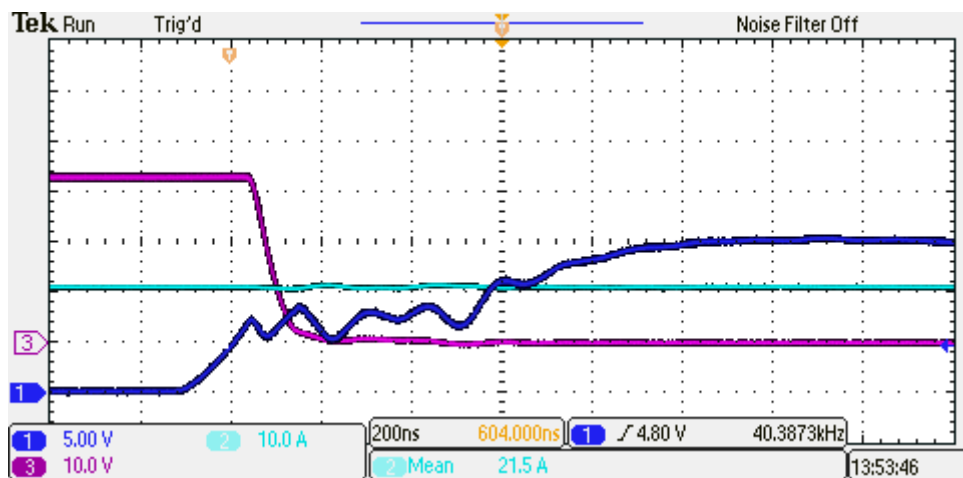
- $U_d = 550V$
- $I_d = 1,4A$
- $U_z = 31,97V$
- $I_z = 21,6A$



Obrázek 31: Celkové průběhy napětí a proudů (1. U_{GE} , 2. I_z , 3. U_{CE} na spodním tranzistoru)

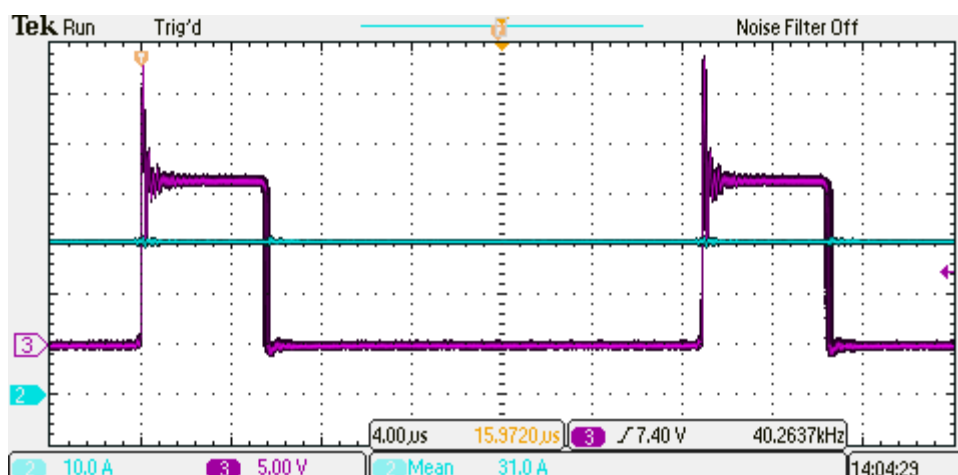


Obrázek 32: Detail vypínacího děje (1. U_{GE} , 2. I_z , 3. U_{CE} na spodním tranzistoru)

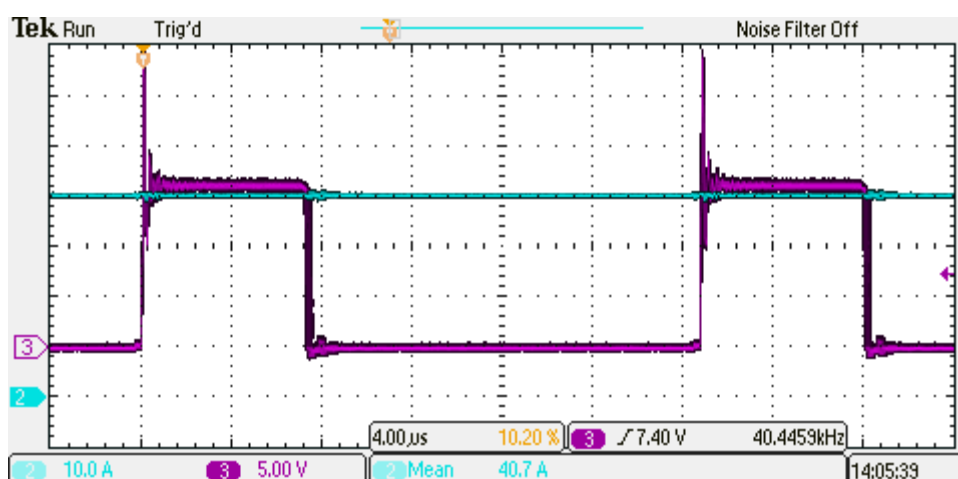


Obrázek 33: Detail zapínacího děje (1. U_{GE} , 2. I_z , 3. U_{CE} na spodním tranzistoru)

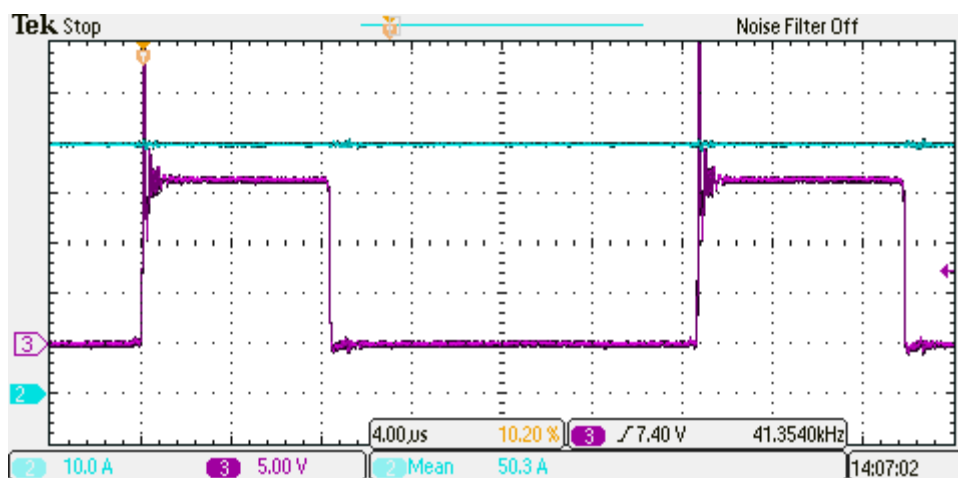
Průběhy napětí na sekundární části měniče nulové diody pro různé změny proudu (střídý).



Obrázek 34: Průběh napětí na nulové diodě při $U_z = 35,7V$ a $I_z = 31A$ (2. I_z , 3. U_{D0} na sekundární straně měniče)

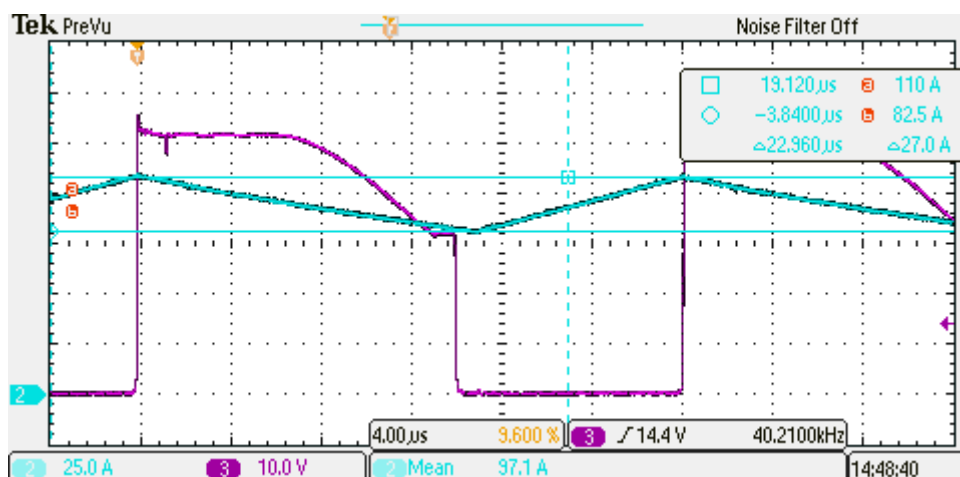


Obrázek 35: Průběh napětí na nulové diodě při $U_z = 46,94V$ a $I_z = 40,7A$ (2. I_z , 3. U_{D0} na sekundární straně měniče)



Obrázek 36: Průběh napětí na nulové diodě při $U_z = 57,9V$ a $I_z = 50,3A$ (2. I_z , 3. U_{D0} na sekundární straně měniče)

Na Obrázek 37 je vidět průběh proudu na tlumivce a napětí na tranzistoru mezi kolektorem a emitorem. Z Obrázek 37 lze odečíst zvlnění proudu na tlumivce. Naměřená velikost zvlnění proudu je $\Delta I = 13,5$ A a zvolené zvlnění je 10 A. Teoretická a naměřená hodnota se liší o 3,5 A. Tento výsledek je správný a rozdíl této hodnoty je dán menším počtem závitů na tlumivce a jádra. Pro realizovanou tlumivku bylo vypočteno 20 závitů, ale do jádra se nevešly všechny závity. Bylo navinuto pouze 15 závitů. Další změnou pro realizaci tlumivky bylo zvýšení zvlnění proudu z 3 A na 10 A. Což vedlo k zmenšení rozměru tlumivky a počtu závitů.



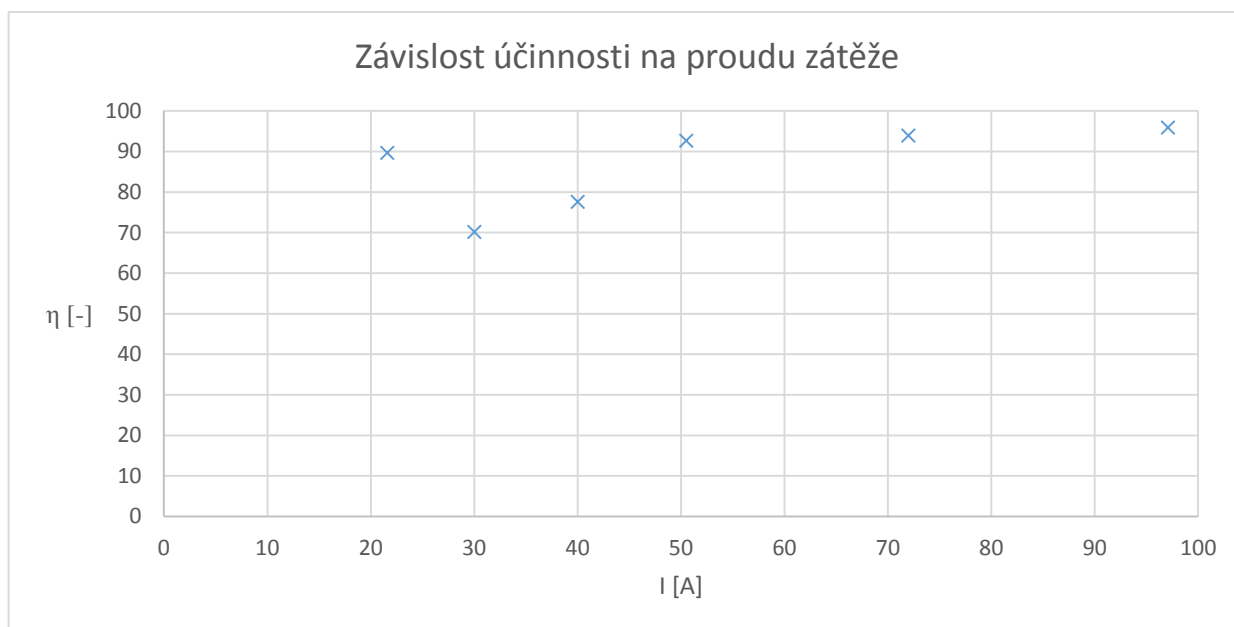
Obrázek 37: Detail průběhu proudu na tlumivce a napětí U_{CE} (2. I_s , 3. U_{CE} na sekundární straně měniče)

Tabulka 9: Naměřené parametry pro různá zatížení

Měření	U _d [-]	I _d	U _z	I _z	P _d	P _z	η [-]
1	550	1,4	31,97	21,6	770,0	690,6	0,897
2	565	2,7	35,70	30	1525,5	1071,0	0,702
3	550	4,4	46,94	40	2420,0	1877,6	0,776
4	535	5,9	57,92	50,5	3156,5	2925,0	0,927
5	525	8,9	60,95	72	4672,5	4388,4	0,939
6	515	11,2	56,98	97,1	5768,0	5532,8	0,959

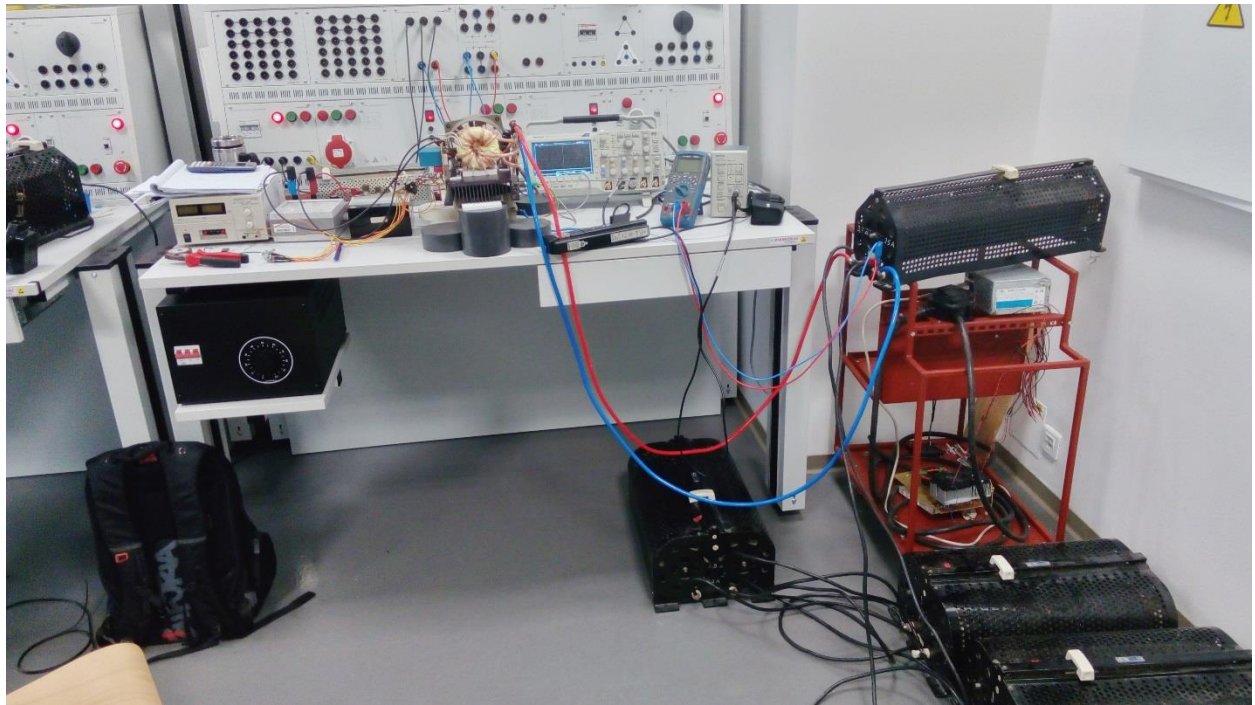
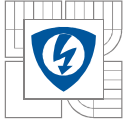
$$\eta = \frac{P_z}{P_d} = \frac{I_z \cdot U_z}{I_d \cdot U_d} = \frac{97,1 \cdot 56,98}{11,2 \cdot 515} = 0,9592$$

14.1-1

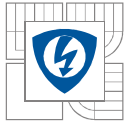


Obrázek 38: Graf závislosti účinnosti na proudu zátěže

Příklad výpočtu účinnosti je uveden pro 6. měření. Z naměřených hodnot napětí a proudů na zátěži a v mezilehlém obvodu je účinnost $\eta = 95,92\%$. Teoretická účinnost je nižší a to je způsobeno výpočtem ztrát pro plné napětí na zátěži a proudu. Dále je to způsobené tím, že měnič nebyl zapnutý delší dobu a součástky se nezahřály na dovolené oteplení. Měnič nemohl být zapnutý delší dobu, protože by došlo k spálení odporové zátěže.



Obrázek 39: Fotografie měřícího pracoviště



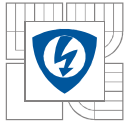
14 ZÁVĚR

Zadáním diplomové práce bylo navrhnout koncepci řídicího obvodu, konkrétní schéma, desky plošných spojů a následnou realizaci s ověřením navrhovaných parametrů zdroje pro kyslíkovodíkovou svářečku. Při řešení práce se podařilo splnit všechny body zadání.

Popisovaná verze spínaného zdroje pro kyslíkovodíkovou svářečku byla vyrobena v rámci diplomové práce a odzkoušena na plný výkon. Odzkoušení proběhlo ve školní laboratoři za přítomnosti vedoucího práce. Odzkoušení trvalo dva dny, kdy se upravovaly menší nedostatky. Měnič byl vyzkoušen na výkon 5,5 kW s nastavitelnými výstupními parametry napětí a proudu. Při experimentálním měření se potvrdila regulovaná hodnota proudu od 30 A do 100 A a regulovatelné napětí v rozmezí od 14 V do 72 V naprázdno. Vypočtená účinnost měniče je shodná s reálnou účinností měniče, která je 93,8 %. Dle těchto faktů je usouzeno, že návrh a realizace zdroje byla provedena správně, což odpovídá výsledkům práce. Zdroj je usazen do vozíku, který je vlastní výroby. Z bezpečnostních důvodů je elektrická část svářečky oddělena plechem od plynové části.

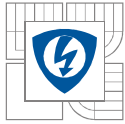
Během testování nenastaly zásadní komplikace. Během měření na měniči byly zaznamenány časové průběhy několika zásadních veličin. Naměřené zvlnění proudu na výstupní tlumivce bylo větší než zvolené z důvodu drobných konstrukčních změn. Tato skutečnost nemá vliv na funkci elektrolyzéry. Podrobnější popis je v 13. kapitole.

Dalším pokračováním na tomto projektu by mohlo být zprovoznění plynové části, uvedení do provozu a vyrobení ovládacího panelu, který by mimo jiné zobrazoval výstupní veličiny (proud a napětí na elektrolyzéry, spínání jednotlivých elektrod, množství vyvinutého plynu, tlak plynu, hladina elektrolytu a teplota elektrolyzéry). Podle požadavků uživatele by mohl regulovat výrobu plynu. Zprovoznění celého přístroje je nad rámec této práce, a proto se touto problematikou nezabývá.



LITERATURA

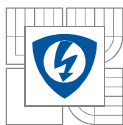
- [1] KREJČÍŘÍK, Alexandr. *Napájecí zdroje II*. 2. vyd. Praha: BEN, 1997. ISBN 80-86056-03-1.
- [2] PATOČKA, Miroslav. *Magnetické jevy a obvody ve výkonové elektrotechnice, měřicí technice a silnoproudé elektrotechnice*. 1. vyd. Brno: VUTIUM, 2011. ISBN 978-80-214-4003-6.
- [3] KREJČÍŘÍK, Alexandr. *Napájecí zdroje I*. 2. vyd. Praha: BEN, 1997. ISBN 80-86056-02-3.
- [4] KREJČÍŘÍK, Alexandr. Spínané zdroje. 2000, roč. 2000, č. 3, s. 38.
- [5] PATOČKA, Miroslav. Vybrané statě z výkonové elektroniky – svazek II: Pulsní měniče bez transformátoru. Brno, 2005.
- [6] Semic Trade. *Semic* [online]. [cit. 2016-05-01]. Dostupné z: http://www.semic.cz/_obchody/semic.obchodak.net/prilohy/0-lj-139t1505-cf.pdf
- [7] Semic Trade. *Semic* [online]. [cit. 2016-05-01]. Dostupné z: http://www.semic.cz/_obchody/semic.obchodak.net/prilohy/0-lj-139t8022c-cf.pdf
- [8] GM electronic. *E-shop, katalog* [online]. [cit. 2016-05-01]. Dostupné z: <http://www.gme.cz/>
- [9] BRESTOVIČ, Tomáš. *Výroba vodíka elektrolýzou vody pomocnou slnečnej energie* [Diplomová práce]. Technická univerzita v Košiciach, Strojnícká fakulta, Iná katedra. Školitel: RNDr. Alexandra Klenovčanová, PhD. Rok obhajoby: 2006.
- [10] Vodík. Wikipedia otevřená encyklopedie [online]. [cit. 2016-05-09]. Dostupné z: <http://cs.wikipedia.org/wiki/Vod%C3%ADk>
- [11] Elektrolýza. Wikipedia otevřená encyklopedie [online]. [cit. 2016-05-09]. Dostupné z: http://cs.wikipedia.org/wiki/Elektrol%C3%BDza#cite_note-0
- [12] BARATH, P. *Výroba vodíku pomocí fotovoltaických článků*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, 2006.
- [13] GM electronic. *E-shop, katalog* [online]. [cit. 2016-05-01]. Dostupné z: <http://www.gme.cz/img/cache/doc/383/004/uc3845n-datasheet-1.pdf>
- [14] GM electronic. *E-shop, katalog* [online]. [cit. 2016-05-01]. Dostupné z: <http://www.gme.cz/img/cache/doc/223/114/dsei60-06a-datasheet-1.pdf>
- [15] MOUSER Electronics. *E-shop, katalog* [online]. [cit. 2016-05-01]. Dostupné z: <http://www.mouser.com/ds/2/389/CD00096470-251073.pdf>
- [16] MOUSER Electronics. *E-shop, katalog* [online]. [cit. 2016-05-01]. Dostupné z: <http://cz.mouser.com/catalog/English/103/609.pdf>
- [17] GM electronic. *E-shop, katalog* [online]. [cit. 2016-05-01]. Dostupné z: <http://www.gme.cz/img/cache/doc/227/109/diodovy-mustek-br3510w-datasheet-1.pdf>



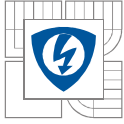
SEZNAM KOMPONENT

Tabulka 10: Seznam součástek zdroje [8], [9], [13], [14], [15], [16], [17]

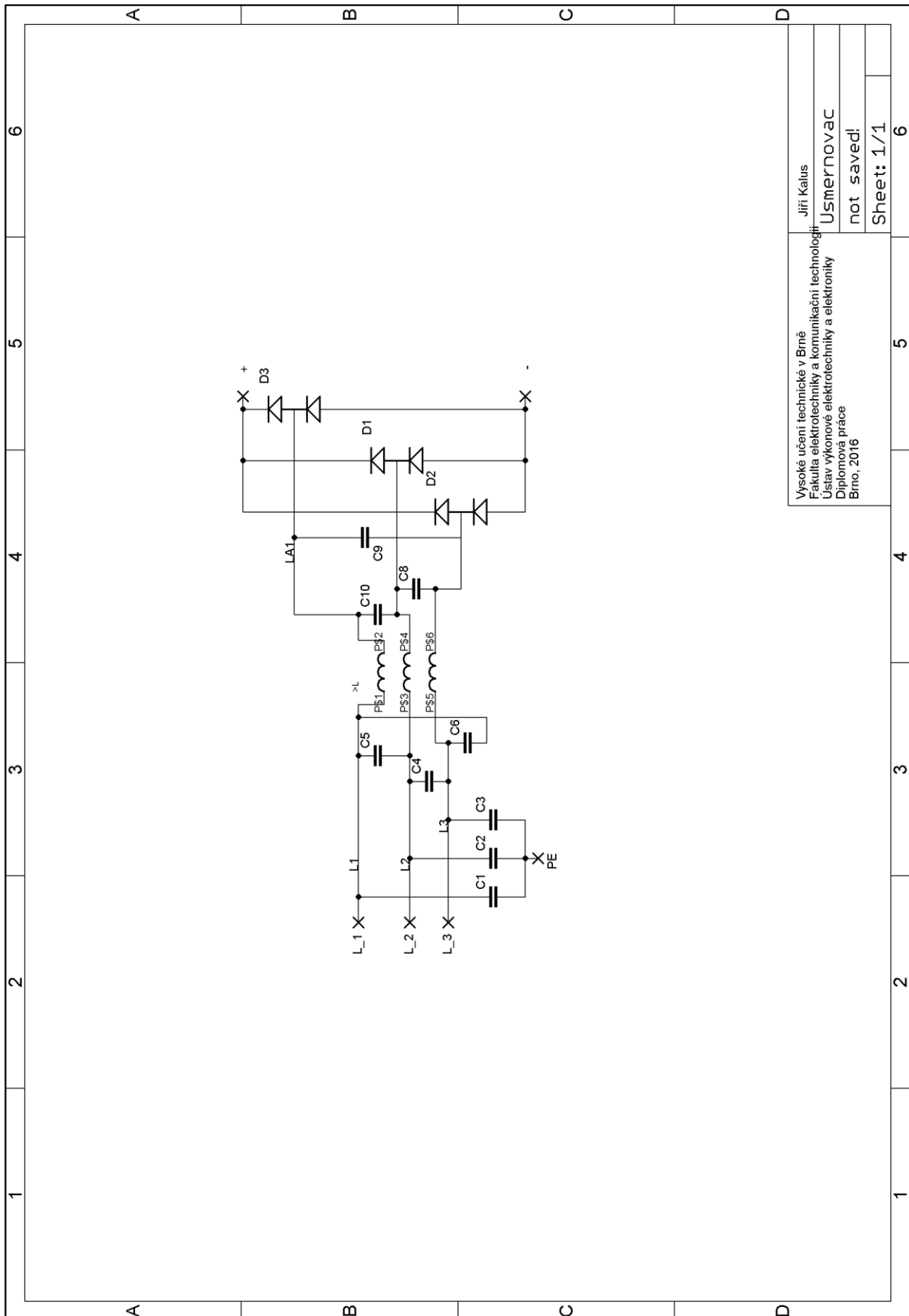
Název	Hodnota	Typ	Poznámka
Usměrňovač			
C1, C2, C2, C3, C4, C5, C6, C7, C8, C9	1N/400 X/Y	KERAMICKÝ	GME
D1, D2, D3	BR3510W	USM	GME
Primární obvod			
R1	47R	5W	GME
R2, R3, R4, R5	2K2	2W	GME
R6, R7, R8, R9	2K2	R1206	GME
D1A, D1B, D2A, D2B	STTH1512PI		MOUSER
T1, T2, T3, T4	FGH40N120AN		MOUSER
C3, C4	1u/630V	FÓLIOVÝ	GME
Sekundární obvod			
R1, R11	22R	2W	GME
D8, D9, D10, D11	DSEI60-06A		GME
C1, C2	680p/100V	FÓLIOVÝ	GME
C3, C4, C5, C6, C7, C8, C9, C10, C11, C12	100u/100V	ELEKTROLYT	GME
Řídící obvod			
R1	5K/	LINEÁRNÍ POT.	GME
R2	220R		GME
R3	2K2		GME
R4	100R		GME
R5	4K7		GME
R7	10K		GME
R8	1K		GME
R9	470R		GME
R10, R11, R12, R13	18R		GME
R14, R15, R19, R20	10R		GME
R17, R18, R22, R23	6R8		GME
R16, R21	470R		GME
C1, C3, C4, C7	10N		GME
C2	47N		GME
C5	1N		GME
C6	4N7		GME
C8, C11	220N		GME



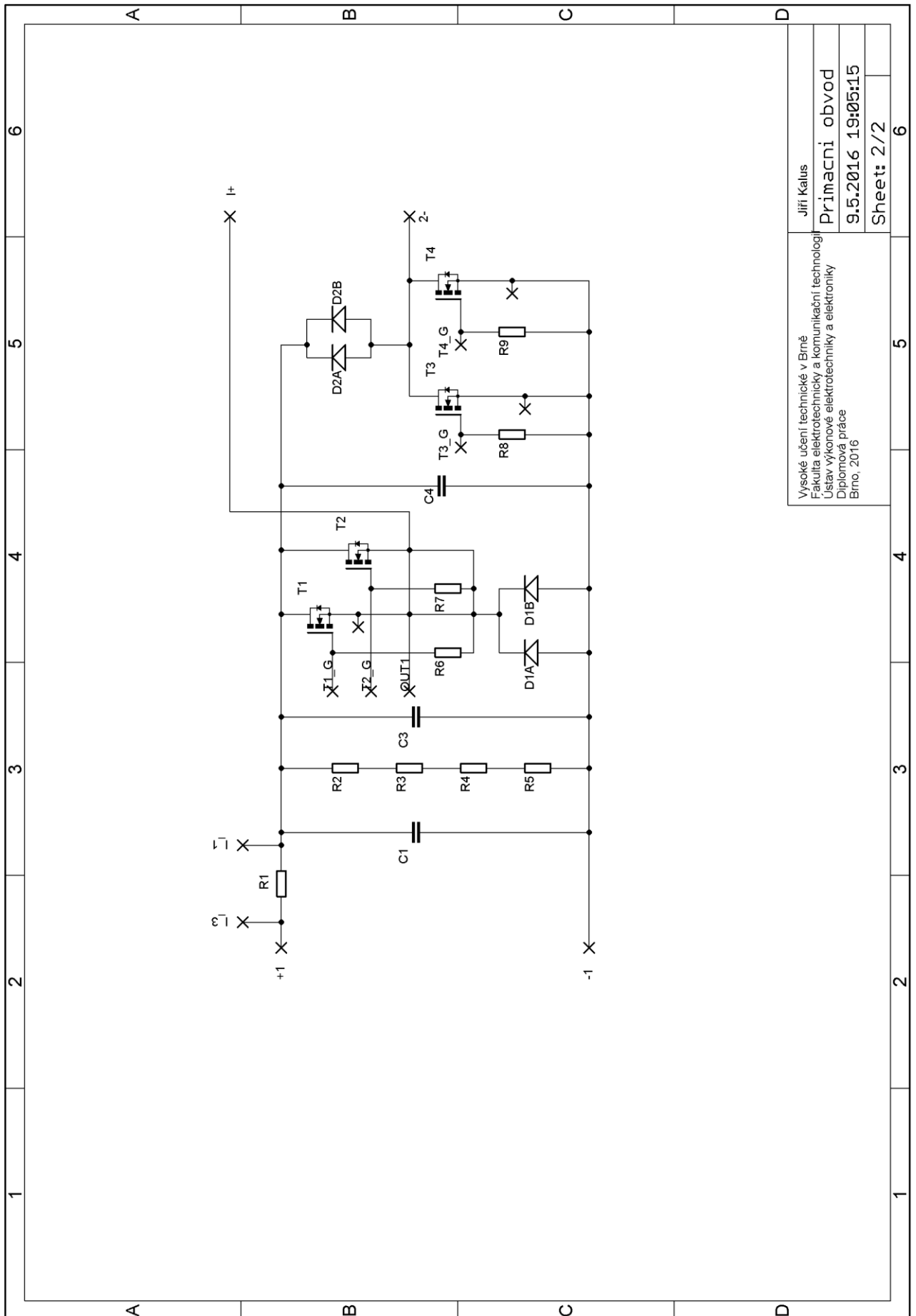
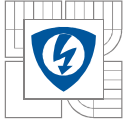
C9	1u/63V		GME
C10	1u/63V		GME
D1, D2, D3, D8, D9, D10, D11, D12	BAT46		GME
D5, D7	20V	ZENEROVA DIODA	GME
D6	5,1V	ZENEROVA DIODA	GME
IC1	UC3845N	DIP8	GME
Pomocný zdroj pro řízení			
B1	B560C2000		GME
U1	78S15		GME
C1, C4	100u/25V	ELEKTROLYT	GME
C2, C3	100N	KERAMIKA	GME
R1	500R		GME
D1	5MM, GREEN	LED	GME
Ostatní			
Chladič		2 ks	



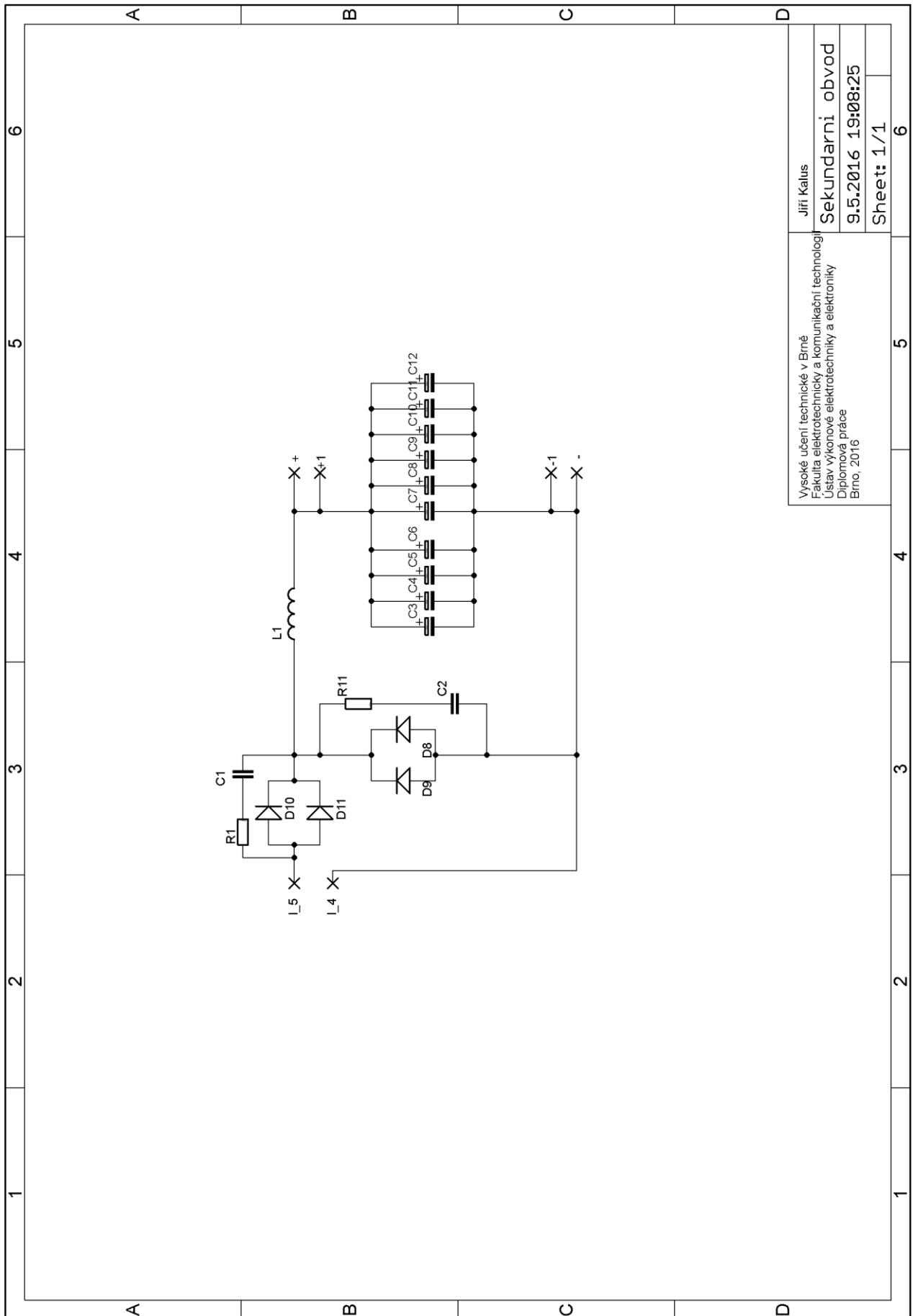
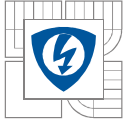
PŘÍLOHA A – SCHÉMATA



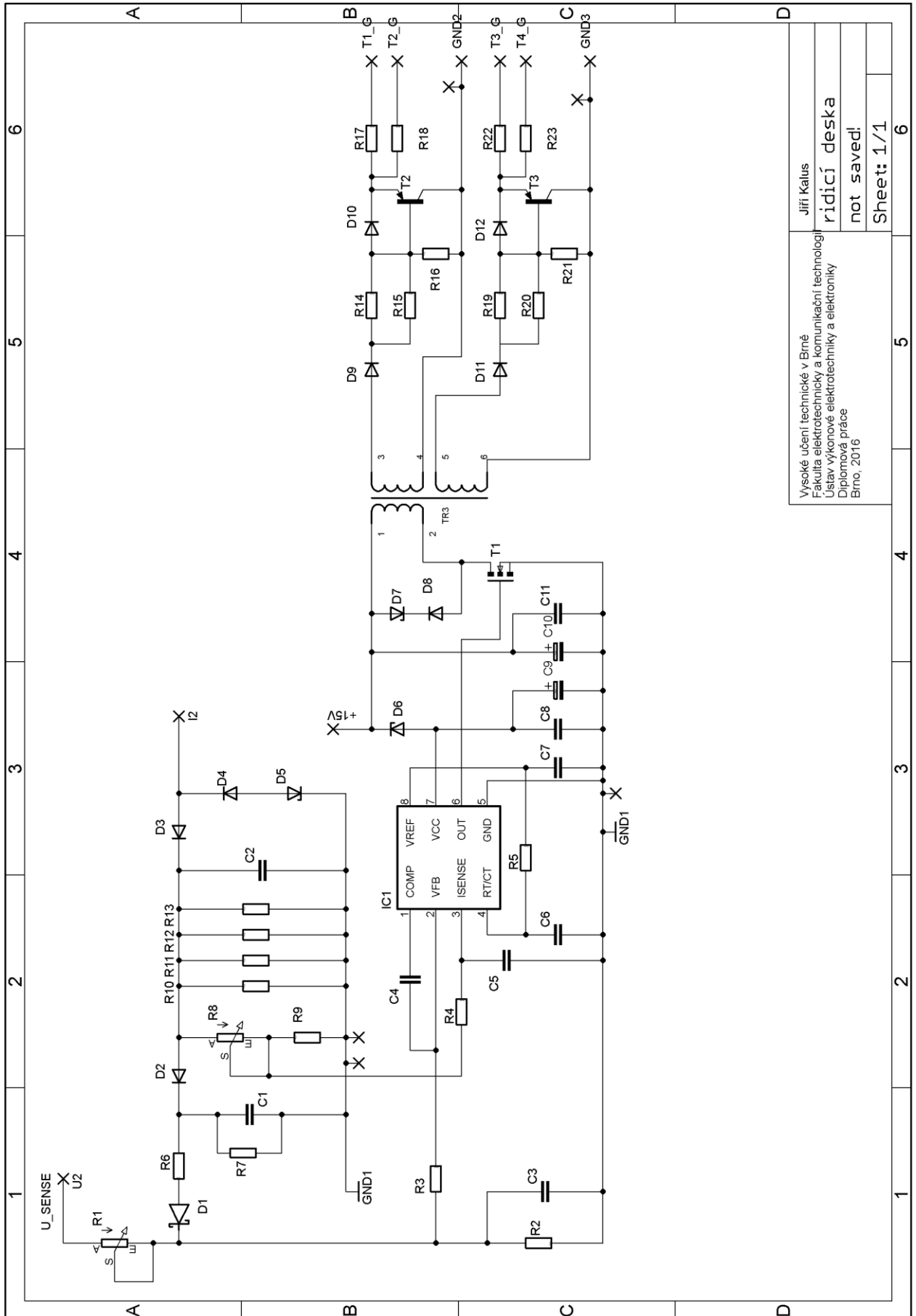
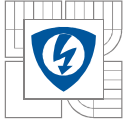
Vysoké učení technické v Brně Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií Ústav výkonové elektrotechniky a elektroniky Diplomová práce Brno, 2016	Jiří Kallus Usměrňovač not saved!
Sheet: 1/1	6



Vysoké učení technické v Brně Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií Ústav výkonové elektrotechniky a elektroniky Diplomová práce Brno, 2016	Jiří Kallus
Primární obvod	
9.5.2016 19:05:15	
Sheet: 2/2	

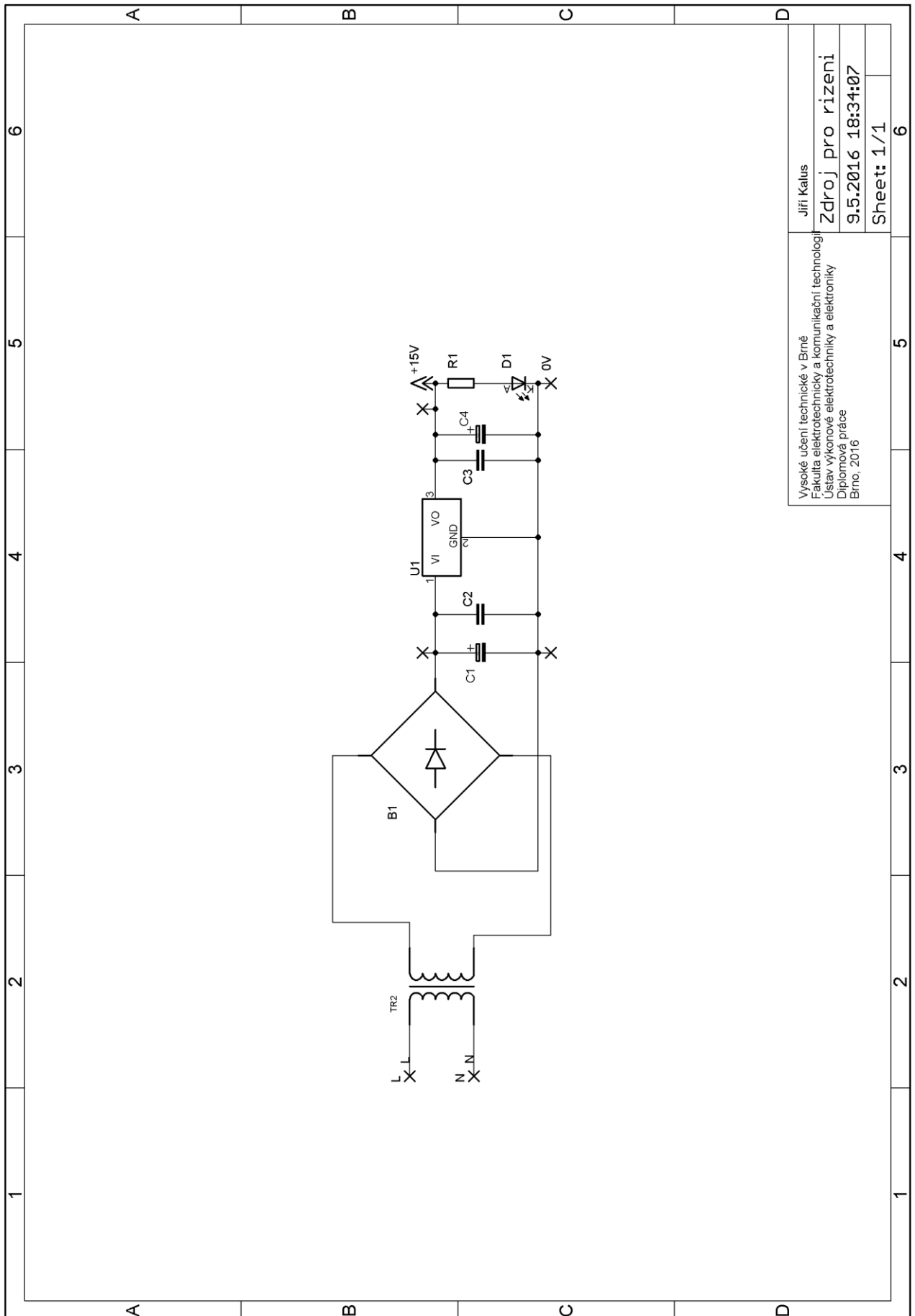
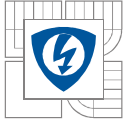


Vysoké učení technické v Brně Fakulta elektrotechniky a komunikační technologií Ústav výkonové elektrotechniky a elektroniky Diplomová práce Brno, 2016	Jiří Kalus
Sekundární obvod	
9.5.2016 19:08:25	
Sheet: 1/1	



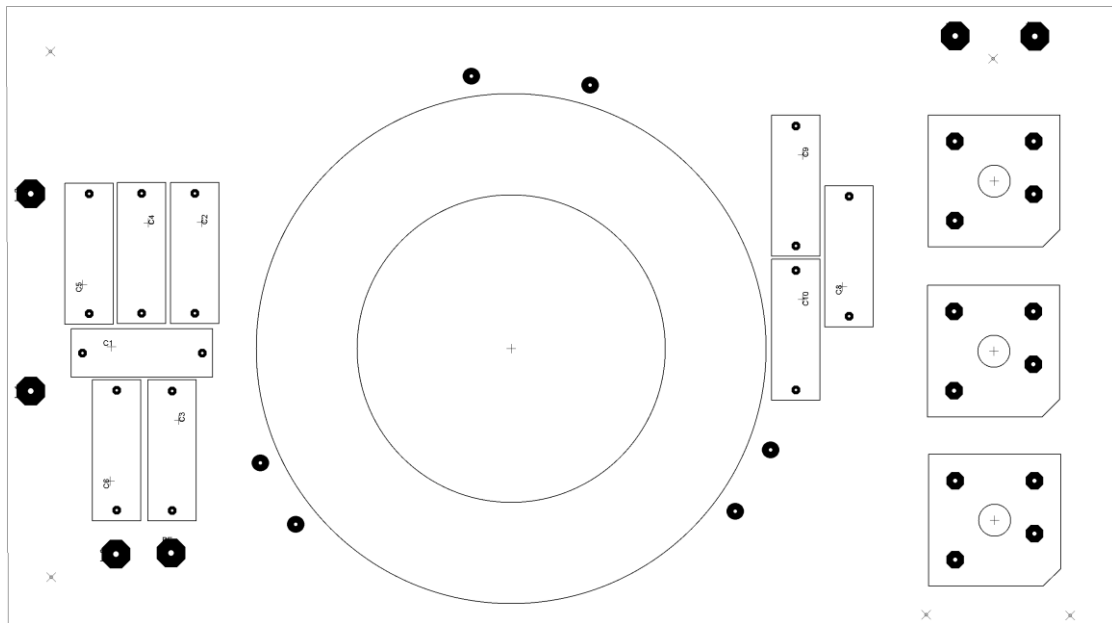
Vysoké učení technické v Brně
 Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií
 Ústav výkonové elektrotechniky a elektroniky
 Diplomová práce
 Brno, 2016

Jiří Kalus
 řídicí deska
 not saved!
 Sheet: 1/1

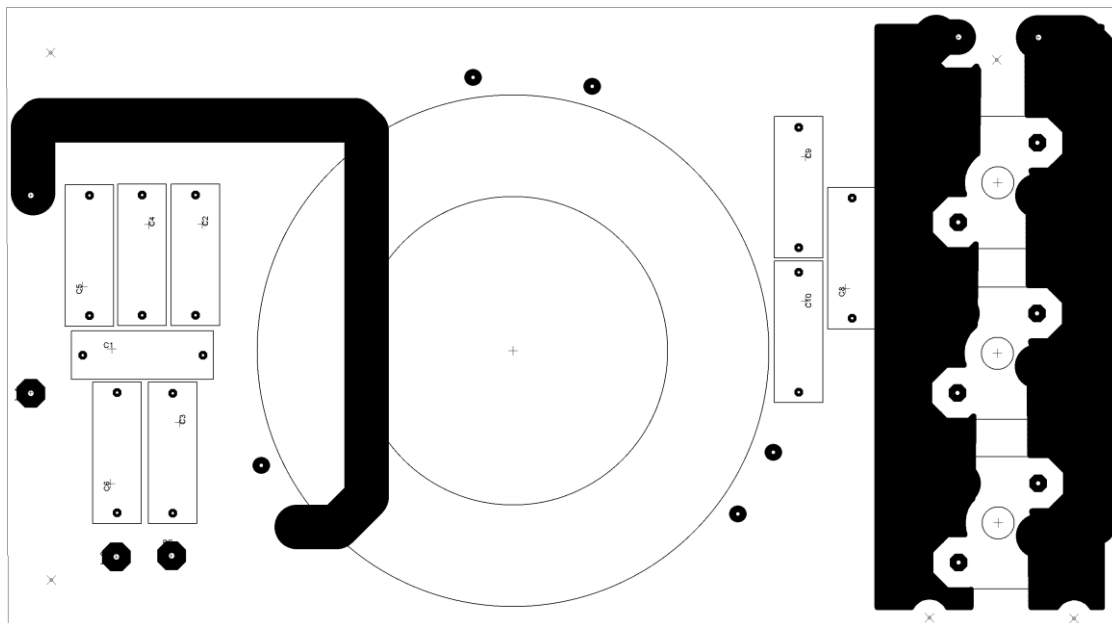


Vysoké učení technické v Brně Fakulta elektrotechniky a komunikační technologií Ústav výkonové elektrotechniky a elektroniky Diplomová práce Brno, 2016	Jiří Kallus
Zdroj pro řízení	
9.5.2016 18:34:07	
Sheet: 1/1	6

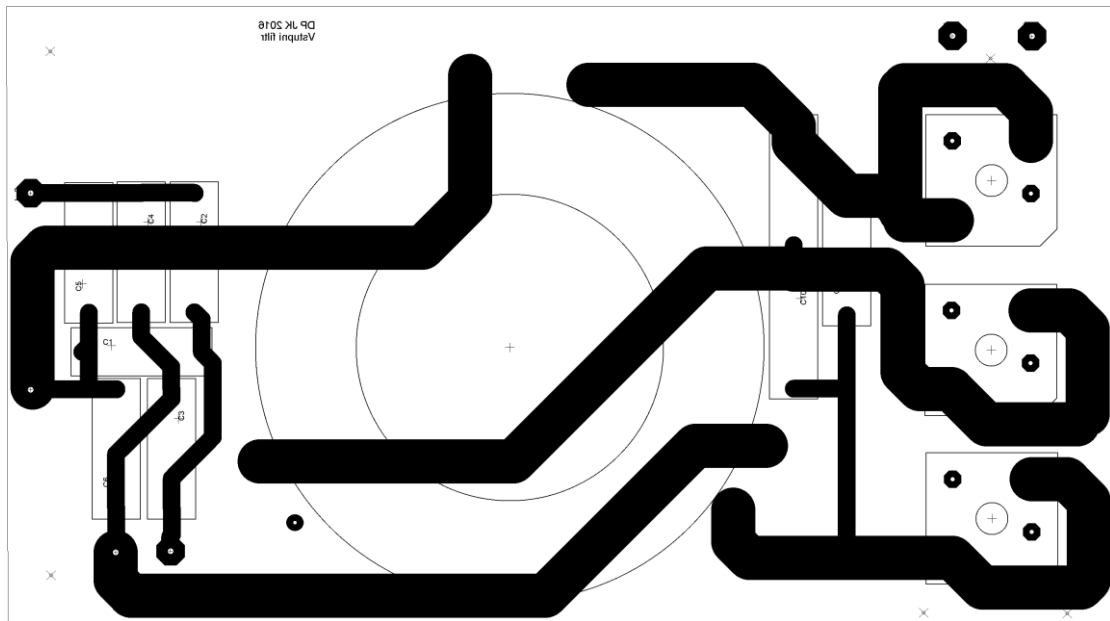
PŘÍLOHA B – DESKY PLOŠNÝCH SPOJŮ



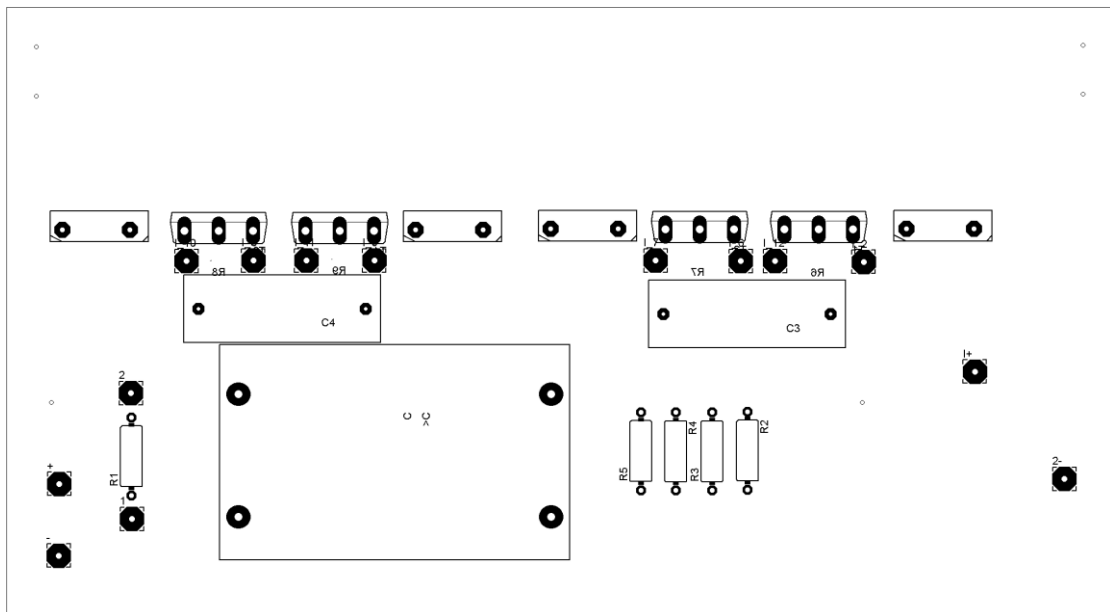
Obrázek 40: USM - rozložení součástek



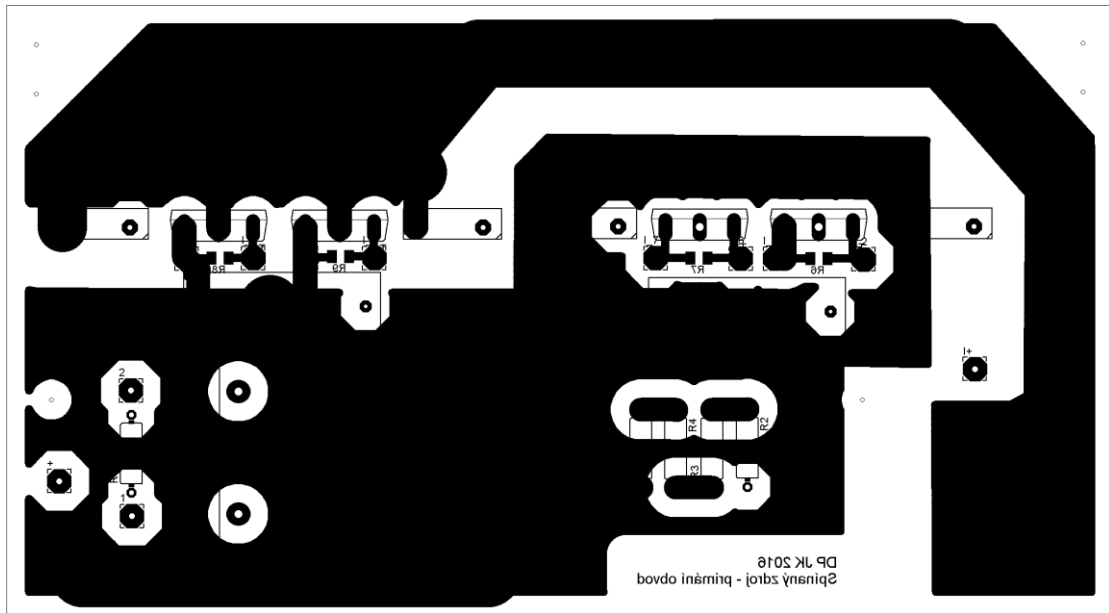
Obrázek 41: USM - TOP



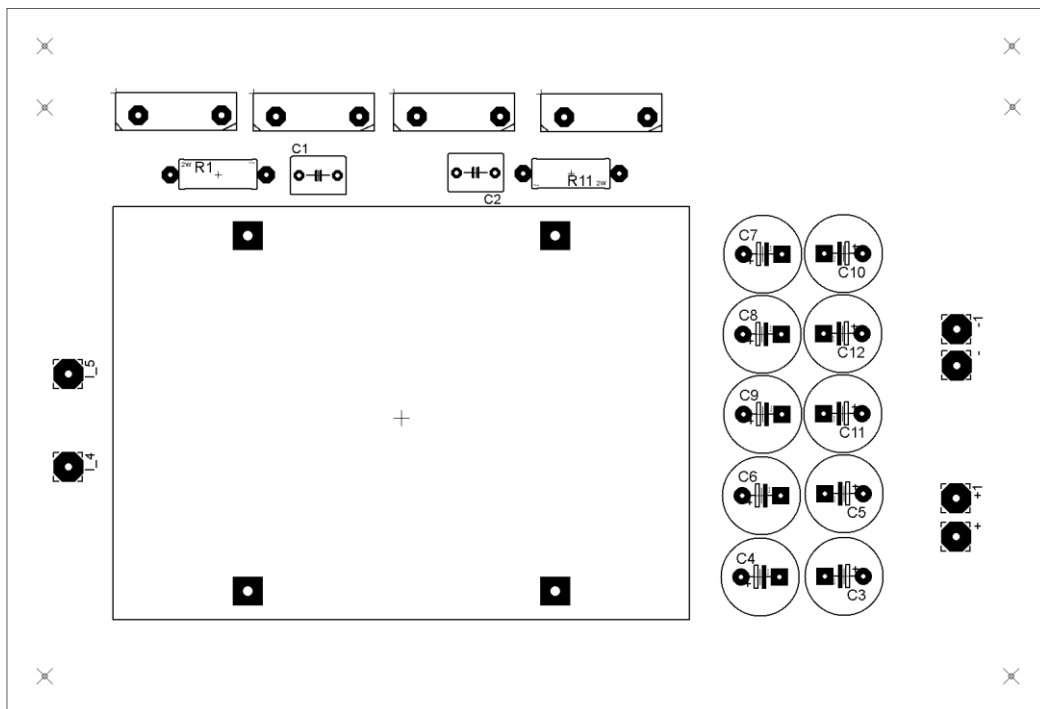
Obrázek 42: USM - BOTTOM



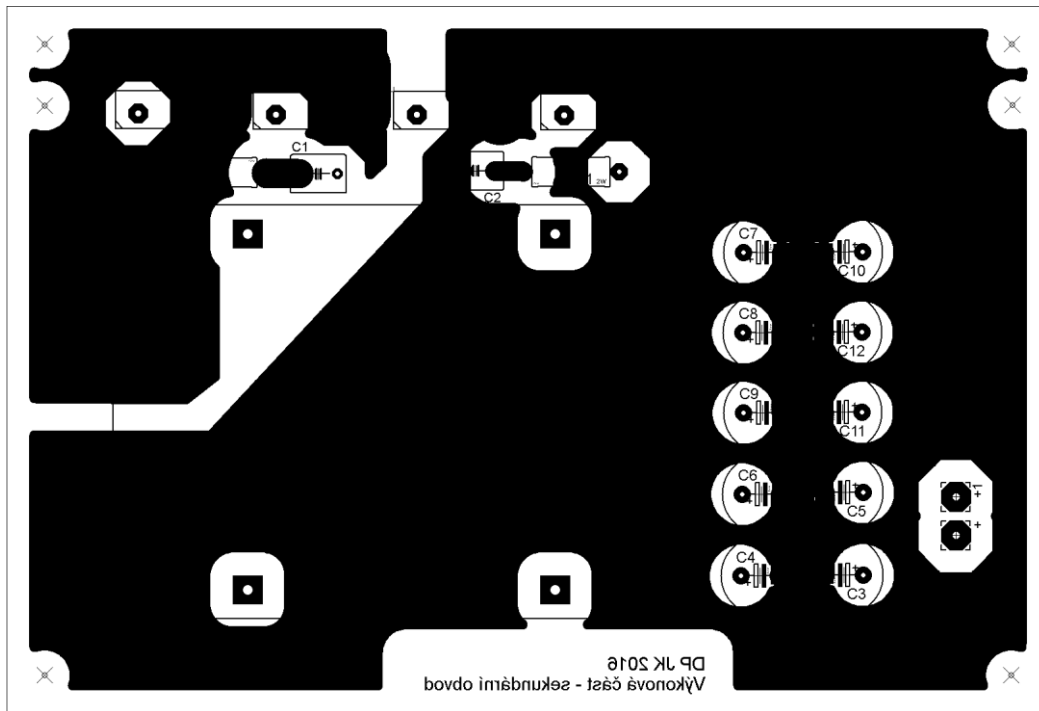
Obrázek 43: Primární obvod - rozložení součástek



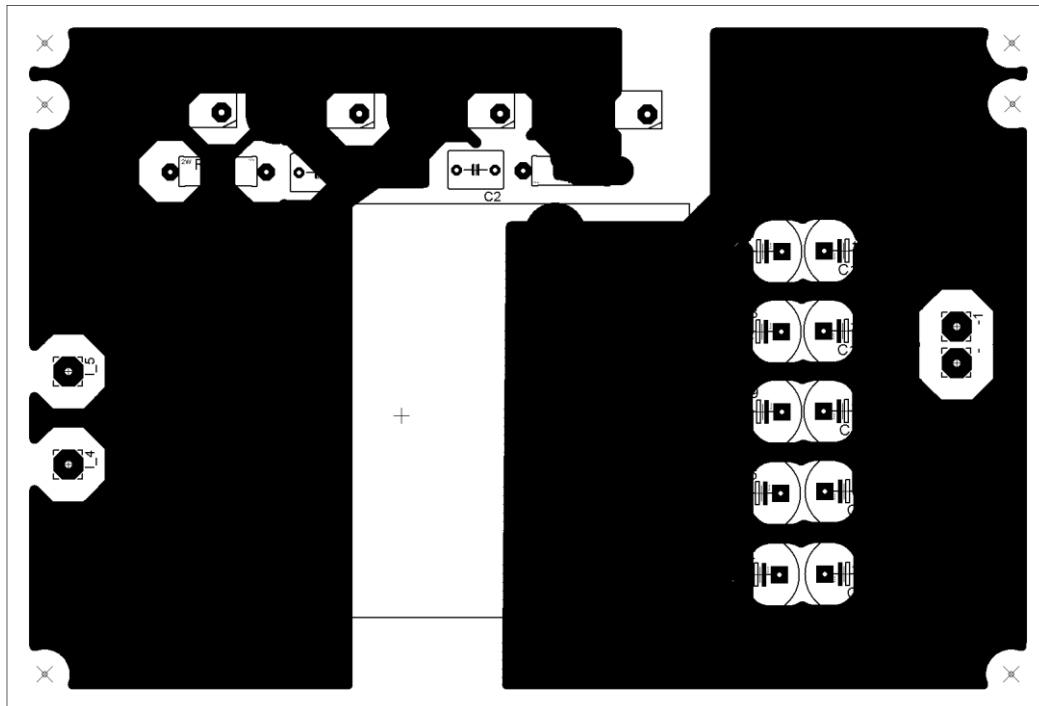
Obrázek 44: Primární obvod - BOTTOM



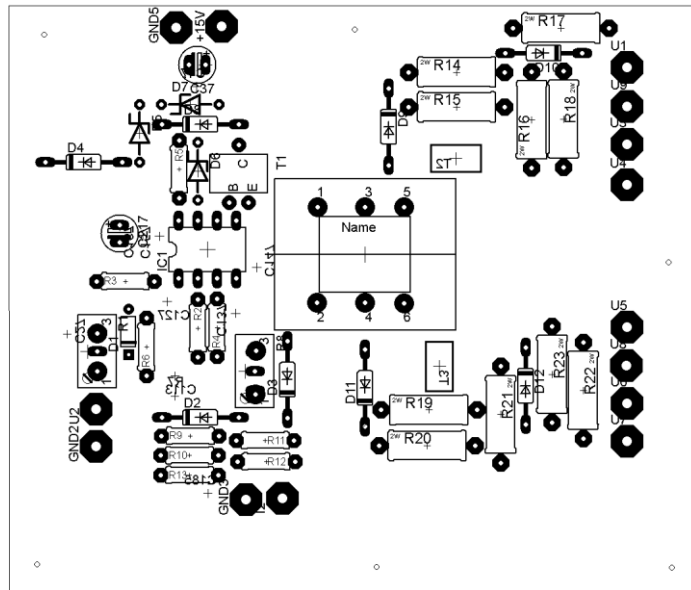
Obrázek 45: Sekundární obvod - rozložení součástek



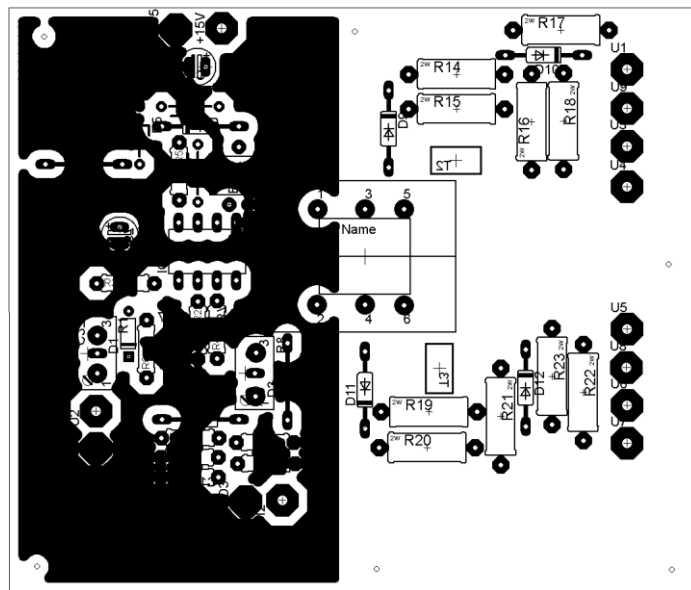
Obrázek 46: : Sekundární obvod - BOTTOM



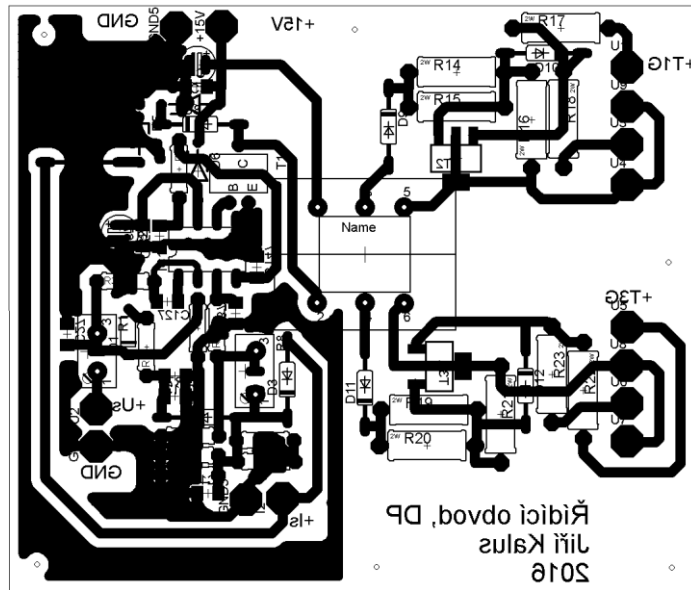
Obrázek 47: Sekundární obvod - TOP



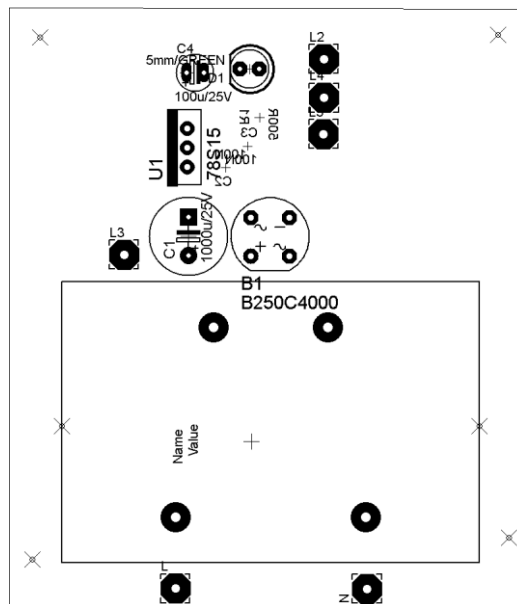
Obrázek 48: Řídící obvod - rozložení součástek



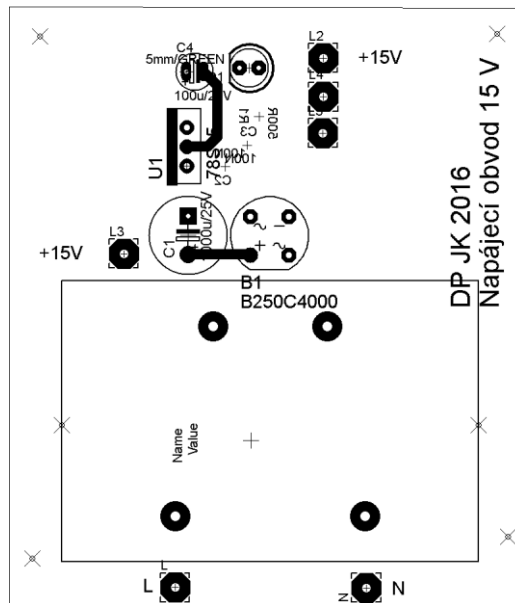
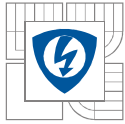
Obrázek 49: Řídící obvod - TOP



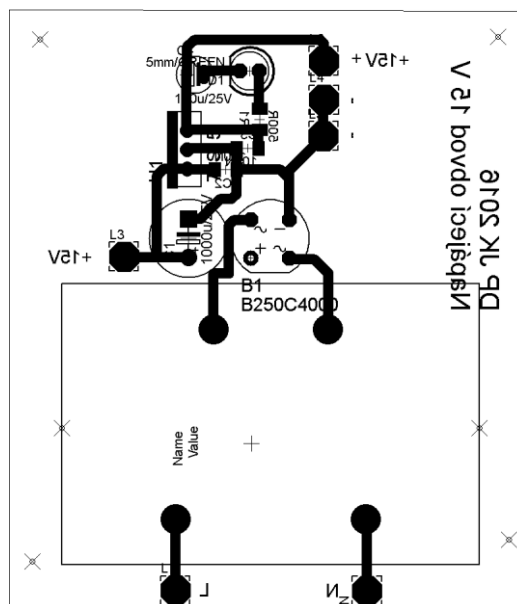
Obrázek 50: Řídicí obvod – BOTTOM



Obrázek 51: Pomocný zdroj pro řízení - rozložení součástek



Obrázek 52: Pomocný zdroj pro řízení - TOP



Obrázek 53: Pomocný zdroj pro řízení - BOTTOM