



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY



FAKULTA ELEKTROTECHNIKY A KOMUNIKAČNÍCH
TECHNOLOGIÍ

ÚSTAV VÝKONOVÉ ELEKTROTECHNIKY A
ELEKTRONIKY

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

MĚNIČ PRO SVAŘOVÁNÍ ELEKTRICKÝM OBLOUKEM

INVERTER FOR ARC WELDING

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

BACHELOR'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

MAROŠ MATIAŠKO

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

doc. Ing. PAVEL VOREL, Ph.D.

BRNO 2014



VYSOKÉ UČENÍ
TECHNICKÉ V BRNĚ

Fakulta elektrotechniky
a komunikačních technologií

Ústav výkonové elektrotechniky a elektroniky

Bakalářská práce

bakalářský studijní obor

Silnoproudá elektrotechnika a elektroenergetika

Student: Maroš Matiaško

ID: 147635

Ročník: 3

Akademický rok: 2013/2014

NÁZEV TÉMATU:

Měnič pro svařování elektrickým obloukem

POKYNY PRO VYPRACOVÁNÍ:

1. Realizujte výkonový impulsní transformátor a výstupní tlumivku (prvky navržené v semestrálním projektu).
2. Osadte navržené desky plošných spojů, realizujte interní zapojení přístroje.
3. Oživte celé zařízení a proveďte sérii ověřovacích měření.
4. Sestavte technickou dokumentaci.

DOPORUČENÁ LITERATURA:

[1] Patočka M. Magnetické jevy a obvody ve výkonové elektronice, měřicí technice a silnoproudé elektrotechnice. Brno: VUTIUM, 2011. 564 s. ISBN: 978-80-214-4003-6.

[2] Patočka M., Vybrané stati z výkonové elektroniky, Svazek II., Vydání 3., skriptum FEKT VUT Brno, 2004

Termín zadání: 27.9.2013

Termín odevzdání: 2.6.2014

Vedoucí práce: doc. Ing. Pavel Vorel, Ph.D.

Konzultanti bakalářské práce:

doc. Ing. Petr Toman, Ph.D.

Předseda oborové rady

UPOZORNĚNÍ:

Autor bakalářské práce nesmí při vytváření bakalářské 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 části druhé, hlavy VI. díl 4 Trestního zákoníku č.40/2009 Sb.

Abstrakt

Táto bakalárska práca sa zaoberá návrhom, dimenzovaním a konštrukciou zvaracieho zdroja na princípe vysokofrekvenčného meniča. Hlavnou náplňou práce je návrh spínaného meniča pre zváranie obalenou elektródou na princípe jednočinného priepustného meniča. Zvarací zdroj je regulovaný na udržanie konštantného prúdu.

Abstract

This bachelor's thesis describes designing, parameter rating and construction of welding source on the principle of high-frequency inverter. The main scope of work is to design a switching inverter for arc welding on the principle of the forward converter. Welding source is regulated for demand of constant current.

Klíčové slová

zváračka, UC3845, menič, inverter, spínaný zdroj, GDT, transformátor, MOSFET

Keywords

welder, UC3845, converter, inverter, switching power supply, GDT, transformer, MOSFET

Bibliografická citácia

MATIAŠKO, M. *Měnič pro svařování elektrickým obloukem*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, 2014. 69 s. Vedoucí bakalářské práce doc. Ing. Pavel Vorel, Ph.D..

Prehlásenie

Prehlasujem, že svoju bakalársku prácu na tému „Menič pre zváranie elektrickým oblúkom“ som vypracoval samostatne pod vedením vedúceho bakalárskej práce a s použitím odbornej literatúry a ďalších informačných zdrojov, ktoré sú všetky citované v práci a uvedené v zozname literatúry na konci práce.

Ako autor uvedenej bakalárskej práce ďalej prehlasujem, že v súvislosti s vytvorením tejto bakalárskej práce som neporušil autorské práva tretích osôb, najmä som nezasiahol nedovoleným spôsobom do cudzích autorských práv osobnostných a som si plne vedomý následkov porušenia ustanovení § 11 a nasledujúceho autorského zákona č. 121/2000 Sb., vrátane možných trestnoprávných dôsledkov vyplývajúcich z ustanovenia § 152 trestného zákona č. 140/1961 Sb.

V Brne dňa

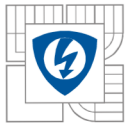
Podpis autora

Pod'akovanie

Ďakujem vedúcemu bakalárskej práce doc. Ing. Pavlu Vorlovi, Ph.D. za účinnú metodickú, pedagogickú, materiálnu, odbornú pomoc a ďalšie cenné rady pri spracovaní mojej bakalárskej práce. Ďalej ďakujem svojim rodičom, Ivanovi Matiaškovi a Lei Matiaškovej za materiálnu pomoc a morálnu podporu.

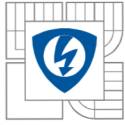
V Brne dňa

Podpis autora

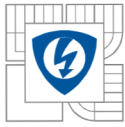


Obsah

ÚVOD.....	1
1 TEORETICKÝ ROZBOR	2
1.1 ZVÁRANIE ELEKTRICKÝM OBLÚKOM.....	2
1.1.1 ELEKTRICKÝ OBLÚK	2
1.1.1.1 VOLTAMPÉROVÁ CHARAKTERISTIKA OBLÚKU	2
1.1.2 RUČNÉ OBLÚKOVÉ ZVÁRANIE	4
1.2 ZVÁRACIE ZDROJE PRE OBLÚKOVÉ ZVÁRANIE.....	4
1.3 ZÁKLADNÉ PARAMETRE ZVÁRACÍCH ZDROJOV	4
1.3.1 VSTUPNÉ VELIČINY	4
1.3.2 VÝSTUPNÉ VELIČINY	5
1.3.3 STATICKÁ CHARAKTERISTIKA	5
1.3.4 DYNAMICKÁ CHARAKTERISTIKA	6
1.4 SPÍNANÉ ZVÁRACIE ZDROJE.....	6
1.5 TOPOLOGIE MENIČOV	8
1.5.1 JEDNOČINNÝ PRIEPUSTNÝ MENIČ S DVOMA SPÍNAČMI	8
1.5.2 DVOJČINNÝ PRIEPUSTNÝ MENIČ	9
1.5.2.1 POROVNANIE JEDNOČINNÉHO A DVOJČINNÉHO MENIČA	9
1.5.3 POLOVIČNÝ MOST	10
1.5.4 PUSH-PULL.....	10
1.6 VOĽBA PARAMETROV A BLOKOVÁ SCHÉMA	11
2 NÁVRH A DIMENZOVANIE PRVKOV.....	12
2.1 SCHÉMA A PRIEBEH VELIČÍN ZAPOJENIA.....	12
2.2 VÝPOČET A DIMENZOVANIE TRANSFORMÁTORA	13
2.3 NÁVRH A DIMENZOVANIE VÝSTUPNEJ TLMIVKY	17
2.3.1 VZDUCHOVÁ TLMIVKA	17
2.3.2 TLMIVKA S FERITOVÝM JADROM.....	17
2.3.3 TLMIVKA SO ŽELEZOPRACHOVÝM JADROM.....	17
2.4 DIMENZOVANIE POLOVODIČOV	20
2.4.1 DIMENZOVANIE TRANZISTOROV.....	20
2.4.2 DIMENZOVANIE DEMAGNETIZAČNÝCH DIÓD.....	20
2.4.3 DIMENZOVANIE DIÓD SEKUNDÁRNEHO USMERŇOVAČA.....	21
2.5 DIMENZOVANIE USMERŇOVAČA A FILTRÁCIE	24
2.6 VÝPOČET STRÁT.....	24
2.6.1 URČENIE STRÁT NA TRANZISTOROCH.....	24
2.6.2 URČENIE STRÁT NA DEMAGNETIZAČNÝCH DIÓDACH	25



2.6.3 URČENIE STRÁT NA USMERŇOVACÍCH DIÓDACH	25
2.6.4 URČENIE STRÁT NA USMERŇOVACOM MOSTÍKU	26
2.7 NÁVRH CHLADENIA.....	26
2.7.1 NÁVRH CHLADENIA TRANZISTOROV A SEKUNDÁRNYCH DIÓD	26
2.7.2 NÁVRH CHLADENIA USMERŇOVACIEHO MOSTÍKA	28
2.8 SIETOVÝ FILTER.....	28
2.9 SOFTŠTART	29
2.10 POMOCNÝ ZDROJ	29
2.11 NÁVRH DPS	30
3 RIADENIE.....	31
3.1 REGULÁCIA NA KONŠTANTNÝ PRÚD	31
3.2 REGULÁCIA NA KONŠTANTNÉ NAPÄTIE.....	31
3.3 REGULÁCIA NA KONŠTANTNÝ VÝKON	31
3.4 RIEŠENIE REGULÁCIE	31
3.4.1 SNÍMANIE PRÚDU	32
3.4.2 ZAPOJENIE RIADENIA	34
3.4.3 BUDENIE TRANZISTOROV.....	35
3.4.3.1 BUDIČE VÝKONOVÝCH TRANZISTOROV.....	36
3.4.3.2 NÁVRH BUDIACEHO TRANSFORMÁTORA	37
3.5 TEPELNÁ OCHRANA	39
4 MERANIE.....	40
ZÁVER.....	44
LITERATÚRA	45
PRÍLOHY	48

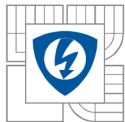


ZOZNAM OBRÁZKOV

Obr. 1.1	Statické charakteristiky zdrojov, oblúku a jeho častí	3
Obr. 1.2	Princíp zvarovania obalenou elektródou[3]	4
Obr. 1.3	Strmá(a) a plochá(b) statická charakteristika v jeho zaťažovacej oblasti(c).....	6
Obr. 1.4	Zjednodušená bloková schéma invertora	7
Obr. 1.5	Menič typu forward.....	8
Obr. 1.6	Zapojenie plný most	9
Obr. 1.7	Menič typu polovičný most.....	10
Obr. 1.8	Zapojenie push-pull.....	10
Obr. 1.9	Bloková schéma navrhovanej zvaračky	11
Obr. 2.1	Jednočinný priepustný menič - základné zapojenie[8, str. 417]	12
Obr. 2.2	Priebehy dôležitých veličín[8, str. 418]	12
Obr. 2.3	Vyhotovený transformátora pripravený na zaspájkovanie do DPS	16
Obr. 2.4	Závislosť permeability na intenzite magnetického poľa[15]	18
Obr. 2.5	Vyhotovená tlmivka pripravená na zaspájkovanie do DPS	19
Obr. 2.6	Prúd nulovou diódou D_0 a) teoretický tvar b) skutočný tvar[8, str. 423].....	20
Obr. 2.7	Schéma zapojenia výkonovej časti meniča	23
Obr. 2.8	Použitý chladič CHL45V3-24[22]	27
Obr. 2.9	Chladič V68-50SA[24]	28
Obr. 2.10	Sieťový filter	28
Obr. 2.11	Oneskoroovací obvod.....	29
Obr. 2.12	Kontakty relé za zaradenie výkonových rezistorov v obvode	29
Obr. 2.13	Pomocný zdroj	30
Obr. 2.14	Rozmiestnenie častí na DPS.....	30
Obr. 3.1	Bloková schéma obvodu UC3845[27].....	32
Obr. 3.2	Priebehy na snímači prúdu	32
Obr. 3.3	Schematické zapojenie prúdového transformátora[8, str. 517].....	33
Obr. 3.4	Schéma zapojenia riadenia	34
Obr. 3.5	Zapojenie budiaceho transformátora	35
Obr. 3.6	Zapojenie budičov[26,30]	36
Obr. 3.7	Budič typu B a jeho spodná a vrchná strana	37
Obr. 3.8	Osadená DPS riadenia, vrchná a spodná strana	38
Obr. 3.9	Zapojenie tepelnej ochrany	39
Obr. 4.1	Napätie U_{GS} pri $U_d=0V$	40

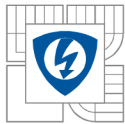


Obr. 4.2 Napätie U_{GS} pri $U_d=300V$	40
Obr. 4.3 Napätie U_{DS} pri $U_d=325V$, $I_z=91,5A$ a napätí na výstupe $U_z=37V$	41
Obr. 4.4 Napätie na sekundárnej nulovej dióde pri $U_d=300V$, $I_z=157,5A$ a $U_z=33V$	42
Obr. 4.5 Napätie U_{DS} pri $U_d=300V$, $I_z=157,5A$ a $U_z=33V$	42



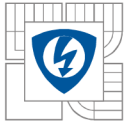
ZOZNAM TABULIEK

Tab. 2.1 Parametre jadra T4919-CF139[9,10]	13
Tab. 2.2 Navrhnuté parametre výkonového transformátora.....	16
Tab. 2.3 Parametre jadra T225-26[12,13]	17
Tab. 2.4 Prúdové dimenzovanie polovodičov	21
Tab. 2.5 Vybrané parametre mosfetu SPW47N60CFD[15].....	22
Tab. 2.6 Parametre diódy MUR1560[16].....	22
Tab. 2.7 Parametre diódy STTH6003CW[17]	22
Tab. 2.8 Parametre mostíku KBPC5006MW[18]	24
Tab. 3.1 Parametre jadra FT 82-61[28]	33
Tab. 3.2 Meranie budičov.....	37
Tab. 3.3 Parametre jadra FT 50-77[32]	38



ZOZNAM SKRATIEK A SYMBOLOV

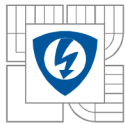
Veličina	Význam	Jednotka
GDT	Gate Drive Transformer, Budiaci transformátor	
U_{ef}	Sieťové napätie 230V	V
MMA	Manual metal arc, zváranie obalenou elektródou	
TIG	Tungsten inert gas, význam rovnaký ako WIG	
MIG	Metal inner gas, zváranie taviacou sa elektródou v ochrannej atmosfére inertného plynu	
PWM	Pulse width modulation, pulzne-široková modulácia	
U_d	Napätie medziobvodu na primárnej strane meniča	V
ESR	Equivalent series resistance, ekvivalentný sériový odpor	Ω
P_c	Činný výkon	W
$V_{dč}$	Objem jadra pri dvojčinnom meniči	m^3
$V_{jč}$	Objem jadra pri jednočinnom meniči	m^3
s_{max}	Maximálna streda meniča	-
R_{dcu1}	Odpor primárneho vinutia	Ω
σ	Prúdová hustota	A/mm^2
MOSFET	Metal Oxide Semiconductor Field Effect Transistor, poľom riadený tranzistor	
D	Drain, kolektor tranzistora	
S	Source, emitor tranzistora	
G	Gate, hradlo tranzistora	
DPS	Doska plošných spojov	
MAG	Metal aktiv gas, zváranie v ochrannej atmosfére aktívneho plynu	



ÚVOD

Zváranie má už od stredoveku významné postavenie medzi metódami na spájanie kovov. Tento proces je vysoko energeticky náročný, čo dáva požiadavky na kvalitné napájacie zdroje vysokého výkonu. V histórii vývoj prešiel cez batéριοvo napájanie zdroje, rotačné zväracie meniče a agregáty, transformátorové striedavé a usmernené zdroje. Zatiaľ posledným typom zväracieho zdroja je zvärací spínaný menič (invertor). Vývoj súčiastok v oblasti polovodičovej techniky dovolil vznik spínaných zdrojov s vysokým výkonom a veľmi dobrou účinnosťou. Vďaka tejto technológii môžu invertory dosahovať vynikajúce zväracie parametre.

V tejto práci je v prvej kapitole popísané ručné oblúkové zváranie, sú zhrnuté požiadavky a parametre zväracích zdrojov a základné topológie meničov vhodné pre zväracie zdroje. V závere kapitoly sú dané požadované parametre navrhovaného zdroja. Druhá kapitola popisuje návrh a dimenzovanie výkonových prvkov meniča a taktiež návrh potrebného chladenia. Tretia kapitola sa zaoberá návrhom riadiacich a regulačných obvodov, ako aj nadprúdovej a tepelnej ochrany.



1 TEORETICKÝ ROZBOR

1.1 Zváranie elektrickým oblúkom

Oblúkovým zváraním sa označuje skupina procesov tavného zvárania, pri ktorej je energia potrebná k roztaveniu kovových plôch dodávaná ako teplo, ktoré vzniká pri horení oblúku. Do dnes tieto typy zvárania patria k najrozšírenejším na svete – medzi ich výhody patrí veľká miera opakovateľnosti, relatívne malé investičné náklady, kvalita a rýchlosť zvárania. Týmito metódami je možné zvärať železné i neželezné kovy (hliník, horčík, meď).

1.1.1 Elektrický oblúk

Elektrický oblúk je elektrický výboj valcovitého tvaru, sústredený do tenkého stĺpca, ktorého jadro tvorí ionizovaný plyn – plazma. Oblúk využiteľný pri zváraní je nízkonapäťový, stabilne horí za predpokladu napätia dostatočného pre ionizáciu daného prostredia a prúdu, ktorý udržuje plazmu oblúku v ionizovanom stave.

Charakteristické znaky oblúku sú

- malý anódový úbytok napätia,
- malý potenciálny rozdiel na elektródach,
- prúd v rádoch jednotiek až tisícok ampérov,
- veľká prúdová hustota katódovej škvŕny,
- intenzívne vyžarovanie svetelného žiarenia z elektród i stĺpca oblúku,
- intenzívne vyžarovanie UV žiarenia.

Fyzikálne a metalurgické deje prebiehajú v oblúku veľmi rýchlo a pri vysokých teplotách. Tieto deje majú vplyv na horenie oblúku a sú ovplyvňované predovšetkým týmito okolnosťami

- chemické zloženie plazmy, materiál elektród a okolitá atmosféra,
- geometrickým usporiadaním a tvarom elektród,
- tepelnou vodivosťou plazmy, elektródy a základného materiálu.

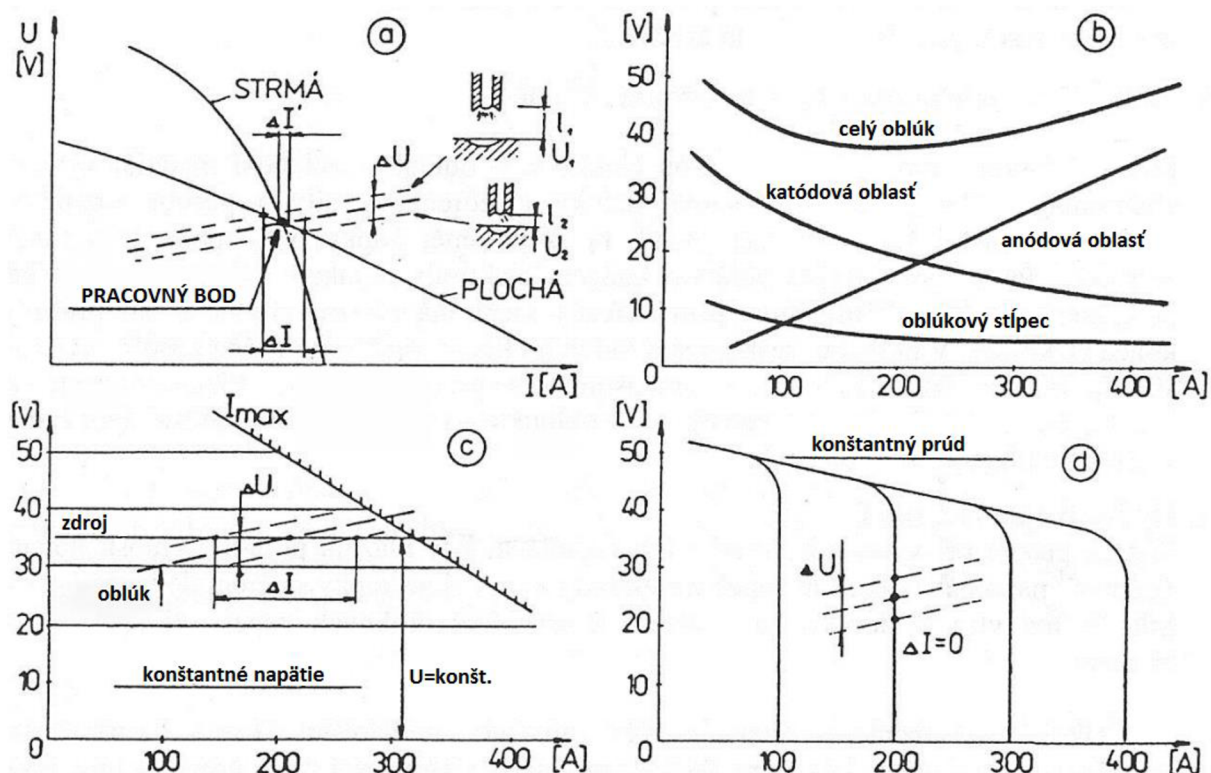
Zapálenie oblúku prebieha pri napätí zdroja naprázdno, ktoré býva vyššie ako pri ustálenom horení oblúku. Veľkosť zápalného napätia býva okolo 60 - 70V v závislosti na materiály elektród a ionizačnej schopnosti prostredia. Pre bežné metódy zvárania je charakteristický rozsah napätia na oblúku v rozsahu 10 - 60V a zvärací prúd v rozmedzí 10 - 2000A.

1.1.1.1 Voltampérová charakteristika oblúku

Statická voltampérová charakteristika oblúku vyjadruje závislosť prúdu na napätí oblúku pri konštantnej dĺžke oblúku. Na vlastný tvar a polohu charakteristiky oblúku má značný vplyv chemické zloženie elektródy, geometria hrotu elektródy, zloženie plazmy oblúku aj priemer elektródy. Z týchto dôvodov sa niekedy používa tzv. štandardná statická charakteristika oblúku (platí pre zváranie obalenou elektródou)

$$U = 20 + 0,04 \cdot I \quad (1.1)$$

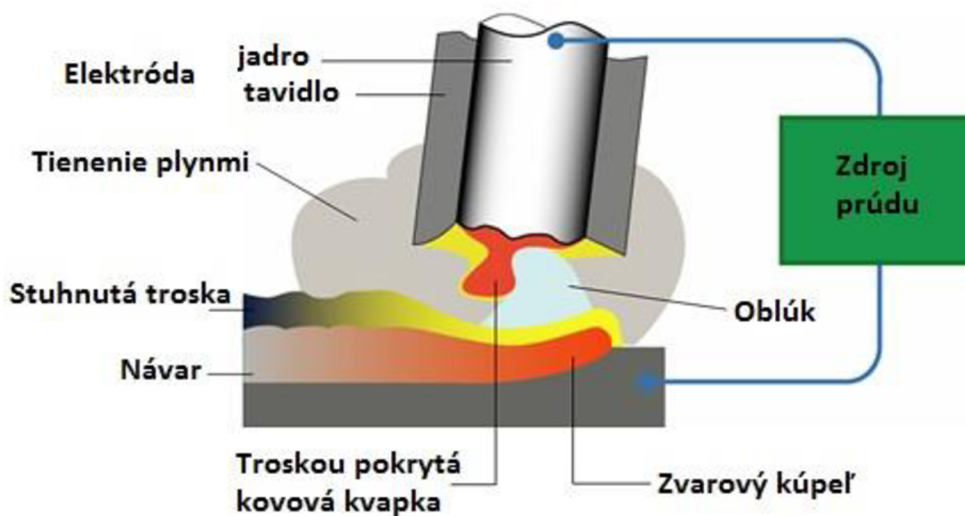
Vplyv statickej charakteristiky zdroja a oblúku na zmenu parametrov je na obr.1.1a. Stĺpec oblúku je spotrebič s konštantným elektrickým odporom. V anódovej a katódovej oblasti má charakter spotrebiča s klesajúcim odporom. Charakteristiky jednotlivých častí oblúku sú zobrazené na obr.1.1b. Jednotlivé technológie zvarovania sa prejavujú rôznymi statickými charakteristikami závislými na parametroch prostredia, v ktorom oblúk horí. Obr.1.1c ukazuje vplyv zdroja s konštantným napätím, obr.1.1d ukazuje vplyv zdroja s konštantným prúdom [1].



Obr. 1.1 Statické charakteristiky zdrojov, oblúku a jeho častí

1.1.2 Ručné oblúkové zváranie

Ručné oblúkové zváranie sa dá charakterizovať ako metóda zvárania elektrickým oblúkom s kovovými taviacimi sa elektródami. Pre horenie oblúku sa používa jednosmerný aj striedavý prúd, v závislosti na použitých elektródach a materiáloch. Elektródy sú obalené v tavidle, ktoré má funkciu metalurgickú, plynotvornú a ionizačnú. Jeho úlohou je stabilizovať oblúk, chrániť zváraný kov pred prístupom vzduchu, spomaliť chladenie zvaru vytvorenou troskou, poprípade dodať do tavného kúpeľa niektoré prísadové prvky (chróm, nikel, molybdén, vanád). Troska vytvorená z obalu chráni odtavované kvapky kovu pred škodlivými účinkami vzduchu tým, že jednak kvapky kovu obaľuje a jednak vytvorí plynovú clonu, ktorá zabraňuje prístupu vzduchu ku kvapkám kovu. Zvára sa najčastejšie ručne, vo všetkých polohách, pretože oblúk má na tavnú časť priamy vplyv [2].



Obr. 1.2 Princíp zvárania obalenou elektródou[3]

1.2 Zváracie zdroje pre oblúkové zváranie

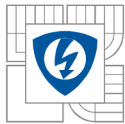
Zváracie zdroje sú elektrické zariadenia, ktoré generujú zvärací prúd pri oblúkovom alebo odporovom zváraní. Zvärací zdroj musí splniť celý rad požiadaviek, vyžadovaných pre bezproblémové zváranie, ako je regulácia elektrického napätia a elektrického prúdu, odolnosť pri vzniku krátkodobých skratov, zapálenie a stabilné horenie elektrického oblúku, stálosť výkonu a dostatočná účinnosť, vhodná statická a dynamická charakteristika, bezpečnosť prevádzky podľa platných noriem a predpisov, zaťažovateľ, účinnosť a účinník. Zväracie zdroje sú vo väčšine prípadov určené na napätie jednofázové (230V 50Hz) alebo združené (400V 50Hz), prípadne trojfázové (3x400V 50Hz) – používané hlavne pri vyšších výkonoch.

1.3 Základné parametre zväracích zdrojov

1.3.1 Vstupné veličiny

Medzi menovité vstupné veličiny patria:

- Menovité vstupné napájacie napätie a jeho kmitočet
- Menovitý príkon zdroja (pri menovitom zväracom prúde)
- Maximálny príkon zdroja (pri maximálnom zväracom prúde)
- Účinník $\cos\varphi$



1.3.2 Výstupné veličiny

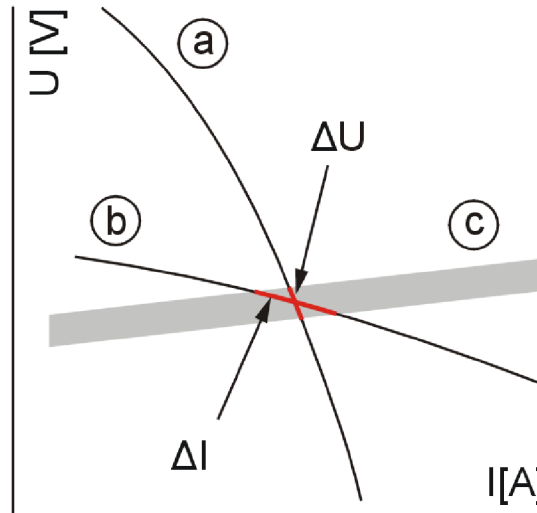
- **Napätie naprázdno** – je to napätie ustálené na výstupných svorkách zapnutého zväracieho zdroja v čase keď nehorí elektrický oblúk, veľkosť napätia naprázdno je z dôvodu bezpečnosti obmedzená normou na 48V efektívnych pri striedavých zdrojoch a 113V pri jednosmerných zdrojoch (prostredie so zvýšeným nebezpečím úrazu elektrickým prúdom) a 80V efektívnych pri striedavých zdrojoch a 113V pri jednosmerných zdrojoch (prostredie bez nebezpečia úrazu elektrickým prúdom)[4].
- **Pracovné napätie** – je to napätie medzi elektródou a zväraným materiálom pri horení oblúku. Toto napätie je závislé na charakteristike zväracieho zdroja, obvykle býva 20 až 36V.
- **Zvärací prúd** – výstupný prúd zdroja, ktorý prechádza zväracím obvodom.
- **Menovitý zvärací prúd** – je to maximálny elektrický prúd, ktorý zdroj dodáva pri danom zaťažovateli, na ktorý je zdroj navrhnutý (väčšinou $DZ=60\%$).
- **Trvalý zvärací prúd** – je to najvyšší prúd, ktorý je možné odoberať zo zväracieho zdroja pri trvalom zaťažení ($DZ=100\%$).
- **Menovitý zvärací výkon** – výkon zväracieho zdroja pri menovitom zväracom napätí a menovitom pracovnom napätí.
- **Účinnosť zdroja** – je to pomer menovitého zväracieho výkonu ku menovitému príkonu zdroja, väčšinou udávaný v percentách.
- **Dovolený zaťažovateľ** – je to pomerná doba zaťaženia zväračky k celkovej dobe pracovného cyklu pri prerušovanom zaťažení. Normalizovaný cyklus je 10 minút. Zaťažovateľ hodnoty $DZ=60\%$ znamená, že 6 minút je možné zvärať so zdrojom pri danom prúde a zvyšný čas sa musí stroj chladiť. Zväračky, ktoré sú určené na mechanizovanú alebo automatickú prevádzku musia mať zaťažovateľ rovný 100%, pretože pri týchto typoch zvärania nie sú potrebné technologické prestávky (napr. výmena elektródy).

1.3.3 Statická charakteristika

Statická charakteristika zdroja zväracieho prúdu je voltampérová krivka závislosti pracovného napätia zdroja na zväracom prúde pri ustálenom stave a určitom nastavení regulačného stupňa zdroja. Hodnoty charakteristiky sa získajú meraním napätia a prúdu v elektrickom obvode zväracieho prúdu, do ktorého je zapojené regulačné zariadenie. Krajné body zaťažovacej statickej charakteristiky sú určené dvoma stavmi – stav naprázdno a stav nakrátko. Pri stave naprázdno zväracím obvodom nepreteká žiadny prúd a napätie zdroja je najvyššie – napätie naprázdno. So stúpajúcim prúdovým zaťažením napätie na zdroji klesá. Pri stave nakrátko (keď je elektróda v kontakte so zväraným materiálom) zväracím obvodom preteká najvyšší prúd – prúd nakrátko (skratový prúd) a napätie na zdroji je takmer nulové. Podľa priebehu statickej charakteristiky v okolí pracovného bodu (podľa strmosti charakteristiky) sa určujú charakteristické vlastnosti zväracích zdrojov

- zdroje s konštantným napätím (tzv. tvrdé zdroje), so zvyšovaním zväracieho prúdu sa napätie na zdroji mení len v malom rozsahu, zaťažovacia charakteristika je plochá,
- zdroje s konštantným prúdom (tzv. mäkké zdroje), so zmenou napätia na oblúku sa nastavený prúd mení len málo, ich charakteristika je strmá,

- zdroje s konštantným výkonom majú pri rastúcom zväracom prúde taký pokles napätia, aby ich súčin $U \cdot I$ (výkon) bol približne konštantný, majú zaťažovaciu charakteristiku mierne klesajúcu.



Obr. 1.3 Strmá(a) a plochá(b) statická charakteristika v jeho zaťažovacej oblasti(c)

Niektoré zväracie zdroje umožňujú prepínať sklon statickej zaťažovacej charakteristiky. Každý zdroj zväracieho prúdu poskytuje v rámci tzv. regulačného rozsahu celý zväzok statických zaťažovacích charakteristík. Nastavovanie jednotlivých aktuálnych charakteristík nachádzajúcich sa medzi krajnými zaťažovacími charakteristikami regulačného rozsahu je možné realizovať buď stupňovitým alebo plynulým prepínaním. Pre ručné zváranie elektrickým oblúkom je vhodný zvärací zdroj so strmou statickou charakteristikou, kde veľká strmosť zaťažovacej charakteristiky zdroja v okolí pracovného bodu zaisťuje pri relatívne veľkom kolísaní napätia na oblúku (pri meniacej sa dĺžke elektrického oblúka) nepatrné zmeny zväracieho prúdu. V prípade, že by strmosť dosiahla hodnoty 90° (statická charakteristika v okolí pracovného bodu je kolmá na os prúdu), by sa potom pri kolísaní dĺžky oblúku hodnota zväracieho prúdu vôbec nemenila. Dĺžka elektrického oblúku, ktorú ovplyvňuje priamo napätie na oblúku, sa môže meniť napr. v dôsledku nepokojného vedenia elektródy alebo vinou nerovnosti povrchu materiálu.

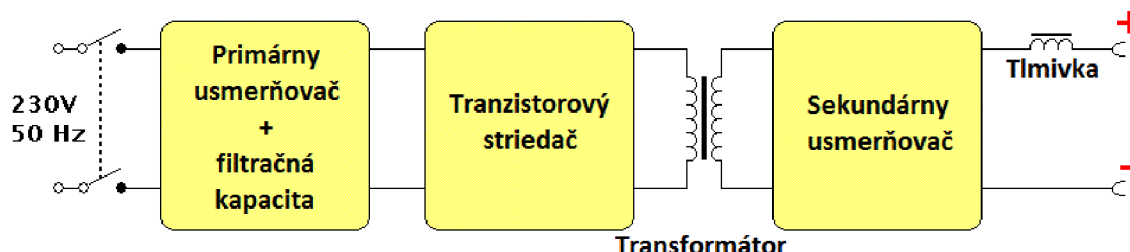
1.3.4 Dynamická charakteristika

Dynamická charakteristika zdroja udáva prechodové hodnoty napätia a prúdu pri rýchlych zmenách v priebehu zvárania – je to závislosť napätia, prúdu a času. Na rozdiel od statickej charakteristiky, ktorá umožňuje iba porovnávanie základných vlastností rôznych zdrojov, charakteristika dynamická udáva vždy pomery pri reálnom stave zvárania a presne v každom okamžiku veľkosť napätia a prúdu. Je to charakteristika zisťovaná na základe merania zmeny napätia a prúdu v celom priebehu zvárania, aj pri rýchlych zmenách týchto veličín (zapálenie oblúku, skraty).[5]

1.4 Spínané zväracie zdroje

Ako spínané zdroje na zváranie sa používajú tzv. invertory – sú to spínané meniče pracujúce na vysokej frekvencii, ktoré transformujú striedavé, napájacie napätie (230V 50Hz v prípade jednofázových invertorov alebo 400V 50Hz pri trojfázových typoch) na vyfiltrované, jednosmerné napätie vhodné na zváranie elektrickým oblúkom. Invertorové zväracie zdroje sú primárne riadené zdroje s výkonovými tranzistormi, ktoré pracujú na princípe vysokofrekvenčných meničov o frekvenciách 20 až 100 kHz a v súčasnej dobe sú najprogressívnejšou koncepciou moderných

zváracích zdrojov. Základným rysom inverterových zdrojov je umiestnenie transformátora v energetickom reťazi až za spínacími tranzistormi. Dôvodom tohto usporiadania je závislosť hmotnosti a objemu transformátora na jeho pracovnej frekvencii. Čím väčšia frekvencia, tým je menší objem a taktiež hmotnosť. Prúdová hmotnosť prakticky nepresahuje hodnotu 0,05kg/A. Ďalšou prednosťou je vysoká energetická účinnosť – až 90%.



Obr. 1.4 Zjednodušená bloková schéma invertora

Na obr. 1.4 je zobrazená jednoduchá bloková schéma zväracieho invertora. Princíp fungovania je nasledovný – sieťové napätie prechádza cez primárny usmerňovač, tu sa transformuje na jednosmerné pulzujúce napätie, ktoré je vyfiltrované filtračnou kapacitou (v rádoch milifarad) a má špičkovú hodnotu $1,42 \times U_{ef}$ (približne 325V). Toto jednosmerné napätie je ďalej spínané cez transformátor tranzistormi – toto napätie môže byť unipolárne ale aj bipolárne, závisí to od použitej topológie. Transformátor má rovnakú úlohu ako v klasickom zväracom zdroji – galvanicky oddeľuje zväracie napätie a upravuje jeho veľkosť. Sekundárny usmerňovač mení striedavé napätie o vysokej frekvencii na jednosmerné napätie. Tlmivka má dôležitú funkciu, zabezpečuje vyhladenie zväracieho prúdu. Vďaka použitej vysokej frekvencii môže byť rovnako malá alebo menšia, ako použitý transformátor. Zväracie invertery majú vďaka ich koncepcii vysoké napätie naprázdno (60 až 90V) ktoré pri zväraní poklesne na asi 20 až 28V.

Medzi výhody inverterov patria:

- Malé rozmery a hmotnosť
- Vysoká účinnosť a s tým súvisiace úspory pri prevádzke
- Rýchla odozva riadenia, ktorá umožňuje komfortné zväranie
- Jednoduchá zmena charakteristiky zdroja a tým možné prispôsobenie k rôznym metódam zvärania (MMA, TIG, MIG)
- Možnosť konštrukcie viacúčelových zväračiek
- S digitálnym riadením prichádza možnosť zapájania zväračiek do sietí a ich komunikácia s počítačmi (nastavovanie a zápis zväracích parametrov)

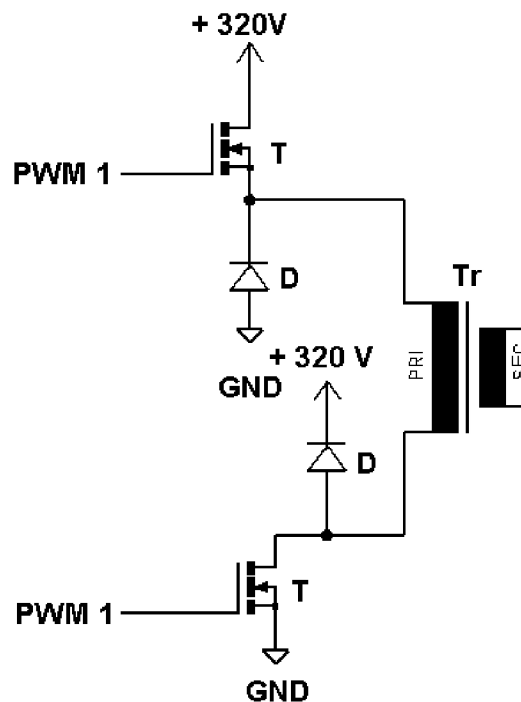
Nevýhody:

- Spoľahlivosť je menšia ako u klasickým zväračiek - toto je spôsobené hlavne vysokým podielom polovodičových súčiastok v zväračke[6]

1.5 Topologie meničů

V této kapitole budou uvedené některé zapojení tranzistorových meničů, které jsou vhodné na konstrukci výkonových zdrojů, jako je aj. zvrací inverter.

1.5.1 Jednočinný propustný menič s dvěma spínači

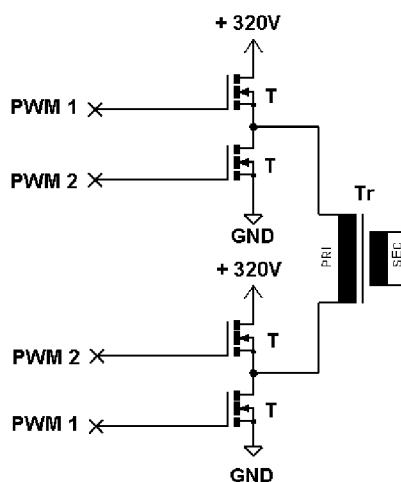


Obr. 1.5 Menič typu forward

Na obr. 1.5 je uvedena zjednodušená schéma tranzistorového meniča typu forward. Tento typ meniča používá transformátor bez vzduchové medzery. Pracuje so striedou maximálne $s = 0,5$, aby nedochádzalo k presýteniu transformátora. Ak by táto podmienka nebola splnená, v priebehu niekoľkých periód by magnetizačný prúd narástol nad únosné medze a hrozila by deštrukcia tranzistorov. V 1. fáze spínania sú tranzistory T zopnuté, prúd preteká cez transformátor a na sekundárnom vinutí sa indukuje napätie, magnetizačný prúd lineárne narastá. V 2. fáze sú tranzistory zatvorené, napätie na transformátore sa otočí, čím je umožnené energii, ktorá je nahromadená v transformátore, dostať sa späť do napäťového medziobvodu (filtračnej kapacity) cez diódy D. Medzi výhody tohto zapojenia patrí veľký výkon pri relatívne malej zložitosti riadiacich obvodov a menší počet spínacích prvkov, taktiež stačí na riadenie iba jeden PWM signál. Tento typ meniča je najpoužívanejší v nižšej a strednej triede invertorov. Niektoré typy zvráčiek používajú zapojené dva propustné meniče paralelne.

1.5.2 Dvojčinný priepustný menič

Taktiež zvaný full bridge (z anglickej literatúry). Toto riešenie predstavuje najlepšie riešenie pre výkonové spínané zdroje, transformátor má najlepši pomer výkon/objem, vyhotovený je opäť bez medzery. Zdroj striedavo pripája napájacie napätie k primárnemu vinutiu v oboch polaritách. Po usmernení sa frekvencia pulzov zdvojuje, tým pádom postačuje menšia tlmivka na vyhladenie potrebného prúdu. Na druhej strane ale potrebuje 4 spínacie prvky a zložité riadenie – dva galvanicky oddelené PWM signály, ktoré sú navzájom fázovo otočené o 180° , ale medzi dobežnou hranou 1. signálu a nábežnou hranou 2. signálu musí byť tzv. dead time – odskok. Počas tejto doby nie je zopnutý žiadny tranzistor, čo zabezpečuje, aby nezopli naraz tranzistory pripojené na rovnaký vývod transformátora, to by malo za následok veľmi rýchlu deštrukciu spínacích polovodičov[7].



Obr. 1.6 Zapojenie plný most

1.5.2.1 Porovnanie jednočinného a dvojčinného meniča

Vyššie uvedené zapojenia meničov sú pre konštrukciu výkonových meničov najpoužívanejšie. Pri porovnaní uvažujeme, že meniče pracujú pri rovnakom napätí medziobvodu U_d a požadujeme od nich rovnaký činný výkon P_δ .

Z hľadiska počtu tranzistorov platí, že koľkokrát je tranzistorov menej, toľkokrát väčším prúdom sú namáhané v zopnutom stave, alebo toľkokrát väčším napätím sú namáhané vo vypnutom stave. Znižovanie počtu tranzistorov principiálne nevedie k ekonomickým úsporám. Výhodu možno nájsť v menšom počte budiacich prvkov a menšej zložitosti pri výrobe.

Pri porovnaní objemu potrebného transformátora vychádzame z rovnice

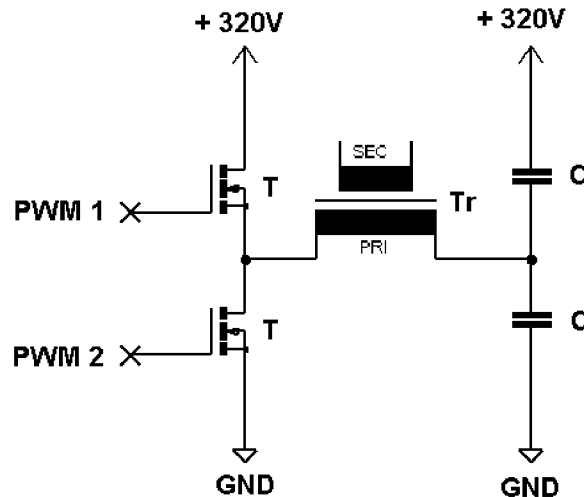
$$\frac{V_{dč}}{V_{jč}} = \left(\frac{1}{2 \cdot \sqrt{2}} \right)^{\frac{3}{4}} = 0,4585 \quad (1.2)$$

Je vidieť, že u dvojčinného meniča je objem transformátora približne polovičný. Táto výhoda sa ekonomicky prejaví až pri väčších prenášaných výkonoch, kedy bude objem transformátora dominantný. Pri malých výkonoch je táto výhoda dvojčinného meniča znehodnotená

- dvojnásobným počtom tranzistorov,
- dvojnásobným počtom budičov,
- väčšou zložitou výrobou,
- problémom s parazitnou jednosmernou magnetizáciou jadra[8, str. 480].

1.5.3 Polovičný most

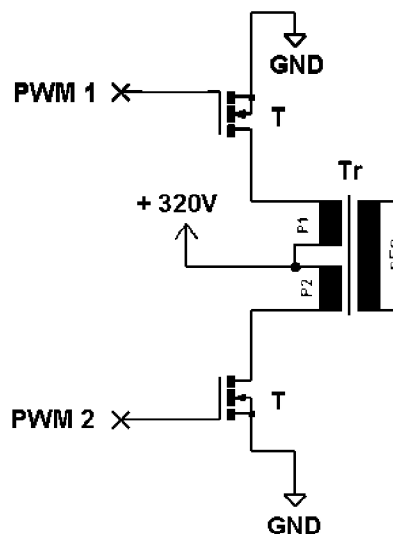
Táto alternatíva k plnému mostu má výhodu v polovičnom počte spínacích prvkov (zvyšné dva zastupujú kondenzátory), ale potreba zložitého riadenia s dead time zostáva. Toto zapojenie je využívané len minimálne.



Obr. 1.7 Menič typu polovičný most

1.5.4 Push-Pull

V tomto zapojení musí byť opäť strieda $s_{max} = 0,5$. Opäť je potrebný len polovičný počet tranzistorov, opäť sú potrebné dva PWM signály s dead time, tentokrát ale nemusia byť galvanicky oddelené, pretože emitory obidvoch tranzistorov sú na rovnakom potenciáli. Nevýhoda je nutnosť transformátora s dvoma primárnymi vinutiami. Toto zapojenie sa opäť v zvracej technike používa len minimálne [7].

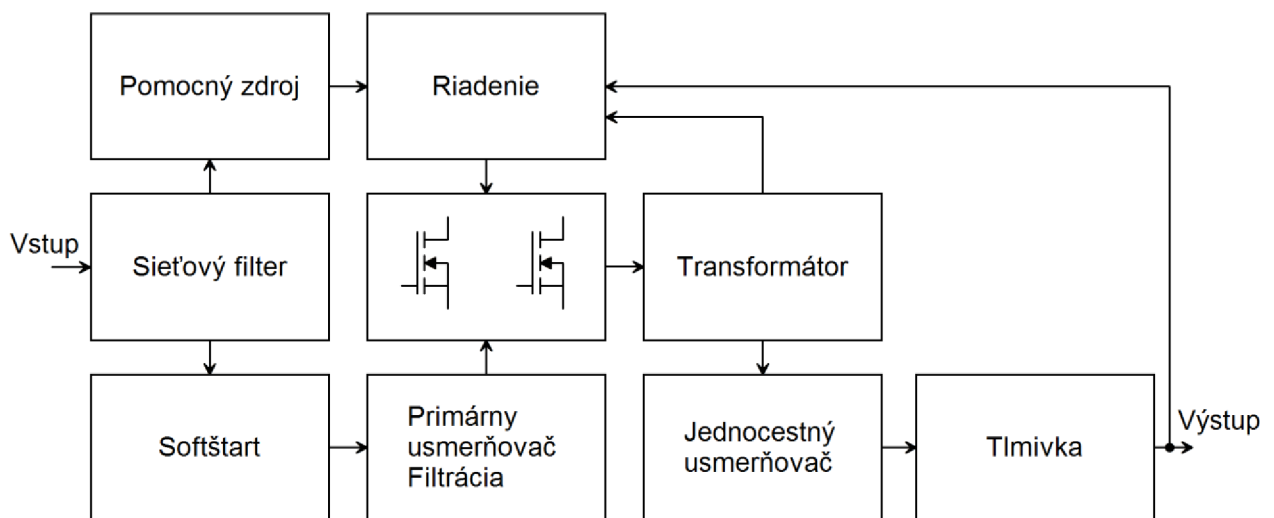


Obr. 1.8 Zapojenie push-pull

1.6 Vol'ba parametrov a bloková schéma

Vzhľadom na uvedené výhody a nevýhody meničov bola zvolená topológia jednočinného meniča. Prenášaný výkon je dostatočný a riadenie nie je zložité ako pri iných meničoch s potrebou generácie odskoku. Parametre, ktoré boli určené pri návrhu tohto spínaného meniča sú nasledovné:

- Vstupné napätie $U_{ef}=230V$
- Výstupný prúd $I_z=140A$
- Frekvencia meniča $f=100kHz$
- Zvlnenie výstupného prúdu $\Delta I_z=15A$
- Maximálna strieda $s_{max}=0,45$
- Zvlnenie napätia medziobvodu $\Delta U_d=70V$
- Napätie naprázdno $U_0=80V$

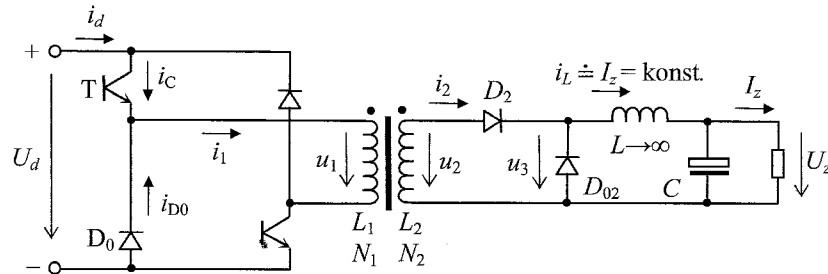


Obr. 1.9 Bloková schéma navrhovanej zväračky

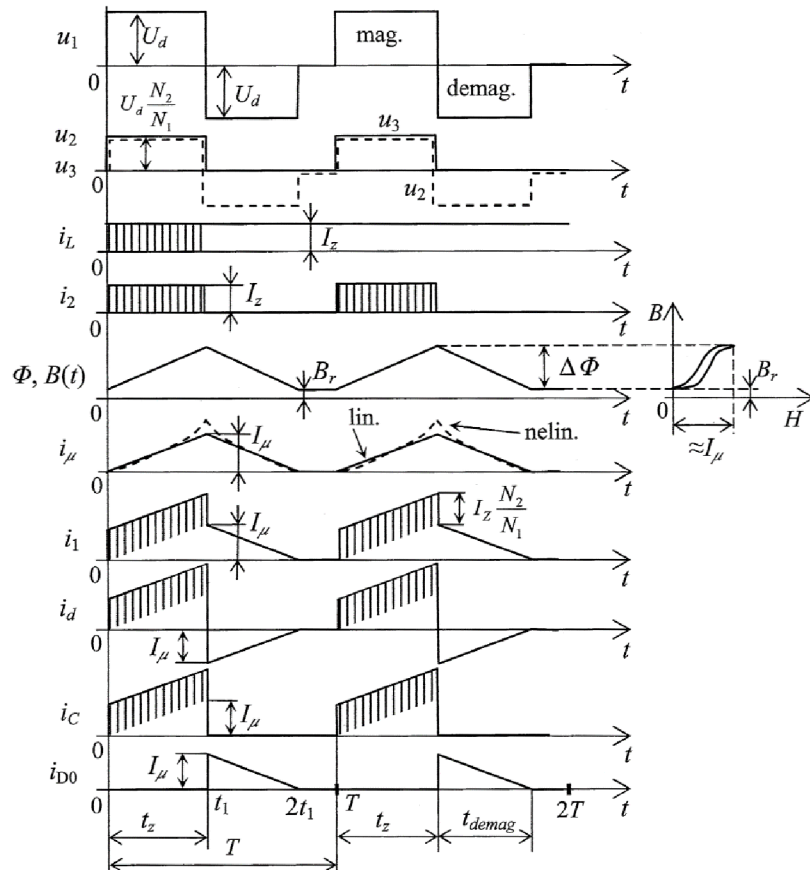
Na obr. 1.9 je vyobrazená základná bloková schéma navrhovaného zapojenia. Vstupné napätie 230V sa pripája na sieťový filter, ktorý napája obvod softstartu a pomocný zdroj. Pomocný zdroj je zdroj malého napätia - v našom prípade približne 24V nestabilizovaných na napájanie ventilátorov a 18V stabilizovaných na napájanie riadenia. Blok transformátora obsahuje snímač prúdu na potrebnú prúdovú spätnú väzbu. Výstupné napätie je snímané pre prípadnú ochranu proti prilepení elektródy (Anti-Stick).

2 NÁVRH A DIMENZOVANIE PRVKOV

2.1 Schéma a priebeh veličín zapojenia

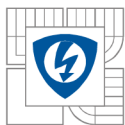


Obr. 2.1 Jednočinný priepustný menič - základné zapojenie[8, str. 417]



Obr. 2.2 Priebehy dôležitých veličín[8, str. 418]

Menič pracuje tak, že obidva tranzistory sú zopnuté súčasne, tým je primárne vinutie transformátora pripojené na napätie U_d a magnetizačný prúd lineárne narastá (pri zanedbaní nelinearity magnetizačnej krivky). V čase t_1 sa tranzistory vypnú, ale magnetizačný prúd nemôže skokovo zaniknúť, indukčnosť primárneho vinutia sa snaží ho držať na rovnakej hodnote, preto sa napätie na primárnom vinutí otočí a cez zopnuté nulové diódy sa pripojí na napätie U_d (napätie na primárnom vinutí má hodnotu $-U_d$). Magnetizačný prúd lineárne klesá, obe diódy sa uzatvoria až v momente, keď magnetizačný prúd klesne na nulu. Z toho dôvodu nesmie byť strieda meniča väčšia ako 0,5 – došlo by k lavínovému nárastu magnetizačného prúdu a ten by sa zastavil na hodnote U_d/R_{Cu1} , behom niekoľkých sekúnd by mohlo dôjsť k tepelnej deštrukcii primárneho vinutia alebo polovodičov.



Na výstupe transformátora je rovnaké napätie ako na vstupe len s prevodom N_2/N_1 . Aby nedošlo k prerušeniu demagnetizácie musí byť na výstupe použitý jednocestný usmerňovač. Tlmivka L drží výstupný prúd na konštantnej hodnote, preto má prúd na výstupe transformátora tvar pravouhlých impulzov. Dióda D_{02} vedie prúd v dobe, keď je dióda D_2 polarizovaná záverne. Celkový primárny prúd i_C tranzistorom T je súčtom sekundárneho prúdu (pretransformovaného na primárnu stranu) a magnetizačného prúdu transformátora. Prúd i_{D0} je prúd primárnej nulovej diódy[8, str. 418].

2.2 Výpočet a dimenzovanie transformátora

Pri použití meničov dochádza k spínaniu na frekvencii vysoko presahujúcej možnosti jadra z transformátorových plechov – dnes je bežne použitá frekvencia od 30 do 200kHz. Preto bol ako materiál zvolený ferit. Jeho výhodami sú nízka cena, nízka hmotnosť, dobre dielektrické vlastnosti a vysoká odolnosť voči korózií. Taktiež nie je taký krehký ako amorfné materiály. Tieto jadrá sú často používané vo výkonovej elektrotechnike, ich nevýhodou je nižšia hodnota sytenia (okolo 0,4 až 0,5T). Bolo vybraté toroidné jadro T4919-CF139 od firmy Semic. Jeho parametre sú v tab. 2.1.

Tab. 2.1 Parametre jadra T4919-CF139[9,10]

T4919-CF139		
Permeabilita	μ_{Fe}	2100
Indukcia pri 25°C	$B_s(25^\circ C)$	490mT
Indukcia pri 100°C	$B_s(100^\circ C)$	390mT
Remanentná indukcia pri 25°C	$B_r(25^\circ C)$	180mT
Hustota	ρ	4800kg/m ³
Stratový výkon pri 100kHz, 200mT, 100°C	P_{vmax}	380kW/m ³
Stredná dĺžka siločiar	L_{Fe}	123mm
Efektívny prierez	S_{Fe}	161mm ²
Konštanta jadra	A_l	3450nH
Objem	V_{Fe}	19796mm ³
Hmotnosť	m	101g
Plocha okna	S_o	7,94cm ²

Budú použité 3 zlepené jadrá, vďaka čomu sa 3x zväčší prierez výsledného jadra. Teraz je možné pristúpiť k výpočtu počtu primárnych závitov transformátora. Vzhľadom na možné oteplenie transformátora, volíme $B_s = 380mT$ a $B_r = 120mT$.

$$N_1 = \frac{U_d \cdot S_{max}}{f \cdot (B_s - B_r) \cdot S_{Fe}} = \frac{325 \cdot 0,45}{100 \cdot 10^3 \cdot (380 - 120) \cdot 10^{-3} \cdot 3 \cdot 161 \cdot 10^{-6}} = 11,65 \quad (2.1)$$



Volíme výsledný počet $N_1 = 12$. Hodnota U_z je podľa rovnice 1.1 pre 140A rovná 25,6V. Ako pracovné výstupné napätie volíme 30V. Vzhľadom na to, že jednočinný priepustný menič sa správa ako prevodník striedy na výstupné napätie, hodnota výstupného napätia je rovná

$$U_z = U_d \cdot s \cdot \frac{N_2}{N_1} \quad (\text{V}; \text{V}, -, -) \quad (2.2)$$

V menovitom pracovnom bode meniča je odporúčané voliť striedu v rozmedzí $s=0,3$ až $0,35$ s ohľadom na požadovaný regulačný rozsah pri poklese napätia U_d a na elimináciu napät'ových úbytkov vo všetkých uzloch meniča [8, str. 421]. Výsledný počet sekundárnych závitov určuje rovnica 2.3.

$$N_2 = \frac{U_z \cdot N_1}{U_d \cdot s} = \frac{30 \cdot 12}{325 \cdot 0,3} = 3,6 \quad (2.3)$$

Počet závitov sme zaokrúhlili nahor na 4 celé závity. Teraz môžeme určiť maximálny magnetizačný prúd transformátora

$$I_{\mu max} = \frac{f \cdot (B_s - B_r)^2 \cdot l_{Fe} \cdot S_{Fe}}{s_{max} \cdot U_d \cdot \mu_0 \cdot \mu_{Fe}} = \frac{100 \cdot 10^3 \cdot (380 - 120) \cdot 10^{-6} \cdot 123 \cdot 10^{-3} \cdot 161 \cdot 10^{-6}}{0,45 \cdot 325 \cdot 4 \cdot \pi \cdot 10^{-7} \cdot 2100} = 1,04A \quad (2.4)$$

Maximálny magnetizačný prúd bude rovný 1,04A. Indukčnosť primárneho a sekundárneho vinutia určíme vzťahom

$$L = N^2 \cdot A_l \quad (2.5)$$

Konštantu A_l musíme ponásobiť počtom jadier (v našom prípade 3) potom výsledná indukčnosť primárneho a sekundárneho vinutia bude

$$L_1 = N^2 \cdot 3 \cdot A_l = 12^2 \cdot 3 \cdot 3450 \cdot 10^{-9} = 1,49mH \quad (2.6)$$

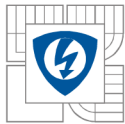
$$L_2 = N^2 \cdot 3 \cdot A_l = 4^2 \cdot 3 \cdot 3450 \cdot 10^{-9} = 165,6\mu H \quad (2.7)$$

Ďalej určíme efektívne prúdy, ktoré pretekajú primárnym a sekundárnym vinutím. Budeme vychádzať z požiadavky na $I_z = 140A$. Potom môžeme písať

$$I_{e2} = I_z \cdot \sqrt{s} = 140 \cdot \sqrt{0,45} = 94A \quad (2.8)$$

$$I_{e1} = I_{e2} \cdot \frac{N_2}{N_1} + I_{efmag} = I_{e2} \cdot \frac{N_2}{N_1} + I_{\mu max} \cdot \sqrt{\frac{s}{3}} = 94 \cdot \frac{4}{12} + 1,04 \cdot \sqrt{\frac{0,45}{3}} = 31,7A \quad (2.9)$$

Prúdy I_{e1} a I_{e2} sú efektívne prúdy primárnym a sekundárnym vinutím. Na tieto prúdy musíme dimenzovať vodiče na primárnej a sekundárnej strane transformátora. Ako hodnotu prúdovej hustoty volíme $\sigma = 7A/mm^2$. Táto relatívne vysoká hodnota je zvolená z dôvodu praktickej realizácie transformátora. Pri príliš malej prúdovej hustote by sa mohlo stať, že sa vinutie do okna



toroidného jadra nezmestí. Pri takto vysokých frekvenciách spínanie je nutné do výpočtu uvažovať aj tzv. skinefekt. Elektrický povrchový jav je u vodičov hodnotený hĺbkou vniknutia δ . Hĺbka vniknutia je hĺbka, v ktorej klesne prúdová hustota na $1/e$ prúdovej hustoty na povrchu vodiča. Primárne a sekundárne vinutie bude preto navinuté VF lankom o priemere jednej žily 0,2mm. Kontrola hĺbky vniknutia podľa [11]

$$\delta = \frac{1}{\sqrt{\pi \cdot \frac{1}{\rho} \cdot \mu_0 \cdot f}} = \frac{1}{\sqrt{\frac{\pi \cdot 4 \cdot \pi \cdot 10^{-7} \cdot 100 \cdot 10^3}{1,724 \cdot 10^{-8}}}} = 0,261 \text{ mm} \quad (2.10)$$

Pre zvolenú frekvenciu $f = 100 \text{ kHz}$ a merný elektrický odpor medi $\rho_{\text{Cu}} = 1,724 \cdot 10^{-8} \Omega \text{ m}$ vychádza hĺbka vniknutia $\delta = 0,26 \text{ mm}$. Použitie 0,2mm vodičov tým považujeme za vyhovujúce. Výsledný prierez vodiča určíme podľa vzťahu

$$S_{\text{Cu1}} = \frac{I_{e1}}{\sigma} = \frac{31,7}{7} = 4,53 \text{ mm}^2 \quad (2.11)$$

$$S_{\text{Cu2}} = \frac{I_{e2}}{\sigma} = \frac{94}{7} = 13,42 \text{ mm}^2 \quad (2.12)$$

Vzhľadom na veľký potrebný prierez bude na namotanie transformátora použité VF lanko s priemerom jednej žily 0,2mm. Primárne vinutie bude namotané jedným lankom zloženým z 180 vodičov, na sekundárne vinutie budú použité 2 lanká paralelne zložené z 300 vodičov. V prípade veľkého oteplenia vodičov pri prevádzke je možné pristúpiť k aktívnemu chladeniu. Kontrola na prierez VF lanka

$$S_{\text{Vf1}} = n \cdot \frac{\pi \cdot d^2}{4} = 180 \cdot \frac{\pi \cdot 0,2^2}{4} = 5,64 \text{ mm}^2 \quad (2.13)$$

$$S_{\text{Vf2}} = n \cdot \frac{\pi \cdot d^2}{4} = 2 \cdot 300 \cdot \frac{\pi \cdot 0,2^2}{4} = 18,85 \text{ mm}^2 \quad (2.14)$$

Nová prúdová hustota

$$\sigma_1 = \frac{I_{e1}}{S_{\text{Cu1}}} = \frac{31,7}{5,64} = 5,62 \text{ A/mm}^2 \quad (2.15)$$

$$\sigma_2 = \frac{I_{e2}}{S_{\text{Cu2}}} = \frac{94}{18,85} = 5 \text{ A/mm}^2 \quad (2.16)$$

Ďalej môžeme skontrolovať zvolený transformátor na prenesený výkon[16]

$$\begin{aligned} P_C &= k_{\text{pcu}} \cdot \sigma \cdot f \cdot (B_s - B_r) \cdot \sqrt{s} \cdot S_o \cdot S_{\text{Fe}} \\ &= 0,15 \cdot 5,31 \cdot 10^6 \cdot 100 \cdot 10^3 \cdot (380 - 120) \cdot 10^{-3} \cdot \sqrt{0,45} \\ &\quad \cdot 7,94 \cdot 10^{-4} \cdot 161 \cdot 3 \cdot 10^{-6} = 5328 \text{ W} \end{aligned} \quad (2.17)$$

Strednú prúdovú hustotu vo vinutiach σ uvažujeme $5,3 \text{ A} \cdot 10^6 / \text{m}$ (vzhľadom na použitie väčšieho prierezu ako je nutné), činiteľ plnenia okna k_{pcu} označuje koľko z plochy okna S_o je zaplnené vodičom.

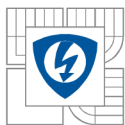
Tento parameter budeme vedieť až po praktickom zhotovení transformátora, ak ho aj odhadneme na veľmi malý ($k_{pcu} = 0,15$), vychádza maximálny prenášaný výkon $P_c = 5328W$, čo je dostatočné na naše požiadavky[8, str. 422]. Tab. 2.2 ukazuje zhrnuté parametre navrhnutého transformátora.

Tab. 2.2 Navrhnuté parametre výkonového transformátora

	Primárne vinutie	Sekundárne vinutie
Počet závitov	12	4
Indukčnosť	1,49mH	165,6uH
Efektívny prúd	31,7A	94A
Magnetizačný prúd	1,04A	
Prúdová hustota	5,62A/mm ²	5A/mm ²
Priemer jednotlivých vodičov	0,2mm	0,2mm
Počet vodičov	180	600
Hĺbka vniknutia	0,26mm	0,26mm



Obr. 2.3 Vyhotovený transformátora pripravený na zaspájkovanie do DPS



2.3 Návrh a dimenzovanie výstupnej tlmivky

Výstupná tlmivka má podstatnú funkciu pri konštrukcii zväracieho invertora, jej veľkosť ovplyvňuje výsledné zväracie vlastnosti, pretože potlačuje výrazné zvlnenie prúdu z výstupu transformátora. Tlmivka musí byť taktiež správne prúdovo dimenzovaná, aby nedošlo k jej presýteniu, prípadne prehriatiu. Tým pádom máme niekoľko možností na jej realizáciu.

2.3.1 Vzduchová tlmivka

Konštrukcia tejto tlmivky má výhodu v tom, že sa prakticky nedá presýtiť a jej permeabilita je nezávislá ako na prúde, tak na frekvencii. Nevýhodou je výsledná veľkosť tlmivky a taktiež väčšie spôsobované rušenie, výhodou je priaznivá cena. Pokusne bola vypočítaná potrebná tlmivka valcovitého typu, jej rozmery pri použití vodiča o priemere 5mm dosahovali 6cm v priemere a 8cm na dĺžku.

2.3.2 Tlmivka s feritovým jadrom

Táto tlmivka je navinutá na feromagnetickom jadre so vzduchovou medzerou. Výhodou tejto tlmivky je väčšia indukčnosť a menšie rozmery.

2.3.3 Tlmivka so železoprachovým jadrom

Pre realizáciu bola zvolená konštrukcia tlmivky s jadrom zo železoprachového materiálu. Tento materiál má prakticky vzduchovú medzeru obsiahnutú v sebe svojim zložením, jeho hysterézná krivka má lineárnejšiu charakteristiku ako feritové materiály. Bolo zvolené toroidné jadro typu T225-26 z ponuky firmy GES Electronics. Parametre tlmivky sú v tab. 2.3.

Tab. 2.3 Parametre jadra T225-26[12,13]

T225-26		
Stredná dĺžka siločiar	l_{Fe}	145,6mm
Vonkajší priemer	d_2	57,15
Vnútorý priemer	d_1	35,56mm
Výška	h	13,97mm
Prierez	S_{fe}	151mm ²
Objem	V_e	21956mm ³
Permeabilita	μ_r	75
Konštanta jadra	A_l	950uH/100

Potrebnú indukčnosť určíme zo vzťahu

$$L = \frac{U_z}{\Delta I_z} \cdot (1 - s) \cdot \frac{1}{f} = \frac{30}{15} \cdot (1 - 0,5) \cdot \frac{1}{100 \cdot 10^3} = 10\mu H \quad (2.18)$$

Pre zvolené hodnoty vychádza indukčnosť $L = 10\mu H$. Budú použité 2 kusy zvolených jadier.

Počet závitov na tlmivke určíme pomocou vzťahu (po dosadení v μH)[14]

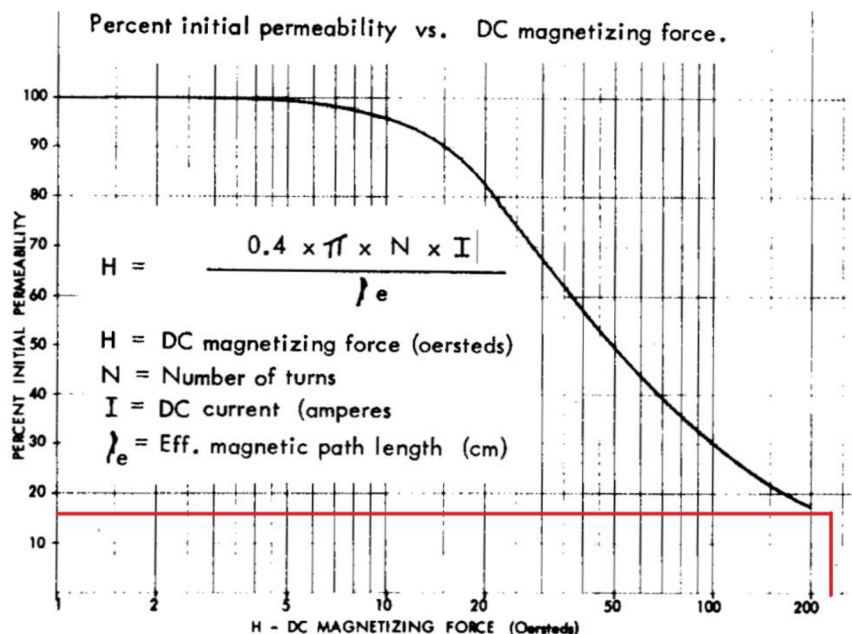
$$N = 100 \cdot \sqrt{\frac{L}{A_l}} = 100 \cdot \sqrt{\frac{10}{2 \cdot 950}} \cong 8 \quad (2.19)$$

Takto navrhnutá tlmivka ale bude mať požadovanú indukčnosť len naprázdno, prípadne po neprekročení určitej hodnoty intenzity magnetického poľa H , pretože ďalej klesá permeabilita tohto jadra a tým aj jeho konštanta A_l . Iteračnou metódou bol dosiahnutý počet závitov, kde je požadovaná hodnota indukčnosti aj pri maximálnom prúde tlmivkou $I_{z\max}=145\text{A}$. Pri počte závitov $N=18$ je hodnota intenzity magnetického poľa rovná[15]

$$H = \frac{0,4 \cdot \pi \cdot N \cdot I_z}{l_e} = \frac{0,4 \cdot \pi \cdot 18 \cdot 140}{14,56} = 217,50e \quad (2.20)$$

Výsledok je udávaný v oerstedoch, pretože takto je označená os v grafe výrobcu. Ako vidno na obr. 2.4, permeabilita μ_r tu klesá na približne 17% z pôvodnej hodnoty. Výsledná indukčnosť potom bude rovná[14]

$$L = \frac{N^2 \cdot A_l}{100^2} = \frac{18^2 \cdot 2 \cdot 0,17 \cdot 950}{100^2} = 10,47\mu\text{H} \quad (2.21)$$



Obr. 2.4 Závislosť permeability na intenzite magnetického poľa[15]

Teraz je možné skontrolovať tlmivku na špičkové magnetické sýtenie B_{\max} .

$$B_{\max} = \frac{L \cdot I_{z\max}}{S_{Fe} \cdot N} = \frac{12,3 \cdot 10^{-6} \cdot 147,5}{2 \cdot 151 \cdot 10^{-6} \cdot 18} = 0,33\text{T} \quad (2.22)$$

Vzhľadom na to, že prúd tlmivkou obsahuje malú striedavú zložku, nebude pri návrhu vinutia braný ohľad na skin efekt. Pri výpočte potrebného prierezu vodiča bude uvažovaná prúdová hustota $\sigma=7\text{A}/\text{mm}^2$ a efektívna hodnota prúdu $I_{\text{ef}} = 140\text{A}$.

Na vinutie bude použitý vodič o priemere $d_{cu}=1,7\text{mm}$. Plocha okna tlmivky je rovná

$$S_o = \frac{d^2 \cdot \pi}{4} = \frac{35,56^2 \cdot \pi}{4} = 993,14\text{mm}^2 \quad (2.23)$$

Počet vodičov pre splnenie podmienky prúdovej hustoty je rovný

$$n = \frac{I_{ef}}{\sigma \cdot \frac{d_{cu}^2 \cdot \pi}{4}} = \frac{140}{7 \cdot \frac{1,7^2 \cdot \pi}{4}} \cong 9 \quad (2.24)$$

Pri navinutí potrebných 18 závitov je plocha medi rovná

$$S_{cu} = N \cdot n \cdot \frac{d_{cu}^2 \cdot \pi}{4} = 18 \cdot 9 \cdot \frac{1,7^2 \cdot \pi}{4} = 367,7\text{mm}^2 \quad (2.25)$$

Podielom plochy okna a plochy vinutia dostávame činiteľ plnenia medi pre tento konkrétny návrh tlmivky

$$k_{pcu} = \frac{S_{cu}}{S_o} = \frac{367,7}{993,14} = 0,37 \quad (2.26)$$

Tak vysoký činiteľ plnenia nie je možné v našich podmienkach dodržať, preto bude počet vodičov znížený na 7. Prúdová hustota sa zmení na

$$\sigma = \frac{I_{ef}}{n \cdot \frac{d_{cu}^2 \cdot \pi}{4}} = \frac{140}{7 \cdot \frac{1,7^2 \cdot \pi}{4}} = 8,81\text{A/mm}^2 \quad (2.27)$$



Obr. 2.5 Vyhotovená tlmivka pripravená na zaspájkovanie do DPS

2.4 Dimenzovanie polovodičov

2.4.1 Dimenzovanie tranzistorov

Tranzistory v tomto zapojení sú namáhané v zopnutom stave hodnotami stredného, efektívneho a špičkového prúdu. Vo vypnutom stave ich polovodičový prechod D-S musí odolať napätiu, ktoré sa pre tento typ meniča udáva na 500 až 600V. Teoreticky by mali byť tranzistory dimenzované len na napätie U_d , prakticky sa k tomuto napätiu ešte pripočítavajú špičky vzniknuté na indukčnosti prívodov a taktiež sa počíta so zvýšením napájacieho napätia o 20% z nominálnej hodnoty. Výpočet špičkovej, strednej a efektívnej hodnoty prúdu tranzistorom (pri výpočte strednej a efektívnej hodnoty je magnetizačný prúd zanedbaný)

$$I_{Tmax} = I_z \cdot \frac{N_2}{N_1} + I_{\mu max} = 140 \cdot \frac{4}{12} + 1,04 = 47,7A \quad (2.28)$$

$$I_{Tstr} = I_z \cdot \frac{N_2}{N_1} \cdot s = 140 \cdot \frac{4}{12} \cdot 0,45 = 21A \quad (2.29)$$

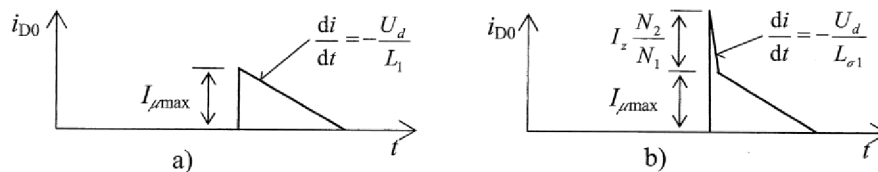
$$I_{Tef} = I_z \cdot \frac{N_2}{N_1} \cdot \sqrt{s} = 140 \cdot \frac{4}{12} \cdot \sqrt{0,45} = 31,3A \quad (2.30)$$

2.4.2 Dimenzovanie demagnetizačných diód

Pre dimenzovanie diód platia podobné podmienky ako pre tranzistory.

$$I_{Dmax} = I_{\mu max} + I_z \cdot \frac{N_2}{N_1} = 1,04A + 140 \cdot \frac{4}{12} = 47,7A \quad (2.31)$$

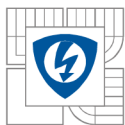
Druhý člen v rovnici je spôsobený rozptylovou indukčnosťou transformátora.



Obr. 2.6 Prúd nulovou diódou D₀ a) teoretický tvar b) skutočný tvar [8, str. 423]

$$I_{Dstr} = \frac{1}{2} \cdot (1 - s) \cdot I_{Dmax} = \frac{1}{2} \cdot (1 - 0,45) \cdot 1,04 = 0,286A \quad (2.32)$$

$$I_{Def} = I_{Dmax} \cdot \sqrt{\frac{s}{2}} = 1,04 \cdot \sqrt{\frac{0,45}{2}} = 0,493A \quad (2.33)$$



2.4.3 Dimenzovanie diód sekundárneho usmerňovača

Pri výpočte prúdov pre hlavnú diódu na sekundárnej strane použijeme vzťahy

$$I_{D2max} = I_z = 140A \quad (2.34)$$

$$I_{D2str} = I_z \cdot s = 140 \cdot 0,45 = 63A \quad (2.35)$$

$$I_{D2ef} = I_z \cdot \sqrt{s} = 140 \cdot \sqrt{0,45} = 93,9A \quad (2.36)$$

Pre nulovú diódu platia podobné vzťahy, namiesto maximálnej striedy s ale musíme uvažovať, že táto dióda vedie prúd počas času $1 - s$. Striedu v tomto prípade uvažujeme minimálnu možnú, ktorú menič dosiahne (volíme $s_{min} = 0,1$).

$$I_{D02max} = I_z = 140A \quad (2.37)$$

$$I_{D02str} = I_z \cdot (1 - s_{min}) = 140 \cdot (1 - 0,1) = 126A \quad (2.38)$$

$$I_{D02ef} = I_z \cdot \sqrt{1 - s_{min}} = 140 \cdot \sqrt{1 - 0,1} = 132,8A \quad (2.39)$$

Napät'ovo budeme tieto diódy dimenzovať minimálne na dvojnásobnú hodnotu $U_d \cdot N_2/N_1$ [8, str. 423].

Tab. 2.4 Prúdové dimenzovanie polovodičov

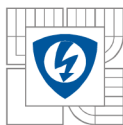
	Špičková hodnota	Stredná hodnota	Efektívna hodnota
Tranzistory	47,7A	21A	31,3A
Demagnetizačné diódy	47,7A	0,286A	0,493A
Sekundárna dióda	140A	63A	93,9A
Nulová dióda	140A	126A	132,8A

Ako tranzistory budú použité výkonové mosfety SPW47N60CFD od výrobcu Infineon, na jeden spínač budú použité 2 tranzistory zapojené paralelne.

Na demagnetizačné diódy budú použité MUR1560 od výrobcu ON Semiconductor.

Na výstupný usmerňovač použijeme diódy STTH6003CW od výrobcu ST Microelectronics. Hlavná dióda bude obsahovať dve tieto diódy zapojené paralelne, na nulovú diódu použijeme tri kusy zapojené paralelne.

Pri výbere týchto polovodičov je dôležité si uvedomiť, že maximálny trvalý prúd, ktorý daný polovodič znesie, je často uvádzaný pri teplote $T = 20$ alebo 25°C . Polovodiče vo výkonových aplikáciách často pracujú pri teplotách, ktoré niekoľkokrát prekročujú zadané teploty. Pri výbere prvkov je taktiež dôležité zohľadniť ich zapínacie a vypínacie časy t_r a t_f , prípadne čas t_{rr} pri diódach. Tieto časy priamo ovplyvňujú straty polovodiču pri prechodných dejoch. Na nasledujúcich tabuľkách 2.5 až 2.7 sú vybrané parametre daných polovodičov.



Tab. 2.5 Vybrané parametre mosfetu SPW47N60CFD[15]

SPW47N60CFD		
Napätie Drain-Source	U_{DS}	600V
Prúd pri T_{25}	I_D	46A
Prúd pri T_{100}	I_D	29A
Odpor v zopnutom stave pri 25°C	R_{DSon}	83m Ω
Odpor v zopnutom stave pri 150°C	R_{DSon}	150m Ω
Tepelný odpor prechod-puzdro	$R_{th(j-c)}$	0,3K/W
Čas zopnutia+oneskorenie	t_{on}	60ns
Čas vypnutia+oneskorenie	t_{off}	115ns
Celkový náboj hradla pri 10V	Q_g	322nC
Puzdro	TO-247AC	

Tab. 2.6 Parametre diódy MUR1560[16]

MUR1560		
Prúd pri T_{25}	I_{FRMS}	30A
Prúd pri T_{145}	I_{FAVM}	15A
Reverse recovery time	t_{rr}	35ns
Max reverse recovery time	t_{rr}	60ns
Záverne napätie	U_{RRM}	600V
Otváracie napätie(T_{25})	U_F	1,5V
Otváracie napätie(T_{150})	U_F	1,2V
Puzdro	TO-220AC	

Tab. 2.7 Parametre diódy STTH6003CW[17]

STTH6003CW		
Prúd pri T_{135}	I_{FAVM}	60A
Reverse recovery time	t_{rr}	40ns
Max reverse recovery time	t_{rr}	55ns
Záverne napätie	U_{RRM}	300V
Otváracie napätie(T_{25})	U_F	1,25V
Tepelný odpor prechod-puzdro	$R_{th(j-c)}$	0,55K/W
Puzdro	TO-247AC	

2.5 Dimenzovanie usmerňovača a filtrácie

Usmernené napájacie napätie by bez filtrácie pulzovalo o frekvencii, ktorá je rovná dvojnásobku napájacej frekvencie. Tento tvar napätia nie je vhodný na napájanie meniča tohto typu, preto je nutné napätie vyhladiť pomocou kondenzátora. Pri návrhu treba brať do úvahy skreslenie prúdu, ktorý takýto usmerňovač odoberá zo siete. Tento prúd má tvar úzkych pulzov a obsahuje veľké množstvo harmonických zložiek.

Ako usmerňovací prvok bude použitý monolitický mostík KBPC5006MW. Jeho hlavné parametre sú uvedené v tab. 2.8.

Tab. 2.8 Parametre mostíku KBPC5006MW[18]

KBPC5006MW		
Záverné napätie	U_{RRM}	600V
Stredná hodnota prúdu	I_{FAV}	50A
Otváracie napätie	U_F	1,1V
Tepelný odpor prechod-puzdro	$R_{th(j-c)}$	0,7K/W

Strednú hodnotu prúdu potrebnú na výpočet kapacity filtra vypočítame ako

$$I_d = \frac{P_d}{U_d} = \frac{\frac{I_z \cdot U_z}{\eta}}{U_m - \frac{\Delta U}{2}} = \frac{140 \cdot 30}{0,9 \cdot (325 - 35)} = 16,1A \quad (2.44)$$

Účinnosť meniča bola odhadnutá na 90%.

$$C = \frac{T \cdot I_d}{2 \cdot \Delta U} \cdot \left[1 - \frac{1}{\pi} \arccos\left(1 - \frac{\Delta U}{U_m}\right) \right] \quad (2.45)$$
$$= \frac{20 \cdot 10^{-3} \cdot 16,1A}{2 \cdot 70} \cdot \left[1 - \frac{1}{\pi} \arccos\left(1 - \frac{70}{325}\right) \right] = 1809\mu F$$

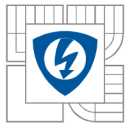
Filtračný kondenzátor bude zložený zo štyroch elektrolytických kondenzátorov ESMH401VNN471MA40S od firmy Nippon o kapacite 470uF a menovitom napätí 400V. Dosiahneme tým lepší ESR ako pri použití jedného väčšieho kondenzátora. Toto zapojenie bolo taktiež zvolené vzhľadom na cenu a lepšie rozmiestnenie filtračnej kapacity pri návrhu DPS[19].

2.6 Výpočet strát

2.6.1 Určenie strát na tranzistoroch

Celkové straty na tranzistore môžeme vyjadriť ako straty vodivostné a straty prepínacie. Vodivostné straty vznikajú z toho dôvodu, že žiadny plne otvorený spínací prvok nemá na svojich vývodoch nekonečne malý odpor, prípadne nekonečne malé napätie. Prepínacie straty súvisia s konečnou rýchlosťou prvkov zmeniť svoju vodivosť z otvoreného do zatvoreného stavu, prípadne naopak. Pre vodivostné straty na tranzistore typu MOSFET platí

$$P_{vod} = R_{ds(on)} \cdot I_{ef}^2 = 0,1 \cdot \left(\frac{31,3}{2}\right)^2 = 24,5W \quad (2.46)$$



Odpor v zopnutom stave $R_{ds(on)}$ uvažujeme pre teplotu prechodu približne 100°C , taktiež uvažujeme že prúd sa rovnomerne rozdelí medzi obidva paralelne radené tranzistory. Pre prepínacie straty môžeme písať[20]

$$\begin{aligned} P_{pr} &= (W_{on} + W_{off}) \cdot f = \frac{1}{4} \cdot U_d \cdot I_{Tmax} \cdot f \cdot (t_{on} + t_{off}) \\ &= \frac{1}{4} \cdot 290 \cdot \frac{47,7}{2} \cdot 100 \cdot 10^3 \cdot (60 + 115) \cdot 10^{-9} = 30,3W \end{aligned} \quad (2.47)$$

Vzhľadom na zvlnené napätie medziobvodu uvažujeme strednú hodnotu $U_d=290\text{V}$. Celkové straty na jednom tranzistore sú rovné

$$P_{Tcel} = P_{vod} + P_{pr} = 24,5 + 30,3 = 54,8W \quad (2.48)$$

2.6.2 Určenie strát na demagnetizačných diódach

Vodivostné straty určíme ako

$$P_{vod} = U_F \cdot I_{Dstr} = 1,5 \cdot 0,286 = 0,43W \quad (2.49)$$

Vďaka rozptylovej indukčnosti transformátora budú skutočné straty väčšie, tieto straty sú ale zanedbateľné voči stratám tranzistorov a sekundárnych diód, preto pri výpočte chladiča budú zanedbané.

2.6.3 Určenie strát na usmerňovacích diódach

Pre použité diódy uvádza výrobca s katalógovom liste rovnicu na vypočítanie vodivostných strát[17]. Opäť uvažujeme rovnomerné rozdelenie prúdu. Pre straty na dióde D_2 platí

$$\begin{aligned} P_{D2} &= 0,75 \cdot \frac{I_{D2str}}{2} + 0,008 \cdot \left(\frac{I_{D2ef}}{2}\right)^2 = 0,75 \cdot 31,5 + 0,008 \cdot 46,95^2 \\ &= 41,3W \end{aligned} \quad (2.50)$$

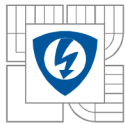
Na overenie výpočtu použijeme rovnicu 2.45 ktorá zanedbáva dynamický odpor diódy ale uvažuje vyššie napätie v priepustnom smere.

$$P_{D2} = 1,25 \cdot \frac{I_{D2str}}{2} = 1,25 \cdot 31,5 = 39,38W \quad (2.51)$$

Ako vidíme, obidve rovnice dávajú približne rovnaké výsledky, pre výpočet chladiča budeme preto uvažovať horšiu variantu podľa vzorca 2.44.

Pre straty na nulovej dióde platia rovnaké vzťahy, musíme len potrebné prúdy treba podeliť tromi[17].

$$\begin{aligned} P_{D02} &= 0,75 \cdot \frac{I_{D2str}}{3} + 0,008 \cdot \frac{I_{D2ef}^2}{9} = 0,75 \cdot \frac{126}{3} + 0,008 \cdot \frac{132,8^2}{9} \\ &= 47,18W \end{aligned} \quad (2.52)$$



2.6.4 Určenie strát na usmerňovacom mostíku

Pre výpočet týchto strát potrebujeme opäť vedieť napätie v priepustnom smere a strednú hodnotu prúdu diódou. V každom momente vedú prúd dve diódy, preto môžeme písať

$$P_{most} = 2 \cdot U_F \cdot I_d = 2 \cdot 16,1 \cdot 1,1 = 35,4W \quad (2.53)$$

2.7 Návrh chladienia

2.7.1 Návrh chladienia tranzistorov a sekundárnych diód

Hlavnou úlohou chladiča je odvod prebytočného tepla, ktoré vzniká vo forme strát na spínacích prvkoch. Cieľom je nájsť potrebný tepelný odpor chladiča, pri ktorom nebude prekročená daná hodnota oteplenia. Zvolený bol jeden chladič pre všetky výkonové prvky – z toho vyplýva nerovnosť teplôt polovodičových prechodov (z dôvodu rozdielnych strát a rôznych tepelných odporov prechod-puzdro). Na začiatku si stanovíme maximálnu pracovnú teplotu polovodičového prechodu, maximálnu teplotu okolia a maximálnu teplotu chladiča. Teplotu okolia volíme na $T=40^{\circ}C$, teplotu chladiča na $T_{Hmax}=80^{\circ}C$. Výsledné oteplenie určíme ako

$$\Delta T = T_{Hmax} - T = 80 - 40 = 40K \quad (2.54)$$

Celková strata na chladiči je rovná

$$P_{cel} = 4 \cdot P_{Tcel} + 2 \cdot P_{D2} + 3 \cdot P_{D02} = 4 \cdot 54,8 + 2 \cdot 41,3 + 3 \cdot 47,18 = 443,3W \quad (2.55)$$

Na potrebu galvanického oddelenia puzdier súčiastok od chladiča (potenciály ochranného vodiča) budú na elektrické oddelenie použité kaptonové izolačné podložky. Tento typ má veľmi veľkú izolačnú pevnosť a výbornú tepelnú vodivosť[21]. Na obidve strany podložky je nutné naniesť teplovodivú pastu z dôvodu mikroskopických medzier medzi podložkou a chladičom, prípadne puzdrom súčiastky.

Pri výpočte potrebného tepelného odporu chladiča vychádzame z nasledujúceho vzorca

$$R_{\vartheta H} = \frac{\Delta T}{P_{cel}} = \frac{40}{443,3} = 0,09K/W \quad (2.56)$$

kde $R_{\vartheta CH}$ je hľadaný odpor chladiča, ΔT je oteplenie a P_{cel} je celková výkonová strata. Kontrola na teploty prechodov

$$T_{TJ} = T_{Hmax} + P_{Tcel} \cdot (R_{\vartheta JC} + R_{\vartheta CH}) = 80 + 54,8 \cdot (0,3 + 0,15) = 104,7^{\circ}C \quad (2.57)$$

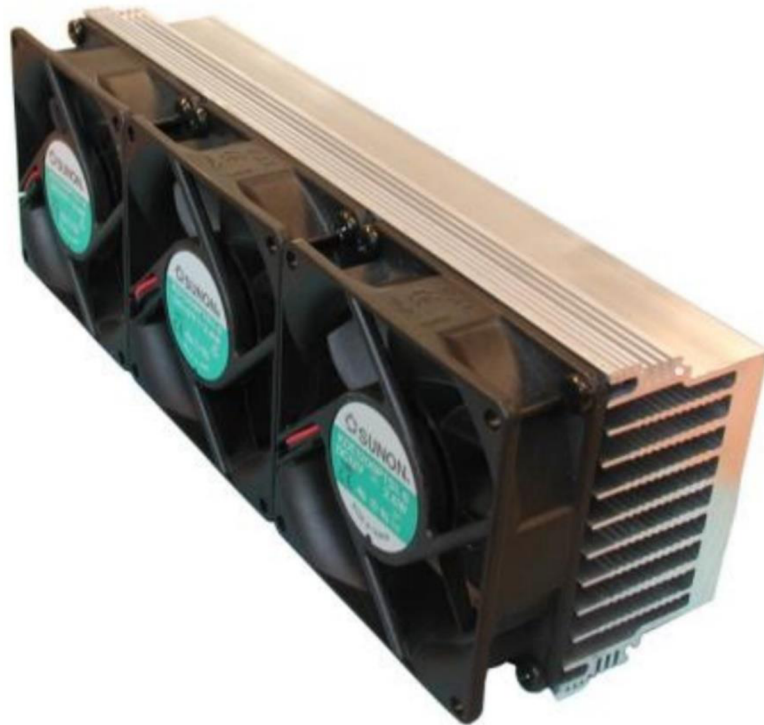
$$T_{D2J} = T_{Hmax} + P_{D2} \cdot (R_{\vartheta JC} + R_{\vartheta CH}) = 80 + 41,3 \cdot (0,55 + 0,15) = 108,9^{\circ}C \quad (2.58)$$

$$T_{D02J} = T_{Hmax} + P_{D02} \cdot (R_{\vartheta JC} + R_{\vartheta CH}) = 80 + 47,2 \cdot (0,55 + 0,15) = 113^{\circ}C \quad (2.59)$$

Všetky teploty prechodov sú v rámci odporúčania výrobcov. Ako použitý chladič bol zvolený CHL45V3-24 z ponuky firmy EZK. Tento chladič má ale tepelný odpor 0,22K/W pri použití dodaných ventilátorov[22] (bez použitia ventilátorov je tepelný odpor 0,9K/W)[23].

V tejto časti máme dve možnosti

- je možné použiť výkonnejšie ventilátory (dodané majú výkon len 1,3W pri napájacom napätí 24V), čím dokážeme tepelný odpor ešte znížiť,
- tepelná ochrana bude nastavená tak, aby vybavila pri určenej teplote chladiča, kedy polovodičové prechody dosiahnú maximálnu možnú povolenú teplotu. Tým bude zaručené, že nedôjde k prehriatiu ale zároveň nebude možné využívať plný zvärací prúd pri zaťažovaní DZ=100%.



Obr. 2.8 Použitý chladič CHL45V3-24[22]

2.7.2 Návrh chladienia usmerňovacieho mostíka

Vychádzame zo vzorca 2.51, izolačné podložku nie je nutné použiť, pretože telo mostíka je elektricky oddelené od všetkých jeho vývodov.

$$R_{\vartheta H} = \frac{\Delta T}{P_{ztr}} - R_{\vartheta JC} = \frac{70}{35,4} - 0,7 = 1,28K/W \quad (2.60)$$

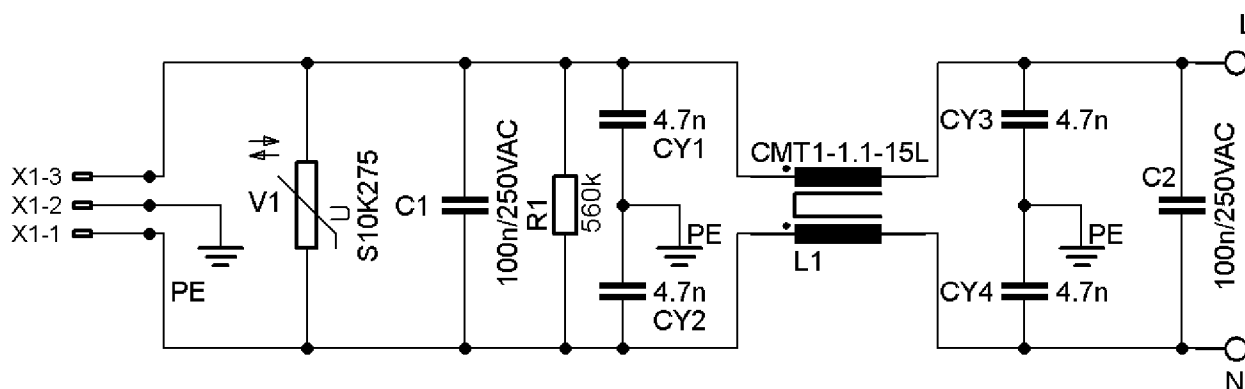
Bude použitý chladič V68-50SA z ponuky firmy GM Electronic, jeho tepelný odpor je 4,8K/W[24]. Pre dlhodobú prevádzku bude osadený ventilátorom.



Obr. 2.9 Chladič V68-50SA[24]

2.8 Siet'ový filter

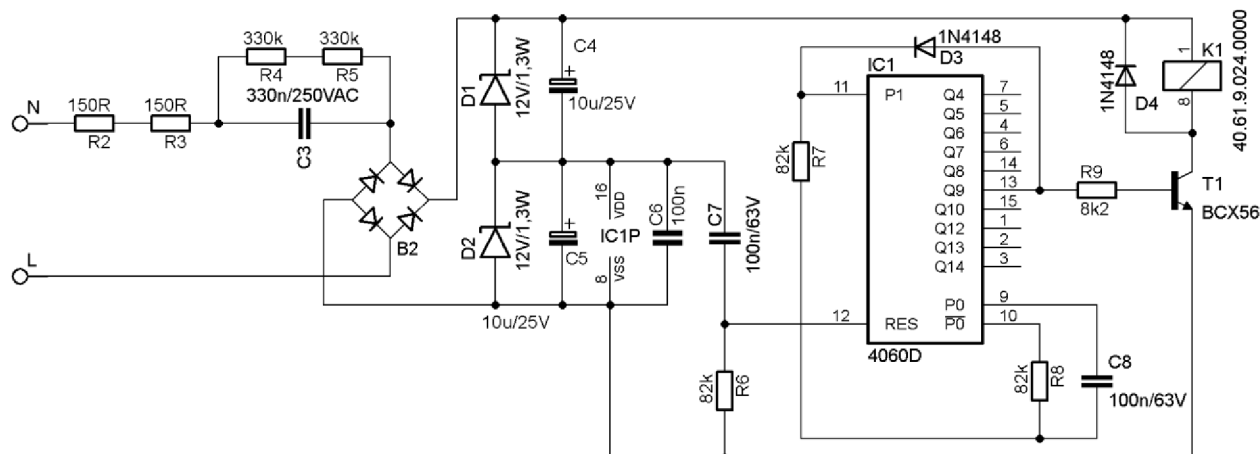
Základné usporiadanie odrušovacieho filtra v jednofázovom usporiadaní je na obr. 2.10. Z pohľadu napät'ového rušenia je dôležitá tzv. súfázová (súhlasná) zložka, meraná voči ochrannému vodiču PE. Vodiče L a N je možné považovať z hľadiska vf. rušivého napätia za vodiče s rovnakým potenciálom – vysokofrekvenčne sú navzájom skratované kondenzátormi C1,C2. Pre súhlasný rušivý signál je možné filter nahradiť Π -článkom v tvare CY1,2-L1-CY3,4. Π -článok sa pre oba smery rušivého signálu správa ako dolná priepusť 2. rádu s klesaním nad medzným kmitočtom so strmosťou 40dB/dek. Pre zachovanie funkcie filtra je dôležité použitie správnych prvkov – kondenzátory musia byť konštruované ako bezindukčné (s minimálnou vlastnou sériovou indukčnosťou) a cievky ako bezkapacitné. Pri návrhu cievky nie je potrebné počítať v návrhu so vzduchovou medzerou, pretože užitočným pracovným prúdom sa tlmivka nedá presýtiť – výsledný magnetický tok je nulový. Naopak, pre rušivú súhlasnú zložku sa uplatňuje veľká indukčnosť o veľkosti L1[19].



Obr. 2.10 Siet'ový filter

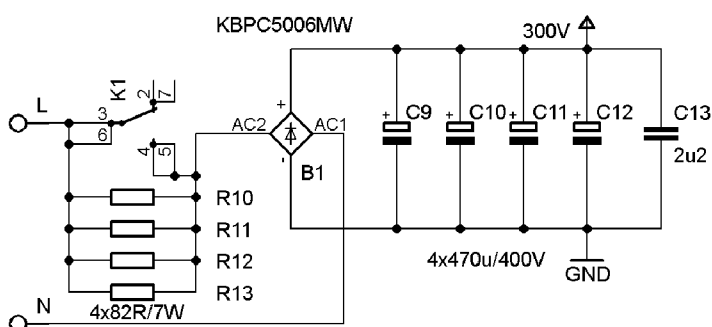
2.9 Softštart

Softštart je obvod postupného zopnutia obvodu. Používa sa tam, kde je potrebné obmedziť veľkosť nárazového prúdu pri pripojení zariadenia do siete – v našom prípade veľkého počtu filtračných kondenzátorov. Funguje na princípe predradení určitého odporu pred zapínané zariadenie. Veľkosť tohto odporu nie je kritická, ale je nutné, aby sa kondenzátory nabili do doby vybavenia softštartu na dostatočnú hodnotu. Je nutné použiť výkonové typy, pretože sú pri zopnutí špičkovo preťažované – v našom prípade je strata v prvej polperióde asi 5kW. Bola zvolená paralelná kombinácia štyroch odporov 82Ω/7W od výrobcu Vishay.



Obr. 2.11 Oneskorovací obvod

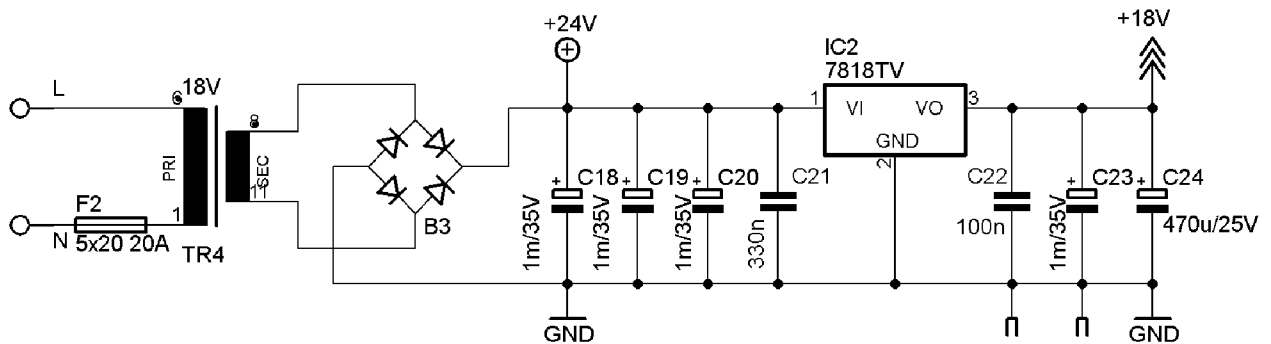
Ako oneskorovací člen bol zvolený obvod na obr. 2.11. Obvod je pripojený za sieťový filter, pomocou kondenzátora C3 je kapacitne zrazené sieťové napätie, diódy D1 a D2 tvoria zdroj 12 a 24V pre napájanie cievky relé a integrovaného obvodu 74HC4060. Tento obvod v sebe zahŕňa oscilátor spolu s čítačom. Frekvenciu určujú prvky R8 a C8. Po napačítaní určitého počtu pulzov (vstup 11) sa výstup 13 preklolí do hornej úrovne, tým zopne cievku relé, ktoré premostí odpory R10 až R13. Cez diódu D3 je počítanie pulzov zastavené. Súčiastky C7 a R6 slúžia na reset obvodu pri zapnutí[25].



Obr. 2.12 Kontakty relé za zaradenie výkonových rezistorov v obvode

2.10 Pomocný zdroj

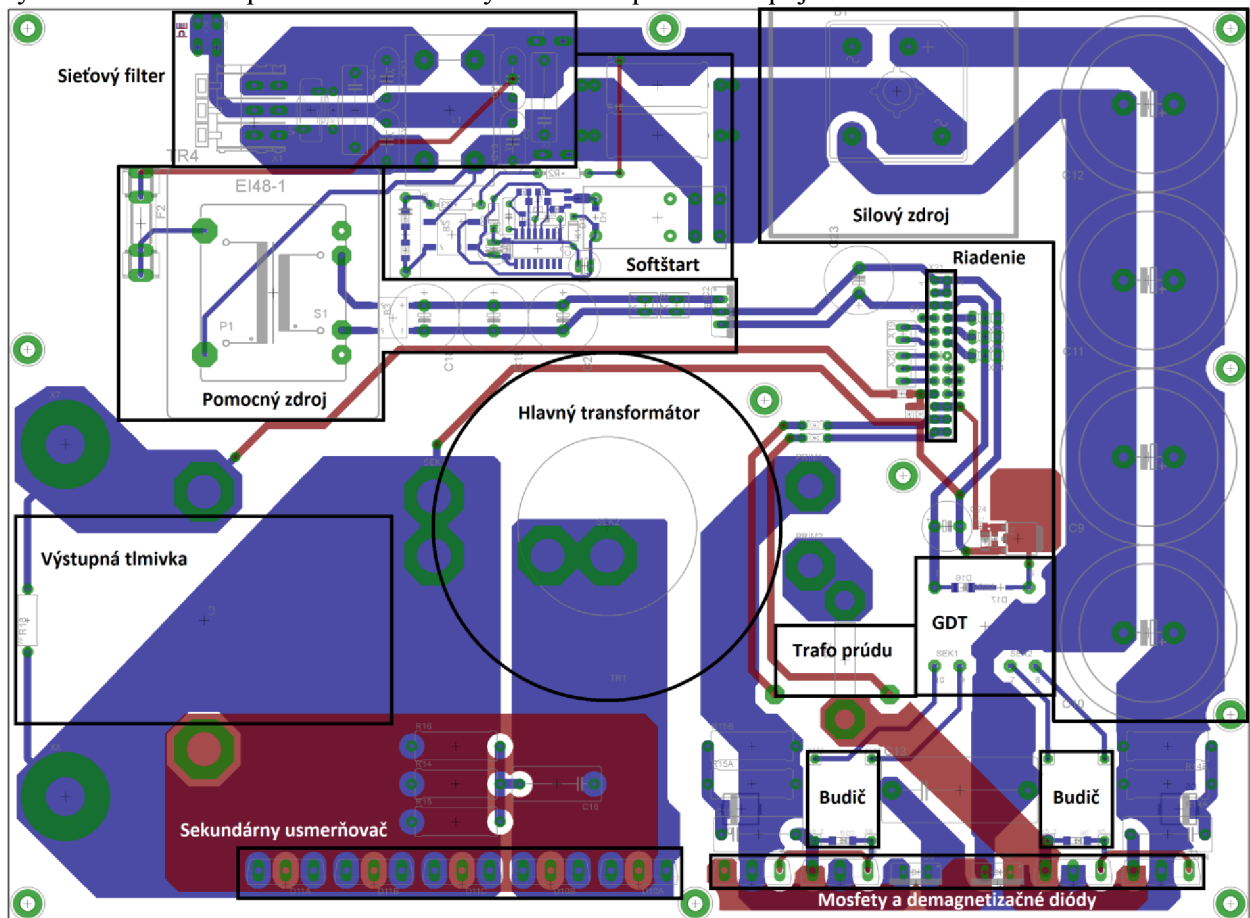
Schéma pomocného zdroja je na obr. 2.13. Bola zvolená jednoduchá koncepcia so sieťovým napájacím transformátorom 230/18V so zdanlivým výkonom 10VA, usmerňovacím mostíkom a filtráciou. Na stabilizáciu napätia bol zvolený známy obvod 7818 v puzdre TO220. Vzhľadom na očakávaný veľký pulzný prúdový odber bola vyhladzovacia kapacita predimenzovaná aj na výstupe stabilizátora.



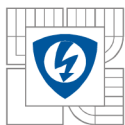
Obr. 2.13 Pomocný zdroj

2.11 Návrh DPS

Pri návrhu DPS bol využitý program EAGLE vo verzii 6.4. Bola navrhnutá hlavná DPS, ktorá združuje všetky vyššie menované prvky. Bola zvolená obojstranná DPS vzhľadom na jednoduchšie navrhovanie výkonových častí. DPS bola vyrobená v domácich podmienkach, bez nepájivej masky. Na posilnenie silových ciest je možné použiť pocínovanie a prípadne (hlavne na sekundárnej strane transformátora) napájkovanie medených mostíkov. Všetky silové cesty sú navrhnuté tak, aby ich oteplenie neprekročilo 30°C . Pri návrhu bol daný dôraz na čo najlepšie využitie SMD komponentov. Rozmery hlavného plošného spoja sú $250 \times 184 \text{ mm}$.



Obr. 2.14 Rozmiestnenie častí na DPS



3 RIADENIE

Riadenie spínaného meniča zabezpečuje potrebné riadiace impulzy pre výkonové tranzistory a prípadnú spätno-väzobnú reguláciu žiadaných veličín. Riadenie zväračky je rovnako dôležité ako jeho výkonová časť, pretože vo veľkej miere ovplyvňuje statické a dynamické zaťažovacie charakteristiky meniča, taktiež pod sebou združuje ochranné prvky (napr. tepelnú a nadprúdovú ochranu).

Oblúk sa správa ako nelineárna záťaž, podobne ako zenerova dióda – napätie na oblúku nie je veľmi závislé na prúde ale hlavne na jeho dĺžke. Tepelný účinok je ale daný súčinom napätia a prúdu. Zväračku tak môžeme konštruovať s reguláciami typu

- regulácia na konštantný prúd,
- regulácia na konštantné napätie,
- regulácia na konštantný výkon.

3.1 Regulácia na konštantný prúd

Pri tomto type je zapojená len základná prúdová regulačná slučka. Napätie tohto prúdového zdroja je určené maximálnym výstupným napätím meniča. Pri zväčšení dĺžky oblúku sa zväčší jeho napätie, pričom prúd zostáva konštantný. Zvärač tak dokáže zmenou dĺžky oblúku meniť celkový tepelný výkon dodaný do zvaru. Pri zváraní tenkých plechov je potrebný prúd cca 30-50A a medzera medzi elektródou a materiálom (tým aj napätie na oblúku) je menšie, preto je väčšia šanca, že pri priblížení k materiálu sa elektróda prilepí. Pri oddialení elektródy je síce napätie väčšie ale aj výkon a tým pádom môžeme materiál ľahko prepáliť.

3.2 Regulácia na konštantné napätie

Pri tomto type riadenia je prúdovej slučke nadradená slučka napäťová. Táto metóda je nevhodná pre ručné oblúkové zváranie. Pri oddialení elektródy oblúk ľahko zhasne, pretože sa nezvýši napätie – to je držané na konštantnej hodnote a pri priblížení enormne narastá prúd a tým aj výkon. Táto metóda riadenia je vhodná pre zväracie poloautomaty (napr. metóda MIG/MAG) kde je prúd regulovaný rýchlosťou posuvu drôtu.

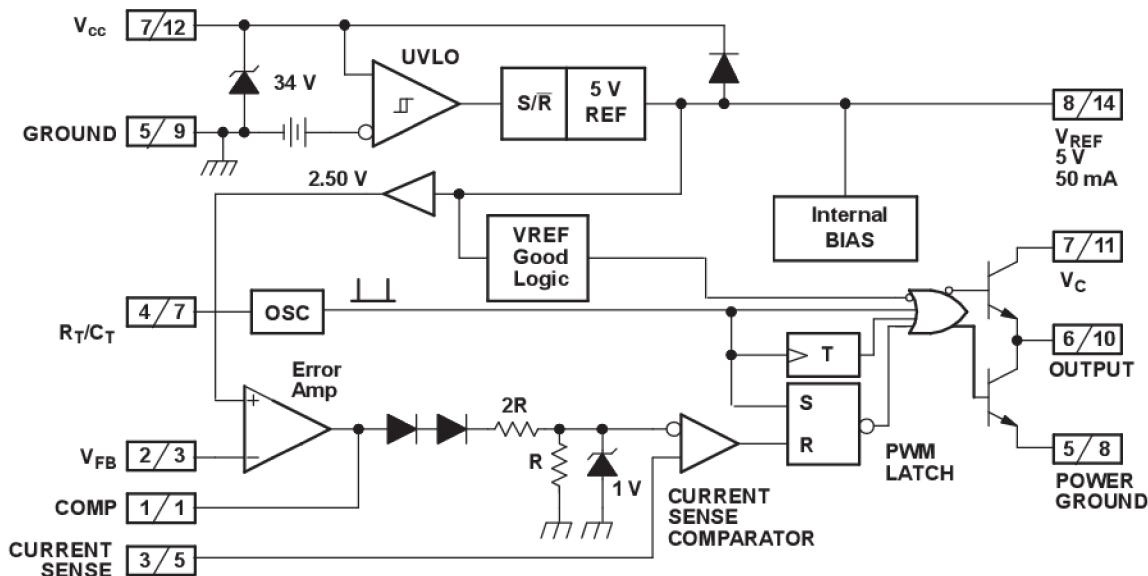
3.3 Regulácia na konštantný výkon

Predchádzajúcemu zapojeniu nadradíme slučku regulácie výkonu. Táto metóda je mimoriadne vhodná na ručné zváranie tenkých materiálov. Pri priblížení elektródy k materiálu klesne napätie na oblúku ale vzrastie prúd, pri oddialení zase vzrastie napätie ale regulácia zmenší prúd tak, aby súčin napätia a prúdu bol stále rovnaký a tým pádom aj tepelný (činný) výkon bude stále konštantný. Nehrozí tým prilepenie elektródy alebo prepálenie materiálu[26].

3.4 Riešenie regulácie

Vzhľadom na požadovanú jednoduchosť riadenia bola zvolená regulácia na konštantný prúd. Ako hlavný regulačný prvok pre pulzne-širokovú moduláciu bol zvolený integrovaný obvod UC3845 v puzdre DIL8. Blokovaná schéma je zobrazená na obr. 3.1. Tento IO funguje na princípe porovnávania referenčného napätia s napätím z bočniku alebo prúdového transformátora. Pri prekročení úrovne 1V na vstupe č.3 dôjde ku generácii dobežnej hrany pulzu (a tým aj ku generovaniu PWM) a zároveň je dosiahnutá prúdová regulácia. Referenčné napätie je možné ešte zmenšiť, napríklad zapojením potenciometru medzi pin 1 a zem – tento výstup sa správa ako prúdový zdroj. Frekvencia a maximálna strieda je určená voľbou súčiastok C30 a R35. Obmedzenie

striedy bolo zvolené vzhľadom na to, aby sa transformátor spoľahlivo demagnetoval. Vďaka existencii parazitnej kapacity medzi emitorom a kolektorom tranzistorov a malej veľkosti magnetizačného prúdu je demagnetizácia spomaľovaná (nabíjanie parazitných kapacít po vypnutí tranzistorov). Preto je nutné voliť striedu menšiu ako teoretická hodnota 50%. Plošný spoj riadenia je realizovaný ako oddelený od hlavnej dosky, pripája sa do konektoru X21.



Note 1: $\boxed{A/B}$ A = DIL-8 Pin Number. B = SO-14 and CFP-14 Pin Number.

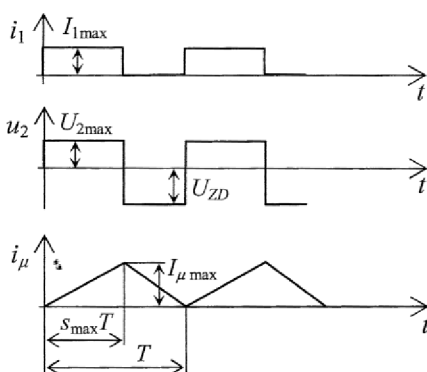
Obr. 3.1 Bloková schéma obvodu UC3845[27]

3.4.1 Snímanie prúdu

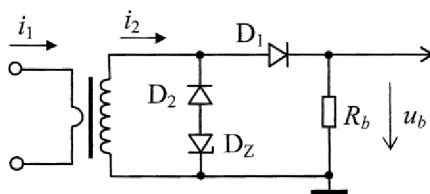
Aby bolo možné realizovať prúdovú reguláciu, je nutné mať informáciu o aktuálnom prúde silového obvodu. Bolo zvolené meranie prúdu na primárnej strane transformátora – toto riešenie je často používané vzhľadom na jeho jednoduchosť a dostačujúcu presnosť. Pri návrhu transformátora snímania prúdu je nutné si uvedomiť tieto fakty

- výstupný prúd je vždy zmenšený o prúd magnetizačný – chybu merania nie je možné odstrániť, iba potlačiť na zvolenú veľkosť,
- žiaduca je čo najväčšia sekundárna indukčnosť,
- čo najmenší odpor sekundárneho vinutia,
- čo najmenší odpor záťaže – práca v režimu čo najviac nakrátko[8, str. 506].

Pri zapojení na snímanie jednopolaritných impulzov je nutné zabezpečiť následnú demagnetizáciu transformátora.



Obr. 3.2 Priebehy na snímači prúdu



Obr. 3.3 Schematické zapojenie prúdového transformátora[8, str. 517]

Ako jadro pre prúdový transformátor bolo zvolené feritové toroidné jadro FT 82-61 z ponuky firmy GES Electronics. Na jadro bolo navinutých 80 závitov, primárne vinutie tvorí jeden závit prestrčený toroidným jadrom.

Tab. 3.1 Parametre jadra FT 82-61[28]

FT 82-61		
Permeabilita	μ_{Fe}	125
Indukcia	B_s	235mT
Stredná dĺžka siločiar	l_{Fe}	52,6mm
Efektívny prierez	S_{Fe}	24,6mm ²
Konštanta jadra	A_l	73,3mH/1000z
Objem	V_{Fe}	1290mm ³
Plocha okna	S_o	24,6mm ²

Maximálny skratový prúd na sekundárnej strane uvažujeme 180A. Pri tomto prúde je potrebné napätie 2,5V na pine 3, ktorý bude využitý ako nadprúdová ochrana – za bočníkom bude zapojený špičkový detektor (tvorený prvkami D19, C29, R31). Potrebné napätie na bočníku R_b je tým rovné

$$U_b = U_{nadprud} + U_{diody} = 2,5 + 0,7 = 3,2V \quad (3.1)$$

Prúd prechádzajúci bočníkom je

$$I_2 = \frac{I_1}{80} = I_{zmax} \cdot \frac{N_2}{N_1} \cdot \frac{1}{80} = 180 \cdot \frac{4}{12} \cdot \frac{1}{80} = 0,75A \quad (3.2)$$

Odpor bočníku je rovný

$$R_b = \frac{U_b}{I_2} = \frac{3,2}{0,75} = 4,27\Omega \quad (3.3)$$

Volíme $R_b=4,7\Omega$, za bočník bude ešte zaradený delič napätia ako pre ochranu proti nadprúdu, tak pre prúdovú reguláciu. Výkonová strata na bočníku je

$$P_b = R_b \cdot I_{2eff}^2 = 4,7 \cdot I_2^2 \cdot s = 4,7 \cdot 0,75^2 \cdot 0,45 = 1,19W \quad (3.4)$$

Volíme 2W metaloxidový rezistor – je podstatné, aby mal čo najmenšiu parazitnú indukčnosť.

Indukčnosť sekundárneho vinutia transformátora je

$$L = N^2 \cdot \mu_0 \cdot \mu_r \cdot \frac{S_{Fe}}{l_{Fe}} = 80^2 \cdot 4 \cdot \pi \cdot 10^{-7} \cdot \frac{24,6 \cdot 10^{-6}}{52,6 \cdot 10^{-3}} = 470,2 \mu H \quad (3.5)$$

Maximálny magnetizačný prúd bude rovný

$$I_{\mu max} = \frac{U_{max} \cdot S_{max}}{L \cdot f} = \frac{(3,2 + 0,7) \cdot 0,45}{470,2 \cdot 10^{-6} \cdot 100 \cdot 10^3} = 37,3 mA \quad (3.6)$$

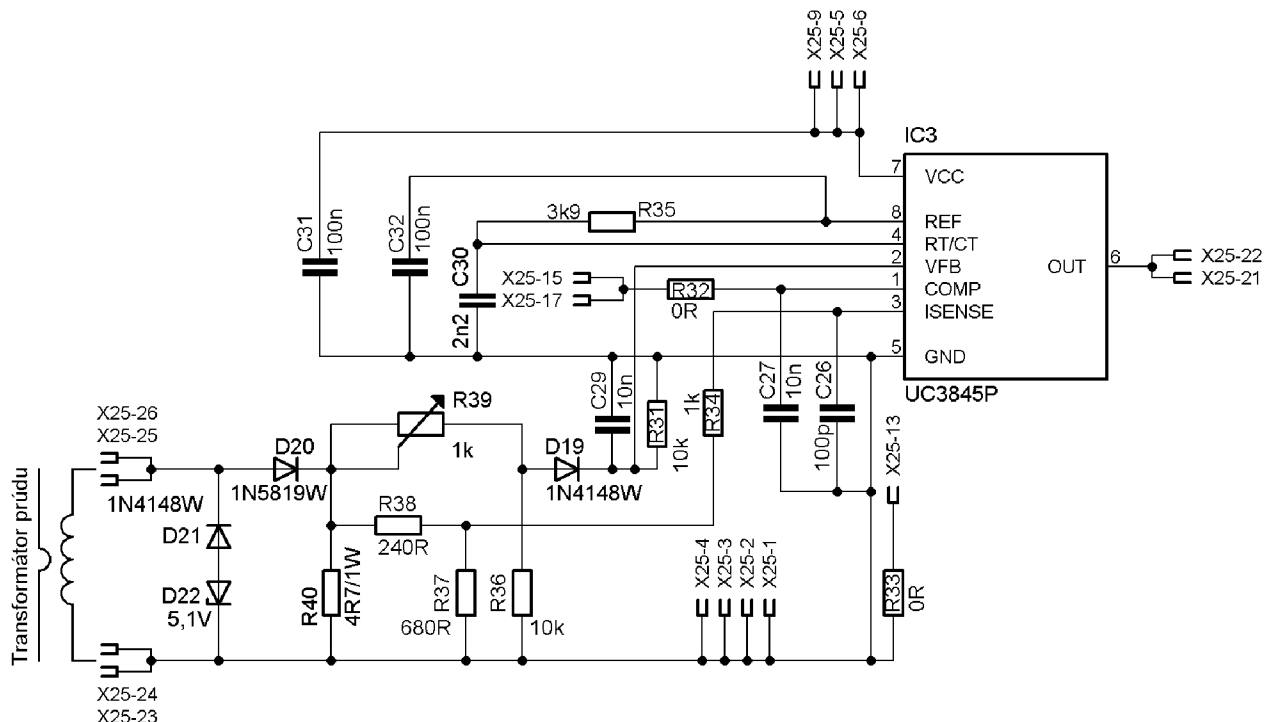
Túto hodnotu prúdu považujeme za dostatočne malú vzhľadom na meranú hodnotu prúdu pretransformovanú na sekundárnu stranu prúd. transformátora. Pre spoľahlivú demagnetizáciu je treba zvoliť správne minimálne napätie zenerovej diódy. Vychádzame zo vzťahu

$$U_{Dz} + U_{D2} \geq \frac{U_{max} \cdot S_{max}}{1 - s_{max}} = \frac{(U_b + 0,7) \cdot 0,45}{1 - 0,45} = \frac{3,9 \cdot 0,45}{0,55} = 3,2 V \quad (3.7)$$

Zenerovu diódu volíme na hodnotu 5,1V. Stratový výkon na zenerovej dióde bude rovný

$$P_Z = \frac{1}{2} \cdot L \cdot I_{\mu max}^2 \cdot f = \frac{1}{2} \cdot 470,2 \cdot 10^{-6} \cdot 37,2^2 \cdot 10^{-6} \cdot 100 \cdot 10^3 = 32,5 mW \quad (3.8)$$

3.4.2 Zapojenie riadenia



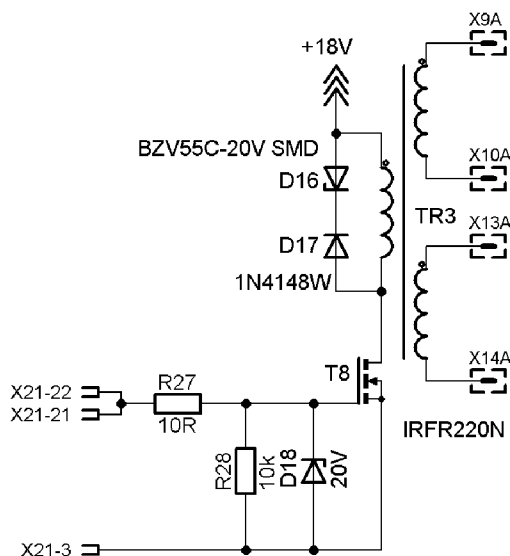
Obr. 3.4 Schéma zapojenia riadenia

Transformátor prúdu je pripojený na svorky 25,26 a 24,23 (pre väčšie prúdové zaťaženie). Diódy D21 a D22 tvoria demagnetizáciu, odpor R40 je výkonový bočník. Rezistory R37 a R38 tvoria delič na zmenšenie úrovne signálu pre prúdovú spätnú väzbu. Súčiastky R34 a C26 tvoria dolnú priepusť pre zamedzenie špičiek, ktoré by mohli predčasne spustiť komparátor. Špičkový detektor je tvorený D19, C29 a R31 a je využívaný ako nadprúdová ochrana – ak napätie na pine

č.2 prekročí 2,5V, generovanie PWM sa zablokuje. Potenciometer je pripojený na svorku 15,17 a 13. Rezistormi R32 a R33 bude možné nastaviť minimálnu a maximálnu nastaviteľnú hodnotu prúdu. Kondenzátory C31 a C32 sú doporučené výrobcom na zamedzenie VF kmitania. Trimer R39 slúži na presné jemné nastavenie nadprúdovej ochrany. Piny č. X25-21 a 22 sú pripojené k hradlu tranzistoru, ktorý spína budiaci transformátor[27].

3.4.3 Budenie tranzistorov

Vzhľadom k zvoleniu tranzistorov typu MOSFET, ktoré sa vyznačujú tým, že majú veľkú vstupnú kapacitu hradla, ktorú je treba nabiť na to, aby mosfet prešiel z nevodivého stavu do vodivého, sú potrebné rýchle budiace obvody. Pri vypínaní je nutné náboj uložený v hradle odčerpať. Tranzistory nemajú emitory na rovnakom potenciály – je nutné budiace signály oddeliť. Bolo zvolené riešenie s tzv. GDT – oddeľovacím budiacim transformátorom. Tento transformátor zároveň prenáša napájanie hradla aj informáciu o potrebné zopnutia alebo vypnutia. Ako GDT bol zvolený transformátor firmy Coilcraft SD250-3L. Výrobca garantuje použitie do 200kHz, rýchlosť prebehu 375V/μs, indukčnosť vinutia 1,5mH a rozptylovú indukčnosť maximálne 4μH[29]. Nastáva rovnaká situácia ako pri prúdovom transformátore – transformátor je nutné demagnetizovať. Vychádzame zo vzorca 3.7 (napájacie napätie je rovné 18V)[26].



Obr. 3.5 Zapojenie budiaceho transformátora

$$U_{D17} + U_{D16} \geq \frac{U_{max} \cdot s_{max}}{1 - s_{max}} = \frac{18 \cdot 0,45}{1 - 0,45} = \frac{18 \cdot 0,45}{0,55} = 14,7V \quad (3.9)$$

Pre spoľahlivú demagnetizáciu volíme 20V zenerovu diódu. Maximálny magnetizačný prúd bude rovný

$$I_{\mu max} = \frac{U_{max} \cdot s_{max}}{L \cdot f} = \frac{18 \cdot 0,45}{1,5 \cdot 10^{-3} \cdot 100 \cdot 10^3} = 54mA \quad (3.10)$$

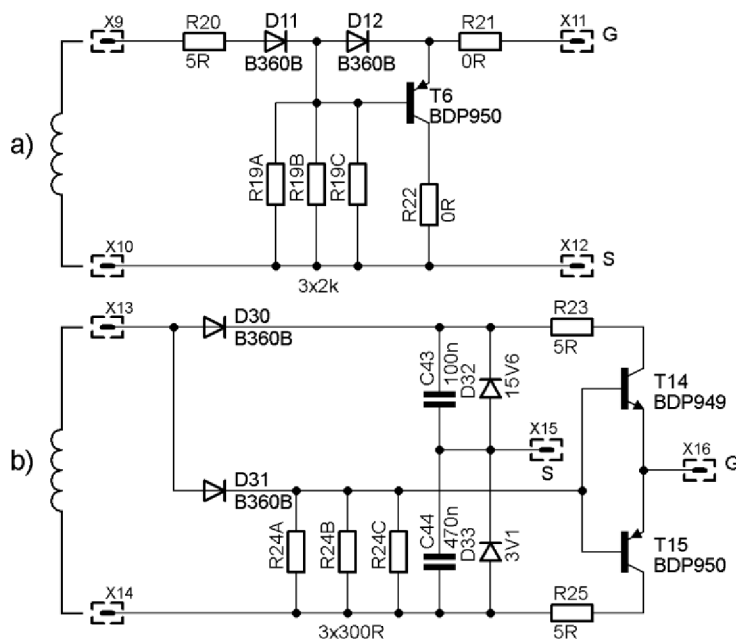
Stratový výkon na zenerovej dióde bude rovný

$$P_Z = \frac{1}{2} \cdot L \cdot I_{\mu max}^2 \cdot f = \frac{1}{2} \cdot 1,5 \cdot 10^{-3} \cdot 54^2 \cdot 10^{-6} \cdot 100 \cdot 10^3 = 218,7mW \quad (3.11)$$

Volíme diódu na menovitý príkon 500mW v puzdre SOD80.

3.4.3.1 Budiče výkonových tranzistorov

Úlohou budičov je dodať dostatočne rýchlo nabíjajúci prúd do hradla mosfetu a taktiež ho dostatočne rýchlo vybiť. Boli navrhnuté dva obvody budičov.



Obr. 3.6 Zapojenie budičov[26,30]

Budič podľa obr. 3.6a pracuje nasledujúcim princípom – na sekundárnej cievke budiaceho transformátora (svorky X9, X10) je pri požiadavke na zapnutie tranzistora 18V, budiaci prúd je obmedzený na špičkovú hodnotu cca 3,6A rezistorom R20. Diódy D11 a D12 sú rýchle schottky diódy s malým úbytkom napätia. Pri vypnutí mosfetu sú diódy D11 a D12 polarizované v závernom smere, tranzistor T6 sa otvorí a tým skratuje hradlo tranzistoru a vybiť jeho kapacitu (svorky X11, X12). Na rezistoroch R19A-C je strata približne

$$P_{R19} = \frac{U^2}{R_{19}} \cdot s_{max} = \frac{18^2}{2000} \cdot 3 \cdot 0,45 = 218,7mW \quad (3.12)$$

Bolo zvolené zapojenie troch rezistorov paralelne – SMD puzdro R1206.

Strata na tranzistore T6 je približne rovná

$$P_{T6} = 2 \cdot Q_g \cdot 1,8 \cdot U_{GS} \cdot f = 2 \cdot 322 \cdot 10^{-9} \cdot 1,8 \cdot 18 \cdot 100 \cdot 10^3 = 2,08W \quad (3.13)$$

Hodnota Q_g je v katalógu udaná pre $U_{GS}=10V$, preto je vo výpočte ponásobená 1,8x. Tranzistor T6 má udávanú maximálnu stratu 5W[31]. Vzhľadom generáciu veľkého množstva tepla v okolí budičov je nutné túto oblasť aktívne chladiť. S rezistormi R21 a R22 bolo na DPS počítané z dôvodu lepšej variability DPS na návrh budiča. Svorky pre pripojenie hradla budeného tranzistoru sú X11 a X12.

Zapojenie budiča na obr. 3.6b bolo prevzaté z[30]. Hlavný rozdiel je vo vypínaní tranzistoru záporným napätím. Súčiastky D30, C43 a C44 tvoria špičkový usmerňovač ktorý slúži na napájanie dvojčinného emitorového sledovača (jeho napätie nesmie byť závislé na striede) a delí napätie na dve definované časti (približne 3,1V a 14,9V v prípade 18V na sekundárnom vinutí). Súčet napätia zenerových diód musí byť mierne vyšší ako je napätie na sekundárnom vinutí aby transformátor

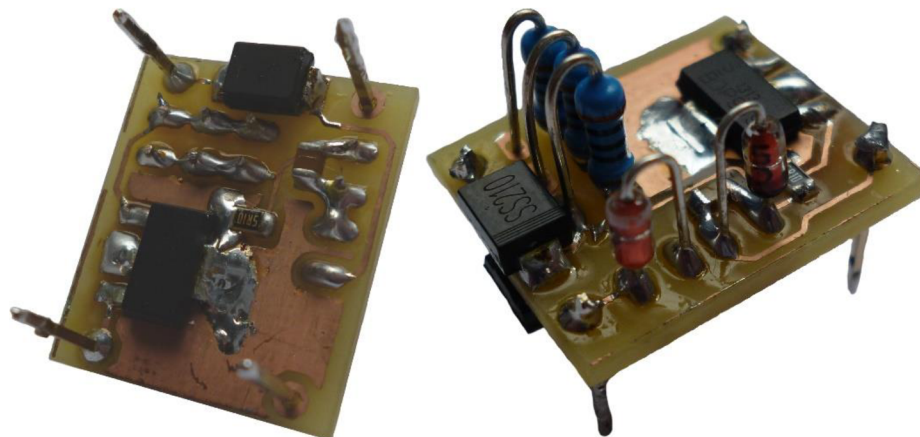
nepracoval do skratu. Pri zapínaní mosfetu je zopnutý tranzistor T14 a mosfet je zopnutý napätím približne 15V. Pri vypnutí je zopnutý tranzistor T15, sledovač je napájaný len z nabitých kondenzátorov, vypínacie napätie je asi -2V[30].

Obidva typy budičov boli vyskúšané pri buzení jedného aj dvoch mosfetov zapojených paralelne. Namerané časy priebehu napätia U_{GS} sú v tabuľke 3.2. Ako čas nábehu bol zvolený nábeh od 0-10V, pre čas dobehu bol zvolený čas, za ktorý klesne napätie na hradle od maxima pod 3V (v našom prípade od 18V po 3V). Budiče boli odskúšané pri buzení jedného aj dvoch kusov tranzistorov. Budiče boli merané s transformátorom popísaným v kapitole 3.4.3.2.

Tab. 3.2 Meranie budičov

	Budič A		Budič B	
	1 tranzistor	2 tranzistory	1 tranzistor	2 tranzistory
Čas nábehu	184ns	296ns	150ns	150ns
Čas dobehu	164ns	244ns	140ns	264ns

Ako vidno, budič typu B je jednoznačne rýchlejší pri zapínaní a len o pár ns pomalší pri vypínaní tranzistora. Vzhľadom ale na jeho väčšiu energetickú náročnosť bol zvolený typ A.



Obr. 3.7 Budič typu B a jeho spodná a vrchná strana

3.4.3.2 Návrh budiaceho transformátora

Pri oživovaní zariadenia bolo zistené, že pre naše aplikácie má vybraný budiaci transformátor príliš veľkú rozptylovú indukčnosť, ktorá spôsobovala prekmity a spomaľovala buzenie mosfetov. Bol navrhnutý nový budiaci transformátor. Boli zvolené 3 kusy toroidných jadier FT 50-77 z ponuky firmy GES Electronics. Vinutia boli namotané trifilárne vodičom s teflónovou izoláciou o priereze 0,2mm². Celkovo bolo namotaných 13 závitov (transformačný pomer je rovný 1). Kontrola na maximálne sýtenie jadra

$$B_{max} = \frac{U_{max} \cdot S_{max}}{N \cdot S_{Fe} \cdot f} = \frac{18 \cdot 0,45}{12 \cdot 3 \cdot 13,3 \cdot 10^{-6} \cdot 100 \cdot 10^3} = 170mT \quad (3.14)$$

Táto hodnota je v poriadku. Kontrola vhodného príkonu zenerovej diódy

$$L = N^2 \cdot \mu_0 \cdot \mu_r \cdot \frac{S_{Fe}}{l_{Fe}} = 13^2 \cdot 4 \cdot \pi \cdot 10^{-7} \cdot 2000 \cdot \frac{3 \cdot 13,3 \cdot 10^{-6}}{30,2 \cdot 10^{-3}} = 561,2 \mu H \quad (3.15)$$

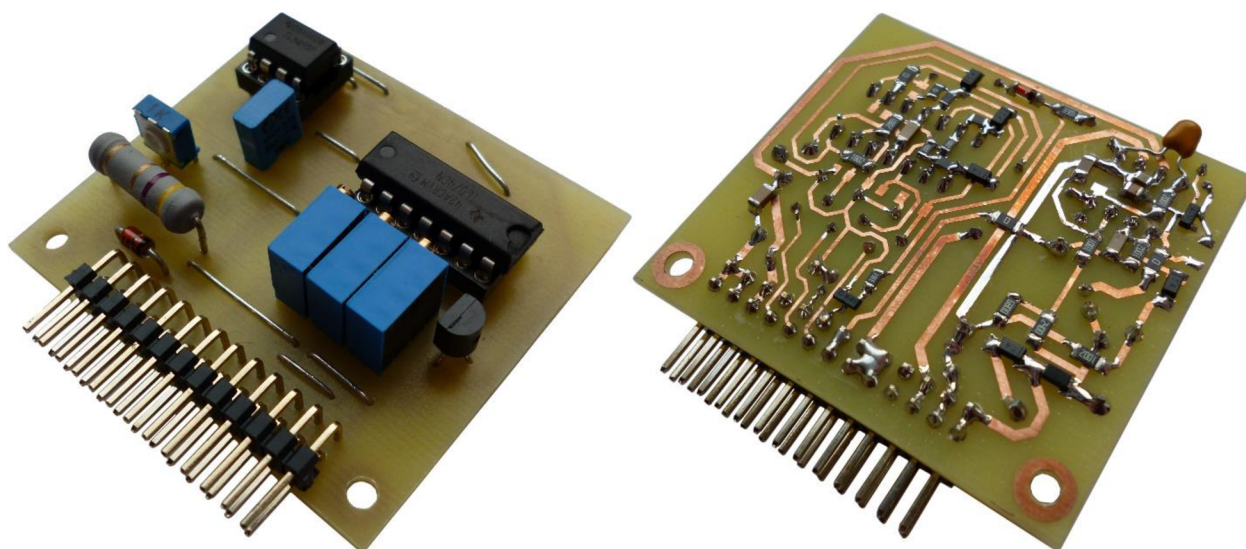
$$I_{\mu max} = \frac{U_{max} \cdot S_{max}}{L \cdot f} = \frac{18 \cdot 0,45}{561,2 \cdot 10^{-6} \cdot 100 \cdot 10^3} = 144,3 mA \quad (3.16)$$

$$P_Z = \frac{1}{2} \cdot L \cdot I_{\mu max}^2 \cdot f = \frac{1}{2} \cdot 561,2 \cdot 10^{-6} \cdot 144,3^2 \cdot 10^{-6} \cdot 100 \cdot 10^3 = 584,3 mW \quad (3.17)$$

Maximálny dovolený príkon predchádzajúcej zvolenej diódy je prekročený, volíme zenerovu diódu so stratou $P_Z=1,3W$.

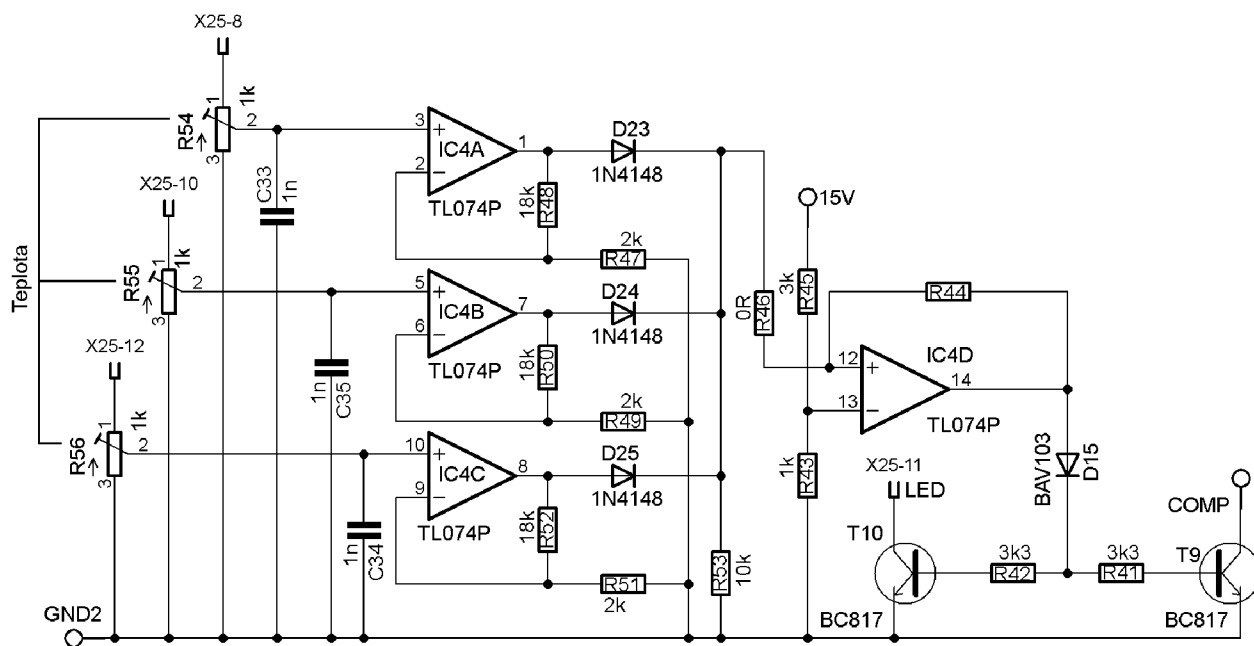
Tab. 3.3 Parametre jadra FT 50-77[32]

FT 50-77		
Permeabilita	μ_{Fe}	2000
Indukcia	B_s	460mT
Stredná dĺžka siločiar	l_{Fe}	30,2mm
Efektívny prierez	S_{Fe}	13,3mm ²
Konštanta jadra	A_l	1100mH/1000z
Objem	V_{Fe}	402mm ³
Plocha okna	S_o	39,6mm ²



Obr. 3.8 Osadená DPS riadenia, vrchná a spodná strana

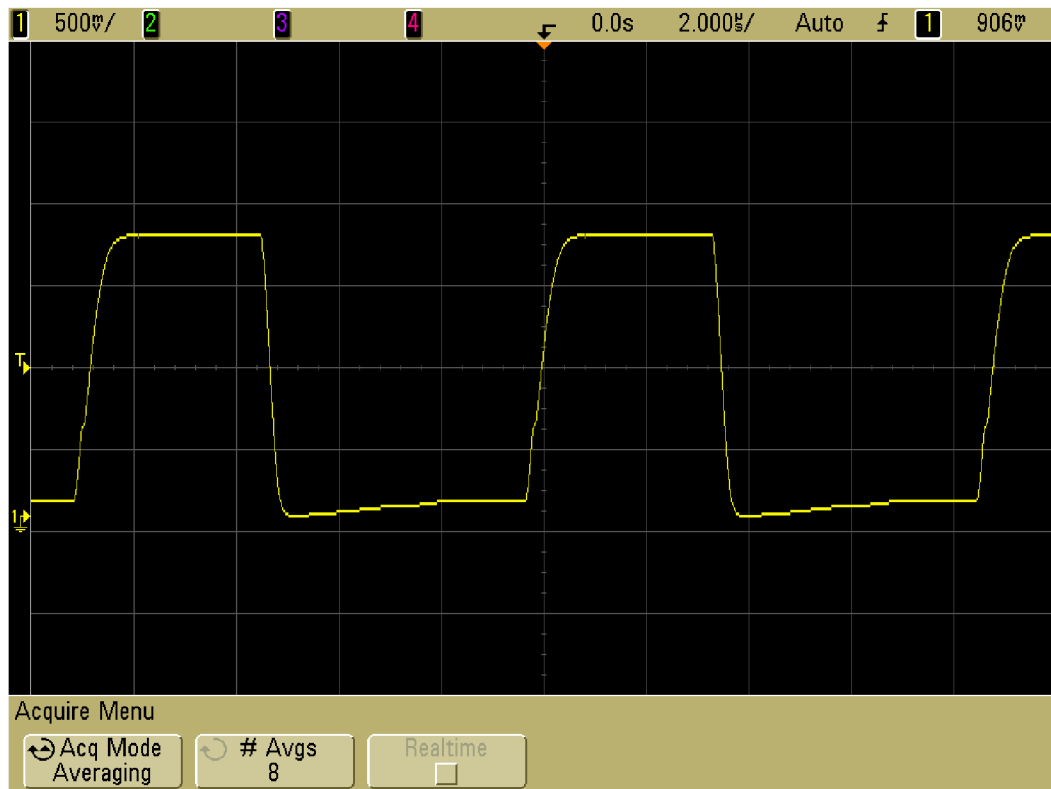
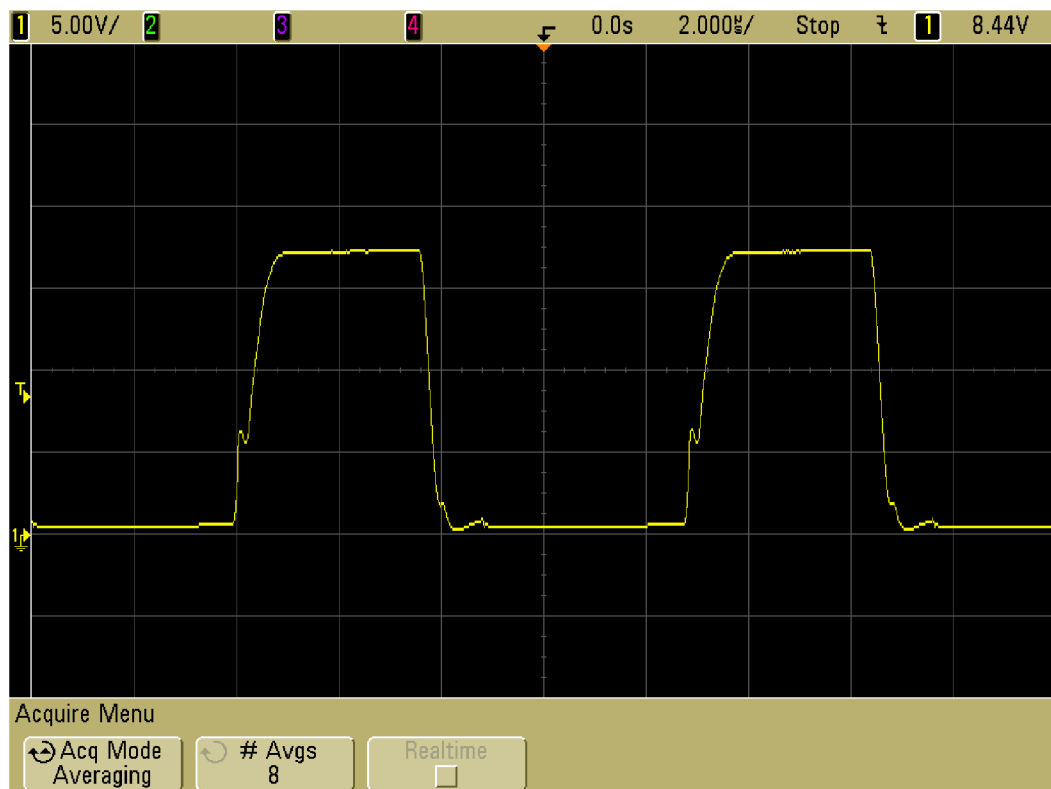
3.5 Tepelná ochrana

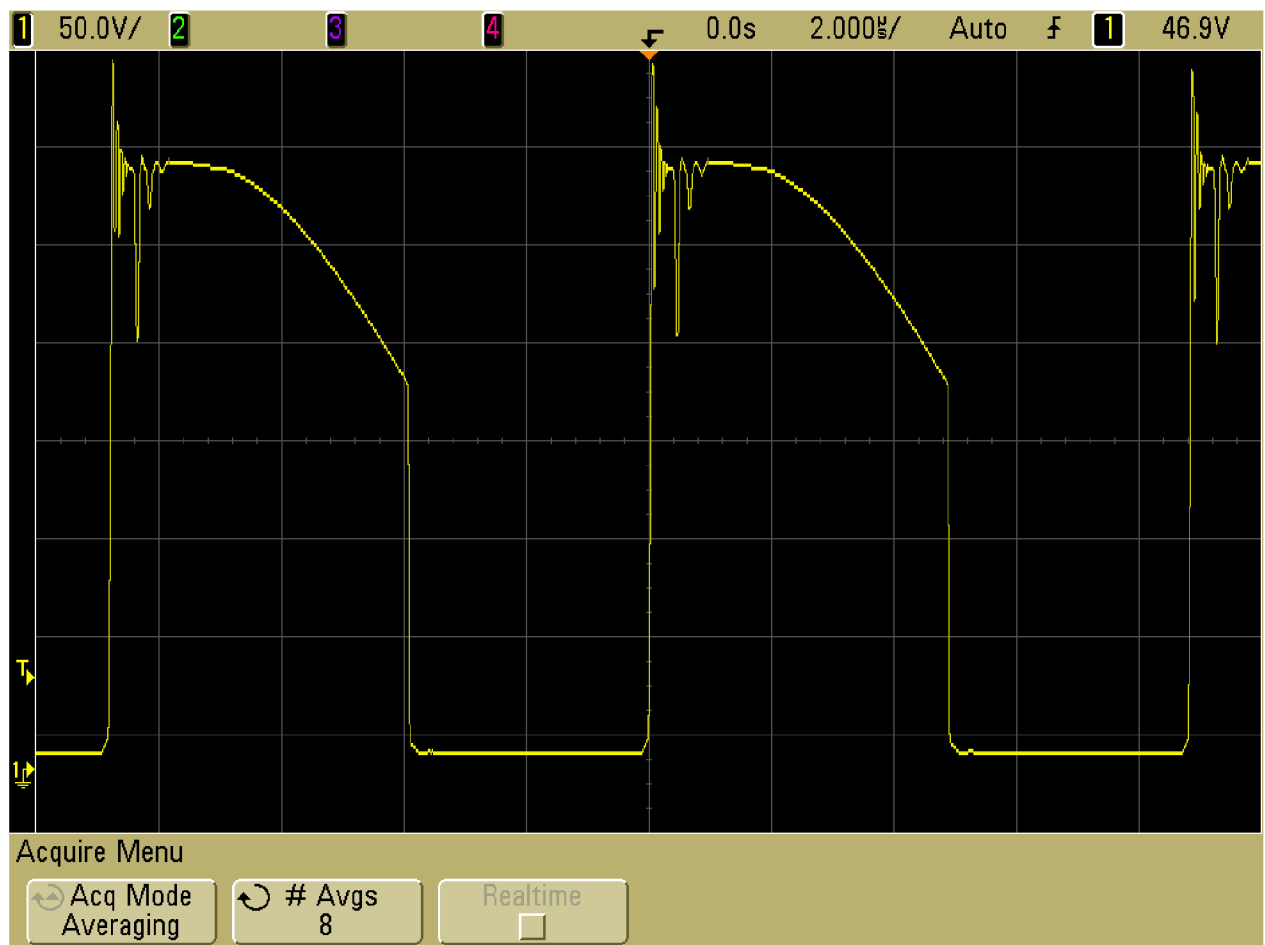


Obr. 3.9 Zapojenie tepelnej ochrany

Na obr. 3.9 je vyobrazená schéma zapojenie tepelnej ochrany. Ako snímacie prvky budú použité integrované obvody LM35 v puzdre TO92 pripojené na svorky X25-8,10,12. Tento obvod poskytuje prevod teploty na napätie lineárnou stupnicou $10\text{mV}/^\circ\text{C}$ [34]. Troma vstupmi ochrany je možné snímať teplotu napr. chladiča, transformátora a výstupnej tlmivky. Trimre R54-R56 slúžia na nastavenie rôznej úrovne teploty pre vybavenie ochrany. Operačné zosilovače IC4A-C sú zapojené ako zosilovače so zosilnením $10\times$. Diódy D23-25 spolu s rezistorom R53 slúžia na selekciu najväčšej teploty. Operačný zosilňovač IC4D je zapojený ako komparátor s referenčnou úrovňou nastavenou deličom R43 a R45 na 5V. Osadením R44 a R46 je možné realizovať hysteréziu. Dióda D15 je použitá z dôvodu dosiahnutia minimálneho napätia na bázach tranzistorov. Tranzistor T10 slúži na zopnutie LED diódy ktorá signalizuje prehriatie, tranzistor T9 prizemní pin č.3 riadiaceho obvodu UC3845, tým je zablokovaná generácia PWM signálu. Operačný zosilňovač je napájaný z 15V satbilizátora 78L15, ktorý je umiestnený na DPS riadenia.

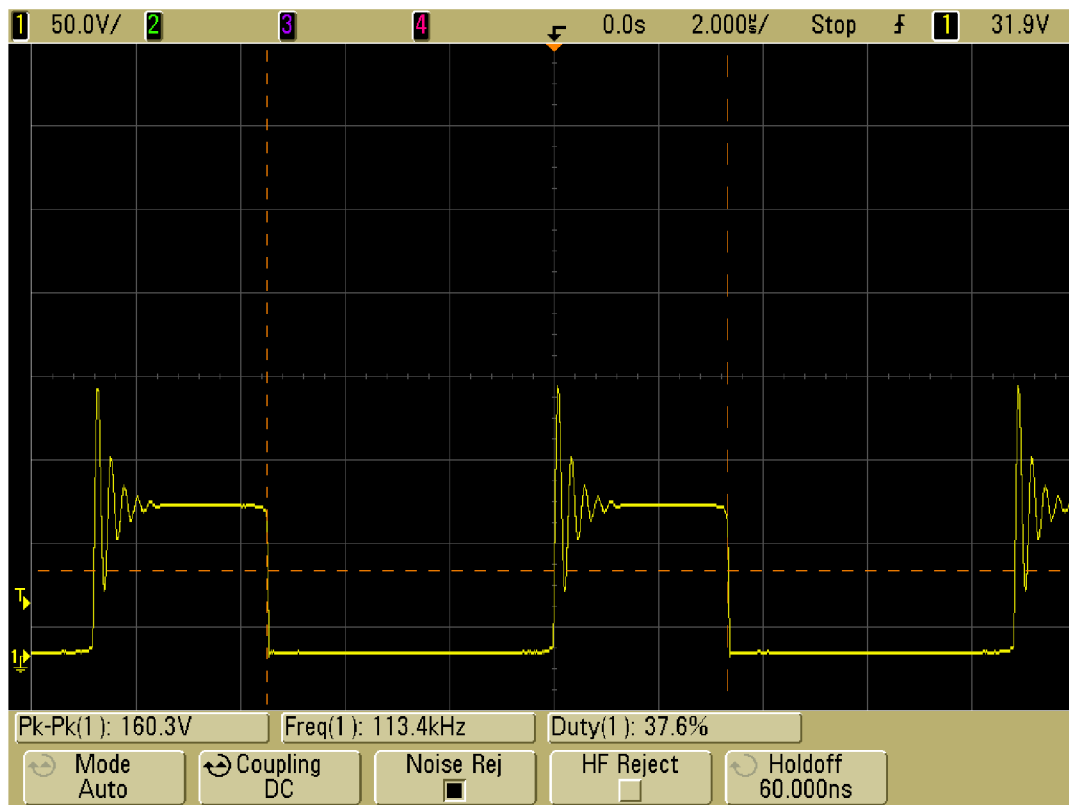
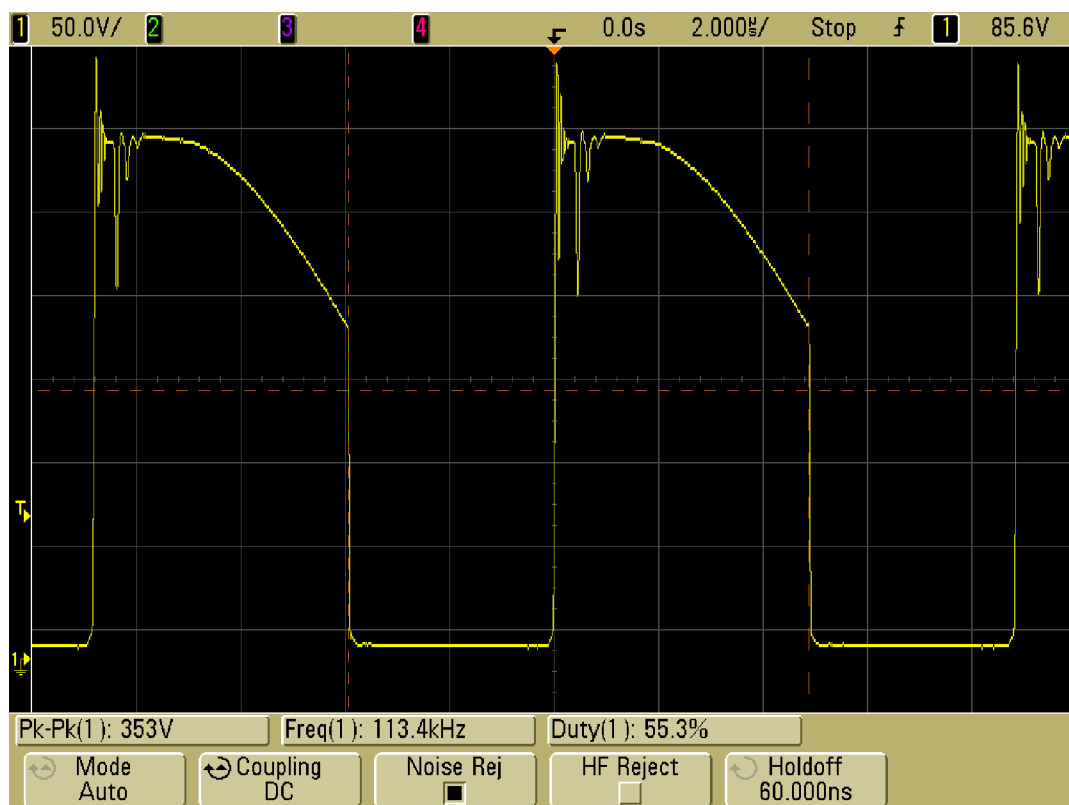
4 MERANIE

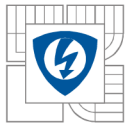
Obr. 4.1 Napätie U_{GS} pri $U_d=0V$ Obr. 4.2 Napätie U_{GS} pri $U_d=300V$



Obr. 4.3 Napätie U_{DS} pri $U_d=325V$, $I_z=91,5A$ a napätí na výstupe $U_z=37V$

Spoľahlivú demagnetizáciu ukazuje obr. 4.3. Na ňom je priebeh napätia drain-source dolného tranzistora (T4,T5). Po vypnutí najprv napätie dosahuje maximálnej hodnoty U_d (prebieha demagnetizácia transformátora), potom sa objaví pokles napätia (oblúkový tvar) – ten zodpovedá dobe, kedy už demagnetizácia skončila, tj. demagnetizačné diódy sa zavreli a medzi drain a source vypnutého tranzistora teda už nie je vnucované napätie medziobvodu U_d . Vďaka parazitným kapacitám vypnutého tranzistora a zatvorenej demagnetizačnej diódy vzniká iba nelineárny kapacitný delič. Prítomnosť „oblúku“ na konci doby vypnutia je dôkazom spoľahlivej rezervy pre demagnetizáciu[33].

Obr. 4.4 Napätie na sekundárnej nulovej dióde pri $U_d=300\text{V}$, $I_z=157,5\text{A}$ a $U_z=33\text{V}$ Obr. 4.5 Napätie U_{DS} pri $U_d=300\text{V}$, $I_z=157,5\text{A}$ a $U_z=33\text{V}$



Na obr. 4.4 a 4.5 je zachytená strieda meniča. Napätie na tranzistoroch má striedu 0,553, z toho vyplýva že napätie na transformátore má striedu

$$s_{max} = 1 - s_T = 1 - 0,553 = 0,447 \quad (4.1)$$

Napätie na nulovej dióde má ale striedu $s_\sigma=0,376$. Tento úbytok je spôsobený rozptylovou indukčnosťou transformátora. Rozptylovú indukčnosť vypočítame podľa vzťahu[8, str. 428]

$$L_\sigma = \frac{(s_{max} - s_\sigma) \cdot U_d \cdot N_2}{f \cdot N_1 \cdot I_z} = \frac{(0,447 - 0,376) \cdot 330 \cdot 4}{113,4 \cdot 10^3 \cdot 12 \cdot 157,5} = 437nH \quad (4.2)$$

Podľa vzorca 2.2 by malo napätie na výstupe meniča byť rovné

$$U_z = U_d \cdot s \cdot \frac{N_2}{N_1} = 330 \cdot 0,447 \cdot \frac{4}{12} = 49,2V \quad (4.3)$$

V našom prípade bolo napätia na výstupe meniča namerané na $U_z=33V$. Tento rozdiel môže byť spôsobený rozptylovou indukčnosťou transformátora a úbytkami na diódach a činných odporoch (napr. odpor výstupnej tlmivky), prípadne nepresnosťou merania.

Ekvivalentný vnútorný odpor je rovný[8, str. 428]

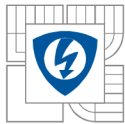
$$R_i = \frac{U_d \cdot s \cdot \frac{N_2}{N_1} - U_z}{I_z} = \frac{330 \cdot 0,447 \cdot \frac{4}{12} - 33}{157,5} = 103m\Omega \quad (4.4)$$

Môžeme určiť činiteľ väzby transformátora[8, str. 429]

$$k = \sqrt{1 - \frac{L_\sigma}{L_2}} = \sqrt{1 - \frac{437 \cdot 10^{-9}}{165,6 \cdot 10^{-6}}} = 0,9987 \quad (4.5)$$

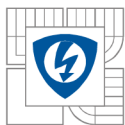
V rámci merania bola nameraná účinnosť meniča

$$\eta = \frac{I_z \cdot U_z}{U_d \cdot I_d} = \frac{157,5 \cdot 33}{330 \cdot 17,51} \cdot 100 = 90\% \quad (4.6)$$



ZÁVER

Práca bola pre mňa veľmi prínosná. V zadanej bakalárskej práci som sa zoznámil s navrhovaním výkonového meniča pre oblúkové zváranie, boli dimenzované výkonové prvky, vyrobené potrebné transformátory a tlmivky. Bolo navrhnuté riešenie riadenia celého meniča, taktiež boli navrhnuté dosky plošných spojov pre hlavnú dosku, dosky budičov aj DPS riadenia. Bol vyhotovený prototyp, na ktorom po osadení všetkých súčiastok bolo prístupné k overovaciemu meraniu. Bola overená hlavne výkonová časť zapojenia, v rámci toho je aj kontrola na maximálny dodaný prúd – táto požiadavka bola splnená. Zváracie vlastnosti zariadenia neboli overené z dôvodu nefunkčnosti prúdovej spätnej väzby – dochádzalo k zarušeniu riadiaceho obvodu. Preto bola spätná väzba vyradená a menič bol odskúšaný len pri maximálnej striede. V budúcnosti by som rád dokončil prúdovú spätnú väzbu a návrh mechanického prevedenia zariadenia. Taktiež bude nutné overiť možnosti chladenia celého meniča.

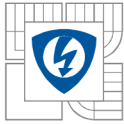


LITERATÚRA

- [1] KUBÍČEK, Jaroslav. *TECHNOLOGIE II: Díl 1 ZÁKLADNÍ METODY TAVNÉHO SVAŘOVÁNÍ*. Brno, 2006. Dostupné z: http://ust.fme.vutbr.cz/svarovani/opory_soubory/technologie_2_svarovani/technologie_2_svarovani_tavne.doc
- [2] HLUCHÝ, Michal et al. *Strojírenská technologie 2: Polotovary a jejich technologičnost*. 1979. vyd. Praha: STNL, 1979, 404 s.
- [3] Welding Processes, Welding Faults, Defects & Discontinuities For NDT Technicians Part 3. [online]. [cit. 2014-06-02]. Dostupné z: http://www.hera.org.nz/Category?Action=View&Category_id=521
- [4] ČSN EN 60974-1. *Zařízení pro obloukové svařování: Část 1: Zdroje svařovacího proudu*. Praha: Český normalizační institut, 2006.
- [5] Zdroje pro svařování el. obloukem. KOLAŘÍK, Ladislav. [online]. 2010 [cit. 2014-06-02]. Dostupné z: http://u12133.fsid.cvut.cz/podklady/TMSV/ob_svar_zdroje.pdf
- [6] Svářecí inventory: Pohled pod pokličku I. *Svarinfo.cz: Magazín praktického svařování* [online]. 2006 [cit. 2014-06-02]. Dostupné z: <http://www.svarbazar.cz/phprs/view.php?cisloclanku=2006092101>
- [7] Svářecí inventory: Pohled pod pokličku II. *Svarinfo.cz: Magazín praktického svařování* [online]. 2007 [cit. 2014-06-02]. Dostupné z: <http://www.svarbazar.cz/phprs/view.php?cisloclanku=2007010401>
- [8] 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.
- [9] SEMIC. *MATERIAL CF139* [online]. [cit. 2014-06-02]. Dostupné z: <http://www.semic.cz/!MATERIALY/CF139.pdf>
- [10] COSMO FERRITES LIMITED. *Product Catalogue* [online]. [cit. 2014-06-02]. Dostupné z: http://www.cosmoferrites.com/Downloads/Downloads/3aabcf73-9613-44ea-887c-b235d1ad774f_catalog.pdf
- [11] FAKTOR, Zdeněk. *Transformátory a tlumivky pro spínané napájecí zdroje*. 1. vyd. Praha: BEN - technická literatura, 2002, 243 s. ISBN 80-860-5691-0.
- [12] T225-26: *Iron Powder Toroid* [online]. [cit. 2014-05-31]. Dostupné z: <http://www.amidoncorp.com/t225-26/>
- [13] CORES FOR DC CHOKES AND AC LINE FILTERS. AMIDON, INC. [online]. [cit. 2014-06-02]. Dostupné z: http://www.amidoncorp.com/product_images/specifications/1-32.pdf
- [14] AMIDON. *SECTION I: IRON POWDER CORES* [online]. 2014 [cit. 2014-05-31]. Dostupné z: http://www.amidoncorp.com/product_images/specifications/1-02.pdf
- [15] INFINEON. *SPW47N60CFD* [online]. 2008 [cit. 2014-06-02]. Dostupné z: http://www.infineon.com/dgdl/SPW47N60CFD_rev1%5B1%5D.3_PCN.pdf?folderId=db3a304412b407950112b408e8c90004&fileId=db3a304412b407950112b42c088f4655
- [16] ON SEMICONDUCTOR. *MUR1560: SWITCHMODE Power Rectifiers* [online]. 2008 [cit. 2014-06-02]. Dostupné z: http://www.onsemi.com/pub_link/Collateral/MUR1520-D.PDF

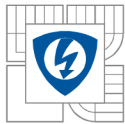


- [17] STMICROELECTRONICS. *STTH6003TV/CW: HIGH FREQUENCY SECONDARY RECTIFIER* [online]. 1999 [cit. 2014-06-02]. Dostupné z: <http://www.st.com/web/en/resource/technical/document/datasheet/CD00001561.pdf>
- [18] *KBPC5006: Bridge Rectifier* [online]. 2011 [cit. 2014-06-02]. Dostupné z: http://www.ecom.cz/open_sheet/sheet_name=D48946
- [19] PATOČKA, Miroslav. *Vybrané statě z výkonové elektroniky: Sv. II. Měniče bez vf. impulsního transformátoru*. 2. vyd. Brno: VUT, FEKT, 2002.
- [20] PATOČKA, Miroslav. *BVEL Presentace: 2. část - tranzistory*. [online]. [cit. 201-06-02]. Dostupné z: https://www.vutbr.cz/www_base/priloha.php?dpid=39912
- [21] *Kaptonová podložka* [online]. 2014 [cit. 2014-06-02]. Dostupné z: <http://www.ges.cz/cz/ka-218-GES06800290.html>
- [22] *CHL45V3-24* [online]. 2014. vyd. [cit. 2014-06-02]. Dostupné z: <http://www.ezk.cz/e-shop/select.php?skupina=17>
- [23] *ES 19451: Hliníkové chladiče* [online]. 2014 [cit. 2014-06-02]. Dostupné z: http://www.gamaaluminium.sk/download/katalog_2014_web.pdf
- [24] *V68-50SA: Chladiče vyrobené z Al profilů* [online]. 2014 [cit. 2014-06-02]. Dostupné z: <http://www.gme.cz/v68-50sa-p620-059>
- [25] MADUDA, Radoslav. *Soft-Start univerzal V2.0* [online]. [cit. 2014-06-02]. Dostupné z: <http://svetelektro.com/modules/Forums/download/file.php?id=30520>
- [26] VOREL, Pavel a Petr PROCHÁZKA. *Řídicí členy v elektrických pohonech*. Brno: VUT FEKT, 2009.
- [27] *UC3845: CURRENT MODE PWM CONTROLLER* [online]. 2007 [cit. 2014-06-02]. Dostupné z: http://www.soselectronic.hu/a_info/resource/c/TexasInstruments/uc3845.pdf
- [28] *FT-82-61: Ferrite Toroids* [online]. 2014 [cit. 2014-06-02]. Dostupné z: <http://www.amidoncorp.com/ft-82-61/>
- [29] COILCRAFT. *SD250-3L: Base/Gate Driver Transformers* [online]. 2012 [cit. 2014-06-02]. Dostupné z: <http://www.coilcraft.com/pdfs/pwrbase.pdf>
- [30] VITEK, Vojtech. *Budicí obvody výkonového tranzistoru SiC MOSFET*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, 2013. 50 s. Vedoucí bakalářské práce Ing. Petr Procházka, Ph.D.
- [31] INFINEON. *BDP950: PNP Silicon AF Power Transistors* [online]. 2008 [cit. 2014-06-02]. Dostupné z: <http://www.gme.cz/img/cache/doc/912/070/bdp950-datasheet-1.pdf>
- [32] *FT-50-77: Ferrite Toroids* [online]. 2014 [cit. 2014-06-02]. Dostupné z: <http://www.amidoncorp.com/ft-50-77/>



[33] J., Šelepa. *Transformátorová páječka 500W*. Brno: FEKT VUT v Brně, 2010. 55 s.
Vedoucí bakalářské práce doc. Ing. Pavel Vorel, Ph.D.

[34] *LM35: Precision Centigrade Temperature Sensors* [online]. 2013 [cit. 2014-06-02].
Dostupné z: <http://www.ti.com/lit/ds/symlink/lm35.pdf>



PRÍLOHY

Príloha A – Fotografia oživeného kusu meniča, vrchná strana

Príloha B – Fotografia oživeného kusu meniča, spodná strana

Príloha C – Schéma zapojenia jednotlivých častí meniča

Príloha D – Návrh hlavnej DPS, spodná strana

Príloha E – Návrh hlavnej DPS, vrchná strana

Príloha F – Návrh dodatočných DPS, spodná a vrchná strana

Obsah CD

Elektronická verzia práce vo formáte PDF

Súbory schém a DPS formátu Eagle

Fotodokumentácia zariadenia

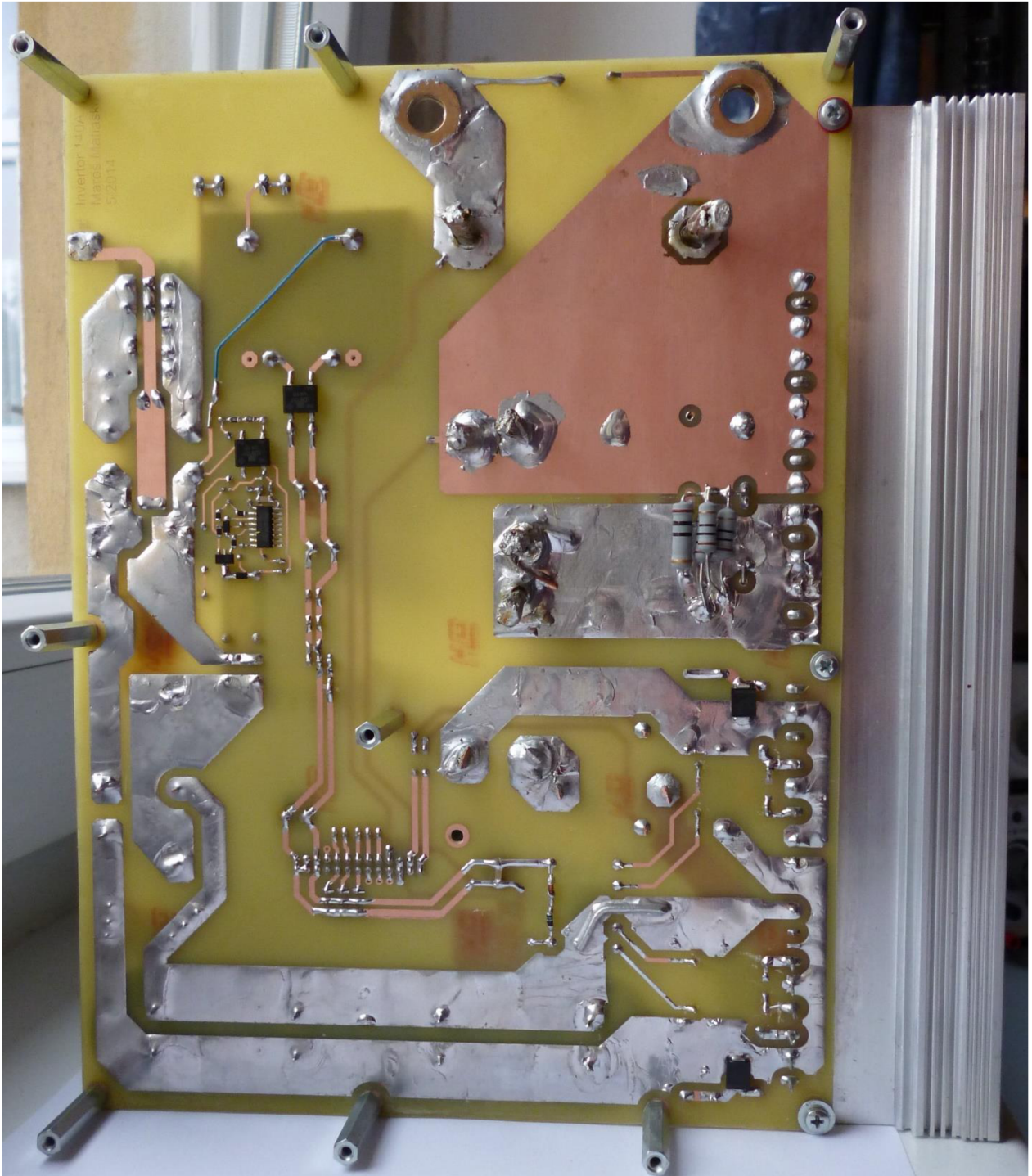
Zoznam súčiastok

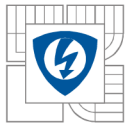
Pozn.: Návrh hlavnej DPS nie je v mierke M1:1

PRÍLOHA A

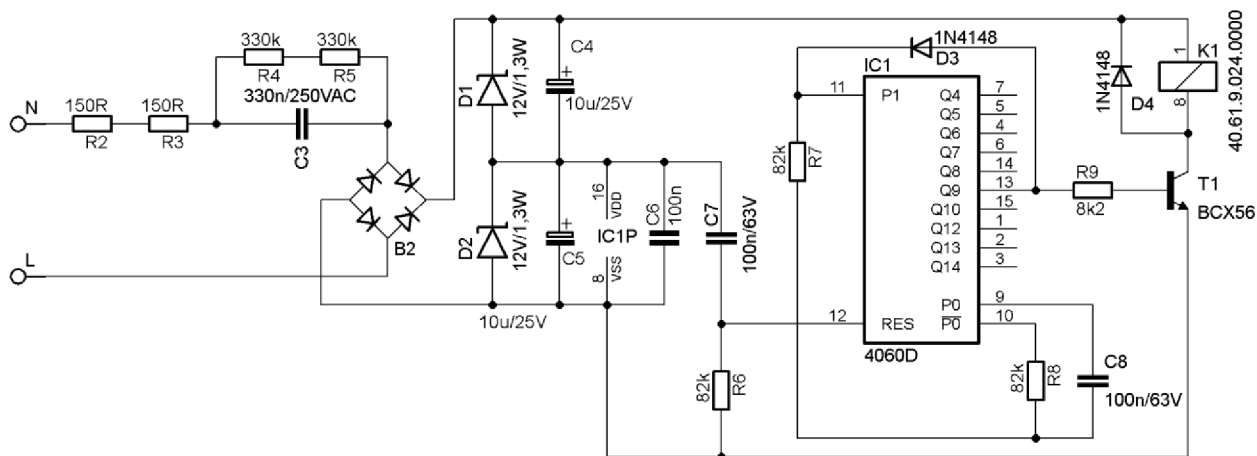
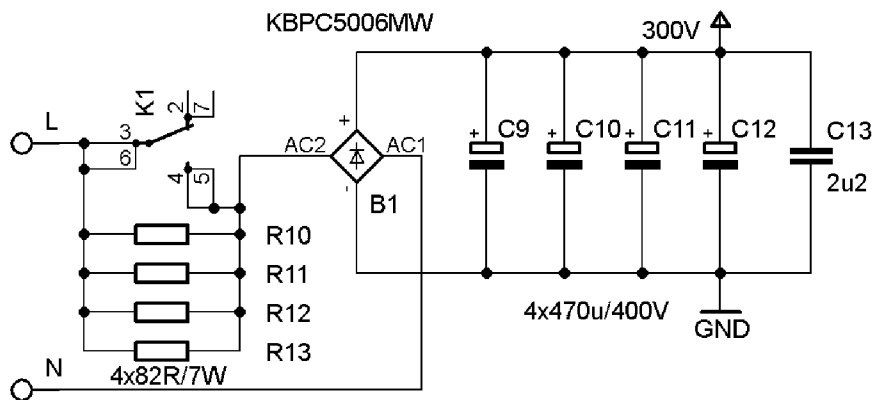
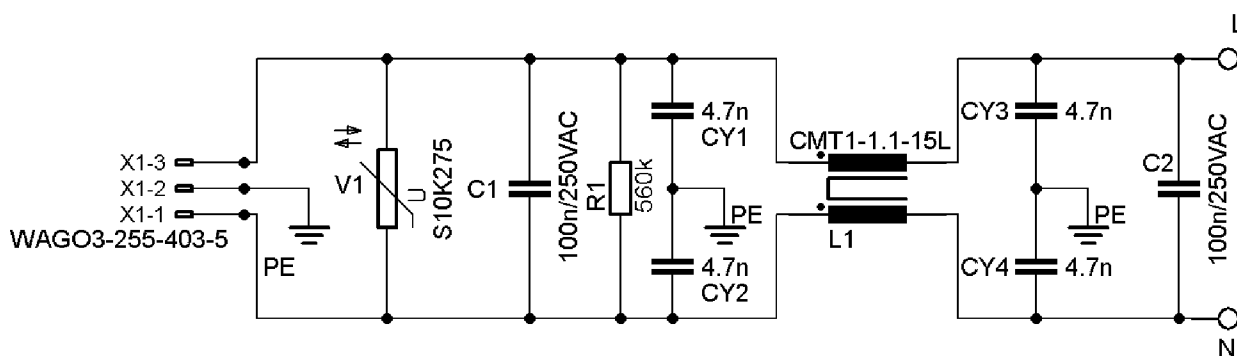
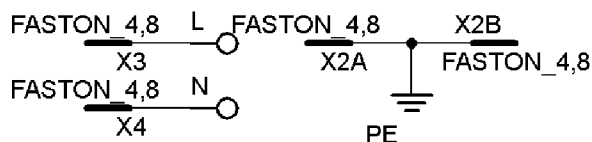


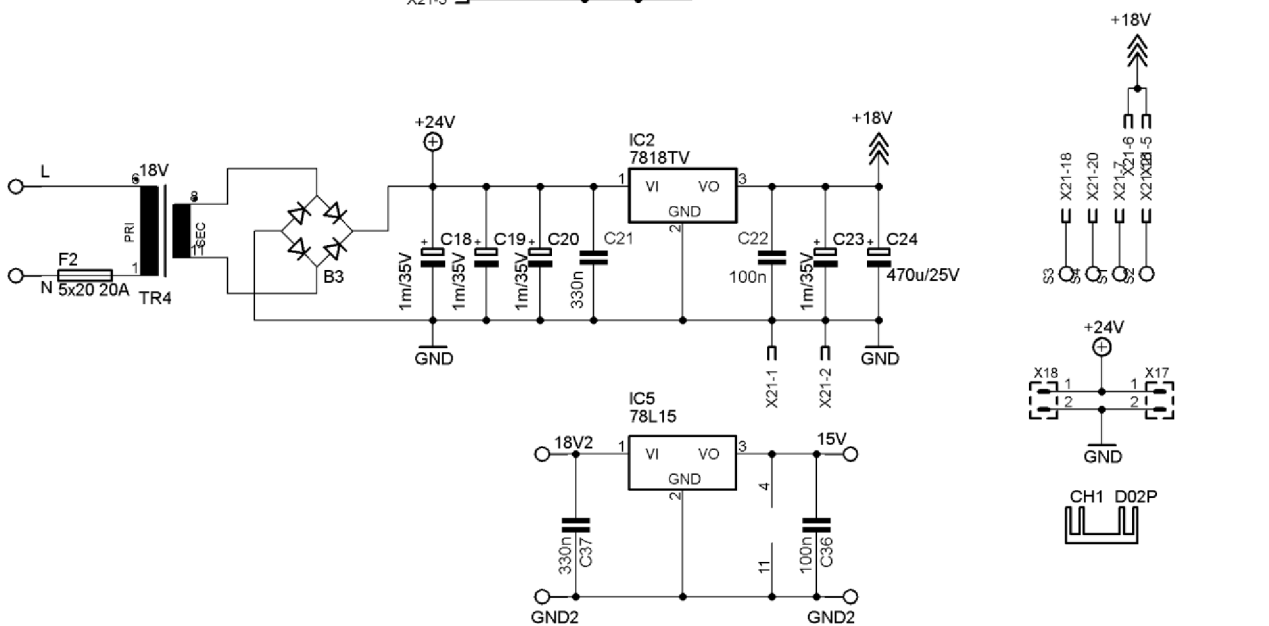
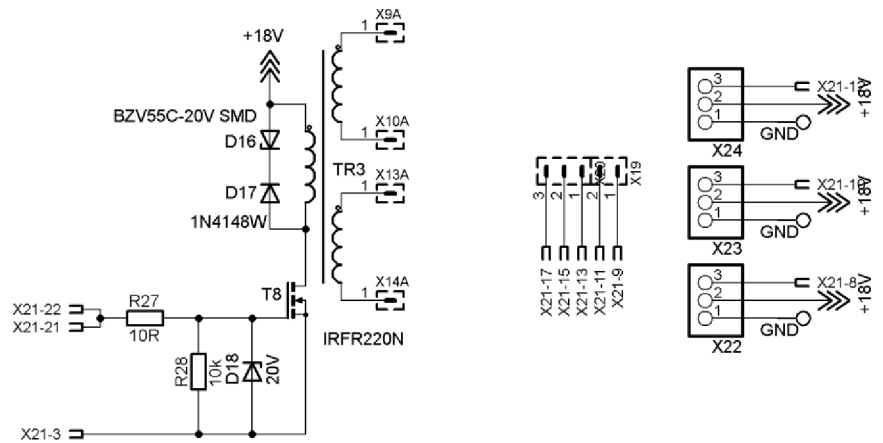
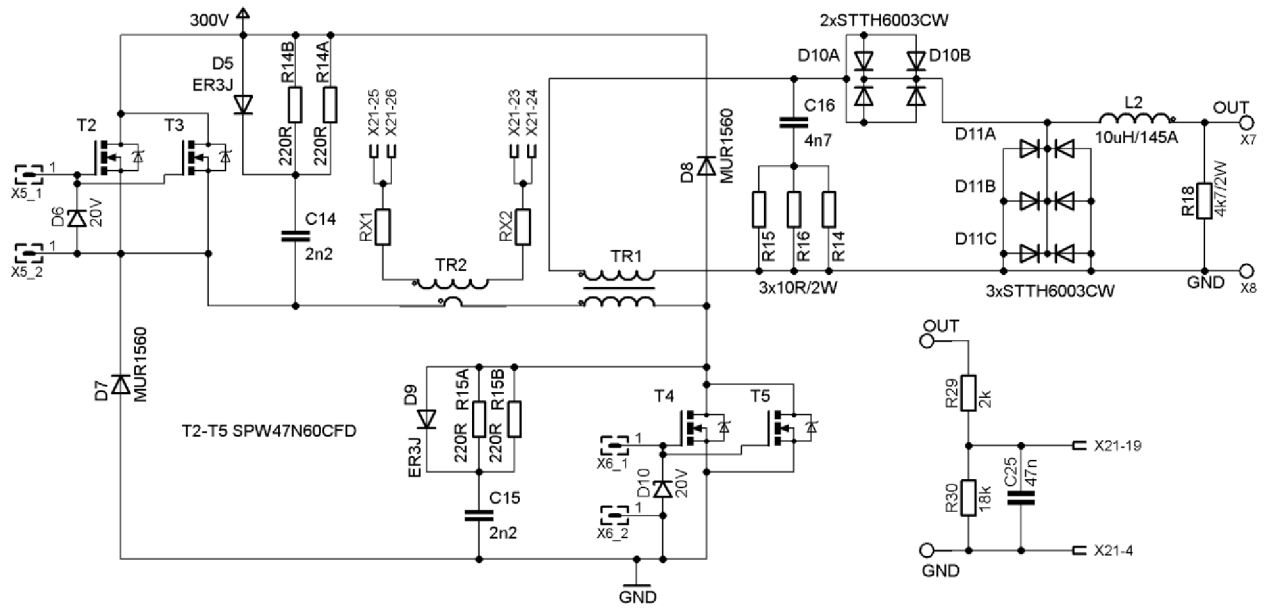
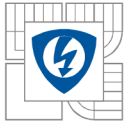
PRÍLOHA B

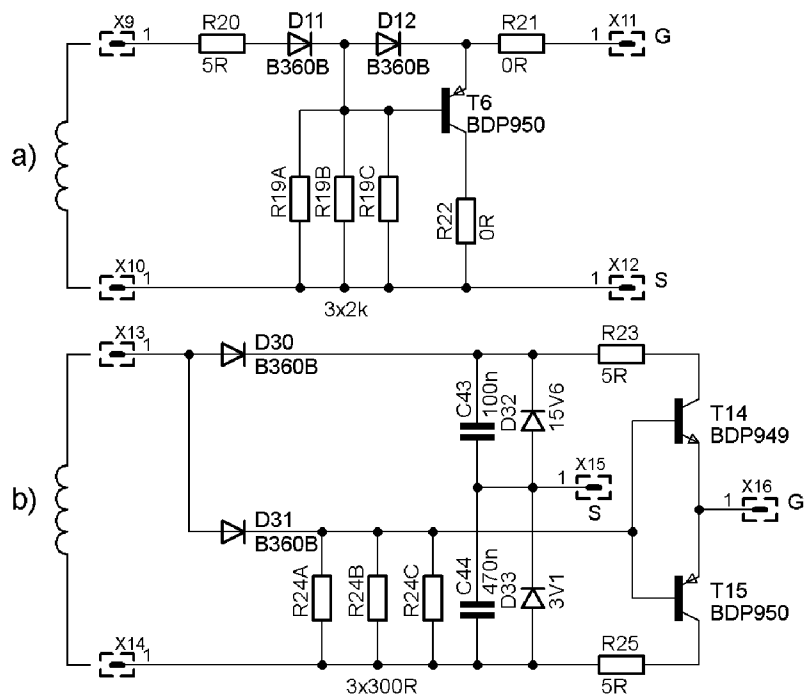
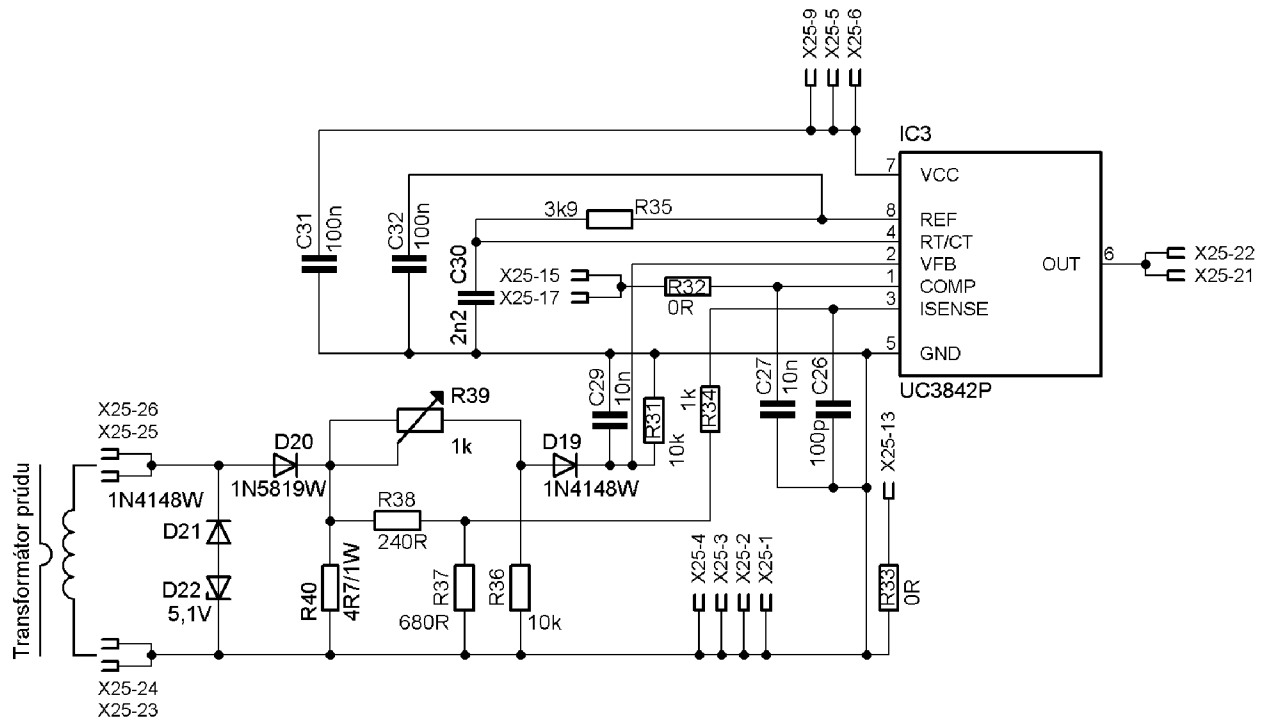
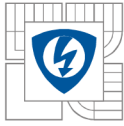


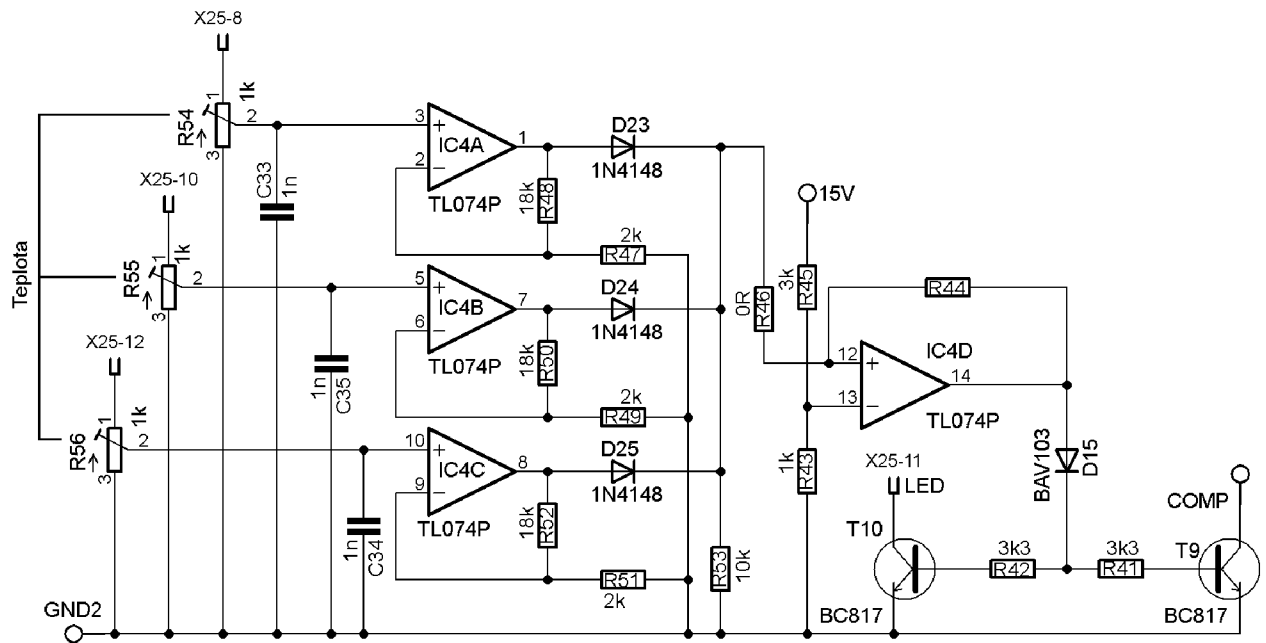
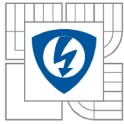


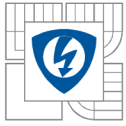
PRÍLOHA C



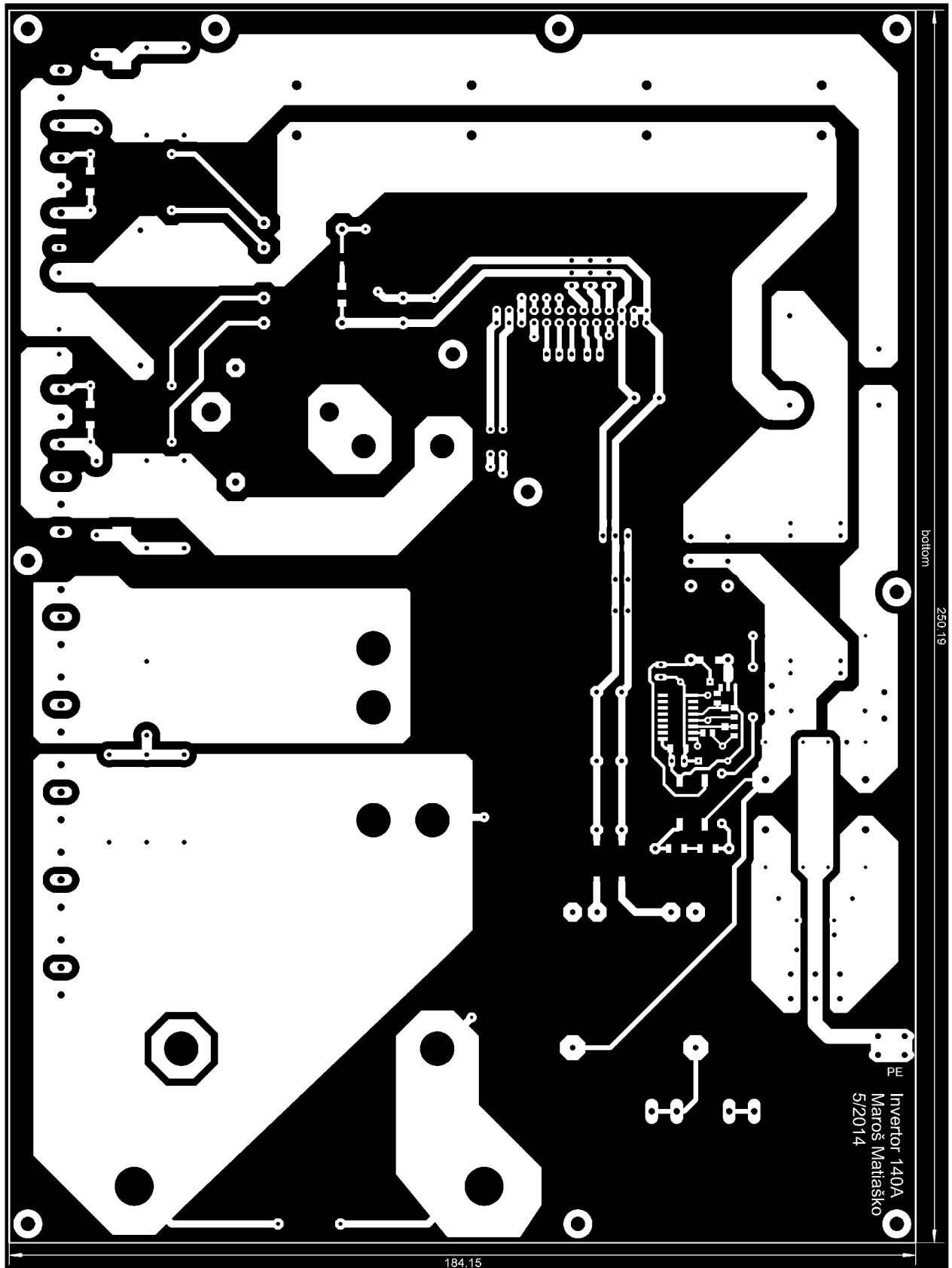


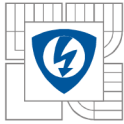




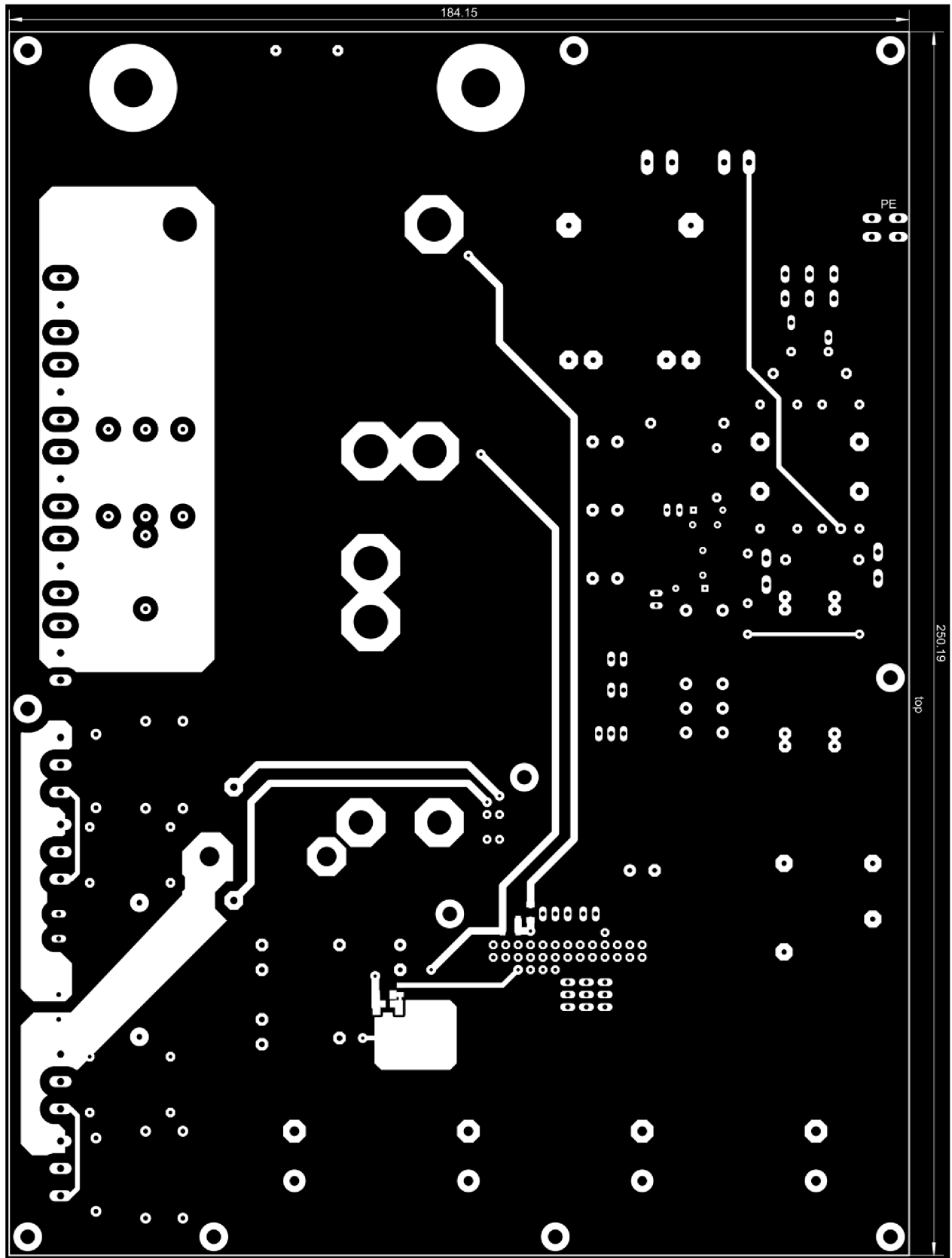


PRÍLOHA D – Návrh hlavnej DPS, spodná strana





PRÍLOHA E – Návrh hlavnej DPS, vrchná strana



PRÍLOHA F – Návrh dodatočných DPS, spodná a vrchná strana

