

# 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

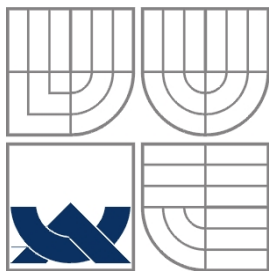
SPÍNANÉ ZDROJE VE VOZIDLECH ELEKTRICKÉ TRAKCE

DIPLOMOVÁ PRÁCE  
MASTER'S THESIS

AUTOR PRÁCE  
AUTHOR

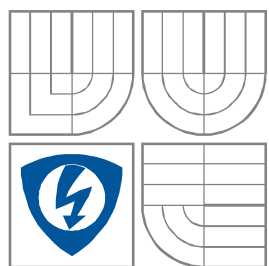
Bc. MICHAL ŠKUNDA

BRNO 2010



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

## SPÍNANÉ ZDROJE VE VOZIDLECH ELEKTRICKÉ TRAKCE

SWITCHING SOURCE IN ELECTRIC TRACTION VEHICLE

DIPLOMOVÁ PRÁCE

MASTER'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

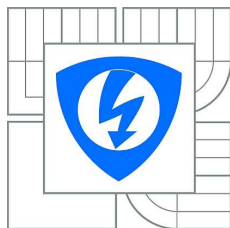
Bc. Michal Škunda

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

Ing. Dalibor Červinka, Ph.D.

BRNO, 2010



VYSOKÉ UČENÍ  
TECHNICKÉ V BRNĚ

Fakulta elektrotechniky  
a komunikačních technologií

Ústav výkonové elektrotechniky a elektroniky

# Diplomová práce

magisterský navazující studijní obor  
Silnoproudá elektrotechnika a výkonová elektronika

**Student:** Bc. Michal Škunda

**ID:** 77905

**Ročník:** 2

**Akademický rok:** 2009/2010

**NÁZEV TÉMATU:**

## Spínané zdroje ve vozidlech elektrické trakce

### POKYNY PRO VYPRACOVÁNÍ:

1. Popište problematiku aplikace spínaných zdrojů ve vozidlech nezávislé elektrické trakce.
2. Navrhněte a zrealizujte spínaný zdroj 12/2x24V 4,5A pro napájení pomocných obvodů v elektromobilu.
3. Zrealizujte budiče na silovou část měniče 220V/300V pro nabíjení elektromobilu.
4. Proveďte měření a oživte funkčnost obou zdrojů.

### DOPORUČENÁ LITERATURA:

Dle doporučení vedoucího

**Termín zadání:** 1.10.2009

**Termín odevzdání:** 20.05.2010

**Vedoucí práce:** Ing. Dalibor Červinka, Ph.D.

**doc. Ing. Čestmír Ondrůšek, CSc.**

*Předseda oborové rady*

### UPOZORNĚNÍ:

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

## **Abstrakt**

Diplomová práca sa nazoberá v prvej časti návrhom a realizáciou spínaného napájacieho zdroja pre riadiace obvody palivých článkov 12/2x24V 4,5A. V úvode je prebraná problematika napájacích zdrojov v elektromobiloch, ďalej celkový návrh a realizácia spomínaného zdroja.

V ďalšej časti práce sa zaoberám rýchlonabíjačkou a budičmi výkonových tranzistorov. V úvodnej časti je popísaná konštrukcia DC meniča a ďalej riadiace a ochranné obvody rýchlonabíjačky. V závere popisujem vybrané budiace obvody a záťažové skúšky na rýchlonabíjačke, čo je podložené nameranými priebehmi.

## **Abstract**

The first part of this work describes the design and implementation of switch-mode power supply for control circuits for 12/2x24V 4.5A fuel cells. The introduction picks the issue of power sources in electromobility and final design and implementation of switching power supply.

The next part deals with the issues of fast-charger and generators for power transistors. It describes the structure of DC converter and control and protection circuits of quick-charger. In the end this work describes selected driver circuits and charge tests on fast-charger as evidenced by measurements.

## **Kľúčové slová**

DC/DC menič; rýchlonabíjačka; push-pull menič; budiace obvody; impulzný transformátor; elektromobil; usmerňovacia dióda

## **Keywords**

DC/DC converter; fast charger; push-pull converter, driver circuits; pulse transformer; electric vehicle; rectifier diode

## **Bibliografická citace**

ŠKUNDA, M. Spínané zdroje ve vozidlech elektrické trakce. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, 2010. 71 s. Vedoucí diplomové práce Ing. Dalibor Červinka, Ph.D.

## **Prohlášení**

Prohlašuji, že svou diplomovou práci na téma Spínané zdroje ve vozidlech elektrické trakce jsem vypracoval samostatně pod vedením vedoucího diplomové práce a s použitím odborné literatury a dalších informačních zdrojů, které jsou všechny citovány v práci a uvedeny v seznamu literatury na konci práce.

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

V Brně dne .....

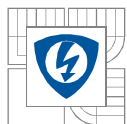
Podpis autora .....

## **Poděkování**

Děkuji vedoucímu diplomové práce Ing. Daliborovi Červinkovi, Ph.D. za účinnou metodickou, pedagogickou a odbornou pomoc a další cenné rady při zpracování mé diplomové práce.

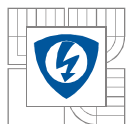
V Brně dne .....

Podpis autora .....

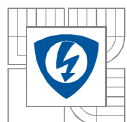


## Obsah

|                                                                                                |           |
|------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------|
| <b>1 ÚVOD .....</b>                                                                            | <b>14</b> |
| <b>2 SPÍNANÝ ZDROJ 12V/2X24V PRE NAPÁJANIE ELEKTRONIKY VODÍKOVÉHO ČLÁNKU V AUTOMOBILE.....</b> | <b>15</b> |
| <b>2.1 Úvod.....</b>                                                                           | <b>15</b> |
| <b>2.2 ZÁKLADNÝ POPIS OBVODU .....</b>                                                         | <b>16</b> |
| 2.2.1 POPIS IO OBVODU .....                                                                    | 16        |
| 2.2.2 NASTAVENIE FREKVENCIE OSCILÁTORA .....                                                   | 17        |
| 2.2.3 NASTAVENIE VÝSTUPNÉHO NAPÄTIA REZONANČNÉHO MENIČA .....                                  | 18        |
| <b>2.3 POPIS ZAPOJENIA OBVODU .....</b>                                                        | <b>18</b> |
| 2.3.1 ĎIAĽKOVÉ VYPÍNANIE ZDROJA .....                                                          | 19        |
| <b>2.4 NÁVRH TRANSFORMÁTORU .....</b>                                                          | <b>19</b> |
| 2.4.1 VÝPOČET PRIEREZU VODIČOV TRANSFORMÁTORA .....                                            | 21        |
| 2.4.2 VÝPOČET PRIEREZU VODIČOV TRANSFORMÁTORA .....                                            | 22        |
| <b>2.5 SEKUNDÁRNA STRANA MENIČA.....</b>                                                       | <b>23</b> |
| <b>3 OBVOD LM2576HVT .....</b>                                                                 | <b>23</b> |
| <b>3.1 MERANIE PREVEDENÉ NA ZDROJI.....</b>                                                    | <b>25</b> |
| <b>3.2 CELKOVÁ SCHÉMA ZAPOJENIA MENIČA.....</b>                                                | <b>26</b> |
| <b>3.3 ZAŤAŽOVACIA SKÚŠKA.....</b>                                                             | <b>27</b> |
| <b>3.4 VYHOTOVENIE MENIČA .....</b>                                                            | <b>28</b> |
| <b>4 RÝCHLONABÍJAČKA PRE TRAKČNÝ AKUMULÁTOR A BUDIČE VÝKONOVÝCH TRANZISTOROV .....</b>         | <b>29</b> |
| <b>4.1 Úvod.....</b>                                                                           | <b>29</b> |
| <b>4.2 POPIS A KONCEPCIA RÝCHLONABÍJAČKY .....</b>                                             | <b>30</b> |
| 4.2.1 SILOVÁ ČASŤ NABÍJAČKY A DC/DC MENIČ.....                                                 | 30        |
| 4.2.2 STRANA NAPÁJANIA, USMERŇOVAČ A JEDNOSMERNÝ NAPÄŤOVÝ OBVOD.....                           | 31        |
| <b>4.3 DC/DC MENIČ – POPIS .....</b>                                                           | <b>33</b> |
| 4.3.1 NÁVRH IMPULZNÉHO TRANSFORMÁTORA A PRÍDAVNEJ ROZPTYLOVEJ INDUKČNOSTI.....                 | 35        |
| 4.3.2 DIMENZOVANIE DIÓD A TRANZISTOROV MENIČA.....                                             | 39        |
| 4.3.3 DEMAGNETIZAČNÉ DIÓDY MENIČA .....                                                        | 40        |
| <b>4.4 SEKUNDÁRNA STRANA MENIČA.....</b>                                                       | <b>41</b> |
| 4.4.1 VÝSTUPNÁ TLMIVKA .....                                                                   | 42        |
| <b>4.5 RIADIACE A OCHRANNÉ OBVODY.....</b>                                                     | <b>42</b> |
| 4.5.1 OBVOD UC 3845.....                                                                       | 44        |
| 4.5.2 SNÍMANIE SKUTOČNEJ HODNOTY PRÚDU.....                                                    | 45        |
| <b>4.6 OCHRANNÉ OBVODY .....</b>                                                               | <b>48</b> |
| 4.6.1 NASTAVENIE REFERENČNEJ HODNOTY NAPÄTIA NA KOMPARÁTORE S OBVODOM LM393D.....              | 49        |
| <b>5 BUDIACE OBVODY .....</b>                                                                  | <b>50</b> |
| <b>5.1 BUDIČE TRANZISTOROV CONCEPT 2SD106AN .....</b>                                          | <b>50</b> |

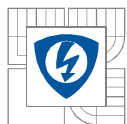


|                                                                             |           |
|-----------------------------------------------------------------------------|-----------|
| 5.1.1 CONCEPT 2SD106AN .....                                                | 50        |
| 5.1.2 PRIMÁRNA STRANA DRIVERA – NAPÁJACIA ČASŤ .....                        | 52        |
| 5.1.3 ZAPOJENIE SEKUNDÁRNEJ STRANY BUDIČA .....                             | 53        |
| 5.2 VÝSLEDKY SKÚŠKY BUDIČA CONCEPT .....                                    | 55        |
| <b>6 RIADIACE OBVODY A POUŽITÉ BUDIČE TRANZISTOROV.....</b>                 | <b>56</b> |
| 6.1.1 NÁVRH IMPULZNÉHO TRANSFORMÁTORA .....                                 | 57        |
| 6.1.2 VÝPOČET POČTU ZÁVITOV PRIMÁRNEHO A SEKUNDÁRNEHO VINUTIA .....         | 58        |
| <b>7 VYHODNOTENIE VÝSLEDKOV MERANIA NA ZHOTOVENEJ RÝCHLONABÍJAČKE .....</b> | <b>60</b> |
| 7.1 VYHODNOTENIE MERANIA NA RÝCHLONABÍJAČKE.....                            | 65        |
| <b>8 ZÁVER.....</b>                                                         | <b>66</b> |
| <b>LITERATÚRA .....</b>                                                     | <b>67</b> |
| <b>PRÍLOHY .....</b>                                                        | <b>68</b> |

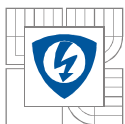


## ZOZNAM OBRÁZKOV

|                                                                                   |    |
|-----------------------------------------------------------------------------------|----|
| Obr. 2.1 Push – Pull menič s tvrdým spínaním, bez rezonancie .....                | 16 |
| Obr. 2.2 Push-Pull menič so sériovou rezonanciou .....                            | 16 |
| Obr. 2.3: Prevedenie púzdra a označenie vývodov obvodu SG3525N.....               | 17 |
| Obr. 2.4: Grafické určenie kmitočtu oscilátoru[6] .....                           | 18 |
| Obr. 2.5: Základné zapojenie PUSH PULL zdroja s obvodom SG3525[6].....            | 18 |
| Obr. 2.6: Priebeh spínania tranzistorov .....                                     | 19 |
| Obr. 2.7: Rozmery jadra transformátoru .....                                      | 21 |
| Obr. 3.1: Obvod LM2576HVT[10] .....                                               | 24 |
| Obr. 3.2: Základné zapojenie obvodu LM2576HVT [10] .....                          | 24 |
| Obr. 3.3: Priebeh prúdu sekundárnym vinutím transformátora .....                  | 25 |
| Obr. 3.4: Pílovitý priebeh oscilátoru .....                                       | 25 |
| Obr. 3.5: Priebeh napätia medzi kolektorom a emitorom tranzistora (spínanie)..... | 25 |
| Obr. 3.6: Doska plošných spojov, strana konektorov .....                          | 28 |
| Obr. 3.7: Doska plošných spojov, strana SMD súčiastok .....                       | 28 |
| Obr. 4.1: Silová časť rýchlonabíjačky.....                                        | 30 |
| Obr. 4.2: Schéma zapojenia DC meniča s odľahčovacími obvodmi.....                 | 33 |
| Obr. 4.3: Doska plošných spojov pre kondenzátorovú batériu medziobvodu.....       | 34 |
| Obr. 4.4: Vyhotovenie medziobvodu a DC meniča .....                               | 35 |
| Obr. 4.5: Konštrukčné prevedenie impulzového transformátora a tlmivky.....        | 38 |
| Obr. 4.6: Prevedenie prídavnej rozptylovej indukčnosti.....                       | 39 |
| Obr. 4.7: Priebeh prúdu a napätia na tranzistore .....                            | 39 |
| Obr. 4.8: Zapojenie sekundárnej strany meniča .....                               | 41 |
| Obr. 4.9: Prevedenie sekundárnej strany DC meniča.....                            | 42 |
| Obr. 4.10: Riadiace a budiace obvody.....                                         | 43 |
| Obr. 4.11: Vnútoraná štruktúra obvodu UC3845 [12] .....                           | 44 |
| Obr. 4.12: Spôsob regulácie napätia .....                                         | 45 |
| Obr. 4.13: Zapojenie prúdových transformátorov .....                              | 45 |
| Obr. 4.14: Prevedenie prúdového transformátora.....                               | 47 |
| Obr. 4.15: Regulačná smyčka prúdu.....                                            | 48 |
| Obr. 5.1: Prevedenie budiča[8] .....                                              | 50 |
| Obr. 5.2: Označenie vývodov budiča[8] .....                                       | 51 |

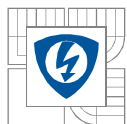


|                                                                                            |    |
|--------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Obr. 5.3: Doporučené zapojenie výrobcom[8] .....                                           | 52 |
| Obr. 5.4: Zapojenie zo strany výkonového prvku[8].....                                     | 53 |
| Obr. 5.5: Schéma zapojenia budiča výkonových tranzistorov .....                            | 54 |
| Obr. 5.6: Doska plošných spojov .....                                                      | 55 |
| Obr. 5.7: Vyhodenie dosky plošného spoja .....                                             | 55 |
| Obr. 6.1: Riadiaci obvod a budiče výkonových tranzistorov .....                            | 56 |
| Obr. 6.2: Prevedenie impulzného transformátora .....                                       | 57 |
| Obr. 6.3: Schéma zapojenia budiča výkonového tranzistoru .....                             | 59 |
| Obr. 6.4: Umiestnenie budičov výkonových tranzistorov.....                                 | 60 |
| Obr. 6.5: Zhotovené riadiace obvody.....                                                   | 60 |
| Obr. 7.1: Priebeh napätia $U_{GE}$ bez napätia v silovej časti DC meniča .....             | 61 |
| Obr. 7.2: Priebeh napätia $U_{GE}$ při menovitom zaťažení meniča.....                      | 61 |
| Obr. 7.3: Detail zapnutia tranzistoru.....                                                 | 62 |
| Obr. 7.4: Detail vypnutia tranzistoru.....                                                 | 62 |
| Obr. 7.5: Napätie $U_{CE}$ na tranzistore pri prúde $I_Z=50A$ , $U_D=250V$ .....           | 63 |
| Obr. 7.6: Priebeh prúdu nulovou diódou na sekundárnej strane, $I_Z=71A$ , $U_D=250V$ ..... | 63 |
| Obr. 7.7: Napätie polovice medziobvodu, $I_Z=50A$ , $U_D=250V$ ,detail NF zvlnenia .....   | 64 |
| Obr. 7.8: Priebeh prúdu na výstupnej tlmivke pri zaťažovacom prúde $I_Z=50A$ .....         | 64 |
| Obr. 7.9:Priebeh odoberaného fázového prúdu, $5A/V$ , $I_Z=50A$ .....                      | 65 |



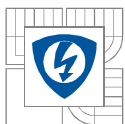
## ZOZNAM TABULIEK

|                                                                                         |    |
|-----------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Tab. 2.1: Parametre impulzného transformátora .....                                     | 23 |
| Tab. 2.2: Porovnanie meniča s rezonanciou a bez rezonancie v sekundárnej strany.....    | 27 |
| Tab. 3.1: Pravdivostná tabuľka NAND hradla.....                                         | 49 |
| Tab.4.1: Doporučené hodnoty $R_{thx}$ a $D_m$ pre nastavenie $U_{sat}$ tranzistoru..... | 53 |



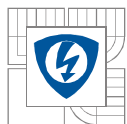
## ZOZNAM SYMBOLOV A SKRATIEK

| Symbol       | Veličina                                     | Jednotka     |
|--------------|----------------------------------------------|--------------|
| $f$          | Frekvencia                                   | Hz           |
| $V_{DSS}$    | Napätie tranzistoru D-S                      | V            |
| $R_{DSon}$   | Hodnota odporu zopnutého tranzistoru D-S     | $\Omega$     |
| $D$          | Dióda                                        | -            |
| $C$          | Kapacita                                     | F            |
| $N_1$        | Počet závitov primarneho vinutia             | -            |
| $N_2$        | Počet závitov sekundárneho vinutia           | -            |
| $t_{zap}$    | Doba zapnutia spínaného prvku                | -            |
| $B_{max}$    | Maximálna hodnota magnetickej indukcie       | T            |
| $S_{FE}$     | Prierez jadra magnetického obvodu            | $mm^2$       |
| $T$          | Periódá signálu                              | s            |
| $s$          | Strieda                                      | -            |
| $I_{str}$    | Stredná hodnota prúdu                        | A            |
| $I_{max}$    | Maximálna hodnota prúdu                      | A            |
| $\omega$     | Uhlová frekvencia                            | $rad.s^{-1}$ |
| $I_{ef}$     | Efektívna hodnota prúdu                      | A            |
| $I_{MAXsek}$ | Maximálny prúd pretekajúci sekundárom        | A            |
| $J$          | Prúdová hustota                              | $A.m^{-2}$   |
| $\delta$     | Hĺbka vniku                                  | mm           |
| $C_r$        | Rezonančný kondenzátor                       | F            |
| $L_{2K}$     | Indukčnosť sekundáru pri skratovanom primári | H            |
| $U_{OUT}$    | Výstupné napätie                             | V            |
| $U_{ref}$    | Referenčné napätie                           | V            |
| $L_r$        | Rozptylová indukčnosť                        | H            |
| $\Delta I$   | Zvlnenie prúdu                               | A            |
| $I_D$        | Stredná hodnota prúdu                        | A            |
| $P$          | Výkon                                        | W            |
| $U_m$        | Maximálna hodnota napätia                    | V            |
| $d$          | Priemer                                      | mm           |
| $I_\mu$      | Magnetizačný prúd                            | A            |



|                   |                                                   |    |
|-------------------|---------------------------------------------------|----|
| $\mathcal{A}$     | Magnetická vodivosť                               | H  |
| $\Delta P_{prep}$ | Prepínacie straty                                 | W  |
| $\Delta P_{ved}$  | Straty vedením                                    | W  |
| $\Delta P_{celk}$ | Celkové straty                                    | W  |
| $L_{\sigma}$      | Rozptylová indukčnosť                             | H  |
| $U_{sat}$         | Saturačné napätie tranzistoru                     | V  |
| $U_{cc}$          | Napájacie napätie riadiacich a ochranných obvodov | V  |
| $L_1$             | Indukčnosť primárneho vinutia transformátora      | H  |
| $L_2$             | Indukčnosť sekundárneho vinutia transformátora    | H  |
| $L_e$             | Dĺžka strednej siločiar magnetickeho jadra        | mm |

| Skratka | Význam                                                          |
|---------|-----------------------------------------------------------------|
| SMD     | Surface mounted device ( súčiastky určené pre povrchovú montáž) |
| DC      | Direct current (jednosmerný prúd)                               |
| PWM     | Pulse width modulation (pulzne šírková modulácia)               |
| GND     | Ground (zem)                                                    |
| MOSFET  | Pol'om riadený tranzistor                                       |
| PNP     | Bipolárny tranzistor, typ PNP                                   |
| LED     | Light-emiting diode (svetelná dióda)                            |

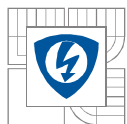


# 1 ÚVOD

V súčasnosti začínajú svetové automobilky vyrábať elektromobily, ktoré možno časom úplne nahradia súčasné automobily s konvenčnými spaľovacími motormi. Elektromobily majú radu výhod ale aj nevýhod. Medzi výhody patrí tichá a ekologická prevádzka, ďalej vysoká účinnosť vďaka použitým elektromotorom a meničom. Medzi ich nevýhody patrí vysoká cena, malý dojazd, čo je spôsobené zatiaľ nedostupnosťou dokonalejších akumulátorov. Nakoniec ďalším nedostatkom je pomerne dlhá doba nabíjania akumulátorov. S vývojom elektromobilov sa postupne vyvíjajú aj kvalitnejšie napájacie zdroje a pohony s elektromotormi. Spínané zdroje sú nevyhnutnou súčasťou elektromobilu. Hlavným zdrojom v elektrickom automobile sú batérie. Výstupné napätie batérii býva rádovo v desiatkách voltov. Preto treba toto napätie pomocou spínaných zdrojov upraviť na vhodné nižšie alebo vyššie napätie. V elektromobile sú použité napájacie zdroje pre napájaciu sieť, obvykle 12V, ďalej pre napájanie riadiacich a ochranných obvodov. Na spínané zdroje v automobiloch sú kladené vysoké nároky. Ako prvá podmienka je, aby spínaný zdroj pracoval v čo najširšom rozsahu vstupného napätia. Výstupom spínaného zdroja musí byť stabilizované napájacie napätie. Pre stabilizáciu napätia na výstupe meniča sa používajú rôzne regulačné smyčky a spätné väzby. Keďže tieto zdroje pracujú v automobile, tak musia odolávať vysokým teplotným výkyvom a vlhkosti. Takisto je potrebné dodržiavať bezpečnosť samotného zdroja. To zahŕňajú hlavne ochrany ako napríklad ochrana proti nadprúdu (preťaženiu), ochrana proti podpätiu a prepätiu. Dôležitá je takisto ochrana proti prehriatiu. Tá je zabezpečená pomocou teplotných čidiel umiestnených na chladičoch výkonových spínacích prvkoch. Väčšina impulzných zdrojov je zložená z jednoúčelových integrovaných obvodov tvoriacich PWM regulátory.

V prvej úlohe diplomovej práce sa zaoberám napájacím zdrojom 12/2x24V 4,5A pre napájanie riadiacich obvodov palivových článkov v elektromobile s vodíkovým pohonom. Popísaný je celý návrh spínaného zdroja, cez návrh transformátoru až po konečné skompletovanie a výsledné zaťažovacie skúšky. Popísaný spínaný zdroj má podľa požiadaviek vstupné napájacie napätie v rozsahu od 9 do 15V. Obsahuje ďalej ochranu proti prepätiu a prehriatiu.

V ďalšej úlohe diplomovej práce sa zaoberám rýchlonabíjačkou pre akumulátory použité v elektromobile. Hlavnou požiadavkou na nabíjanie trakčných akumulátorov je čo najkratšia doba nabíjania. To je dosiahnuté vysokým nabíjacím prúdom v našom prípade až 100A. V práci sa zaoberám návrhom, konštrukciou a zaťažovacou skúškou rýchlonabíjačky. Táto práca už bola v predchádzajúcej diplomovej práci rozpracovaná a skonštruovaná jej skúšobná verzia. V druhej úlohe som sa podieľal na oživení tejto rýchlonabíjačky, implementácii a skúške budičov výkonových tranzistorov a vylepšení napäťového medziobvodu a DC meniča. Z budiacich obvodov je podrobne popísaný budiaci obvod výkonových tranzistorov firmy CONCEPT. Úvod pojednáva a použitom DC meniči a jeho riadení, ďalej sa sústreďujem na budiace obvody a medziobvod nabíjačky. V práci sa nachádzajú výpočty pre impulzné transformátory, tlmičky a takisto aj dimenzovanie výkonových prvkov DC meniča. Celý text práce je doprevádzaný doloženými fotkami a schémami zapojenia. V závere diplomovej práce sa nachádza záťažová skúška rýchlonabíjačky doprevádzaná nameranými grafmi.



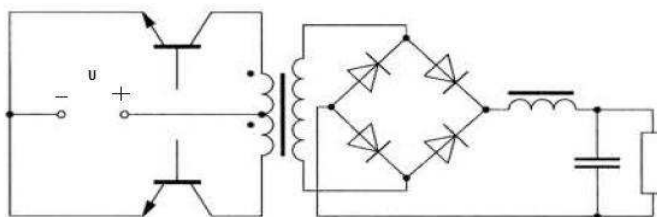
## **2 SPÍNANÝ ZDROJ 12V/2x24V PRE NAPÁJANIE ELEKTRONIKY VODÍKOVÉHO ČLÁNKU V AUTOMOBILE**

### **2.1 Úvod**

Prvou úlohou diplomovej práce bola realizácia napájacieho zdroja 2x24V s prúdom 4,5A pre napájanie elektroniky vodíkového článku. Tento napájací zdroj bol napájaný z napájacej siete 12V. V automobile sa nachádzali dva palivové články a preto bolo potrebné spraviť dve nezávislé 24V vetvy pre oddelené napájanie každého palivového článku. Pre nutnú činnosť palivových článkov bola potrebná elektronika pre napájanie ochranných obvodov a procesoru riadiaci činnosť palivového článku. Ďalšia požiadavka bola, aby bol zdroj galvanicky oddelený od napájacieho napätia práve kôli oddeleniu jednotlivých elektrických odvodov v automobile. Práve preto je menič realizovaný pomocou impulzného transformátora, ktorý túto požiadavku splňuje. Jedná sa o dvojčinný push-pull priepustný rezonančný menič. V úvode sa zameriavam na hlavné zapojenie výkonovej časti meniča. Nasleduje návrh riadiacich obvodov, ich vhodné zapojenie a nastavenie spínacej frekvencie meniča. Tento spínaný zdroj je riadený monolitickým PWM regulátorom SG3525N. Nasleduje podrobný návrh impulzného transformátora, jeho počet závitov a výpočet prerezu vodičov. Keďže sa jedná o rezonančný menič, nieje možná regulácia výstupného napätia. Kôli tomuto dôvodu je zapojený za rezonančným meničom ďalší znižujúci menič na ktorého výstupe je spomínané napätie 24V. Celý zdroj je osadený na doske plošných spojov v prevedení SMD. Po vyhotovení a oživení tohoto napájacieho zdroja je v závere realizovaná záťažová skúška.

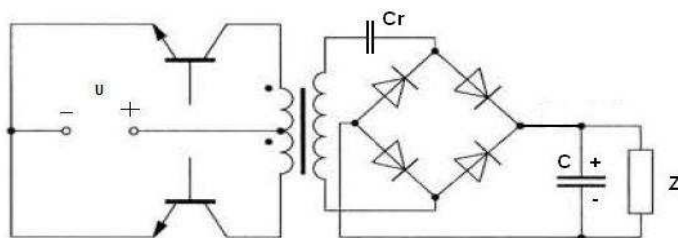
## 2.2 Základný popis obvodu

Nasledujúci menič na obr. 2.1 je vyhotovený ako dvojčinný pulzný menič doplnený o rezonančný menič na výstupe. Jedná sa o menič s transformátorom s dvomi spínacími prvkami, ktoré sa v činnosti spínania striedajú. Budiace impulzy pre spínače sú oddelené bezpečnostnými intervalmi. Oddelenie je nutné z hľadiska zotavovacích dôb spínacích prvkov. Zabráňuje sa tým krátkodobému skratovaniu transformátoru a tým zhoršeniu jeho činnosti.



Obr. 2.1 Push – Pull menič s tvrdým spínaním, bez rezonancie

Meniče s dvojčinnými transformátormi dosahujú najvyšších výkonov. Transformátor pre dvojčinný menič pozostáva z dvoch impulzných transformátorov navinutých na jednom jadre, ktoré sa v činnosti striedajú. Tento menič je vyhotovený s konštantnou striedou, teda s konštantným výstupným napätím na sekundárnej strane transformátora. Teda buďenie spínacích prvkov je realizované s konštantnou striedou. Zdroj pracuje bez regulácie kľí potrebnej rezonancii na sekundárnej strane transformátora. Výstup transformátora je doplnený o sériový rezonančný obvod tvorený kondenzátorom  $C_R$  a indukčnosťou vinutia transformátora.



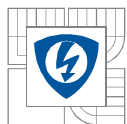
Obr. 2.2 Push-Pull menič so sériovou rezonanciou

Základným prvkom zdrojov typu Push-pull je symetrické primárne vinutie transformátora. Každá polovica vinutia primára podľa obr. 2.2 je buďená jedným spínačom. Toto usporiadanie vedie k tomu, že je odstránená jednosmerná zložka syťenia transformátora. Výhoda dvojčinného meniča je, že dochádza k dvojnásobnému syťeniu transformátora – magnetická indukcia sa môže pohybovať v rozmedzí  $-B_{\max}$  až  $+B_{\max}$ , a tým pádom polovičného počtu závitov primárneho vinutia.

Vďaka tomu je možné prenášať vyšší výkon pri použití silnejších vodičov. Napájacie napätie na vstupe meniča je striedavo pripájané raz na jedno a raz na druhé primárne vinutie transformátora.

### 2.2.1 Popis IO obvodu

Hlavným obvodom je monolitický široko pulzný regulátor s dvoma výstupmi pre spínacie tranzistory - SG3525N. Obvod je využitý pre spínanie oboch tranzistorov pre spínaný zdroj Push-Pull. Tento integrovaný obvod spolu s tranzistormi pracuje v uvedenej schéme s konštantnou frekvenciou 120 kHz a tým aj konštantnou striedou. Schéma zapojenia obvodu vychádza



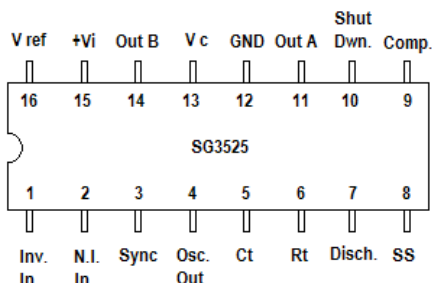
z katalógového zapojenia obvodu. Ocsilátor je nastavený vonkajšími prvkami  $R_T$  a  $C_T$  na konštantnú frekvenciu. Obvod má funkciu pomalého zapínania, ktorá je realizovaná nabíjaním externého kondenzátora. Ten sa pripája na vývod IO označeného ako SS- Soft Start.

#### Charakteristika obvodu [6]:

- Napájacie napätie 8-35V
- Referenčné napätie 5,1V(+/- 1%)
- Frekvencia oscilátora 100Hz-500Khz
- Interný soft štart
- Dvojité výstup, vhodný pre ovládanie Mosfet tranzistorov

#### Značenie vývodov IO:

Obvod je v púzdre DIP16 v klasickom prevedení



Obr. 2.3: Prevedenie púzdra a označenie vývodov obvodu SG3525N

### 2.2.2 Nastavenie frekvencie oscilátora

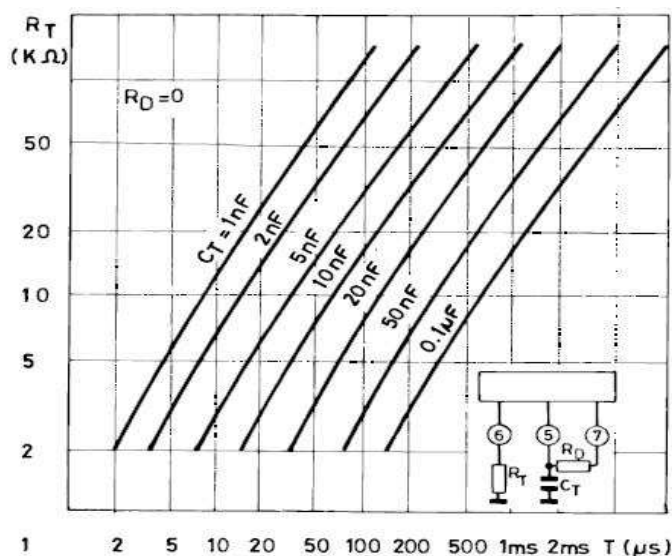
Frekvenciu oscilátora v obvode je možné nastaviť dvoma obvodovými prvkami R a C. Tie sa pripájajú na vývody označené na obr. 2.3  $R_T$  a  $C_T$ . Ich hodnoty je možné vypočítať pomocou vzorcov alebo „narýchlo“ zvoliť z priebehov kapacity a hodnoty odporu v závislosti na perióde. V druhej možnosti je možné priamo odčítať frekvenciu z grafu pri priamej voľbe časovacieho kondenzátora  $C_T$  a odporu  $R_T$ . Ďalšou možnosťou je vypočítať hodnoty oboch súčiastok pri zvolenej frekvencii podľa nasledujúceho vzorca [6]:

$$f = \frac{1}{C_T \cdot (0,7R_T + 3R_D)} \quad (2.1)$$

Keďže frekvencia oscilátora je nastavená na hodnotu 120 kHz, z rovnice 2.1 tak tomu odpovedajú hodnoty:  $R_T=2,5 \text{ k}\Omega$ ,  $C_T=2,2 \text{ nF}$

Rezistor  $R_T$  je zložený z paralelnej kombinácie dvoch odporov a to 4,7 k $\Omega$  a 6,6 k $\Omega$ . Nasledujúci graf zobrazuje určenie frekvencie oscilátora pri vynechanom odpore  $R_D$ . V našom zapojení sa tento rezistor nenachádza.

Určenie z priebehov:



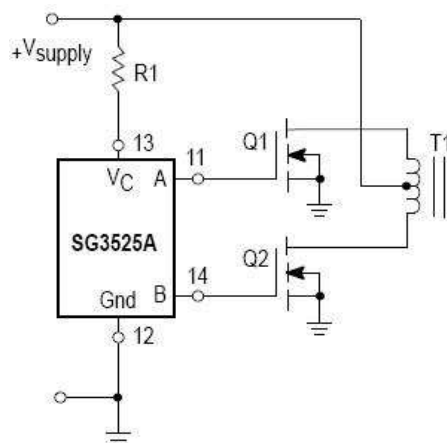
Obr. 2.4: Grafické určenie kmitočtu oscilátoru[6]

### 2.2.3 Nastavenie výstupného napätia rezonančného meniča

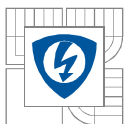
Obvod je možné zapojiť so spätnou väzbou, ktorá udržiava konštantné napätie na výstupe meniča. V schéme je spätná väzba nastavená prvkami  $R_1$  a  $R_2$ . Odporový delič tvorený týmito prvkami je napájaný zo zdroja referenčného napätia 5V. Výstup odporového deliča, je vyvedený na neinvertujúci vstup operačného zosilňovača vnútri obvodu. Spätná väzba z výstupu meniča nieje zavedená a tak veľkosť výstupného napätia na sekundárnej strane je závislá od napájacieho napätia a prevodu transformátoru. Menič tak pracuje s konštantnou striedou.

## 2.3 Popis zapojenia obvodu

Regulátor je nastavený na pevnú hodnotu výstupného napätia prvkami  $R_1$  a  $R_2$ . Kondenzátor  $C_2$  slúži na pomalý nábeh obvodu po zapnutí. Jeho vyskratovaním je možné obvod vypnúť, čím sme vyriešili výpínanie obvodu. Kondenzátory  $C_3, C_4, C_5$  sú blokovacie a takisto aj kondenzátory  $C_6-C_{11}$ .



Obr. 2.5: Základné zapojenie PUSH PULL zdroja s obvodom SG3525[6]



Oba výstupy z IO spínajú so zadanou frekvenciou koncové výkonové mosfet tranzistory. Ich spínanie sa strieda, čiže jednu dobu je zopnutý jeden spínač a po určitej časovej prodleve potrebnej k zotaveniu prechodu tranzistora a tým aj zabráneniu skratu transformátora je zopnutý druhý spínač. V obvode je k báze tranzistorov zapojený hradlový rezistor spolu s vybíjajúcim rezistorom. Ako koncové tranzistory sú použité výkonové N- mosfet tranzistory v prevedení D2PAK.

Označenie: 3N6025

**Parametre:**

$$V_{DSS}=100V$$

$$R_{DS(on)}= <0,077\Omega$$

$$I_D=22A$$

### 2.3.1 Ďiaľkové vypínanie zdroja

Vypínanie obvodu je riešené pomocou optočlenu, ktorý skratuje spúšťací kondenzátor  $C_2$  na zem a tým vypína obvod SG3525N. Zdroj vypína takzvané na svetlo, teda pripojením napájacieho napätia na vstup optočlenu. Použitý optočlen je klasického typu dióda - fototranzistor s označením PC817. Týmto je umožnené diaľkovo vypínať zdroj v prípade nejakej poruchy v inštalácii automobilu.

### 2.4 Návrh transformátora

Pre určenie počtu závitov primárneho vinutia transformátora použijeme nasledovný vzťah:

$$N_1 = \frac{U_1 \cdot t_{zap}}{2 \cdot B_{max} \cdot S_{fe}} \quad (2.2)$$

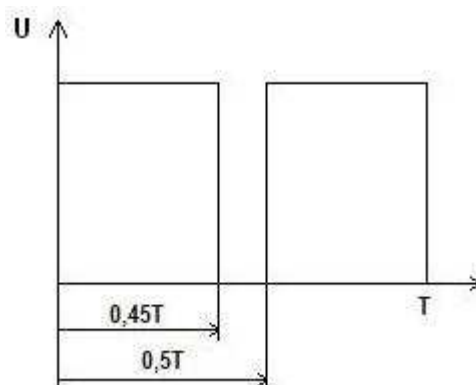
Kde  $U_1$  - vstupné napätie

$t_{zap}$  – doba zopnutia spínacieho prvku

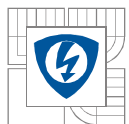
$B_{max}$  – maximálna hodnota sýtenia magnetického obvodu (jadra) transformátora

$S_{fe}$  – prierez magnetického odvodu transformátora

Pre výpočet je potrebné poznať dobu zapnutia spínacieho prvku.



Obr. 2.6: Pribeh spínania tranzistorov



Každý z tranzistorov je zopnutý 0,45T doby periódy. Ďalej nasleduje čas pre zotavenie do polovice periódy a potom nasleduje zopnutie druhého tranzistoru ako je vidieť z obr. 2.6.

Teda skutočná doba zapnutia je daná:

$$t_{zap} = \frac{1}{f} \cdot 0,45T \quad (2.3)$$

Pre frekvenciu 120 kHz platí:

$$\begin{aligned} t_{zap} &= \frac{1}{120000} \cdot 0,45T \\ t_{zap} &= 3,75\mu s \end{aligned} \quad (2.4)$$

Vstupné napätie uvažujeme 14,4V. Maximálna zvolená hodnota mag. indukcie pre konkrétnu aplikáciu je  $B=0,15T$ . Prierez jadra transformátora:  $S_{fe}=83,8 \cdot 10^{-6} \text{ mm}^2$

Konečný počet závitov po dosadení hodnôt:

$$N_1 = \frac{U_1 \cdot t_{zap}}{2 \cdot B_{max} \cdot S_{fe}} = \frac{14,4 \cdot 3,75e-6}{2 \cdot 0,15 \cdot 83,8e-6} = 2,15z \quad (2.5)$$

Pomocou prevodu transformátoru určíme pri minimálnom vstupnom napätí počet závitov sekundárneho vinutia z rovnice 2.5. Z vypočítaného počtu závitov sme určili nový počet závitov a to  $N_1=3z$ . Minimálne vstupné napätie na vstupe monolitického znižujúceho spínaného zdroja s obvodom LM2576HVT je minimálne 27V pri požadovanom výstupnom napätí 24V. A práve na túto hodnotu je výpočet prispôsobený:

Pri minimálnom uvažovanom vstupnom napájacom napätí 10V vychádza pomocou prevodu transformátora:

$$\begin{aligned} \frac{U1}{U2} &= \frac{N1}{N2} \\ N2 &= N1 \cdot \frac{U2}{U1} = 3 \cdot \frac{27V}{10V} = 8,1z \end{aligned}$$

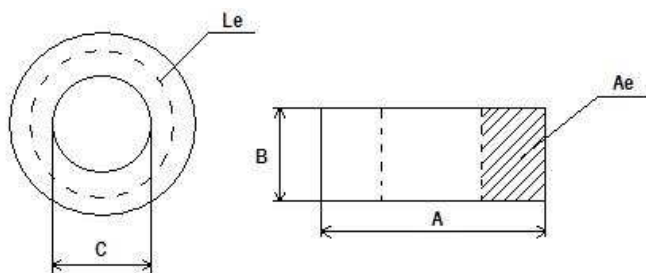
Z výsledkov vyplýva, že bude použitý transformátor, ktorý bude mať:

Primárne vinutie: 2x3 závitov

Sekundárne vinutie: 2x8 závitov

### Materiál jadra

Pre jadro bol vybraný nasledujúci materiál: **LJT2615C-CF138**. Ide o feritové jadro s nasledujúcimi rozmermi a parametrami:



Obr. 2.7: Rozmery jadra transformátoru

$L_e$  – dĺžka strednej siločiar – 60,1 mm

$A_e$  – obsah jadra toroidu – 83,8 mm<sup>2</sup>

$A$  – priemer vonkajší – 26 mm

$B$  – výška jadra – 14,5 mm

$C$  – priemer vnútorný – 15 mm

$\mu$  – magnetická vodivosť – 3650 nH

### 2.4.1 Výpočet prierezu vodičov transformátora

Keďže ja jedná o rezonančný menič, tak priebeh sekundárneho prúdu je sínusový. Pre Výpočet jednej hodnoty prúdu platí:

$$I_{str} = I_{max} \cdot \frac{1}{T} \cdot \int_0^{\pi} \sin \omega t \cdot dt \quad (2.5)$$

Po dosadení:

$$I_{str} = I_{max} \cdot \frac{1}{T} \cdot \int_0^{\pi} \sin \omega t \cdot dt = I_{max} \cdot \frac{2}{T} \cdot \frac{1}{\omega} \cdot (-\cos t)_0^{\pi} = I_{max} \cdot \frac{2}{T} \cdot \frac{1}{2 \cdot \pi \cdot f} \cdot (1+1) = I_{max} \cdot \frac{2}{\pi}$$

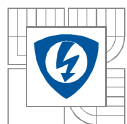
Pre výpočet ef. hodnoty prúdu potrebujeme poznať prúd maximálny a preto jeho vyjadrenie:

$$I_{max} = I_{str} \cdot \frac{\pi}{2} \cdot \frac{0,5}{0,45} \quad (2.6)$$

Zatiaľ čo strieda je 0,45 a výpočet vychádza zo striedy 0,5 tak to je zohľadnené posledným zlomkom vo výpočte. Dosadením do vzorca pre maximálnu hodnotu prúdu uvažujeme strednú hodnotu prúdu 3A, keďže výstup zdroja je na túto hodnotu navrhnutý:

$$I_{maxSEK} = I_{str} \cdot \frac{\pi}{2} \cdot \frac{0,5}{0,45} = 3 \cdot \frac{\pi}{2} \cdot \frac{0,5}{0,45} = 5,23A \quad (2.7)$$

Maximálny prúd primárnym vinutím je väčší násobkom prevodu transformátora a primárneho prúdu 2,66x:



$$I_{\max PRIM} = 13,9A$$

Efektívne hodnoty prúdov primárnych a sekundárnych vinutí sa spočítajú podľa nasledujúcich vzorcov:

$$I_{efsek} = \frac{I_{\max sek}}{\sqrt{2}} \cdot \sqrt{0,45 \cdot 2} \quad (2.8)$$

$$I_{efprim} = \frac{I_{\max prim}}{\sqrt{2}} \cdot \sqrt{0,45} \quad (2.9)$$

$$I_{efsek} = \frac{5,23}{\sqrt{2}} \cdot \sqrt{0,45 \cdot 2} = 3,5A \quad (2.10)$$

$$I_{efprim} = \frac{13,9}{\sqrt{2}} \cdot \sqrt{0,45} = 6,6A \quad (2.11)$$

## 2.4.2 Výpočet prierezu vodičov transformátora

Pre výpočet prierezu vodiča je potrebné zvoliť vhodnú prúdovú hustotu  $J$ . V našom prípade bola volená prúdová hustota  $J=4A/mm^2$ .

Pre prierez vodiča sekundárneho vinutia platí:

$$J = \frac{I_{ef}}{S} \Rightarrow S = \frac{I_{efsek}}{J} = \frac{3,5}{4} = 0,87mm^2 \quad (2.12)$$

Pre prierez vodiča primárneho vinutia platí:

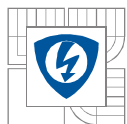
$$J = \frac{I_{ef}}{S} \Rightarrow S = \frac{I_{efprim}}{J} = \frac{6,6}{4} = 1,65mm^2$$

Hĺbka vniku sa uvažuje pri vyššej frekvencii spínania a udáva maximálny polomer vodiča, ktorý by nemal byť prekročený vzhľadom ku danej frekvencii:

$$\delta = \frac{65}{\sqrt{f}} = \frac{65}{\sqrt{120000Hz}} = 0,187mm^2 \quad (2.13)$$

A teda pre sekundár s vypočítaným obsahom drátu  $0,87 mm^2$  platí, že pri použití vodiča o priereze  $0,3mm^2$  boli použité **tri paralelné vodiče** navinuté súčasne.

Pre primárne vinutie transformátoru s vypočítaným obsahom  $1,65mm^2$  platí, že pri použití vodiča o priereze  $0,4 mm^2$  boli použité **štyri paralelné vodiče** navinuté súčasne.



Tab.2.1: Parametre transformátora

|                                     |                      |
|-------------------------------------|----------------------|
| Počet závitov primára               | 2x3                  |
| Počet závitov sekundára             | 2x8                  |
| Počet paralelných vodičov primára   | 4                    |
| Počet paralelných vodičov sekundára | 3                    |
| Celkový prierez vodiča primára      | 1,65 mm <sup>2</sup> |
| Celkový prierez vodiča sekundára    | 0,87 mm <sup>2</sup> |
| Prierez jedného vodiča primára      | 0,4 mm <sup>2</sup>  |
| Prierez jedného vodiča sekundára    | 0,3 mm <sup>2</sup>  |

## 2.5 Sekundárna strana meniča

Keďže sa jedná o spínaný rezonančný zdroj, tak na sekundárnej strane je sériovo zapojený kondenzátor spolu s vinutím transformátora, ktoré tvoria sériový rezonančný obvod. Pre výpočet hodnoty kondenzátoru je potrebné poznať indukčnosť sekundárneho vinutia pri skratovanom primárnom vinutí  $L_{2K}$ . Kapacita kondenzátoru sa spočíta podľa vzorca[2]:

$$Cr = \left(\frac{t_{zap}}{\pi}\right)^2 \cdot \frac{1}{L_{2K}} \quad (2.14)$$

Pričom skutočná doba zapnutia pri frekvencii 120 kHz je:

$$\begin{aligned} t_{zap} &= \frac{1}{120000} \cdot 0,45T \\ t_{zap} &= 3,75s \end{aligned} \quad (2.15)$$

**Meraním sa zistila indukčnosť primárneho vonutia nakrátko:  $L_{2K}=1,05\mu H$ .**

$$Cr = \left(\frac{3,75 \cdot 10^{-6}}{\pi}\right)^2 \cdot \frac{1}{1,05 \cdot 10^{-6}} = 1,3\mu F$$

Celková kapacita kondenzátoru bola poskladaná z šiestich keramických SMD kondenzátorov o hodnote 220nF.

## 3 OBVOD LM2576HVT

Jedná sa o integrovaný spínaný znižujúci zdroj s maximálnym vstupným napätím 45V s horným spínačom. Jeho výstupné napätie je regulovateľné a nastaviteľné dvoma externými rezistormi od 1.23V do 37V.

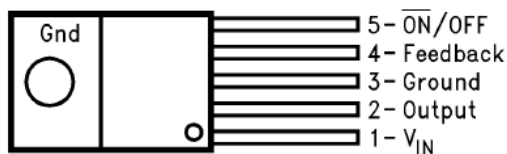
**Jeho parametre sú [10]:**

Max. vstupné napätie: 45V

Výstupné napätie regulované: od 1.23V do 37V  $\pm 4\%$

Max. výstupný prúd: 3A

Frekvencia interného oscilátora: 52 kHz



Obr. 3.1: Obvod LM2576HVT[10]

Pomocou vývodu FD- feed back (spatná väzba) podľa obr. 3.1 je nastavená hodnota výstupného napätia. Ešte pred vstupom je napätie z transformátora usmernené šotkyho diódami, a následne vyfiltrované kondenzátormi.

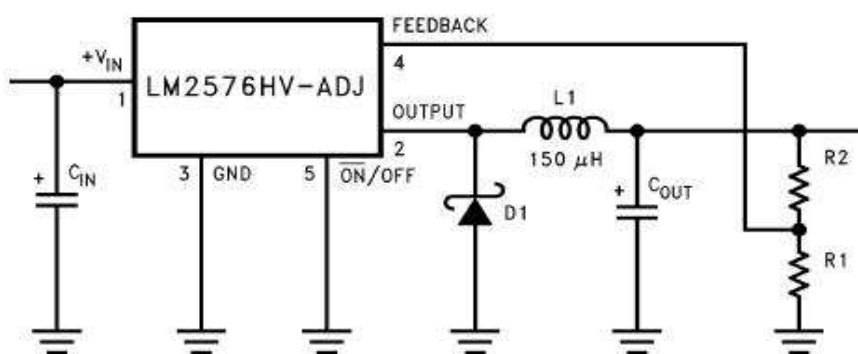
Usmerňovacie diódy sú typu: SK56C

$I=5A$ ,  $U_d=60V$

Na vstupe obvodu LM2576HVT po vyfiltrovaní a usmernení sa nachádza prepäťová ochrana tvorená transilmi bidirect (obojsmerné), ktorá je nastavená na hodnotu 52V. Funkčnými prvkami v tomto znižujúcom zdroji sú tlmivka  $L_1$  spolu s diódou  $D_1$ , ako je vidieť na schéme zapojenia na obr 3.2.

Výpočet hodnoty výstupného napätia:

$$V_{out} = V_{ref} \cdot \left(1 + \frac{R_2}{R_1}\right) \quad (2.16)$$



Obr. 3.2: Základné zapojenie obvodu LM2576HVT [10]

Referenčné napätie tohto obvodu je 1,23V. Takže pre požadovanú hodnotu výstupného napätia 24V vyšli hodnoty rezistorov:

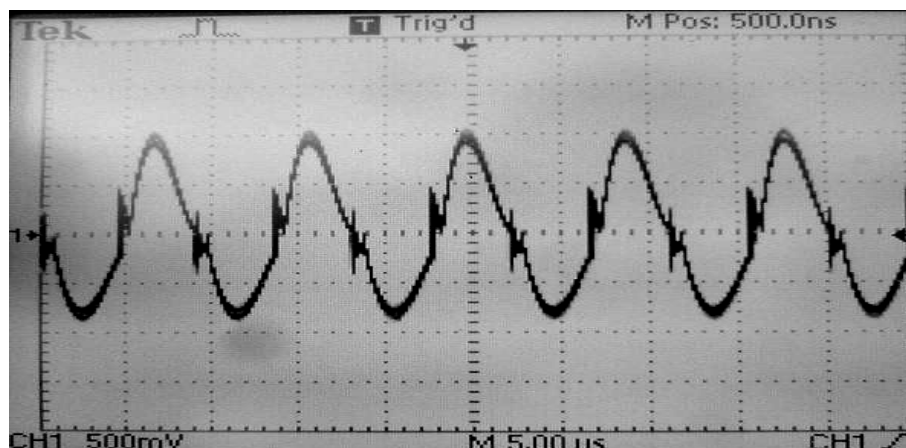
$R_1 = 1,2 \text{ k}\Omega$

$R_2 = 22 \text{ k}\Omega$

Tlmivka je vyhotovená zo železoprachového jadra o hodnote indukčnosti  $L=150\mu H$  a na prúd 4A. Výstup je doplnený o filtračné kondenzátory a to v každej vetve o hodnote  $2 \times 1000\mu F$  a  $2 \times 220\mu F$ , ďalej dve vyhladzovacie SMD tlmivky o hodnote  $10 \mu H$  v každej vetve 24V. Funkcia výstupu je indikovaná zelenou LED diódou.

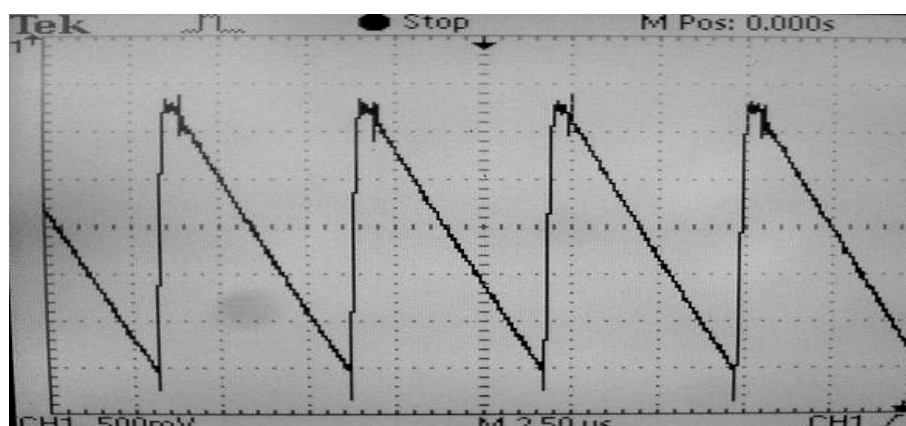
### 3.1 Meranie prevedené na zdroji

Na spínanom zdroji boli pre prehľadnosť namerané priebehy pomocou osciloskopu. Nasledujúci obrázok prezentuje priebeh prúdu vyladeným sériovým rezonančným obvodom. Z obrázku je vidieť, že výsledný priebeh prúdu sa blíži sínusovému priebehu. Kondenzátor „usekáva“ prúd pri prechode nulou.

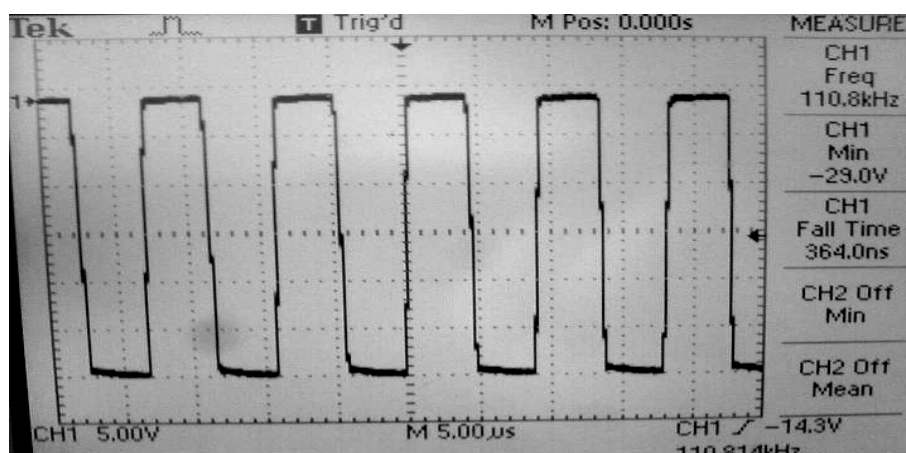


Obr. 3.3: Priebeh prúdu sekundárnym vinutím transformátora

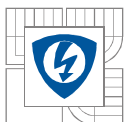
Keďže ide o PWM reguláciu, tak nasledujúci obrázok zobrazuje pílovitý priebeh oscilátora obvodu:



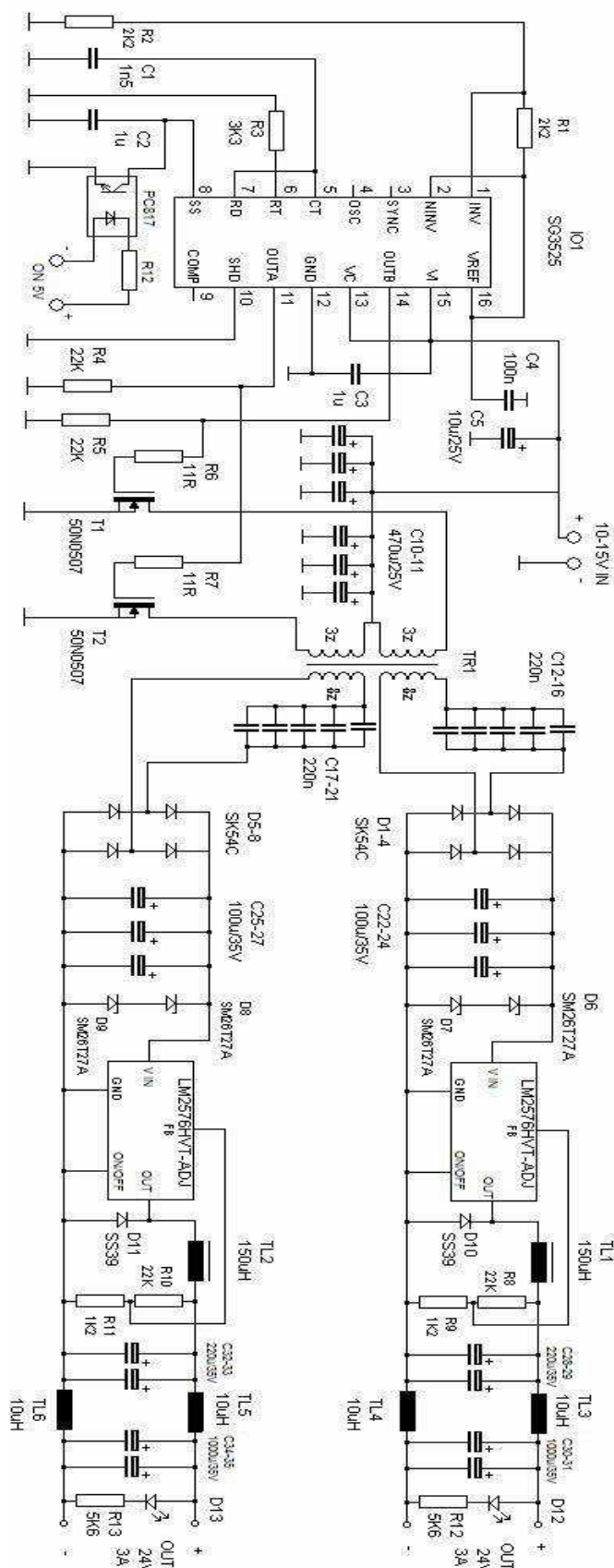
Obr. 3.4: Pílovitý priebeh oscilátoru

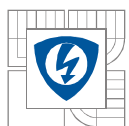


Obr. 3.5: Priebeh napätia medzi kolektorom a emitorom tranzistora (spínanie)



### 3.2 Celková schéma zapojenia meniča





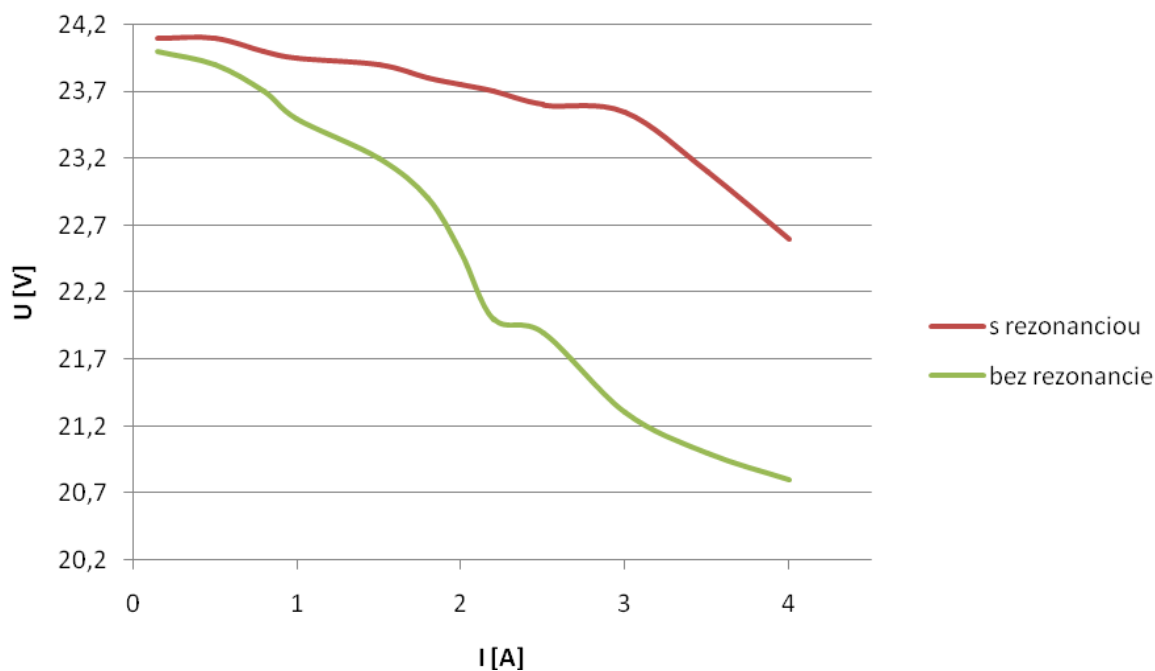
### 3.3 Zat'azovacia skúška

Po zhotovení a následnom oživení napájacieho zdroja boli zmerané zat'azovacie charakteristiky meniča. Prvé meranie pre porovnanie bolo uskutočnené s rezonančným kondenzátorom, druhé meranie bez rezonancie.

Tab. 2.2: Porovnanie meniča s rezonanciou a bez rezonancie v sekundárnej strane

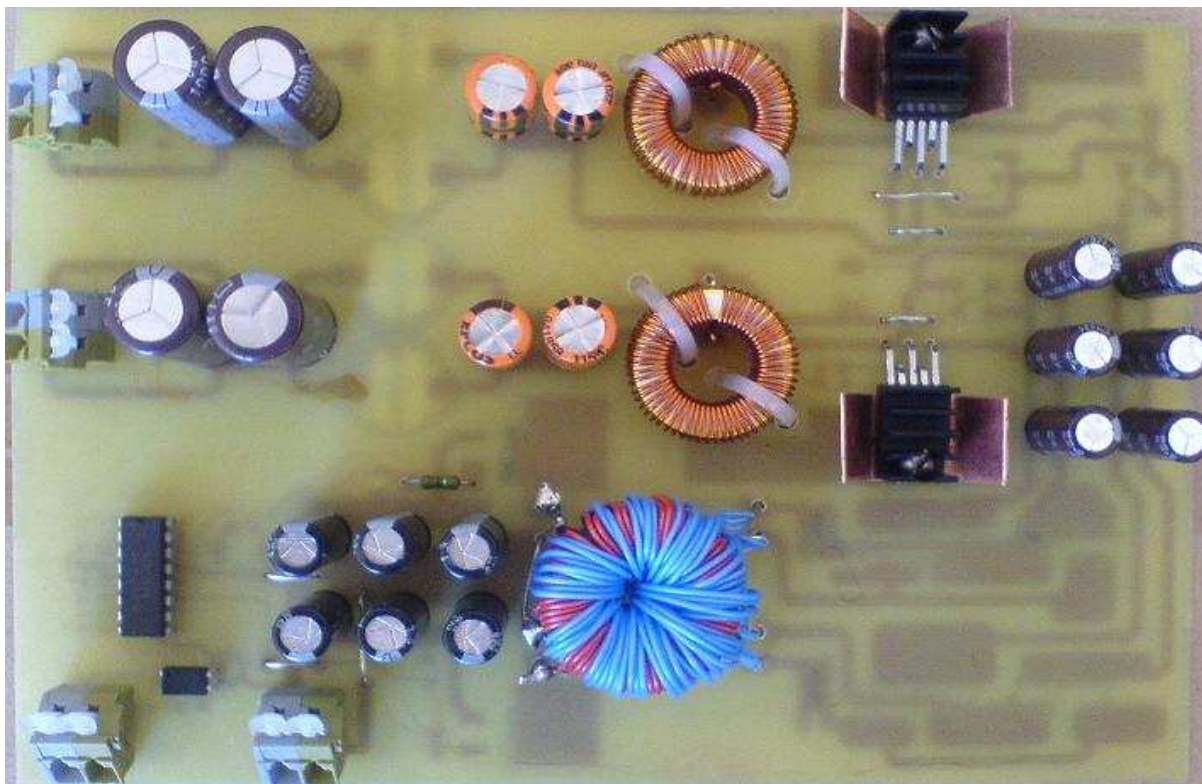
| Výstupný prúd<br>[A] | Výstupné napätie<br>[V]<br>S rezonanciou | Výstupné napätie<br>[V]<br>Bez rezonancie |
|----------------------|------------------------------------------|-------------------------------------------|
| 0,15                 | 24,1                                     | 24                                        |
| 0,5                  | 24,1                                     | 23,9                                      |
| 0,8                  | 24                                       | 23,7                                      |
| 1                    | 23,95                                    | 23,5                                      |
| 1,5                  | 23,9                                     | 23,2                                      |
| 1,8                  | 23,8                                     | 22,9                                      |
| 2                    | 23,75                                    | 22,5                                      |
| 2,2                  | 23,7                                     | 22,0                                      |
| 2,5                  | 23,6                                     | 21,9                                      |
| 3                    | 23,55                                    | 21,3                                      |
| 3,5                  | 23,1                                     | 21                                        |
| 4                    | 22,6                                     | 20,8                                      |

#### V-A charakteristika spínaného zdroja

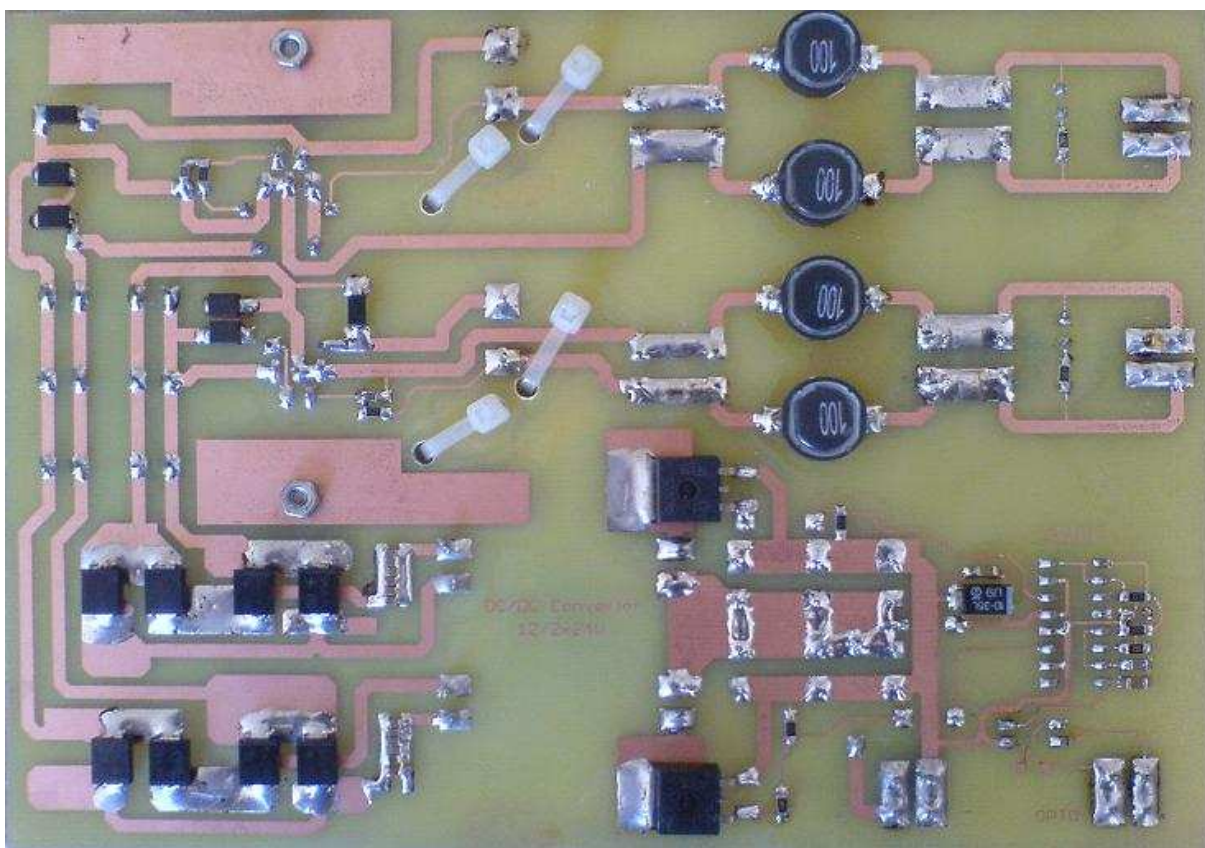


Z nameraných hodnôt je vidieť, že sériový rezonančný zdroj má tvrdší charakter ako bez rezonančného kondenzátora. Výstupné napätie pri maximálnom odbere záťaže 4A je 22,6V, čo je v tolerancii pre napájanie záťaže, ktorá pracuje od 18V.

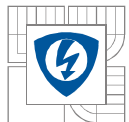
### 3.4 Vyhotovenie meniča



Obr. 3.6: Doska plošných spojov, strana konektorov



Obr. 3.7: Doska plošných spojov, strana SMD súčiastok



## 4 RÝCHLONABÍJAČKA PRE TRAKČNÝ AKUMULÁTOR A BUDIČE VÝKONOVÝCH TRANZISTOROV

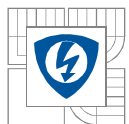
### 4.1 Úvod

V ďalšej úlohe diplomovej práce som sa zaoberal rýchlonabíjačkou, ktorá už bola rozpracovaná v predchádzajúcej diplomovej práci. Zaoberal som sa celkovým dokončením rýchlonabíjačky a jej doladenie uvedenie do bezchybnej prevádzky. V prvej časti práce popisujem celkovú činnosť, zapojenie a realizáciu nabíjačky. V semestrálnom projekte 2 som sa zaoberal implementáciou budičov (driverov) výkonových tranzistorov firmy EUPEC EICEDRIVER, ktoré okrem galvanického oddelenia obsahovali saturačnú ochranu tranzistorov. V tejto časti rozoberiem činnosť týchto budičov, konečné zhotovenie a nastavenie ochrán a ich možnosť využitia v danej aplikácii.

Medzi hlavnú nevýhodu nabíjania akumulátorov v elektromobile patrí dĺžka nabíjania. Ďalšia časť diplomovej práce preto rieši túto problematiku. Preto bola táto nabíjačka vyvinutá na to, aby sa značne skrátila doba nabíjania akumulátorov. Výhoda dnešných akumulátorov (lion) je možnosť nabíjania vysokým prúdom, pričom sa ich doba nabíjania výrazne skráti. Štandardné nabíjanie nízkym prúdom trvá okolo 2 hodín. Táto nabíjačka disponuje nabíjacím prúdom 100A pri ktorom sa nabíjanie akumulátorov skráti na asi 30minút.

V práci som sa venoval celkovému vyladeniu tejto rýchlonabíjačky, veľký dôraz bol kladený na celkovú koncepciu napäťového medziobvodu, umiestnenie výkonových tranzistorov, nulových diód, odľahčovacích obvodov a budiacich stupňov pre výkonové tranzistory. Pri oživovaní a celkovom zaťažovaní rýchlonabíjačky vznikali na tranzistoroch prekmity, ktoré mohli spôsobiť opätovné zapnutie tranzistora a tak mohlo dôjsť k celkovej havárii meniča. Ukázalo sa, že vhodnou optimalizáciou napäťového medziobvodu, tranzistorov, nulových diód, odľahčovacích obvodov tranzistorov a ich budiacich koncových stupňov došlo k zániku nebezpečných prekmitov na tranzistoroch a tak mohla byť nabíjačka zaťažená menovitým prúdom 100A.

Obr. 4.1: Silová část' rýchlónabíjačky



Keďže nabíjačka je realizovaná na trojfázovú sieť tak na jej vstupe podľa obr. 4.1 sa nachádza 6-pulzný diódový usmerňovač zložený z dvoch diódových mostíkov. Za usmerňovačom je umiestnený jednosmerný napäťový medziobvod tvorený dvomi do série spojenými kondenzátorovými batériami. Jedná batéria je tvorená 40 kusmi kondenzátormi, ktoré budú popísané v ďalšom texte. Ich konfiguráciu bude vidieť zo silovej schémy. Stredná hodnota 6 - pulzného usmerného napätia je 540V. Na oboch kondenzátorových batériách zapojených v napäťovom medziobvode je stredná hodnota napätia cca 270V. Za týmto medziobvodom sa nachádzajú dva klasické DC/DC meniče zapojené sériovo, ktorých výstupy kôli výkonu pracujú paralelne do spoločnej záťaže. Tieto DC meniče sú zapojené do série a spojené s kondenzátorovými batériami medziobvodu. Keďže celkový výkon rýchlonabíjačky je 16kW tak potom musí byť výkon každého meniča 8kW.

Výkon meniča je daný vzťahom:

$$P = U_d \cdot I_d \quad (4.1)$$

Kde  $U_d$  je stredná hodnota napätia a  $I_d$  je stredná hodnota prúdu. Po úprave získame strednú hodnotu prúdu jedného meniča:

$$P = U_d \cdot I_d \Rightarrow I_d = \frac{P}{U_d} = \frac{8 \cdot 10^3 \text{ W}}{270 \text{ V}} = 30 \text{ A}$$

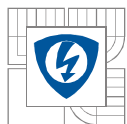
Ako spínacie prvky sú použité výkonové MOSFET tranzistory. Každý menič obsahuje dve trojice paralelne spojených MOSFET tranzistorov a to kôli veľkosti pretekajúceho prúdu. Nevýhoda MOSFET tranzistorov je však ich použitie do napäťovej hladiny 600V. V meniči sa ďalej nachádzajú dve trojice paralelne zapojených demagnetizačných diód. Tieto diódy majú na starosti demagnetizáciu jadra výkonových impulzných transformátorov  $TR_1$  a  $TR_2$  na obr.4.1. Frekvencia spínania tranzistorov je nastavená na hodnote 100 KHz.

Do série s impulznými transformátormi sú zapojené ešte aj transformátory prúdu označené v schéme ako  $PT_1$  a  $PT_2$ , ktoré snímajú skutočnú hodnotu odoberaného prúdu a slúžia ako spätná väzba pre riadiace obvody. Popis riadiacich obvodov bude popísaný v ďalšom texte. Hlavným integrovaným obvodom pre riadiace obvody je použitý UC3845 doplnený o ochrany a budiace stupne tranzistorov. Na výstupoch výkonových impulzných transformátorov sú meniče zapojené paralelne. Na každej sekundárnej strane meniča sú zapojené usmerňovacie diódy, nulové diódy a vlastné tlmičky. Usmerňovacia a nulová dióda je ztrojená, kôli vysokému pretekajúcemu prúdu. Sériová kombinácia odporu a kapacity  $R_7, C_3$  a  $R_8, C_4$  na obr. 4.1 na výstupe meniča tvorí odľahčovací obvod.

#### 4.2.2 Strana napájania, usmerňovač a jednosmerný napäťový obvod

Napájaniu z trojfázovej siete zodpovedá aj typ použitého usmerňovacieho mostíka, trojfázového 6 pulzného.

Usmerňovacie mostíky sú dva, ktoré pracujú paralelne a to kôli spomínanej veľkosti odoberaného prúdu záťažou. Efektívna hodnota združeného napätia je 400V, z toho vyplýva, že amplitúda združeného napätia bude 565V. Keďže napätie je usmerné 6 pulzným mostíkom, je možné určiť jeho strednú hodnotu ktorá je definovaná a daná:



$$U_d = U_m \cdot \frac{3}{\pi} \quad (4.2)$$

Po dosadení do rovnice (4.2):

$$U_d = U_m \cdot \frac{3}{\pi} = 565V \cdot \frac{3}{\pi} = 540V$$

Usmernené napätie je potrebné vyhladiť a usmerniť. V predchádzajúcom vývoji nabíjačky boli preskúmané možnosti akú veľkosť tlmivky a kondenzátora použiť. Pri zapojení filtračného kondenzátora v medziobvode vychádzala jeho kapacita veľmi veľká, takisto efektívna hodnota prúdu vyšla príliš vysoká. Ďalšou možnosťou bolo použitie tlmivky a kondenzátoru v medziobvode. Takisto pri tejto voľbe a výpočte vychádzala pre veľkosť tlmivky veľmi veľká, rádovo mF. Nakoniec bolo zvolené mierne netradičné riešenie. Na výstupe 6-pulzného usmerňovača bude použitý iba kondenzátor, ktorého hodnota kapacity bude dostatočne malá na to, aby sa usmernené napätie nestačilo na kapacite vyhladzovať a priebeh usmerneného napätia na kondenzátore bol totožný s priebehom 6-pulzného napätia na usmerňovači.

Následne kolísanie napätia na primárnej aj sekundárnej strane meniča vplyvom nevyhladeného napätia by malo aj plyvať na výstupné napätie rýchlonabíjačky. Zabráneniu kolísaniu napätia je vyriešené vhodným riadením výkonových tranzistorov riadiacimi obvodmi na konštantnú strednú hodnotu napätia na výstupe rýchlonabíjačky. Odoberaný sieťový prúd nebude mať pri použití takejto kapacity charakter úzkych impulzov o veľkej amplitúde. Kôli veľkej hodnote prúdu kondenzátormi sú použité svitkové kondenzátory. Pre maximálnu hodnotu kapacity kondenzátora platí:

$$C_{\max} = \frac{T \cdot I_D}{\pi \cdot U_m} \quad (4.3)$$

Kde:

$T$  – perióda napájacieho napätia (50Hz)

$I_D$  – stredná hodnota prúdu tečúca do každého meniča

$U_m$  – maximálna hodnota napätia na kondenzátore (vypočítana v predchádzajúcom texte 565V)

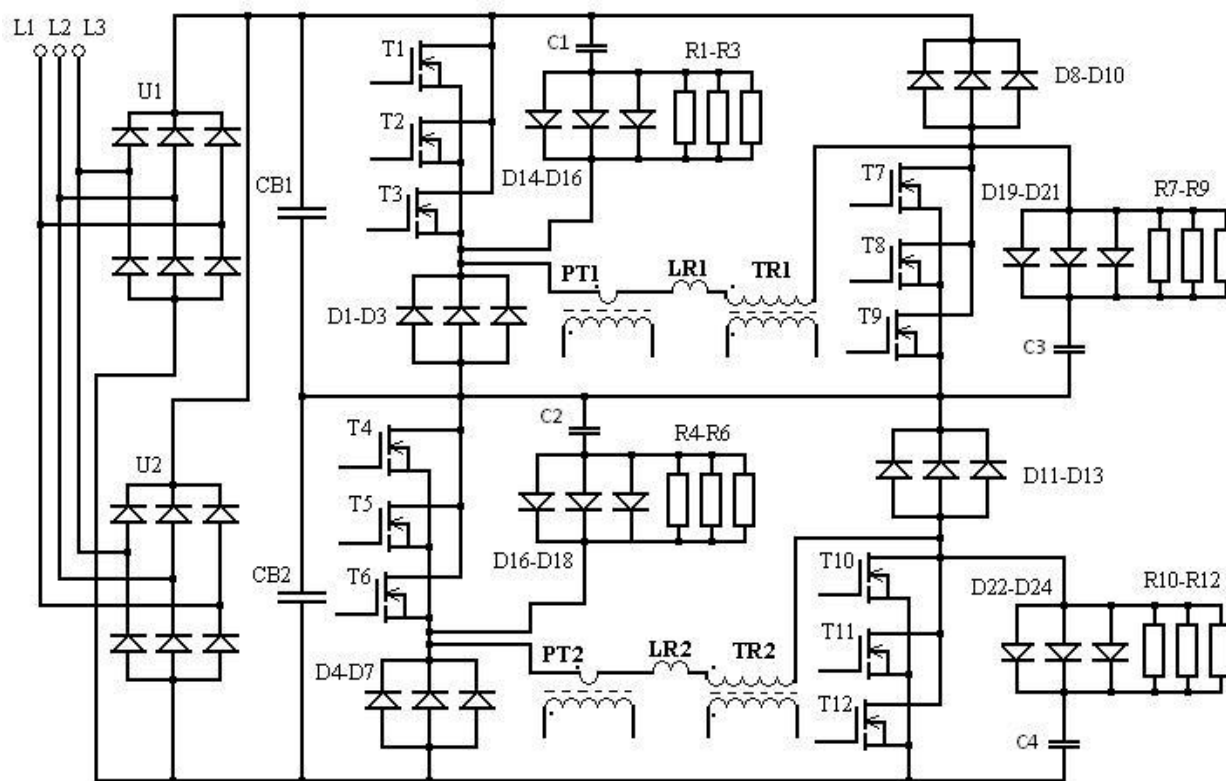
Po dosadení do horeuvedeného vzorca nám vyjde hodnota kapacity kondenzátora :

$$C_{\max} = \frac{T \cdot I_D}{\pi \cdot U_m} = \frac{0.02s \cdot 30A}{\pi \cdot 565V} = 338\mu F$$

To znamená, že v našom prípade, kde máme v schéme značené dva sériovo spojené kondenzátory, tak hodnota každého z nich nesmie prekročiť hodnotu 676 $\mu$ F. Napätie sa na tejto kapacite nestačí vyfiltrovať a jeho priebeh je zhodný s priebehom na výstupe usmerňovacích mostíkov. Ako usmerňovacie mostíky sú použité dva paralelne zapojené trojfázové mostíky typu **36MT120**. Napätie na nich môže byť až 1200V a výstupný prúd 30A každým. Na trojfázovú sieť sú teda pripojené paralelne a takisto aj ich výstupy napájajúce jednosmerný medziobvod. Pri doladňovaní samotného meniča bola vytvorená nová doska plošných spojov celého DC/DC meniča. Dva do série zapojené kondenzátory nahradili dve samostatné kondenzátorové batérie

tvorené 40 kusmi kondenzátorov. Použité sú svitkové kondenzátory a každá batéria je zapojená ku každému DC meniču samostatne. Jedná sa o kondenzátory typu EPCOS 0,47 $\mu$ F/630V, na efektívny prúd  $I_{ef}=2,4A$ .

Na jednej doske plošných spojov sa teda nachádza DC menič, kondenzátorová batéria a odľahčovacie obvody tranzistorov tvorené R,C,D členmi. Aby boli čo najviac znížené parazitné kapacity prírodných vodičov a spojov DC meniča nulových diód a výkonových tranzistorov sú nulové diódy, tranzistory a odľahčovacie obvody umiestnené na plošnom spoji čo najbližšie. Konštrukcia plošného spoja vychádza z použitia dvoch jednostranných plošných spojov priletovaných k sebe s opačnými stranami pomocou elektronických súčiastok. Táto koncepcia je podobná obojstrannému plošnému spoju. Vzhľadom na to, že ide len o skôšobnú verziu, preto bola zvolená táto koncepcia výroby plošného spoja. Namiesto prekovov sú použité samotné prírodné vodiče súčiastok a namiesto prázdnych prechodov len zväčšené diery na prejdienie prírodných vodičov elektronických súčiastok. Tieto dva plošné spoje nie sú rozoberateľné. Nasledujúci obrázok zobrazuje upravenú schému zapojenia pre medziobvod DC meniča a zapojenia jeho výkonových prvkov pre plošný spoj.

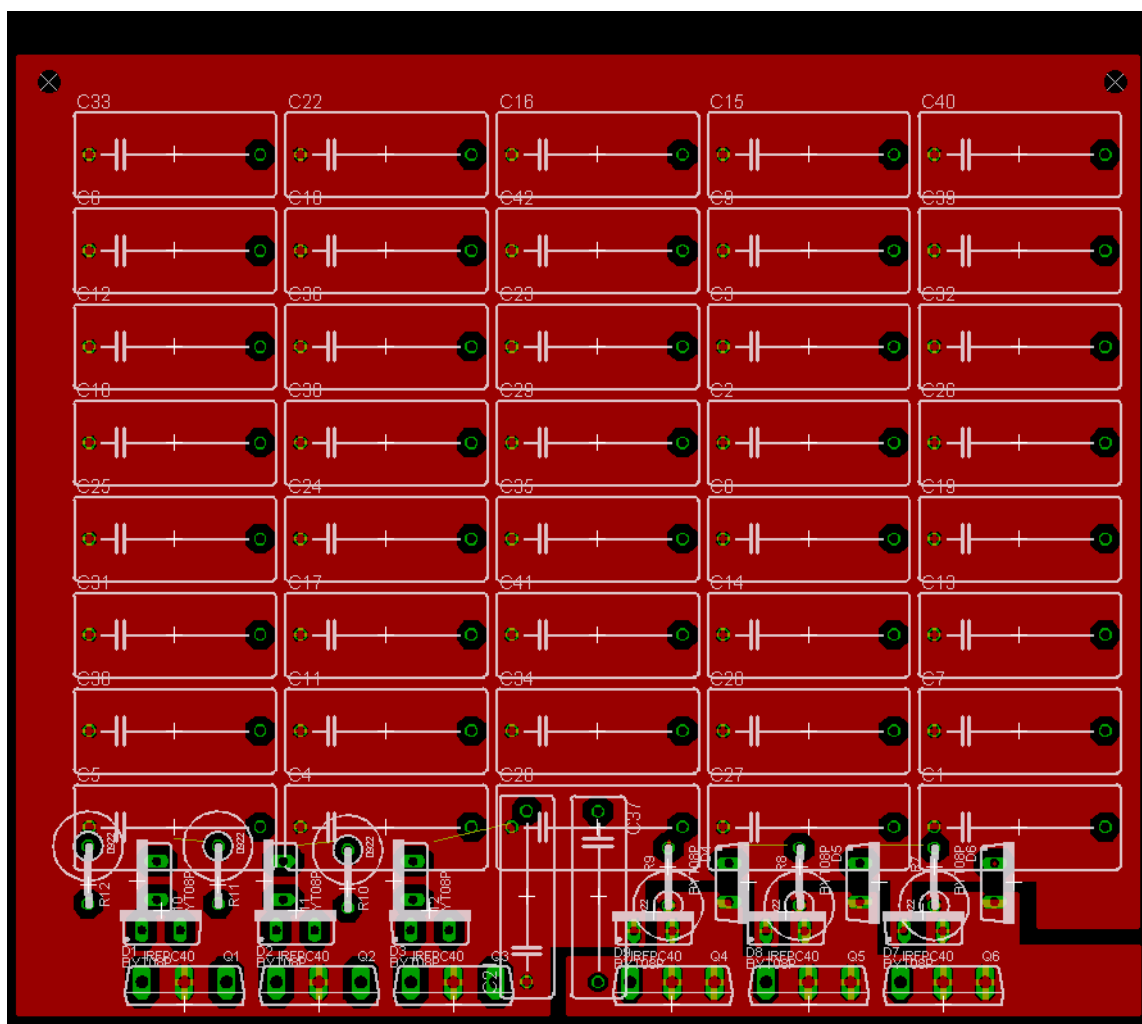


Obr. 4.2: Schéma zapojenia DC meniča s odľahčovacími obvodmi

### 4.3 DC/DC menič – popis

Hlavné zapojenie je vidieť z obr. 4.2 a tvorí ho jednočinný mostíkový priepustný menič. Napätie siete je usmernené dvomi paralelne zapojenými usmerňovacími mostíkmi U1 a U2. Za týmito mostíkmi sú zapojené dve kondenzátorové batérie CB<sub>1</sub> a CB<sub>2</sub> zapojené do série, ktoré tvoria napäťový medziobvod. Na každú kondenzátorovú batériu je zapojený DC/DC menič

tvorený dvomi trojicami tranzistorov a dvomi trojicami demagnetizačných diód. Funkčné prvky u jedného DC meniča tvoria tranzistory  $T_1-T_3$ ,  $T_7-T_9$ , diódy  $D_1-D_3$  a  $D_8-D_{10}$ . Obdobné je to aj u druhého meniča. Tranzistory sú typu MOSFET a sú zapojené paralelne. Menič ďalej obsahuje dve trojice demagnetizačných diód. Tie magnetujú a demagnetizujú jadro výkonového impulzného transformátora  $TR_1$  a  $TR_2$ . **Funkcia DC meniča sa zakladá sa súčasným spínaním všetkých tranzistorov súčasne.** Ku každému výkonovému transformátoru je zapojená prídavná rozptylová indukčnosť  $LR_1$  a  $LR_2$ , ktorej použitie bude popísané v ďalšej časti práce. Ďalej do série s transformátorom je zapojený prúdový transformátor pre snímanie prúdu prechádzajúceho každým meničom zvlášť. Paralelne ku výkonovým MOSFET tranzistorom sú zapojené pasívne odľahčovacie vypínacie odvody tvorené prvkami R, C a D. Odpor R je tvorený tromi paralelne zapojenými odpormi, dióda je taktiež tvorená tromi paralelne zapojenými diódami typu SiC IDH15S120 toho istého typu ako sú použité v celom DC meniči. Kondenzátor je použitý svitkový s kapacitou 3,3nF na 2000V. Ako bolo spomenuté, plošný spoj je vyhotovený z dvoch jednostranných dosiek plošných spojov. Nasledujúce obrázky ukazujú jeho vyhotovenie v Eagli.



Obr. 4.3: Doska plošných spojov pre kondenzátorovú batériu medziobvodu

Keďže menič pracuje tak, že sú spínané oba tranzistory v diagonále, a striedajú sa s vedením demagnetizačných diód. Preto musí byť maximálna možná strieda rovná  $s=0.5$ . Strieda je definovaná podielom doby zapnutia výkonového prvku k celej periode:

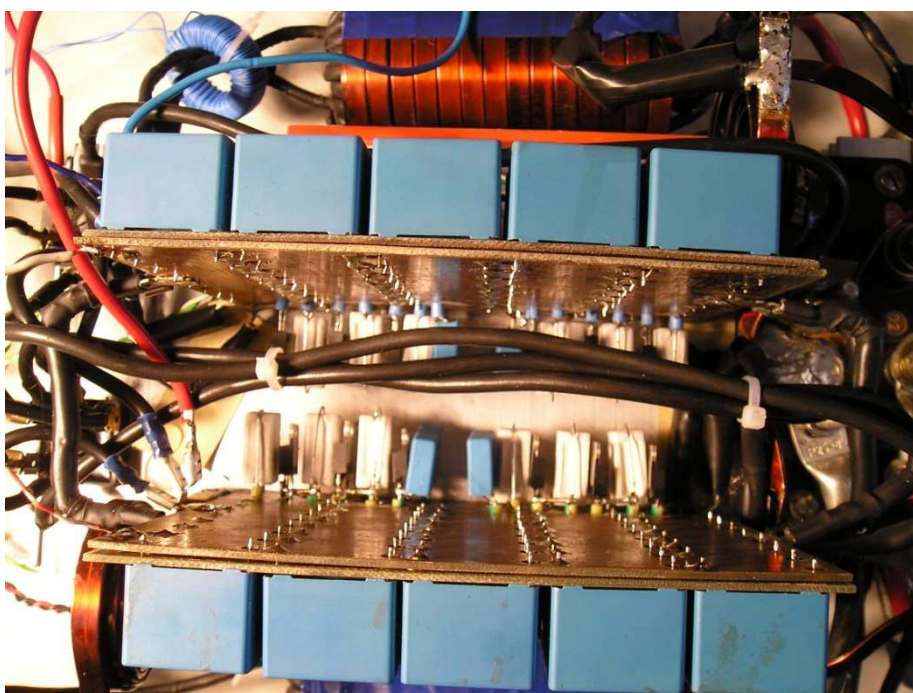
$$s = \frac{1}{T} \quad (4.4)$$

Kde:  $t_1$  – doba zopnutia

$T$  – perioda

Maximálna doba zopnutia tranzistora nesmie prekročiť  $T/2$ . Pri nedoržaní tohto pravidla by došlo k nekontrolovateľnému presýteniu transformátora. Zopnutie tranzistora znamená pre impulzný transformátor magnetizáciu jeho jadra a doba vypnutia jeho demagnetovanie. Ak by bola strieda väčšia ako 0.5 tak by sa transformátor nestačil demagnetovať, teda demagnetizačný prúd by nestihol klesnúť k nule a došlo by k rastu magnetizačného prúdu v každom cykle nadovšetky medze.

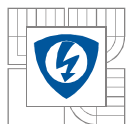
Ďalším faktorom ovplyvňujúcu veľkosť striedy sú parazitné kapacity výkonových tranzistorov. Táto parazitná kapacita sa nachádza medzi kolektorom a emitorom tranzistora. Čím vyšší bude magnetizačný prúd tým rýchlejšie bude nabitá táto kapacita a tým sa môže zvýšiť aj strieda. Táto kapacita je samozrejme nabíjaná magnetizačným prúdom pri vypnutom tranzistore až do doby ak nedosiahne napätie na tejto kapacite vstupného napájacieho napätia. Demagnetizácia začína v okamihu, keď sú tieto parazitné kapacity nabité na polovicu napätia. V tom okamihu preberajú činnosť demagnetizačné diódy a prúd nimi tečie späť do zdroja a zároveň sa jadro impulzného transformátoru cez ne demagnetuje. V praxi však nieje možné dosiahnuť striedu zuvedených príčin  $s=0.5$ . Preto bola zvolená strieda  $s=0.43$ .



Obr. 4.4: Vyhotovenie medziobvodu a DC meniča

#### 4.3.1 Návrh impulzného transformátora a prídavnej rozptylovej indukčnosti

Keďže celá nabíjačka je zložená z dvoch DC meničov, bolo potrebné vyhotoviť dva rovnaké impulzné transformátory. Jadro tohto impulzného transformátoru je zložené z paralelne



spojených feritových jadier. Nevýhoda feritového jadra je jeho malé sýtenie a to okolo 0,3T, pričom železné jadra môžu byť sýtené až hodnotou magnetickej indukcie 1,3T.

Keďže na primárnej strane transformátora kolíše napätie v rozsahu 245V-283V, vďaka nízkej kapacite filtračného kondenzátora tvorenej kondenzátorovú batériou CB<sub>1</sub> a CB<sub>2</sub>, pri jeho návrhu je potrebné s touto skutočnosťou počítať. To znamená, že i pri vstupnom napätí 245V a danej striede je potrebné, aby na výstupe meniča bola stredná hodnota napätia 160V.

Pre určenie potrebného počtu primárnych závitov transformátora platí vzťah:

$$N_1 = \frac{U \cdot s \cdot T}{B \cdot S} \quad (4.5)$$

Kde: s – strieda, T – perióda spínania tranzistorov, B- sýtenie jadra, S- prierez jadra transformátoru

$$\text{Po dosadení: } N_1 = \frac{U \cdot s \cdot T}{B \cdot S} = \frac{283V \cdot 0,43 \cdot 1 \cdot 10^{-5}s}{0,2T \cdot 966 \cdot 10^{-6}m^2} \cong 7 \text{ záv.}$$

A teda, počet závitov primárneho vinutia bude n<sub>1</sub>=7. Pre určenie počtu závitov sekundárneho vinutia je potrebné vziať do úvahy minimálne vstupné napätie 245V pri ktorom musí byť na sekundárnej strane približne 450V.

$$\frac{N_1}{N_2} = \frac{U_1}{U_2} \quad (4.6)$$

Po dosadení:

$$\frac{7}{N_2} = \frac{245V}{450V} \rightarrow N_2 = 12,96 \text{ záv.}$$

Ďalej pre určenie indukčnosti primárneho a sekundárneho vinutia transformátora je potrebné poznať magneticкую vodivosť materiálu jadra. Jadro transformátoru bolo použité z katalógu firmy Semic Trade s.r.o, typ **Lj T4919/CF138**. Z katalógu zistená hodnota magnetickej vodivosti je A<sub>L</sub>→Λ=3450 nH/záv.<sup>2</sup>

$$\text{Potom pre indukčnosť vinutia platí: } L = N^2 \cdot \Lambda \quad (4.8)$$

Kde N je počet závitov vinutia a Λ magneticкая vodivosť materiálu jadra. Pre hodnotu indukčnosti vinutí transformátora platí:

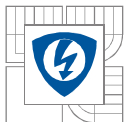
$$L_1 = N_1^2 \Lambda = 7^2 \cdot 6 \cdot 3450 \cdot 10^{-9} nH / zav^2 = 1,014 mH$$

$$L_2 = N_2^2 \Lambda = 13^2 \cdot 6 \cdot 3450 \cdot 10^{-9} nH / zav^2 = 3,498 mH$$

Pre výpočet hodnoty sýtenia jadra je potrebné najskôr určiť veľkosť časového integrálu primárneho napätia. Pre jeho určenie platí:

$$A = \max \left| \int u_1(t) dt \right| = \int_0^{t_{zap}} U_1 dt = U_1 \cdot t_{zap} \quad (4.9)$$

Kde U<sub>1</sub> je veľkosť napätia na primárnom vinutí. Preto pre výpočet maximálnej a minimálnej hodnoty tohoto integrálu je potrebné dosadiť max. a min. hodnotu napätia na primári:



$$A_{\min} = \max \left| \int u_1(t) dt \right| = \int_0^{t_{\text{zap}}} U_1 dt = U_1 \cdot t_{\text{zap}} = 245V \cdot 4,3 \cdot 10^{-6} s = 1,0535 \cdot 10^{-3} V \cdot s$$

$$A_{\max} = \max \left| \int u_1(t) dt \right| = \int_0^{t_{\text{zap}}} U_1 dt = U_1 \cdot t_{\text{zap}} = 283V \cdot 4,3 \cdot 10^{-6} s = 1,2169 \cdot 10^{-3} V \cdot s$$

Potom pre výpočet hodnoty sýtenia jadra pre vstupné napätia platí vzťah:

$$B_{\min} = \frac{A_{\min}}{N_1 \cdot S} = \frac{1,0535 \cdot 10^{-3} V \cdot s}{7 \cdot 966 \cdot 10^{-6} mm^2} = 0,16T \quad (4.10)$$

$$B_{\max} = \frac{A_{\max}}{N_1 \cdot S} = \frac{1,2169 \cdot 10^{-3} V \cdot s}{7 \cdot 966 \cdot 10^{-6} mm^2} = 0,18T$$

Pri vypočítaných hodnotach sýtenia nedôjde ku presýteniu jadra transformátora pri danom počte závitov primárneho vinutia a pri možnom napätí.

Pre výpočet veľkosti magnetizačného prúdu platí:

$$I_{\mu} = \frac{U_1 \cdot t_{\text{zap}}}{L_1} \quad (4.11)$$

Kde  $U_1$  je veľkosť primárneho napätia,  $t_{\text{zap}}$  je doba zapnutia spínacieho prvku a  $L_1$  je indukčnosť primárneho vinutia.

$$I_{\mu} = \frac{U_1 \cdot t_1}{L_1} = \frac{245V \cdot 4,3 \cdot 10^{-6} s}{1,01 \cdot 10^{-3} H} = 1,04A$$

Vzhľadom na použitú vysokú frekvenciu spínania 100 kHz je potrebné uvažovať so skin efektom vo vodičoch transformátora. Pre hĺbku vniku platí vzťah:

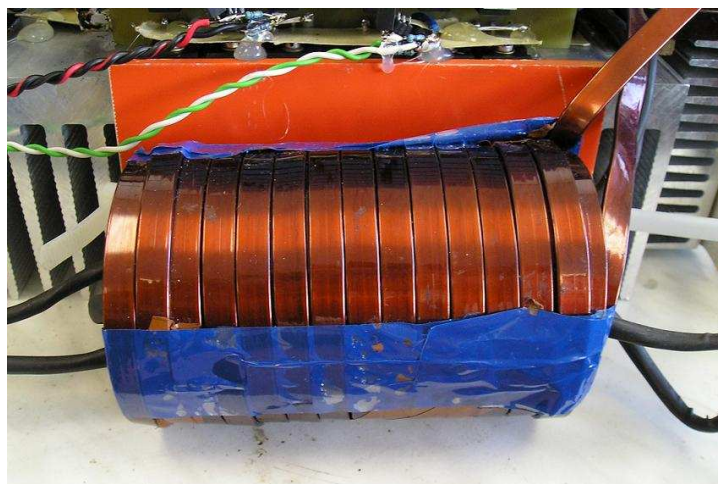
$$d = \sqrt{\frac{2 \cdot \rho}{\omega \cdot \mu}}, \text{ po úprave pre medenný vodič:} \quad (4.12)$$

$$d = \frac{0,0628}{\sqrt{f}} \quad (4.13)$$

Pre veľkosť priemeru drátu bude platiť podľa rovnice 4.13:

$$\phi = 2 \cdot d = \frac{0,0628}{\sqrt{100 \cdot 10^3}} = 0,39mm \quad (4.14)$$

Pre výrobu zväzku vodiča transformátora bol použitý vodič o priemere  $\phi = 0,45mm$ . Počet drátov vo zväzku je 55. Prúdová hustota  $J$  bola zvolená na hodnotu  $3,5A/mm^2$ . Pri konštrukcii výstupnej tlumivky na sekundárnej strane na obr. 4.5 sa použilo jadro, na ktorom je umiestnený výkonový impulzný transformátor. Takéto riešenie ušetrilo miesto a zároveň magnetické toky tlumivky a transformátoru sú na seba kolmé a teda sa vzájomne neovplyvňujú.



Obr. 4.5: Konštrukčné prevedenie impulzího transformátora a tlmivky

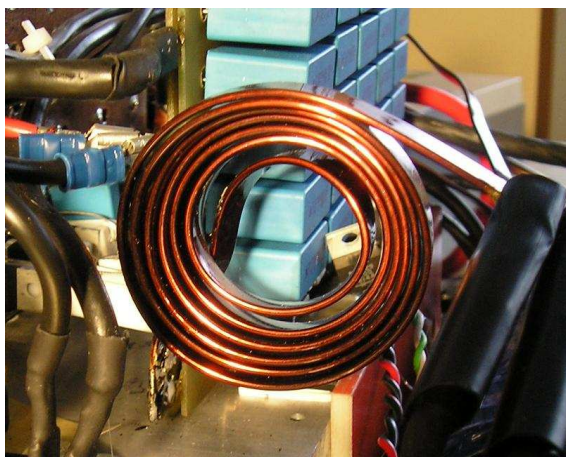
Samotný návrh transformátora je spojený s uvažovaním rozptylu transformátora. Túto rozptylovú indukčnosť je možné si predstaviť ako indukčnosť pripojenú sériovo s primárnym alebo sekundárnym vinutím. Vplyvom rozptylu transformátora je celková strieda s zmenšená. Vysvetlenie je nasledujúce: pri zopnutí tranzistorov sú usmerňovacie diódy na výstupe meniča polarizované v priepustnom smere a začína nimi prechádzať prúd. V rovnakom čase zaniká prúd nulovými diódami. Celkový priebeh prúdu je daný kirchhoffovým zákonom a výsledný prúd je daný prúdom usmerňovacích diód a nulových diód. Vďaka rozptylovej indukčnosti transformátora prúd diódami nenarastá a neklesá okamžite. Výsledkom rozptylu je teda zmenšenie striedy a tým pokles strednej hodnoty výstupného napätia.

Kôli malej rozptylovej indukčnosti impulzného transformátora vznikali na sekundárnej strane na usmerňovacích a nulových diódach veľké prekmity a nárast prúdu  $di/dt$  bol značný. Rozptylová indukčnosť transformátora bola zväčšená vzduchovou cievkou zapojenou do série ku primárnemu vinutiu transformátora. Jedná sa o cievky  $LR_1$  a  $LR_2$  na obr. 4.2.

Pri výpočtoch bolo uvažované, že strieda sa zmenší na hodnotu  $s=0,36$  a teda pri spínaní tranzistorov s frekvenciou 100kHz sa skráti aj doba zapnutia tranzistora o  $0,7\mu s$ . Pre veľkosť rozptylovej indukčnosti platí:

$$L_r = \frac{U \cdot \Delta t}{\Delta I} = \frac{450V \cdot 0,7 \cdot 10^{-6} s}{50A} = 6,3 \cdot 10^{-6} H \quad (4.15)$$

Po realizácii transformátora bolo zistené, že rozptylová indukčnosť vypočítaná podľa rovnice 4.15 prepočítaná na sekundárnu stranu bola len  $L_r=3,3\mu H$ . Kôli takejto malej rozptylovej indukčnosti sú namáhané nárastom a zánikom prúdu  $di/dt$  usmerňovacie a nulové diódy na sekundárnej strane meniča. Vzhľadom na parazitné indukčnosti by vznikali na týchto diódach veľké prekmity prúdu a mohli by ich zničiť. Preto sa musela táto rozptylová indukčnosť umelo zvýšiť pridaním do série s primárnym vinutím transformátora indukčnosť  $LR_1$  a  $LR_2$ .



Obr. 4.6: Prevedenie prídavnej rozptylovej indukčnosti

Táto indukčnosť na obr. 4.6 je vyrobená z pásoviny, má 6 závitov a jej indukčnosť je  $L=1,6\mu\text{H}$ . Výhodou pripojenia tejto cievky k primárnemu vinutiu a nie ku sekundárnemu vinutiu transformátoru je, že táto rozptylová indukčnosť sa prepočítava s prevodom na sekundárnu stranu podľa vzťahu:

$$L_{r\text{celk}} = p^2 \cdot L + L_r \quad (4.16)$$

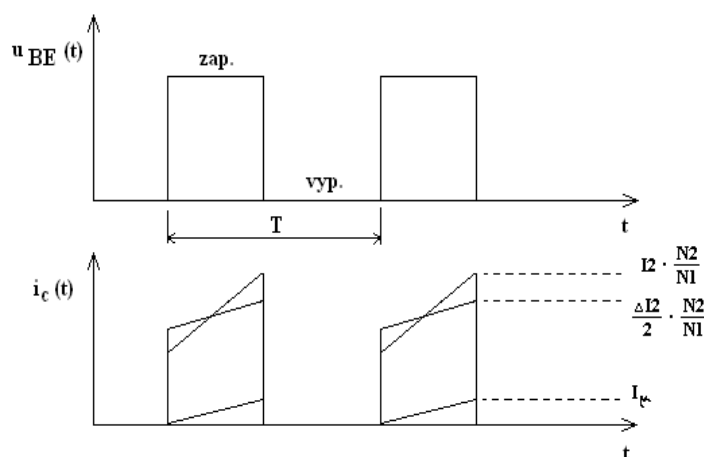
Po dosadení:

$$L_{r2} = p^2 \cdot L + L'_{r2} = \left(\frac{13}{7}\right)^2 \cdot 1,6 \cdot 10^{-6} \text{ H} + 3,3 \cdot 10^{-6} \text{ H} = 8,8 \cdot 10^{-6} \text{ H}$$

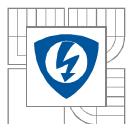
Rozptylová indukčnosť prepočítaná na sekundárnu stranu má teda:  $L_r = 8,8\mu\text{H}$ .

### 4.3.2 Dimenzovanie diód a tranzistorov meniča

Pôvodne bolo plánované použiť IGBT tranzistory, ale vzhľadom na ich rýchlosť boli nakoniec použité MOSFET tranzistory na maximálne naätie 600V. Dimenzované sú na maximálny prúd pretekajúci prechodom C-E a na maximálne napätie na tomto prechode. Pre určenie maximálneho pretekajúceho prúdu prechodom C-E je potrebné poznať jeho priebeh a zvlnenie.



Obr. 4.7: Priebeh prúdu a napätia na tranzistore



Ako je vidieť z obr. 4.7, tak výsledný priebeh prúdu je zložený z prúdu výstupného a z prúdu magnetizačného prepočítaného prevodom na primár. Zvlnenie prúdu je zvolené na 5A. Pre maximálny prúd, ktorý tečie tranzistorom platí:

$$I_{C\max} = I_2 \cdot \frac{N_2}{N_1} + \frac{\Delta I_2}{2} \cdot \frac{N_2}{N_1} + I_\mu \quad (4.17)$$

Kde  $I_2$  je prúd sekundárnym vinutím meniča,  $N_1$  a  $N_2$  je počet vinutí primárneho a sekundárneho vinutia,  $\Delta I_2$  je zvolené zvlnenie prúdu a  $I_\mu$  je vypočítaný magnetizačný prúd transformátora.

Po dosadení do rovnice 4.17:

$$I_{C\max} = I_2 \cdot \frac{N_2}{N_1} + \frac{\Delta I_2}{2} \cdot \frac{N_2}{N_1} + I_\mu = 50A \cdot \frac{13}{7} + \frac{10A}{2} \cdot \frac{13}{7} + 1A = 103A$$

Veľkosť efektívnej hodnoty prúdu kolektorom tranzistora sa určí pomocou striedy a to:

$$I_{Cef} = I_{C\max} \cdot \sqrt{s} = 100A \cdot \sqrt{0,43} = 65A \quad (4.18)$$

Ako tranzistory boli použité CoolMOS s označením **SPW47N60CFD**. Ich parametre sú nasledovné:

$$V_{DS}=600V, R_{DSon}=0,083\Omega, I_D=46A, t_{on}=60ns, t_{off}=115ns.$$

Straty vedením je možné určiť pri známom  $R_{DSon}$  a  $I_{Cef}$ :

$$\Delta P_{ved} = R_{DS(on)} \cdot I_{ef}^2 \quad (4.19)$$

Pre straty troch paralelne zapojených tranzistorov je nutné určiť paralelný odpor troch tranzistorov s  $R_{DSon}=0,083\Omega$  a ten je  $R_{DSon3}=0,0277\Omega$ :

$$\Delta P_{ved} = R_{DSon3} \cdot I_{ef}^2 = 0,0277\Omega \cdot (65A)^2 \cong 100W$$

Straty prepínacie je možné určiť z doby zapnutia a vypnutia tranzistoru  $t_{on}$  a  $t_{off}$ , napätia na prechode C-E, jeho prúdu a frekvencii spínania  $f$ . Po dosadení:

$$\Delta P_{prep} = \frac{(t_{on} + t_{off}) \cdot u_{ce} \cdot i_c}{2} \cdot f = \frac{175 \cdot 10^{-9}s \cdot 264V \cdot 100A}{2} \cdot 100 \cdot 10^3 Hz \cong 231W$$

Keďže v zapojení sú použité dva sériovo spojené meniče a teda štyri trojice tranzistorov, tak celkové straty v meničoch budú:

$$\Delta P_{celk} = 4 \cdot (231W + 100W) = 1324W \quad (4.20)$$

Vzhľadom na výšku strát bolo potrebné použiť výkonný chladič.

### 4.3.3 Demagnetizačné diódy meniča

Tieto diódy sú dimenzované na strednú hodnotu prúdu  $I_{FAV}$  a na napätie v závernom smere  $U_{RRM}$ . Keďže sa jedná o demagnetizačné diódy, tak cez ne sa uzatvára magnetizačný prúd, ktorý tečie späť do zdroja. Preto určenie veľkosti prúdu diódami je nasledovné:

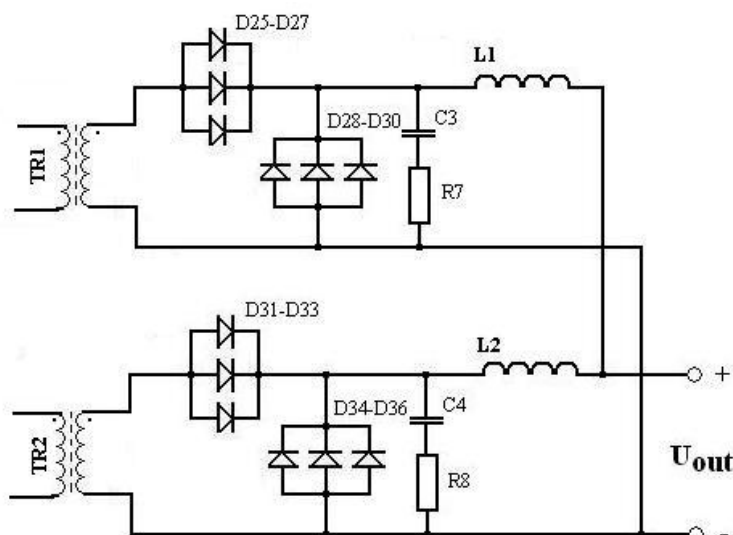
$$I_{FAV} = I_{\mu} \cdot \frac{t_{demag}}{T} \cdot \frac{1}{2} = 1A \cdot \frac{5,7 \cdot 10^{-6} s}{10 \cdot 10^{-6} s} \cdot \frac{1}{2} = 0,285 A \quad (4.21)$$

Maximálne záverné napätie je  $U_{RRM}=283V$ .

Všetky diódy v meniči boli použité rýchle diódy typu SiC s označením IDH15S120 na maximálne napätie 1200V a maximálny prúd 15A. Vzhľadom na rozptylovú indukčnosť transformátora tečie diódami krátkodobý špičkový prúd. Preto diódy v meniči sú zapojené ako trojica diód. Úbytok napätia na dióde v priepustnom smere podľa katalógu je  $V_F=1,65V$ , pri pretekajúcom prúde 0,285A bude strata na dióde len 0,47W.

#### 4.4 Sekundárna strana meniča

Táto časť pozostáva z troch výkonových SiC (karbid kremíka) usmerňovacích diód, troch nulových diód, ďalej odľahčovacieho RC člena a výstupnej tlmivky. Výstupy oboch meničov pracujú paralelne do spoločnej záťaže.



Obr. 4.8: Zapojenie sekundárnej strany meniča

Diódy sú dimenzované na strednú hodnotu prúdu, ktorý nimi preteká. V katalógu je stredná hodnota označená ako  $I_{FAV}$  a vypočíta sa nasledovne:

$$I_{FAV} = I_{výst} \cdot s_{max} = 50 A \cdot 0,43 = 21,5 A \quad (4.22)$$

kde  $I_{výst}$  je výstupný prúd meniča a  $s$  je zvolená strieda.

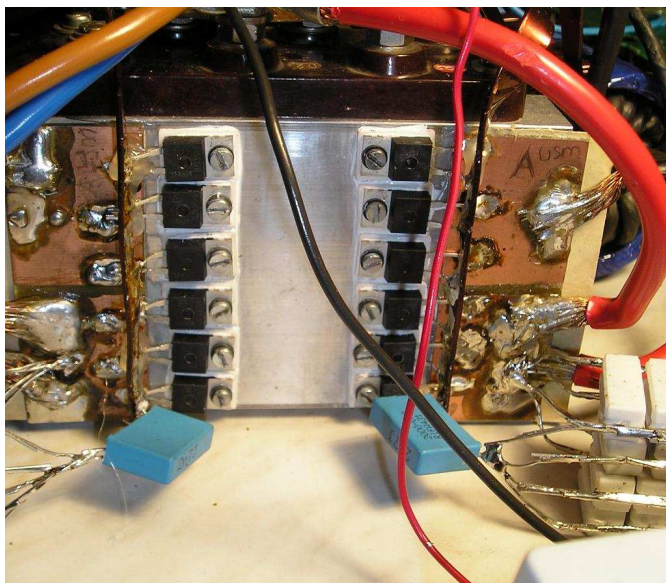
Takisto diódy musia byť dimenzované na záverné napätie, ktoré sa v meniči vyskytne a to je 520V. Diódy tejto požiadavke vyhovujú, ich záverné napätie  $U_{RRM}=1200V$ .

Nulové diódy na sekundárnej strane meniča sú dimenzované takisto na strednú hodnotu prúdu a záverné napätie, akurát v tom rozdiel, že je uvažovaná minimálna strieda  $1-s_{min}$ .

$$I_{FAV} = I_{výst} \cdot (1 - s_{min}) = 50 A$$

Kôli veľkej strmosti  $di/dt$  vznikali na nulových diódach prekmity, ktoré ich mohli zničiť. Preto sú paralelne k nulovým diódam zapojené odľahčovacie RC členy. Jedná sa o zapojenie odporu a kondenzátoru do série. Odpor je zložený z 20 kusov odporov o hodnote  $1.5 \text{ k}\Omega$  a výkone  $5\text{W}$ . Kondenzátor má celkovú kapacitu  $3\text{nF}$  tvorený dvomi kondenzátormi Vishay  $1.5\text{nF}/2000\text{V}$  typu KP/MKP 375.

Nasledujúci obrázok znázorňuje usporiadanie súčiastok sekundárnej strany, a to usmerňovacie, nulové diódy a odľahčovací obvod tvorený RC členom:



Obr. 4.9: Prevedenie sekundárnej strany DC meniča

#### 4.4.1 Výstupná tlmivka

Ako už bolo spomenuté, každý menič obsahuje vlastnú tlmivku. Tlmivky majú zhodnú indukčnosť a z toho aj zhodný počet závitov. Pri výpočte indukčnosti bolo potrebné zvoliť zvlnenie prúdu  $\Delta I$  na indukčnosti. Zvlnenie prúdu na každej tlmivke meniča bolo zvolené na  $5\text{A}$ . Pre výpočet indukčnosti platí nasledovný vzťah:

$$L = \frac{U_D}{2 \cdot f \cdot \Delta I} (1 - s) \cdot s \quad (4.23)$$

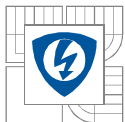
Kde  $U_D$  je maximálna hodnota napätia na sekundárnej strane meniča ( $450\text{V}$ ),  $f$  je frekvencia spínania tranzistorov,  $\Delta I$  je zvolené zvlnenie prúdu a  $s$  je strieda meniča. Po dosadení :

$$L = \frac{U_D}{2 \cdot f \cdot \Delta I} (1 - s) \cdot s = \frac{450\text{V}}{2 \cdot 100 \cdot 10^3 \text{ Hz} \cdot 5\text{A}} (1 - 0,36) \cdot 0,36 = 103 \mu\text{H}$$

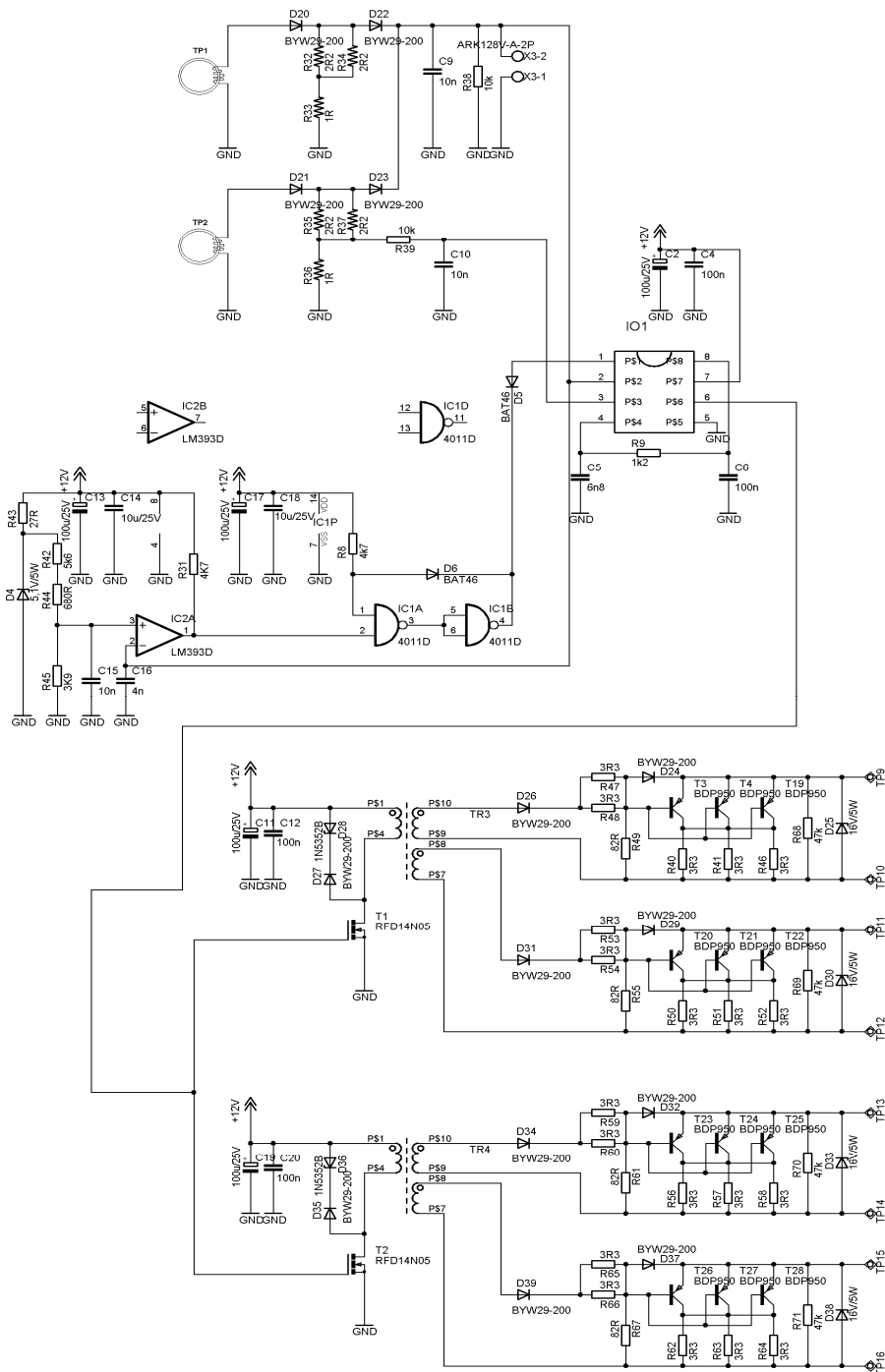
Keďže jadro transformátora a tlmivky je spoločné, tak bolo pokusom zistené, že tlmivka má mať 30 závitov pre vypočítanú indukčnosť. Ako vodič je použitá medenná pásovina o rozmeroch  $7 \times 1,5 \text{ mm}$ . Je vinutá v dvoch vrstvách na sebe a vývody sú prispájkované na výstupnú svorku a na plošný spoj s kondenzátorovou batériou.

#### 4.5 Riadiace a ochranné obvody

Hlavným obvodom, ktorý zabezpečuje PWM reguláciu je obvod UC 3485. Jedná sa o jednoduchý PWM (puzlne šírkový) regulátor s nastavením frekvencie oscilátora pomocou



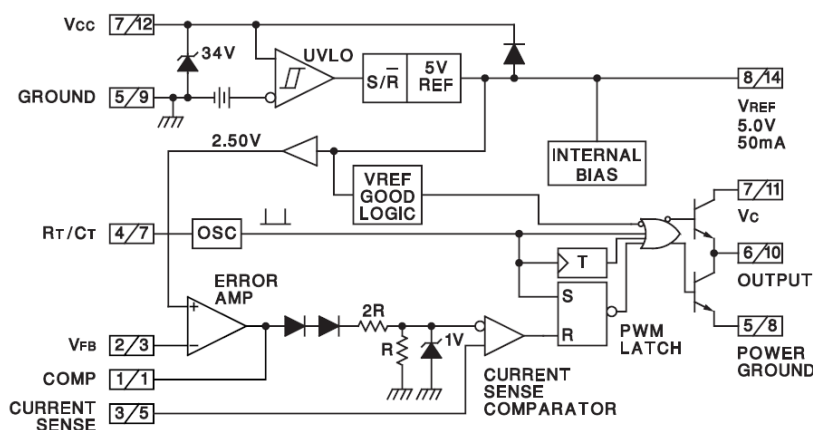
externých súčiastok. Zapojenie s týmto obvodom je jednoduché, spoľahlivé a cenovo dostupné. Jeho výstup je spojený s budiacimi tranzistormi a oddelovacími transformátormi pre budiace obvody výkonových tranzistorov. Na spomínaný obvod sú napojené ochrany proti nadprúdu a prepätiu. Spolu s PWM regulátorom sa nachádzajú na doske plošných spojov aj budiace obvody pre výkonové tranzistory. Na nasledujúcej schéme je vidieť detailné zapojenie riadiacích a budiacích obvodov:



Obr. 4.10: Riadiace a budiace obvody

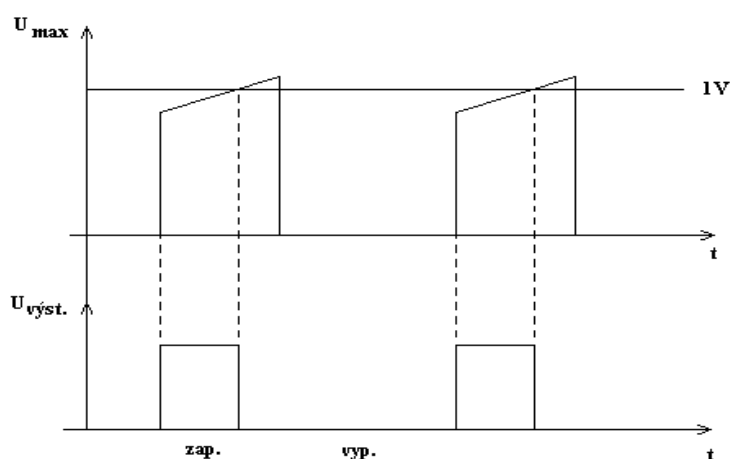
### 4.5.1 Obvod UC 3845

Celý menič je riadený jednoduchým PWM modulátorom UC 3845. Jeho vnútorná štruktúra je v celku jednoduchá. Obvod v sebe obsahuje výstup pre napäťovú reguláciu a reguláciu prúdu. Obsahuje referenčné napätie 2,5V, ktoré sa pri napäťovej regulácii porovnáva so vstupom č.2. V našom zapojení je na vstup č.2 privádzaná informácia o veľkosti prúdu z prúdových transformátorov  $PT_1$  a  $PT_2$ . Vstup číslo 2 predstavuje jeden vstup komparátoru vo vnútornom zapojení obvodu a na jeho druhý vstup je privádzané vnútorné referenčné napätie 2,5V. A teda pri prekročení úrovne 2,5V na vstupe č.2 komparátor prekllopí a nastaví sa strieda na hodnotu  $s=0$  a teda menič sa vypne. Obidva prúdové transformátory musia pracovať do nízkej záťaže. Túto záťaž tvoria rezistory pripojené sériovo paralelne k prúdovým transformátorom. Jedná sa o rezistory  $R_{32}-R_{34}$  a  $R_{35}-R_{37}$  z obr. 4.10. Na vstup č.3 obvodu, kde je meraný nadprúd pomocou odporového deliča je privádzaný tiež výstup z ďalšieho prúdového transformátora. Vstup č.3 predstavuje ďalší komparátor, tento krát s rozhodovacou úrovňou 1V. Nasledujúci obrázok predstavuje vnútorné zapojenie obvodu UC3845 a jeho komparátorov.



Obr. 4.11: Vnútorná štruktúra obvodu UC3845 [12]

Komparátor na obr. 4.11 označený ako Current Sense Comp. zaisťuje PWM moduláciu a reguláciu prúdu. Porovnáva tak skutočnú hodnotu prúdu privádzanú na vstup č.3 z prúdového transformátora so žiadanou hodnotou prúdu privádzanú na vstup č.2. Ako už bolo spomenuté, žiadaná i skutočná hodnota prúdu je prevedená na napätie ktorého maximálna hodnota je 1V a je daná vnútorným zapojením obvodu – zenerová dióda 1V.



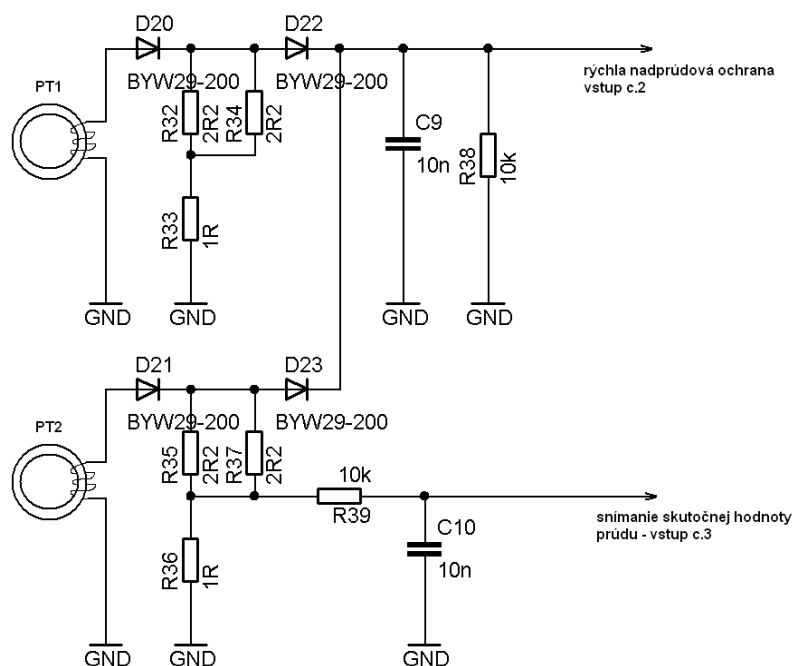
Obr. 4.12: Spôsob regulácie napätia

Keďže sa jedná o PWM reguláciu, z princípu je pílovitý priebeh výstupného napätia porovnávaný s premenlivým napätím privádzaného na vstup č.3 s maximálnou hodnotou 1V. Obrázok 4.12 zobrazuje reguláciu výstupného napätia.

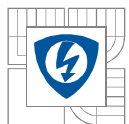
Vnútny oscilátor obvodu je nastaviteľný pomocou dvoch externých súčiastok značenými ako  $R_T$  a  $C_T$ . Na schéme sa jedná o súčiastky  $C_5$  a  $R_9$ . Hodnota nastavenej frekvencie je 100kHz. Riadiaci obvod je napájaný pomocou externého napájacieho zdroja 12V. Maximálne napájacie napätie obvodu je 34V.

#### 4.5.2 Snímanie skutočnej hodnoty prúdu

Keďže hlavné zapojenie pozostáva z dvoch paralelne pracujúcich DC/DC meničov ako je vidieť z obr. 4.1, je potrebné snímanie prúdu na každom z nich. Snímanie prúdu je realizované pomocou prúdových transformátorov zapojených do série s každým výkonovým transformátorom v meniči. Takisto so snímaním skutočného prúdu je realizovaná aj rýchla nadprúdová ochrana. Nasledujúca schéma zapojenia zobrazuje zapojenie prúdových transformátorov.



Obr. 4.13: Zapojenie prúdových transformátorov



Merací transformátor prúdu označený na obr. 4.13 ako PT predstavuje na primárnej strane jeden závit, ktorý je vlastne len jeden prevlek silovým káblom na strane primáru impulzného výkonového transformátoru. Prúdový transformátor, ako je naznačené na obr. 4.13(PT), je napájaný na primárnej strane zdrojom prúdu. Na sekundárnej strane je odoberané napätie na záťaži pretransformované z primárneho vinutia. Jadro transformátoru je magnetizované sekundárnym napätím tohoto prúdového transformátoru. Prítomnosť sekundárneho napätia zabezpečí to, že sekundárnym vinutím bude pretekať magnetizačný prúd  $i_\mu$ . Sekundárne vinutie teda predstavuje zdroj prúdu prepočítaný pomocou prevodu s označením  $i_1'$ . Pre výstupný prúd meracieho transformátora bude platiť:

$$i_2(t) = i_1'(t) - i_\mu(t)$$

Výstupný prúd je teda zmenšený o magnetizačný prúd a spôsobuje chybu merania. Túto chybu je možné odstrániť umelým zmenšením indukčnosti sekundárneho vinutia transformátoru. To sa dosiahne tým, že vinutie bude pracovať paralelne do čo najmenšieho zaťažovacieho odporu pri čo najmenšom výstupnom napätí. Pri návrhu transformátoru je potrebné brať do úvahy maximálne výstupné napätie na sekundárnej strane na záťaži  $U_{zmax}$ , ďalej maximálny snímaný prúd  $I_{1max}$  a maximálnu dobu zopnutia výkonového prvku meniča  $t_{1max}$ . Ďalšou požiadavkou je čo najmenšia chyba transformátoru a preto musí platiť:

$$I_{\mu max} \ll I_{1max}'$$

Ďalšou požiadavkou pri návrhu transformátoru je, že hodnota magnetizačného prúdu musí byť omnoho menšia než hodnota prúdu transformovaného a preto musí platiť nasledujúca nerovnosť:

$$I_{\mu max} = \frac{U_{zmax} + U_F}{L_2} \cdot t_{1max} \ll I_{1max}' \cdot \frac{N_1}{N_2} \quad (4.24)$$

V rovnici  $U_F$  je prahové napätie usmerňovacej diódy,  $U_{zmax}$  je maximálne požadované napätie na sekundári prúdového transformátoru na záťaži,  $L_2$  je indukčnosť sekundárneho vinutia,  $t_{1max}$  je maximálna doba zopnutia spínacího prvku a  $N_1$   $N_2$  je počet závitov primárneho a sekundárneho vinutia.

Po dosadení vzťahu  $L_2 = N_2^2 \cdot \Lambda$  platí:

$$N_1 \cdot N_2 \gg \frac{U_{zmax} + U_F}{I_{1max}' \cdot \Lambda} \cdot t_{1max} \quad (4.25)$$

### Charakteristika prúdového transformátora

Primárne vinutie má jeden závit tvorený paralelne dvoma vodičmi. Sekundárnym vinutím bude tiecť maximálny prúd 1A, primárnym vinutím bude tiecť maximálny prúd 103A a z toho vyplýva, že sekundárne vinutie bude mať 103 závitov. Vinutie je navinuté drátom o priemere 0,4mm. Ako usmerňovacia dióda na výstupe prúdového transformátora je použitá typu **BYW29-200** a jej prahové napätie je 0,859V. Prúdový transformátor je zapojený cez usmerňovaciu diódu a záťaž priamo na vstup obvodu UC 3845. Tento vstup je vedený na vnútorný komparátor, ktorý preklápa pri napätí 2,5V pomocou tohto referenčného napätia. A teda maximálna hodnota napätia na výstupe transformátora bola zvolená 2,1V. Použitý materiál pre jadro bol zvolený typ **LjT3813/CF138**. A teda po dosadení do rovnice (4.25):

$$1.103 \gg \frac{2,1V + 0,859V}{100A \cdot 2000 \cdot 10^{-9} H / \text{záv.}^2} \cdot 4,3 \cdot 10^{-6} s$$

Ako je vidieť z nerovnice, podmienka veľkosti magnetizačného prúdu a prúdu pretekajúceho je splnená.



Obr. 4.14: Prevedenie prúdového transformátora

Pre výstupné napätie transformátoru platí:

$$U_{z\max} = I_{1\max} \cdot \frac{N_1}{N_2} \cdot R_z \quad (4.26)$$

V rovnici (4.26)  $U_{z\max}$  znamená maximálne výstupné napätie na sekundárnom vinutí transformátora,  $I_{1\max}$  je maximálny prúd primárnym vinutím a to vodičom, ktorý tvorí jeden prevlek,  $R_z$  je zaťažovací odpor na sekundarnej strane transformátora. V našom prípade tvorí zaťažovací odpor sériovo-paralelná kombinácia odporov  $R_{33}$  až  $R_{37}$  podľa obr. 4.13. Pre veľkosť záťaže teda platí:

$$R_z = \frac{U_{z\max}}{I_{1\max}} \cdot \frac{N_2}{N_1} = \frac{2,1V}{103A} \cdot \frac{103}{1} = 2,1\Omega$$

Táto záťaž je tvorená dvomi paralelne zapojenými odpormi o hodnote  $2,2\Omega$  a k nim zapojeným sériovo  $1\Omega$  odpor. Keďže sa jedná o feritové jadro, je potrebné skontrolovať veľkosť sýtenia jadra. Feritové jadrá majú maximálne možné sýtenie okolo  $0,3T$ .

Hodnota magnetickej indukcie je daná známym vzťahom:

$$B_{\max} = \frac{(U_{z\max} + U_F) \cdot t_{1\max}}{N_2 \cdot S_{FE}} \quad (4.27)$$

Kde v rovnici 4.27  $U_{z\max}$  je maximálne napätie na výstupe transformátora,  $U_F$  je prahové napätie použitej usmerňovacej diódy na výstupe trafka,  $t_{1\max}$  je maximálna doba zopnutia spínacieho prvku a  $S_{FE}$  je prierez jadra transformátoru. Po dosadení hodnôt platí:

$$B_{\max} = \frac{(2,1V + 0,859V) \cdot 4,3 \cdot 10^{-6} s}{103,77,5 \cdot 10^{-6} m^2} = 0,002T$$

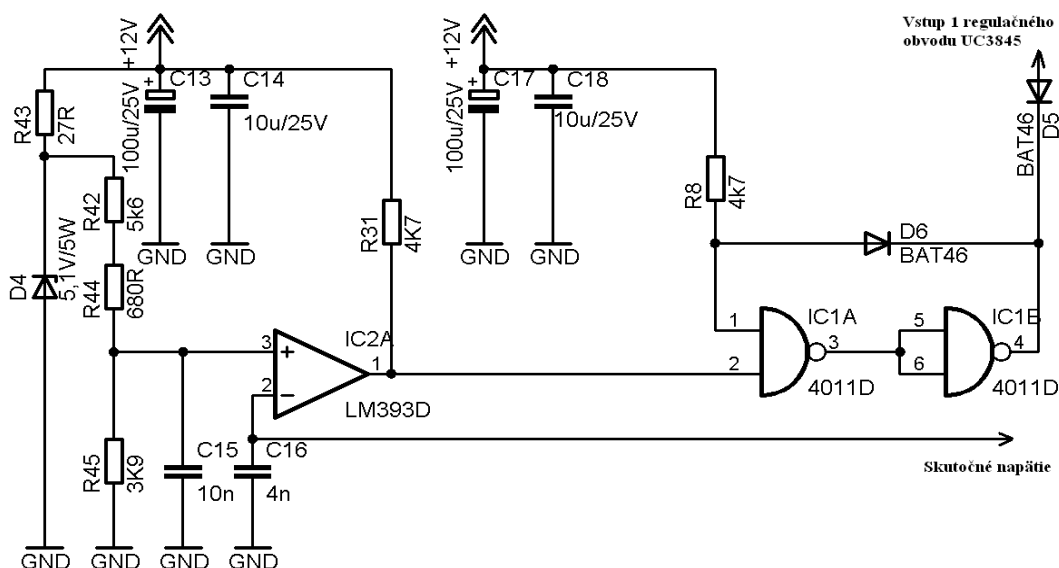
Z výsledku je vidno, že nedôjde k presýteniu jadra transformátora.

Skutočná hodnota prúdu je snímaná len na jednom DC meniči. Jedná sa o transformátor TP<sub>2</sub>. Maximálna hodnota prúdu pretekajúceho sekundárnym vinutím je 1A. Tento prúd preteká rýchlou usmerňovacou diódou D<sub>21</sub>.

Keďže je výstup z deliča vedený na vstup obvodu pre snímanie prúdu –  $i_{sense}$ , tak pre správnu činnosť je dôležité aby maximálna hodnota napätia z deliča bola 1V. Pri dosiahnutí tejto hranice dôjde ku preklopeniu klopného obvodu vnútri obvodu UC3845 a tým k vybaveniu ochrany proti nadprúdu a vypnutiu meniča. Pri prúde 1A, čomu odpovedá prúd primárom 100A, vznikne na odpore R<sub>35</sub> o hodnote 1Ω úbytok 1V, ktorý je potrebný na vybavenie ochrany. Výstupný signál má pílovitý priebeh a obsahuje jednosmernú zložku. Tento priebeh je skutočným obrazom priebehu prúdu pretekajúceho meničom. Keďže má tento signál pílovitý priebeh, je nutné znížiť indukčnosť L bočniku. Na indukčnosti vzniká parazitné napätie a takisto bočník má parazitnú kapacitu. Kôli týmto nežiadúcim veličinám dochádza k vzniku tlmeným kmitom. Na ich odstránenie je použitý RC člen na výstupe tvorený súčiastkami R<sub>39</sub> a C<sub>10</sub>.

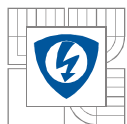
## 4.6 Ochranné obvody

Medzi regulačné a ochranné obvody sa radí snímanie skutočnej okamžitej hodnoty prúdu pomocou meracích transformátorov.



Obr. 4.15: Regulačná smyčka prúdu

A teda v meniči je použitá ešte jedna ochrana a to regulačná smyčka prúdu znázornená na obr. 4.15. Jedná sa v podstate o komparátor, na ktorého neinvertujúci vstup je privedené referenčné napätie. Toto referenčné napätie je vytvorené pomocou zenerovej diódy 5,1V (obr. 4.15) a odporového deliča. Jeho hodnota je nastavená na 1,95V. Informácia a skutočnom prúde je privádzaná na jeho invertujúci vstup. Je privádzaná z rýchlej nadprúdovej ochrany, ktorá je pripojená na vstup č.2 obvodu UC3845. Ako komparátor je použitý obvod LM353D, kde je použitý iba jeden z dvoch komparátorov. Ak je napätie skutočné privedené z prúdových transformátorov väčšie než referenčná hodnota na vstupe komparátora tak komparátor preklopí



do nuly napätia. Nieje použité symetrické napájanie a kôli tomu komparátor nepreklápa do zápornej hodnoty napätia.

Za klopným obvodom sa nachádza obvod 4011D tvorený štyrmi NAND hradlami. Z nich sú použité iba dve. Ich funkcia je nasledovná: Ak dôjde ku preklopeniu klopného obvodu, na jeho výstupe sa objaví logická 0 a teda zem. To znamená, že skutočné napätie snímané z meniča bolo väčšie než nastavené referenčné napätie na vstupe komparátora. Na vstup NAND hradla č.2 IC1A je teda log 0. Na jeho druhý vstup je privádzaná log 1. Podľa pravdivostnej tabuľky  $1 \times 0 = 1$  na jeho výstupe sa teda objaví log 1. Ďalšie NAND hradlo je zapojené ako invertor a ten zneguje log 1 na log 0 a tá potom prejde cez usmerňovaciu diódu D5 (BAT46) na vstup obvodu UC3845. Pri vybavení poruchy dôjde teda ovplyvnenie prúdového obmedzenia obvodu UC 3845 a to hodnoty 1V, ktorá vyplýva z jeho vnútorného zapojenia.

Tab 3.1: Pravdivostná tabuľka NAND hradla obvodu 4011D:

| Input A | Input B | Output |
|---------|---------|--------|
| 0       | 0       | 1      |
| 0       | 1       | 1      |
| 1       | 0       | 1      |
| 1       | 1       | 0      |

Ak je informácia o skutočnom prúde nižšia než referenčná hodnota na vstupe komparátora, na jeho výstupe je plné napájacie napätie operačného zosilňovača a teda Log 1. Na hradle IC1 je na obidvoch vstupoch Log. 1 a podľa pravdivostnej tabuľky 3.1 je výsledkom násobenia na výstupe Log. 0. Na ďalšie NAND hradlo zapojené ako invertor je teda privedená Log. 0 a jeho negovaním sa objaví na výstupe Log.1. Keďže usmerňovacia dióda D<sub>5</sub> je zapojená v nepriepustnom smere nedôjde ku ovplyvneniu regulačnej časti obvodu na vstupe č.1 obvodu. Výhodou tejto ochrany je, že pri náhlom odpadnutí vodičov alebo nezareagovaní rýchlej nadprúdovej ochrany ostávajú NAND hradla v pôvodnom stave pri vybavení poruchy.

#### 4.6.1 Nastavenie referenčnej hodnoty napätia na komparátore s obvodom LM393D

Keďže je v zapojení použitá zenerová dióda ako zdroj konštantného napätia a za ňou je zapojený odporový delič (obr. 4.15), je možné referenčné napätie jednoducho určiť. Na vstupe deliča je teda hodnota 5,1V daná zenerovým napätím. Napäťový delič tvoria rezistory R<sub>44</sub>, R<sub>42</sub> a R<sub>45</sub>. Výstupná hodnota referenčného napätia je teda daná známym vzťahom pre delič napätia:

$$\frac{U_1}{U_2} = \frac{R_1 + R_2}{R_2} \quad (4.28)$$

Po úprave:

$$U_2 = U_1 \cdot \frac{R_1}{R_2 + R_1} = 5,1V \cdot \frac{3900\Omega}{6280\Omega + 3900\Omega} = 1,95V$$

## 5 BUDIACE OBVODY

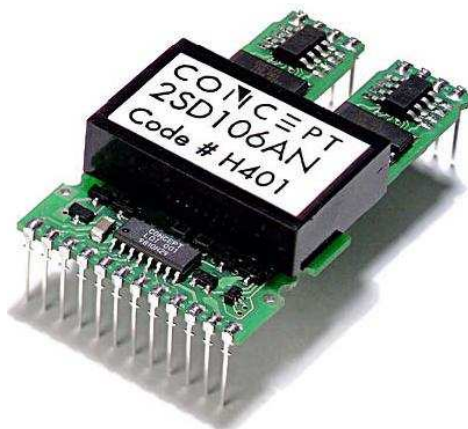
Pri dolad'ovaní rýchlonabíjačky bolo potrebné skonštruovať čo najkvalitnejšie budiace obvody výkonových tranzistorov. Ako prvá voľba padla na originálne budiče výkonových tranzistorov firmy CONCEPT. Nasledujúca časť pojednáva o ich možnom použití a ich vlastnosti.

### 5.1 Budiče tranzistorov CONCEPT 2SD106AN

Keďže bolo potrebné navrhnuť kvalitné budiče výkonových tranzistorov, tak jeden z možných riešení bolo použitie originálnych budičov vyrábané firmou CONCEPT. Tieto budiče obsahujú okrem galvanického oddelenia impulzov aj saturačnú ochranu, ktorú je možné prispôbiť konkrétnym výkonovým tranzistorom. Pre našu aplikáciu sme použili dvojité driver firmy concept 2SD106AI. Jeho popis a nastavenie bude popísané v nasledujúcej časti.

#### 5.1.1 CONCEPT 2SD106AN

Jedná sa o dvojité budič výkonových MOSFET a IGBT tranzistorov. Je ho možné požiť v DC meničoch s nastaviteľným oneskorením zopínania výkonových prvkov situovaných pod sebou v. Takisto je ho možné použiť aj ako dva nezávislé budiče výkonových tranzistorov.



Obr. 5.1: Prevedenie budiča[8]

Jedná sa o jednoduchý driver, ktorý má minimum externých súčiastok potrebných ku svojej činnosti, avšak je zložitý svojou vnútornou štruktúrou. Na výstupe budiča sa nastavuje veľkosť sledovaného saturačného napätia tranzistoru. Na vstupnej strane budiča sa nachádzajú piny pre jeho vlastné zaletovanie do plošného spoja a to vstupy riadenia a výstup pre signalizáciu a chybové hlásenie oboch budiacich kanálov zvlášť. Takisto na jeho primárnej strane je možné nastaviť jeho dva módy v ktorých môže pracovať.

#### Vlastosti drivera:

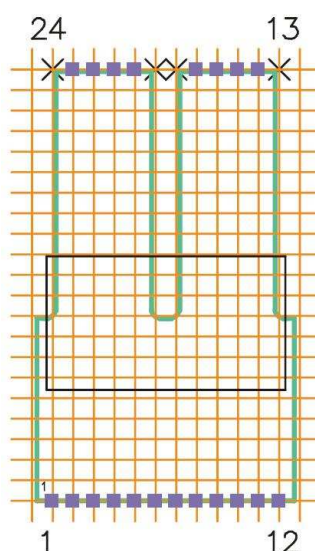
- Použiteľný pre IGBT a MOSFET tranzistory
- Ochrana proti skratu a nadprúdu
- Dlhá životnosť
- Vysoký hradlový (gate) prúd +/- 6A
- Elektrická izolácia medzi primárom a sekundárom 4000V<sub>AC</sub>

- Monitorovanie napájacieho napätia
- Spínacia frekvencia do 100 KHz
- Obsahuje v sebe DC/DC menič pre samotné napájanie drivera

Tento budič môže pracovať v dvoch režimoch. Prvý z nich je režim HALF BRIDGE ,tzv. polovičný mostík. V tomto režime sú jednotlivé budiace signály výkonových tranzistorov od seba oddelené tzv. " dead time" dobou. To je dôležité hlavne v tom prípade ak budič spína tranzistory v DC meniči pod sebou. Táto doba je potrebná na to, aby nedošlo k zopnutiu tranzistorov v DC meniči pod sebou a nedošlo tak ku skratu a zničeniu výkonových súčiastok celého DC meniča.

V našom prípade je dôležitý režim nezávislého budenia tzv. mód DIRECT. To znamená, že budiace signály sú na sebe nezávislé a výkonové tranzistory je možné riadiť nezávisle. Tieto režimy je možné meniť pinom 9 s označením MODE.

Značenie pinov a ich popis je uvedený na nasledujúcom obrázku.



Obr. 5.2: Označenie vývodov budiča[8]

| Pin | Popis   | Funkcia               | Pin | Popis | Funkcia                    |
|-----|---------|-----------------------|-----|-------|----------------------------|
| 1   | VDD     | +15V vstupnej strany  | 24  |       | voľný                      |
| 2   | GND     | GND vstupnej strany   | 23  | C1    | Collector sense kanál 1    |
| 3   | SO1     | Status výstup kanál 1 | 22  | Rth1  | Reference resistor kanál 1 |
| 4   | VL      | Reset                 | 21  | E1    | Emitter kanál 1            |
| 5   | RC1     | RC člen, kanál 1      | 20  | G1    | Gate kanál 1               |
| 6   | InA     | Vstup A               | 19  |       | voľný                      |
| 7   | InB     | Vstup B               | 18  |       | voľný                      |
| 8   | RC2     | RC člen, kanál 2      | 17  | C2    | Collector sense kanál 2    |
| 9   | MOD     | Mode vstup            | 16  | Rth2  | Reference resistor kanál 2 |
| 10  | SO2     | Status výstup kanál 2 | 15  | E2    | Emitter kanál 2            |
| 11  | GND(dc) | GND pre DC/DC menič   | 14  | G2    | Gate kanál 2               |
| 12  | VDC     | +15V pre DC/DC menič  | 13  |       | voľný                      |

Celý budič z obr. 5.1 je osadený na jednostrannej doske pošných spojov. Ako je vidieť z popisu jednotlivých vývodov, tak je zreteľne vidieť, že primárna strana obsahuje vstupy pre budiace signály, nastavenie módu drivera, výstup signalizácie statusu jednotlivých budičov a vlastné napájanie. Sekundárna strana obsahuje výstupy pre výkonové tranzistory a snímanie saturačného napätia.

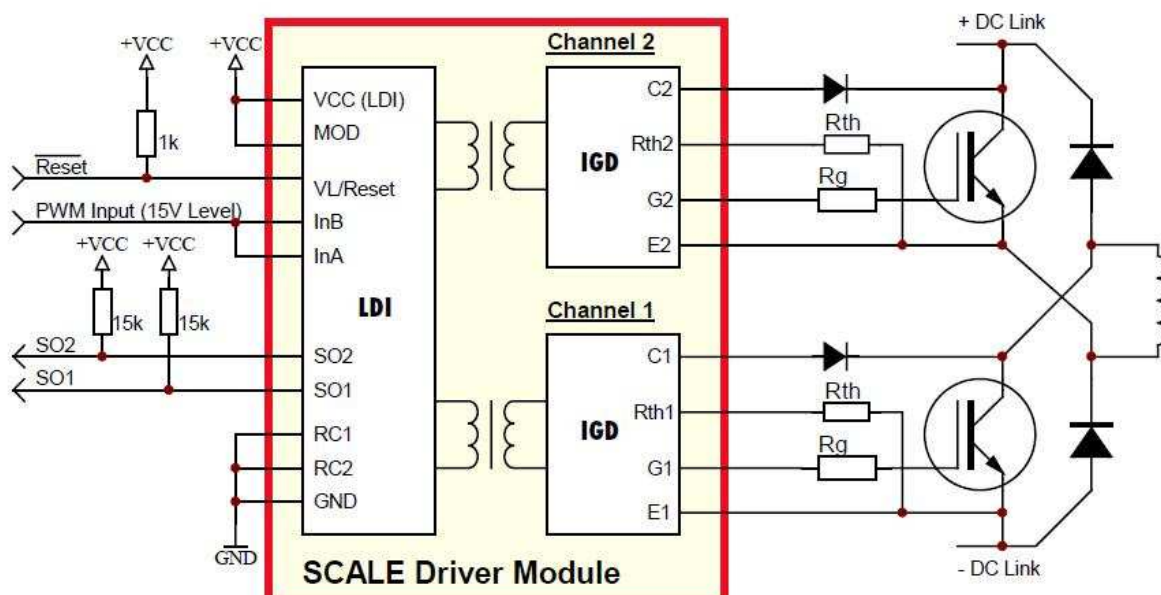
### Elektrické parametre:

|                                   |        |
|-----------------------------------|--------|
| Max. napájacie napätie:           | 16V    |
| Kľudový odber prúdu bez záťaže:   | 23 mA  |
| Maximálny odber prúdu             | 153 mA |
| Maximálny výstupný výkon na kanál | 1W     |
| Minimálne napájacie napätie       | 11,2 V |

### 5.1.2 Primárna strana drivera – napájacia časť

Zapojenie primárnej strany obsahuje niekoľko pinov s privedením napájacieho napätia +15V, ďalej piny so zemou (GND). Dôležitý je pin s označením MODE.

Pinom MODE volíme režim drivera. Keďže driver bude ovládať dve trojice tranzistorov spoločne tak je nutné prejsť do módu DIRECT, kedy sú kanály od seba nezávislé. Tento mód je potrebné povoliť a to tým, že pin MODE je nutné zapojiť na napájacie napätie +15V. Nasledujúci obrázok prezentuje zapojenie pinov v režime DIRECT MODE.



Obr. 5.3: Doporučené zapojenie výrobcom[8]

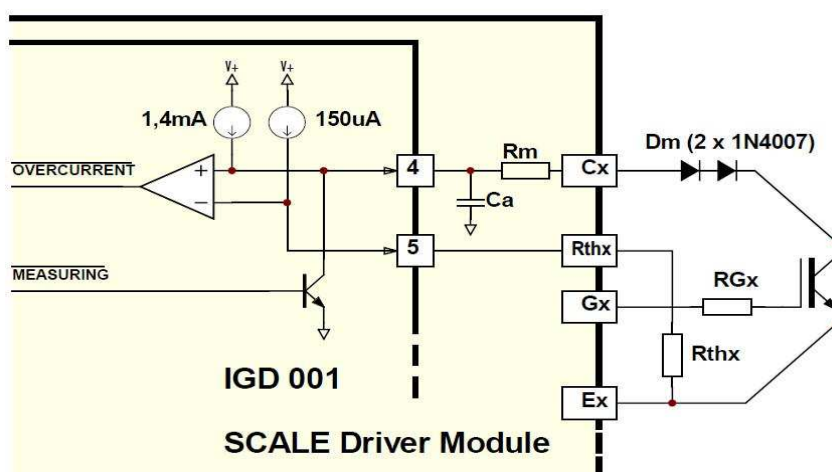
Obidva vstupy je nutné spojiť do jedného prívodu. Vstupy RC<sub>1</sub> a RC<sub>2</sub>, ktoré sú použité pre nastavenie DEAD TIME v režime HALF BRIDGE je nutné pripojiť na zem GND keďže je zvolený direct mode. SO<sub>1</sub> a SO<sub>2</sub> sú monitorovacie výstupy jednotlivých kanálov. Pin

s označením VL/Reset vykonáva reset obvodu po pripojení tohto vývodu na zem pomocou externého tranzistora. Keďže v našej aplikácii sme nevyužívali možnosť resetu, tak je tento pin zapojený na napájacie napätie +Vcc cez rezistora hodnotou 1k $\Omega$ .

### 5.1.3 Zapojenie sekundárnej strany budiča

Pre pripojenie výkonových tranzistorov a ochrán je určená opačná strana budiča. Na jeden budič ako bolo spomenuté je možné zapojiť dva nezávislo riadené výkonové tranzistory. Sekundárna strana budiča obsahuje len 4 piny, pomocou ktorých je zabezpečené monitorovanie saturačného napätia tranzistoru a privedenie signálu na hradlo ( bázu) výkonového tranzistoru.

Keďže ochrana výkonového prvku je realizovaná ako saturačná ochrana, tak jej nastavenie je veľmi dôležité na daný typ výkonového tranzistora. Tento driver má možnosť merania saturačného napätia na prechode E-C tranzistoru. Je to realizované pomocou pinov označených Cx, Rthx a Ex. Pomocou externých súčiastok je možné nastaviť veľkosť saturačného napätia pri ktorom ma zareagovať ochrana tranzistoru. Bázový rezistor je daný výrobcom výkonového MOSFET tranzistora a je možné jeho veľkosť zistiť z príslušného datesheetu tranzistoru. Nasledujúci obrázok zobrazuje principiálne zapojenie výkonového tranzistora na výstupe drivera.



Obr. 5.4: Zapojenie zo strany výkonového prvku[8]

Vhodnou kombináciou veľkosti odporu  $R_{thx}$  a zapojením vhodného počtu diód podľa obr. 5.4 je možné meniť veľkosť snímaného saturačného napätia a rýchlosť reakcie pri dosiahnutí nastaveného napätia. Nasledujúca tabuľka zobrazuje závislosť hodnôt rezistoru  $R_{th}$  a počtu diód na tieto hodnoty.

Tab. 4.1: Doporučené hodnoty  $R_{thx}$  a počet diód  $D_m$  pre nastavenie saturačného napätia tranzistoru

| Value $R_{th}$ | Reaction time      | Vth1           | Vth2           | $V_{CE(off)}$    |
|----------------|--------------------|----------------|----------------|------------------|
| 22k            | $\approx 4.9\mu s$ | $\approx 4.8V$ | $\approx 3.2V$ | 2.35V (1 Diode)  |
| 27k            | $\approx 5.7\mu s$ | $\approx 5.6V$ | $\approx 3.9V$ | 3.05V (1 Diode)  |
| 33k            | $\approx 6.8\mu s$ | $\approx 6.5V$ | $\approx 4.7V$ | 3.25V (2 Diodes) |
| 39k            | $\approx 7.6\mu s$ | $\approx 7.3V$ | $\approx 5.6V$ | 4.15V (2 Diodes) |
| 47k            | $\approx 9\mu s$   | $\approx 8.4V$ | $\approx 6.8V$ | 5.35V (2 Diodes) |

$V_{CE(off)}$  – saturačné napätie

$V_{th1}$  - napätie na rezistore  $R_{thx}$  ktoré sa porovnáva s napätím na kolektore

$V_{th2}$  – napätie na rezistore  $R_{thx}$  , ktoré je v normálnom režime bez zasahujúcej ochrany

Ako diódy su odporučené diódy typu 1N4007 – 1A/1000V. Pre použitie tranzistora typu **SPW47N60CFD** sú jeho hodnoty nasledovné:

$$U_{DS} = 600V$$

$$R_{DS(on),max} = 0,083\Omega,$$

$$I_D = 46A$$

Efektívna hodnota prúdu, ktorá prechádza tranzistormi v jednej trojici je 65A.

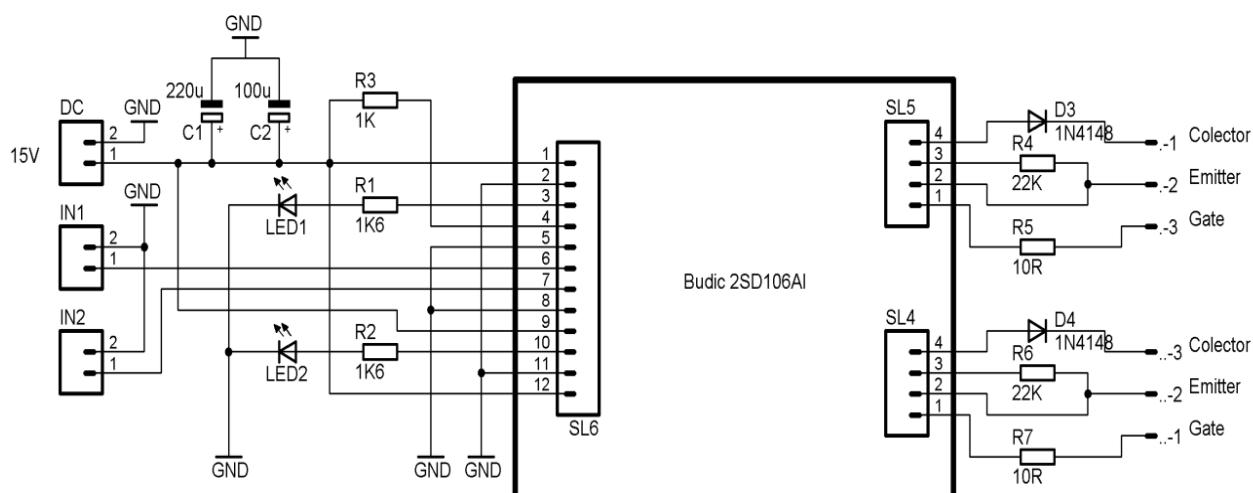
Keďže tranzistory sú zapojené 3 kusy paralelne tak ich odpor  $R_{DS(on),max}$  je vlastne hodnota odporu jedného tranzistoru zapojeného troch paralelne:

$$R_{DS(on),max3} = 0,027\Omega$$

Maximálny prúd tranzistormi: 65A

Maximálny úbytok na tranzistoroch:  $V_{CE} = 1,755V$

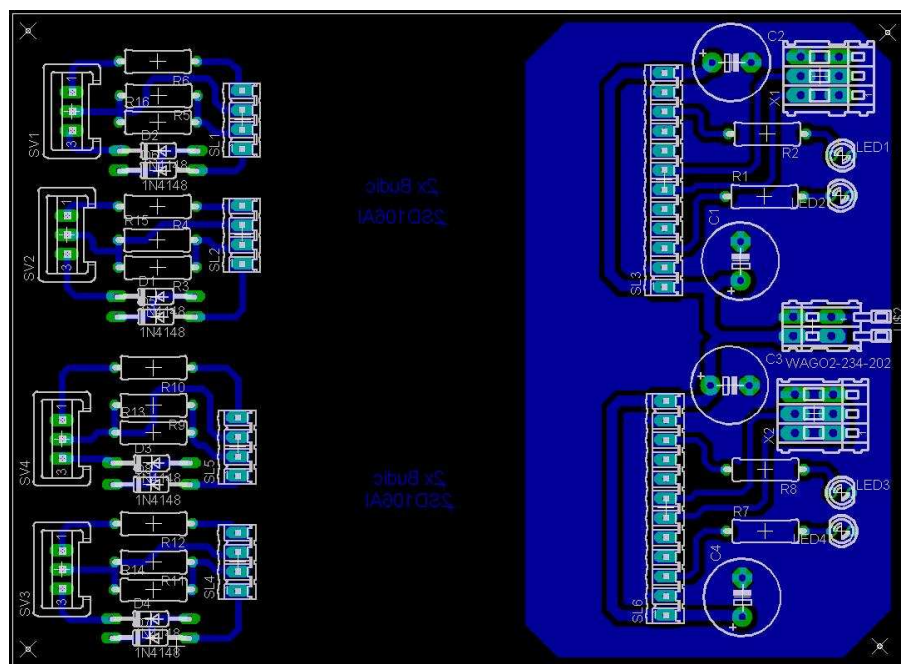
Nasledujúci obrázok znázorňuje schému zapojenia budiča.



Obr. 5.5: Schéma zapojenia budiča výkonových tranzistorov

Prevedenie plošného spoja je na jednej strane osadený klasickou veľkosťou elektronických súčiastok. Na strane napájania boli pridané dva filtračné kondenzátory, ktoré filtrujú napájacie napätie drivera.

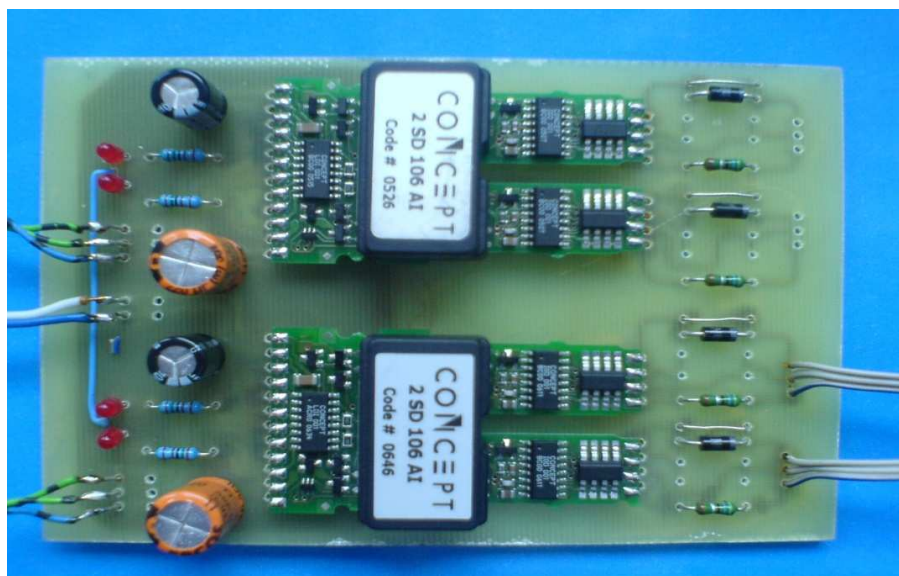
Nasledujúci obrázok zobrazuje dosku plošných spojov spolu so súčiastkami. Plošný spoj bol navrhnutý v EAGLI.



Obr. 5.6: Doska plošných spojov

Rozmery plošného spoja: 117mm x 85mm

Zapojenie tohto budiča je podľa doporučeného zapojenia výrobcu. Ďalej na vstupnej strane meniča sa nachádzajú dve LED diódy indikujúce normálny a chybový režim každého budiča, čo je vidieť aj na nasludujúcom obr 5.7. Nasledujúci obrázok zobrazuje jeho konečné vyhotovenie spolu s osazenými súčiastkami.



Obr. 5.7: Vyhotovenie dosky plošného spoja

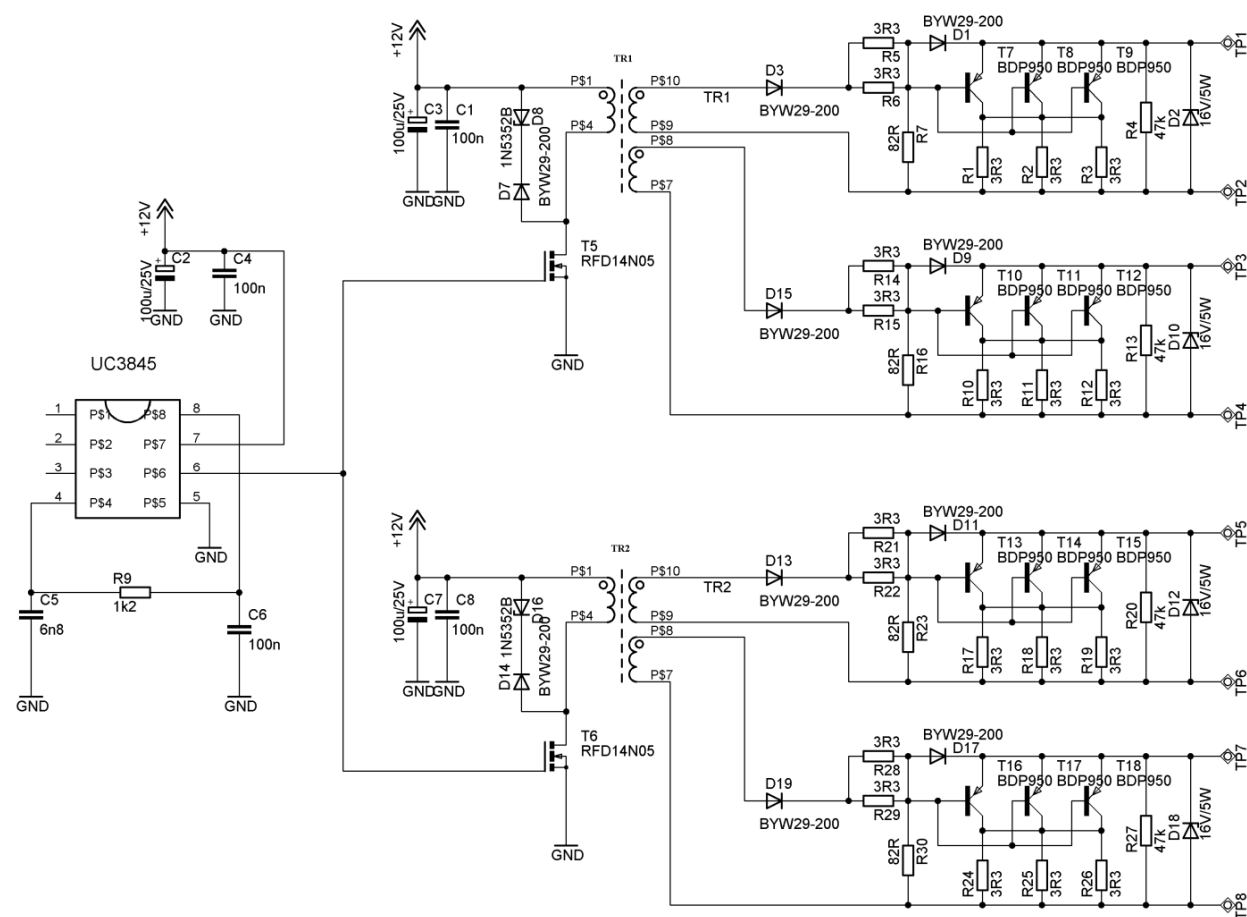
## 5.2 Výsledky skúšky budiča CONCEPT

Pôvodným zámerom bolo zjednodušenie budiacich obvodov nabíjačky. Tieto budiče boli pôvodne vybrané s ohľadom na ich spoľahlivosť a jednoduchosť zapojenia. Medzi jeho výhody patrí malý rozmer, jednoduchosť aplikácie na riadiace obvody a skutočnosť, že v tomto budiči

sa nachádza nastaviteľná saturačná ochrana. Pôvodný zámer bol, že sa použijú dva takéto budiče a jeden budič bude spínať jeden DC menič a druhý budič druhý DC menič. Po vyskúšaní budičov sa došlo ku nasledujúcim záverom. Teto budič je usporiadaný aj pre budenie IGBT tranzistorov, čo je jeho nevýhoda. Pri spínaní vznikala nadmerná teplota koncových budičov, pretože signál na hradle tranzistoru sa pohybuje od +15V do -15V. Takže ako prvé negatívum bolo nadmerné prehrievanie budičov. Ďalšou nevýhodou bolo, že budič pracoval na hrane svojich možností, pretože celý menič pracuje na frekvencii 100kHz a maximálna hodnota frekvencie budiaceho signálu u tohto budiča je 100kHz. Preto bolo rozhodnuté, že sa od týchto budičov upustí a použijú sa nové upravené budiace odvody s klasickým oddelovacím transformátorčekom.

## 6 RIADIACE OBVODY A POUŽITÉ BUDIČE TRANZISTOROV

Hlavným obvodom pre riadiace signály a PWM reguláciu je použitý obvod UC3845 popisovaný v kap. 4.5.1. Výstup pre riadiace signály je realizovaný pomocou z pinu č.5. Z tohto výstupu je vedený spínací signál na mosfet tranzistory  $T_5$  a  $T_6$ , ktoré ďalej budia oddelovacie impulzné transformátorčeky budiacich obvodov výkonových tranzistorov. Nasledujúci obrázok zobrazuje riešenie budiacich obvodov.



Obr. 6.1: Riadiaci obvod a budiče výkonových tranzistorov

Zopnutím tranzistorov  $T_5$  a  $T_6$  na obr. 6.1 riadiacim obvodom začne pretekať prúd primárnymi vinutiami impulznými transformátorčekami  $TR_1$  a  $TR_2$ . Na sekundárnych stranách sa objaví napätie 15V a sekundárnym vinutím preteká prúd. Ako je vidieť zo schémy zapojenia, všetky štyri budiče sú spínané súčasne pomocou tranzistorov  $T_5$  a  $T_6$ , ktorých hradlá sú spoločné. Pri vypnutí budiacich tranzistorov sú transformátory  $TR_1$  a  $TR_2$  demagnetované cez diódy  $D_7, D_{14}$  a zenerové diódy  $D_8$  a  $D_{16}$ . Kondenzátory  $C_3, C_1$  a  $C_7, C_8$  slúžia na filtrovanie napájacieho napätia. Nasledujúca časť bude pojednávať o návrhu týchto oddelovacích impulzných transformátoroch.

### 6.1.1 Návrh impulzného transformátora

Pre každý transformátorček  $TR_1$  a  $TR_2$  na obr. 6.1 boli použité tri paralelne spojené feritové jadrá s označením **LjT1305/CF139**. Vzhľadom na to, že celá nabíjačka pracuje na vysokej frekvencii 100kHz, je potrebné aby budiace obvody boli navrhnuté precízne a boli schopné dostatočne rýchlo budiť výkonové tranzistory na danej frekvencii. Vzhľadom na použitú frekvenciu je kladený dôraz na samotné impulzné transformátorčeky. Pri tejto frekvencii musia mať čo najnižšiu rozptylovú indukčnosť. To je možné dosiahnuť zväčšením obsahu jadra a znížením počtu závitov. Vzhľadom na zväčšenie obsahu jadra boli vybrané tri paralelne spojené jadrá.



Obr. 6.2: Prevedenie impulzného transformátora

Odôvodnenie počtu jadier transformátora je nasledujúce. V prípade, že by mal transformátorček iba jedno jadro bude platiť podľa známych vzťahov:

#### Použitie jedného jadra s obsahom $S$

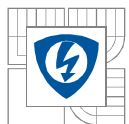
Počet závitov primárneho vinutia je daný:

$$N_1 = \frac{\max \int u_1(t) dt}{S_{FE} \cdot B_{\max}} \quad (6.1)$$

Pre indukčnosť primárneho vinutia platí:

$$L_1 = N_1^2 \cdot \Lambda = N_1^2 \cdot \mu_0 \cdot \mu_r \cdot \frac{S}{l}$$

Pre rozptylovú indukčnosť primárneho vinutia platí:



$$L_{\sigma 1} = L_1 \cdot (1 - k^2) \quad (6.2)$$

Kde  $k$  je činiteľ väzby transformátorčeka.

### Použitie troch jadier spojených do série

Nový počet závitov primárneho vinutia:

$$N_1' = \frac{\max \int u_1(t) dt}{3 \cdot S_{FE} \cdot B_{\max}} \quad (6.3)$$

Nový počet závitov bude oproti transformátoru s jedným jadrom tretinový a teda platí:

$$N_1' = \frac{N_1}{3}$$

Pre indukčnosť primárneho vinutia potom platí :

$$L_1' = N_1'^2 \cdot 3 \cdot \Lambda = \left(\frac{N_1}{3}\right)^2 \cdot 3 \cdot \mu_0 \cdot \mu_r \cdot \frac{S}{l} \quad (6.4)$$

Znížením počtu závitov o 1/3 sa rovnako zníži aj indukčnosť primárneho vinutia:

$$L_1' = \frac{L_1}{3}$$

Pre novú rozptylovú indukčnosť potom platí:

$$L_{\sigma 1}' = L_{\sigma 1} \cdot (1 - k^2) = \frac{L_{\sigma 1}}{3} \quad (6.5)$$

Zvýšením prierezu jadra sa znížil počet závitov primárneho vinutia o 1/3, ďalej sa znížila indukčnosť primárneho vinutia o 1/3 a rozptylová indukčnosť sa znížila na tretinu oproti rozptylovej indukčnosti s jedným jadrom.

### 6.1.2 Výpočet počtu závitov primárneho a sekundárneho vinutia

Pri výpočte počtu závitov sa vychádza zo známeho vzťahu:

$$N = \frac{U \cdot s \cdot T}{B \cdot S} \quad (6.6)$$

Kde  $U$  je veľkosť primárneho alebo sekundárneho napätia,  $s$  je strieda s ktorou menič pracuje,  $B$  je sýtenie jadra a  $S$  je plocha použitého jadra transformátora. Pre počet primárnych a sekundárnych vinutí pri použití feritových jadier typu **LjT1305/CF139** platí:

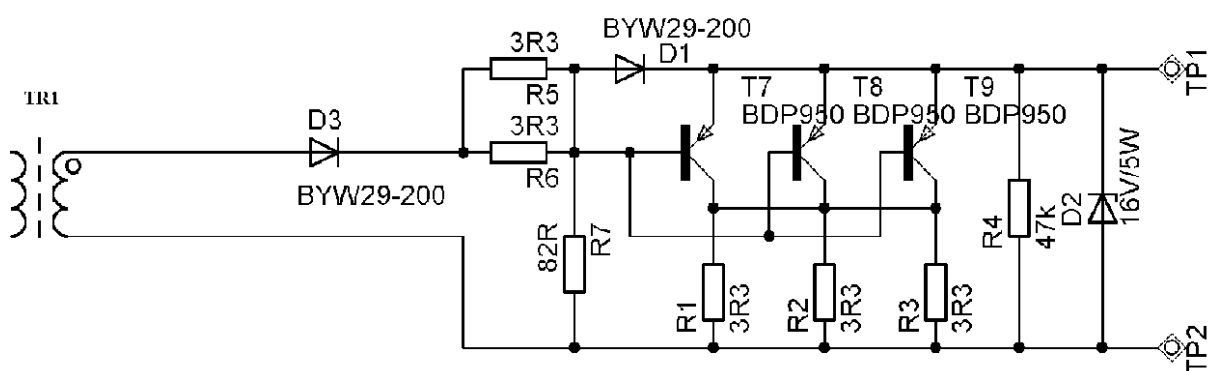
$$N_1 = \frac{U_1 \cdot s \cdot T}{B \cdot S} = \frac{12V \cdot 0,43 \cdot 1 \cdot 10^{-5} s}{0,25T \cdot 72 \cdot 10^{-6} m^2} = 2,86 \text{záv.}$$

$$N_2 = \frac{U_2 \cdot s \cdot T}{B \cdot S} = \frac{15V \cdot 0,43 \cdot 1 \cdot 10^{-5} s}{0,25T \cdot 72 \cdot 10^{-6} m^2} = 3,58 \text{záv.}$$

Následným zhotovením a meraním bol zmenený počet závitov na  $N_1=4$  a  $N_2=6$ . Vinutie je tvorené vodičom o priemere 0,4mm s izoláciou. Primárne vinutie je navinuté 3 krát a spojené paralelne. To je hlavne kôli zmenšeniu rozptylu transformátorčeka a pre zlepšenie rozloženia vinutia na jadrách.

Sekundárna strana impulzných transformátorov je tvorená vlastnými budičmi výkonových tranzistorov. Napätie indukované v sekundárnom vinutí transformátoru je usmernené rýchlou shottky diódou typu BYW29-200 vďaka použitej vysokej spínanej frekvencii. V schéme zapojenia podľa obr. 4.5 sa jedná o diódy  $D_3, D_{15}, D_{13}$  a  $D_{19}$ .

Samotný budič je zobrazený na nasledujúcom obrázku a bude popisovaný len jeden, u ostatných je funkcia obdobná.



Obr. 6.3: Schéma zapojenia budiča výkonového tranzistoru

Keďže mosfet tranzistory sú veľmi rýchle, musí byť ich zapínací a vypínací dej spomalený. Ak by tomu tak nebolo, vznikali by v meniči kôli parazitnej indukčnosti a veľkej strmosti prúdu  $di/dt$  prekmity čo by malo za následok zničenie demagnetizačných diód a výkonových tranzistorov v meniči. Spomalenie zapínacieho deju je realizované pomocou odporu  $R_G$  na obr. 6.3. Veľkosť tohto odporu ovplyvňuje rýchlosť spínania a vypínania výkonového tranzistoru. Tento odpor je tvorený odpormi  $R_5, R_6$  a  $R_1-R_3$ . Ako je známe, každý Mosfet tranzistor obsahuje parazitnú kapacitu na prechode G-S. Táto kapacita spolu s odporom  $R_G$  tvorí samostatnú časovú konštantu pri spínacích a vypínacích dejoch. O vypnutie výkonových tranzistorov sa starajú tri paralelne zapojené PNP tranzistory. Ich spínanie zabezpečuje rezistor  $R_7$ . V prípade kladného impulzu vedie dióda  $D_1$  a je polarizovaná v priepustnom smere. V tom čase na činnosť budiča nemajú PNP tranzistory vplyv. Ako je z obrázku vidieť, rezistory tvoriace  $R_G$  sú neobvykle zapojené v kolektoroch vypínacích tranzistorov. Tranzistory v tomto prípade sú pri vypnutí lepšie spínané a prakticky nezáleží na tom kde sa tieto rezistory nachádzajú a to buď na výstupe alebo v kolektoroch tranzistorov. Zopnutím PNP tranzistorov dôjde ku vybitiu parazitnej kapacity Mosfet tranzistoru cez  $R_G$  odpory do zeme.

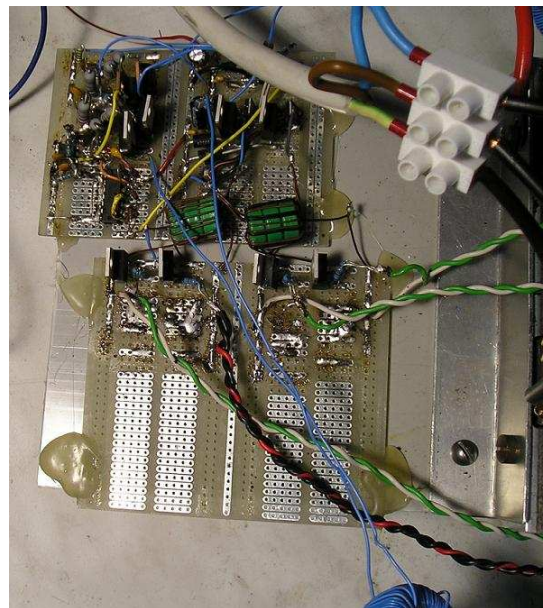
V budiči sa nachádzajú aj ochranné prvky. Rezistor  $R_4$  zabráňuje náhodnému zopnutiu výkonového tranzistoru pri „odpadnutí“ prívodov od budiča. Ako ďalšiu doplnkovú ochranu tvorí zenerová dióda s napätím 16V.

Nasledujúci obrázok zobrazuje umiestnenie budičov výkonových tranzistorov priamo na ich prívodoch spolu s doskou plošných spojov s kondenzátorovou batériou:



Obr. 6.4: Umiestnenie budičov výkonových tranzistorov

Budiče je vidieť na obr. 6.4 a sú priamo priletované na prívody tranzistorov. Prívod od impulzných trafiek je realizovaný stočeným vodičom (twisted) kôli zabráneniu parazitnej indukčnosti v prívodných vodičoch.



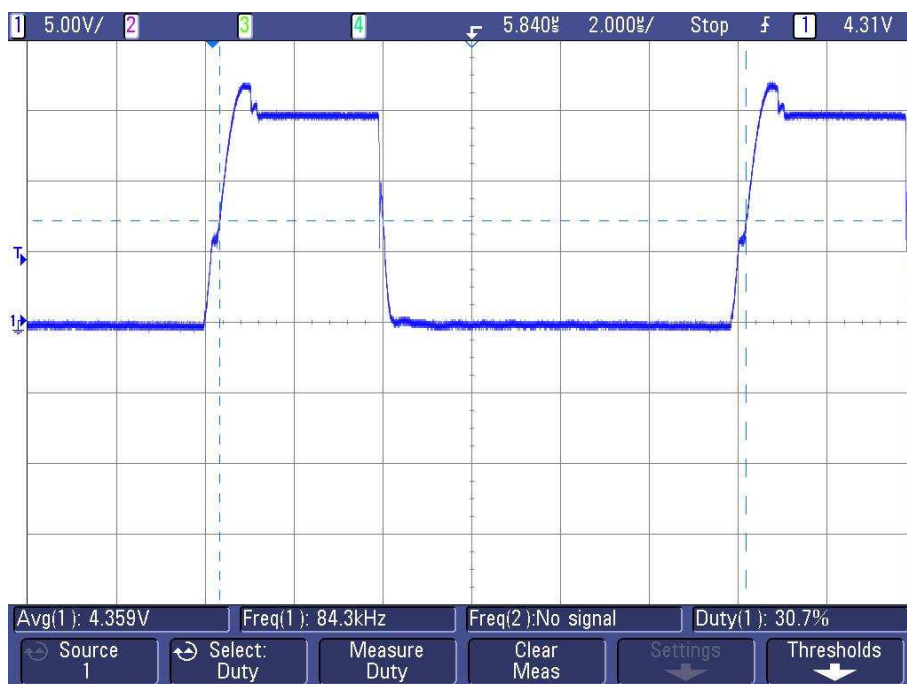
Obr. 6.5: Zhotovené riadiace obvody

Ako je z predchádzajúceho obr. 6.5 vidieť tak riadiace a ochranné obvody sa nachádzajú na spoločnej doske plošných spojov. Doska je skúšobná a určená pre laboratórne pokusy. Napájanie riadiacich obvodov je prevedené externým regulovaným napájacím zdrojom 12V.

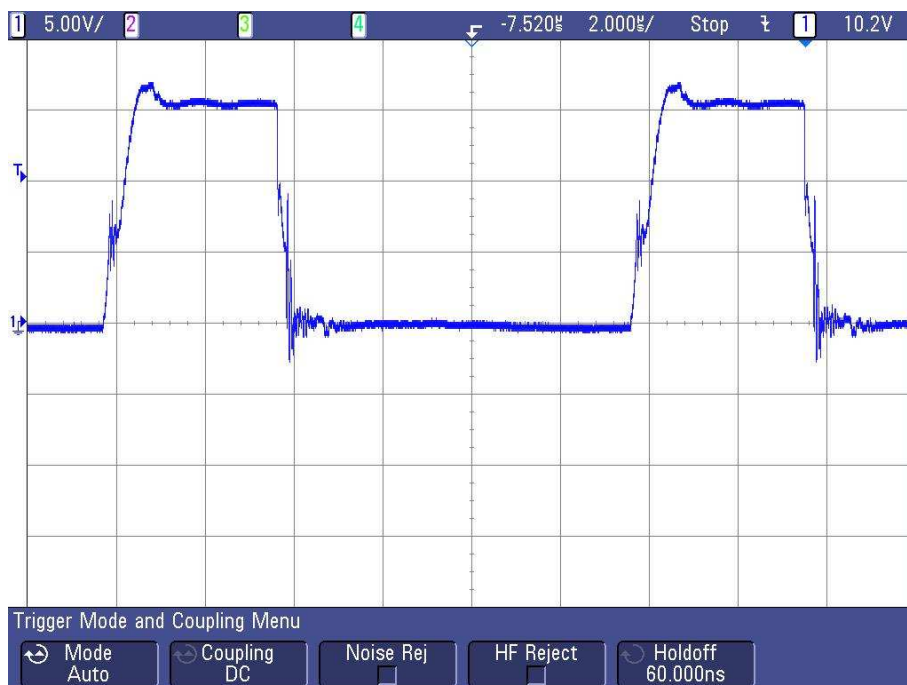
## 7 VYHODNOTENIE VÝSLEDKOV MERANIA NA ZHOTOVENEJ RÝCHLONABÍJAČKE

Keďže pri oživovaní nastali problémy pri prekmitoch napätia na tranzistoroch, bola venovaná zvýšená pozornosť najskôr na riadiace signály privádzané na tranzistory.

Obr. 7.1 zobrazuje napätie  $U_{GE}$  privádzané na hradlo výkonového tranzistoru. Ako je z obrázku vidieť tak veľkosť tohto napätia je 11,3V. Popisovaný priebeh riadiaceho napätia tranzistorov je meraný bez napätia v silovej časti obvodu na dolnom tranzistore.

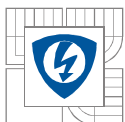


Obr. 7.1: Priebeh napätia  $U_{GE}$  bez napätia v silovej časti DC meniča



Obr. 7.2: Priebeh napätia  $U_{GE}$  pri menovitom zaťažení meniča

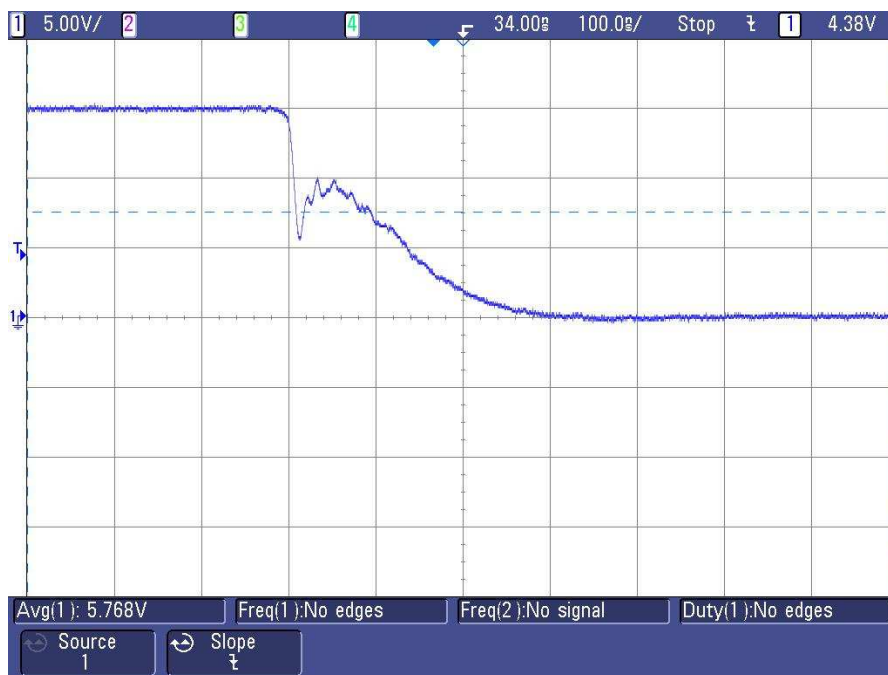
Obrázok 7.2 zobrazuje priebeh riadiaceho signálu na hradlo výkonového tranzistoru. Napätia medziobvodu 250V a prúd záťažou  $I_D=50A$ . Spínací signál má hodnotu približne 15V.



Ďalšie dva obrázky 7.3 a 7.4 zobrazujú nábežnú a dobežnú hranu spínacieho signálu tranzistoru. Spomalenie spínania výkonových tranzistorov má na svedomí hradlový odpor  $R_G$  spolu s kapacitou prechodu  $C_{GE}$ , ktoré spolu tvoria časovú konštantu. Okamih zopnutia tranzistoru je vidieť z nameraného priebehu. V okamihu ak sa objaví malé „zachvenie“ priebehu na vzostupnej hrane signálu, tak vtedy dochádza ku zopnutiu tranzistoru. Podobné je to na zostupnej hrane signálu.

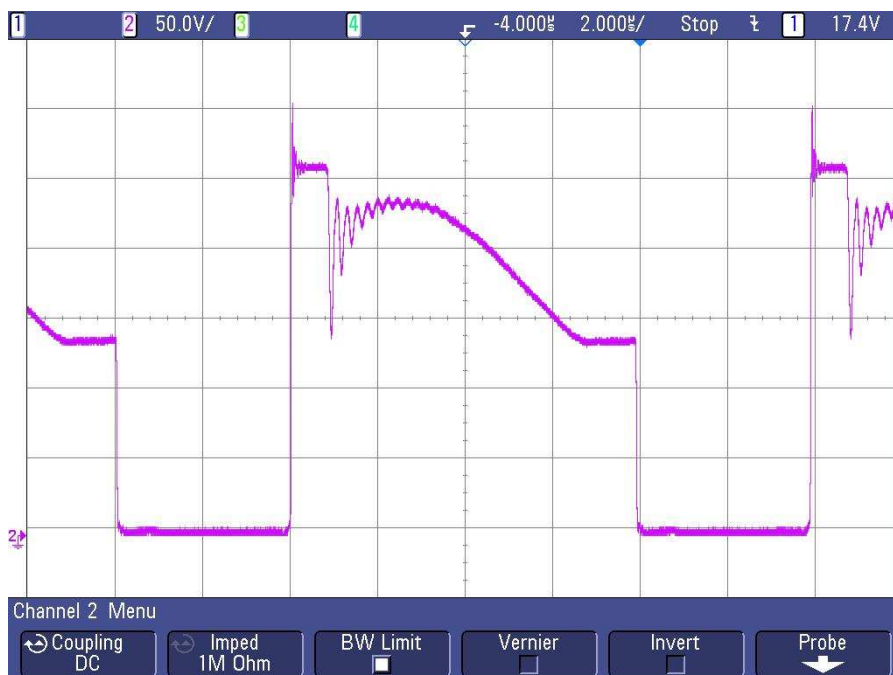


Obr. 7.3: Detail zapnutia tranzistoru



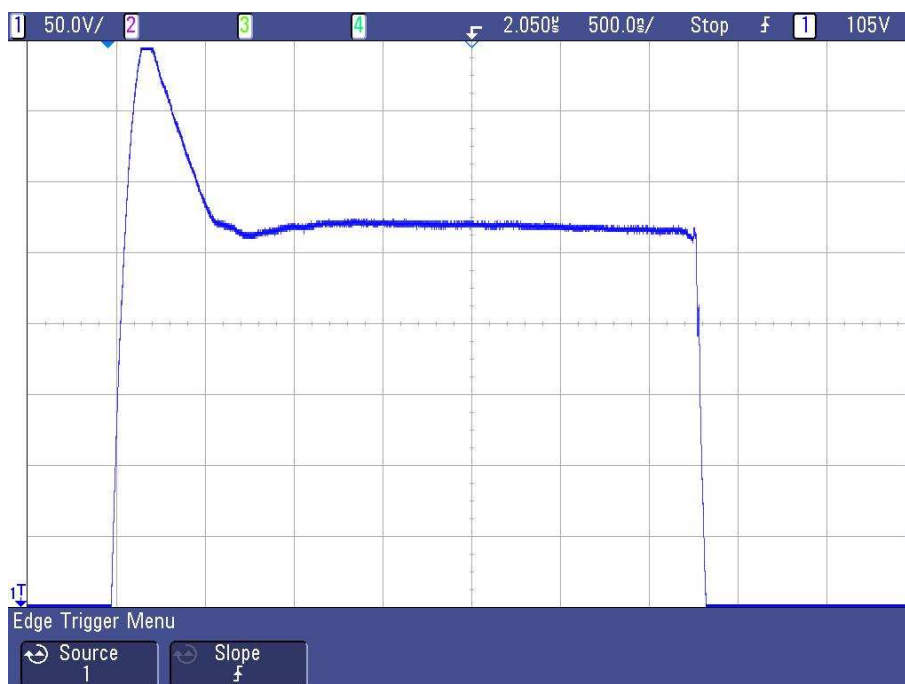
Obr. 7.4: Detail vypnutia tranzistoru

Nasledující průběh obr. 7.5 zobrazuje napětí  $U_{CE}$  na výkonovém tranzistore při menovitom prúde 100A. Maximálna hodnota prekmitu napätia na tranzistore je okolo 300V. Tieto prekmity sú spôsobené demagnetizačnými diódami v DC meniči. Sú spôsobené vplyvom veľkej strmosti prúdu  $di/dt$  vďaka vysokej spínacej frekvencii. Ako bolo pri meraní vidieť, tak výška prekmitu sa so zvyšujúcou záťažou zväčšovala aj s prúdom, ale nedosiahla pri maximálnej možnej záťaži takú veľkosť, aby došlo k ohrozeniu výkonových tranzistorov DC meniča.



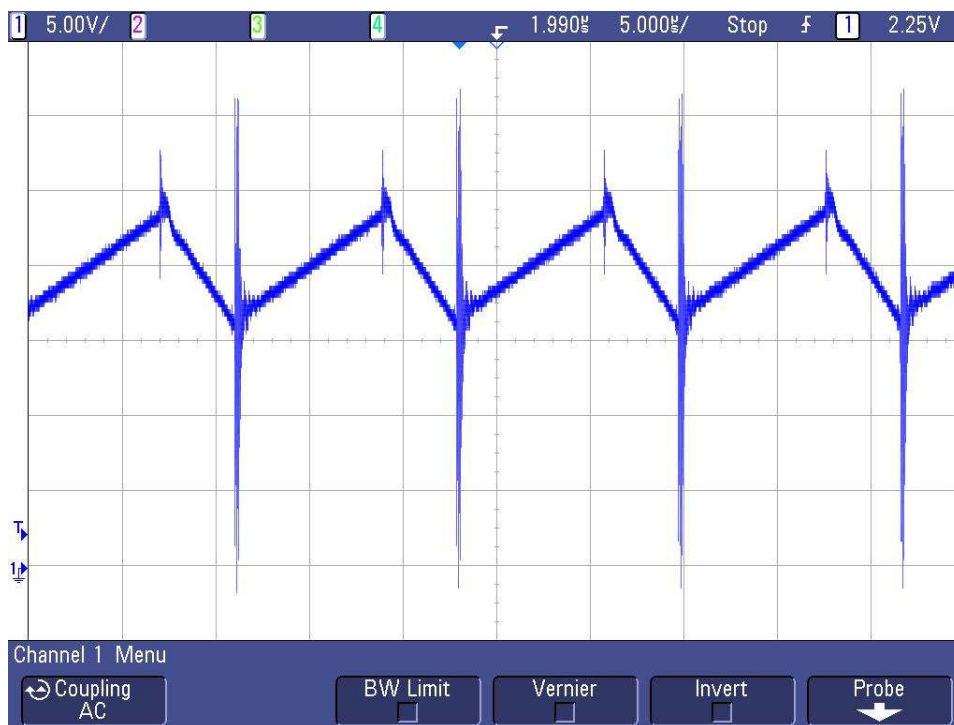
Obr. 7.5: Napätie  $U_{CE}$  na tranzistore pri prúde  $I_Z=50A$ ,  $U_D=250V$

Pri zaťažovaní rýchlonabíjačky bol tento prechod sledovaný až do menovitého zaťažovacieho prúdu, aby nedošlo k ohrozeniu výkonových tranzistorov.

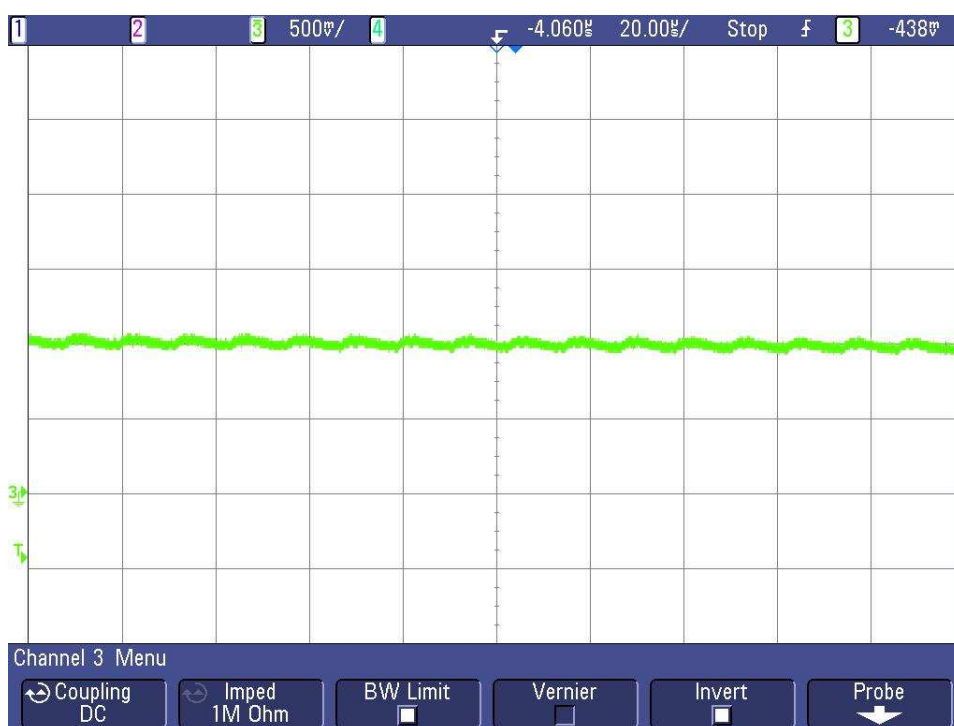


Obr. 7.6: Prúbeh prúdu nulovou diódou na sekundárnej strane,  $I_Z=71A$ ,  $U_D=250V$

Obrázok 7.6 zobrazuje priebeh prúdu nulovou diódou na sekundárnej strane DC/DC meniča. Vďaka parazitnej indukčnosti impulzného transformátora a vplyvom veľkej strmosti  $di/dt$  pretekajúceho prúdu vznikajú na diodách prekmity. Tieto prekmity sú čiastočne potlačené RC členom na výstupnej strane meniča. Nasledujúci obrázok zobrazuje priebeh napätia polovice medziobvodu. Toto napätie je zvlnené a má pílovitý priebeh. Detail zobrazuje nízkofrekvenčné zvlnenie napätia.



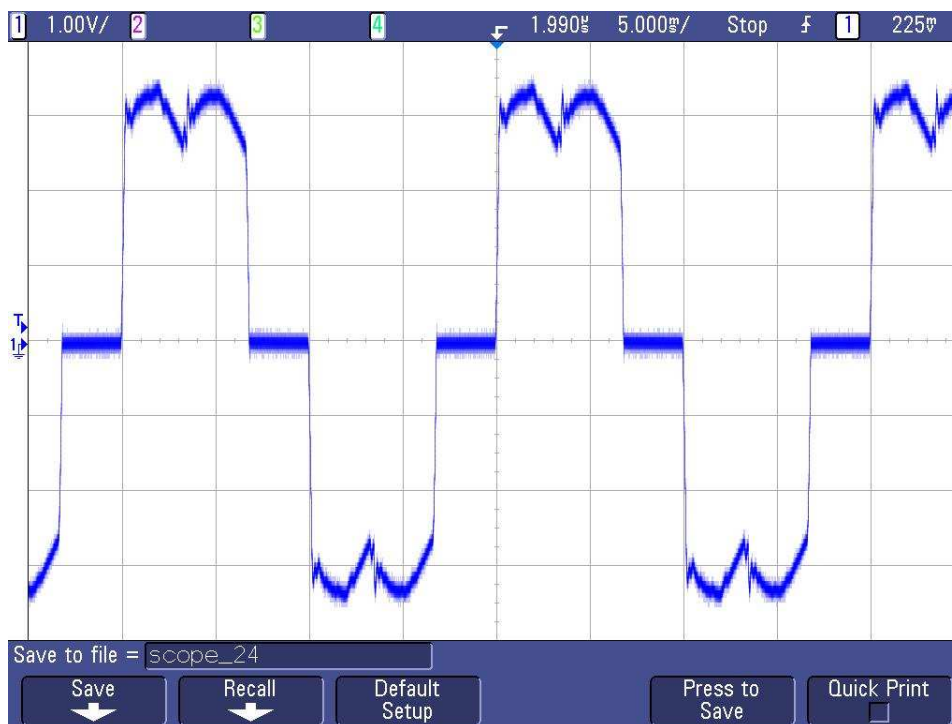
Obr. 7.7: Napätie polovice medziobvodu,  $I_Z=50A$ ,  $U_D=250V$ , detail NF zvlnenia



Obr. 7.8: Priebeh prúdu na výstupnej tlmivke pri zaťažovacom prúde  $I_Z=50A$

Na obrázku 7.8 je zobrazený priebeh prúdu výstupnou tlmivkou. Mierka je 50A/V. Zvlnenie prúdu je veľmi malé, okolo 5A.

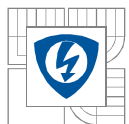
Nasledujúci obrázok zobrazuje odoberaný fázový prúd grätzovým mostíkom na vstupe rýchlonabíjačky. Ako je vidieť, priebeh odoberaného prúdu má impulzný charakter a je vidno aj sínusový priebeh napájacieho prúdu.



Obr. 7.9: Priebeh odoberaného fázového prúdu, 5A/V,  $I_Z=50A$

## 7.1 Vyhodnotenie merania na rýchlonabíjačke

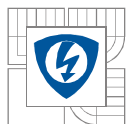
V predošlej časti bolo prezentované meranie na zhotovenej rýchlonabíjačke. Pri prvom meraní bola nabíjačka najskôr zapojená naprázdno. To znamená, že na výstupe nebola zapojená záťaž a napájacie napätie sa pomocou autotransfómátora zvyšovalo až do menovitého napätia trojfázovej siete 400V. Veľká pozornosť bola venovaná najmä prekmitom na výkonových tranzistoroch (obr. 7.5). Postupne bola zvyšovaná záťaž na menovitú hodnotu a spolu s ňou boli sledované spomenuté prekmity napätia na tranzistoroch na prechode C-E. Nové diódy SiC (Silicon Carbide Schottky) na sekundárnej strane boli úspešne odskúšané. Nakoniec zobrazené priebehy sú pri menovitom prúde 50A jedného DC meniča.



## 8 ZÁVER

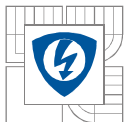
V úvode diplomovej práce je popísaná problematika spínaných zdrojov používaných v elektromobiloch. V prvá časť popisuje napájací zdroj pre riadiace obvody palivového článku. Bolo potrebné zabezpečiť čo najkvalitnejšie napájanie týchto riadiacich obvodov. Teda šlo hlavne o bezpečnosť prevádzky týchto palivových článkov. Napájané obvody zabezpečovali monitorovanie teploty celého článku, ochrany a napájanie obvodov pre komunikáciu s inými zariadeniami v automobile. Spínaný zdroj bol najskôr navrhnutý a potom vyladený na skúšobnej doske plošných spojov. Pri ladení rezonančného obvodu bola najskôr zmeraná  $L_{1K}$ , indukčnosť sekundárneho vinutia transformátora pri skratovanom primárnom vinutí. Po odmeraní tejto hodnoty bolo možné rezonančný obvod na sekundárnej strane transformátora naladiť. Pri zaťažení menovitým prúdom nastali problémy s prehrievaním znižujúceho meniča na výstupe napájacieho zdroja. Problém bol vyriešený doplnením integrovaného obvodu LM2576HVT o pasívny chladič. Ako je vidieť z nameraných hodnôt pri zaťažení, rezonančný menič mal tvrdšie charakteristiky oproti meniču bez rezonancie. S rezonančným meničom kleslo napätie pri zaťažovacom prúde 3A na hodnotu 23,55V a bez rezonančného kondenzátoru toto napätie pri rovnakom záťažnom prúde kleslo na hodnotu 21,3V. Celý menič je na konci prvej časti detailne pofotený.

V ďalšej úlohe diplomovej práce som sa zamerlal na rýchlonabíjačku, ktorá bola už rozpracovaná v predchádzajúcej diplomovej práci. Zamerlal som sa konkrétne na stavbu medziobvodu a stavbu budiacich obvodov výkonových tranzistorov. Hlavnú časť som venoval v prvom kroku stavbe napäťového medziobvodu a návrhu plošného spoja pre výkonové prvky DC meniča a odľahčovacie obvody. V ďalšej časti sa zaoberám problematikou budiacich obvodov výkonových tranzistorov. Boli odskúšané originálne budiče tranzistorov firmy CONCEPT. Tieto budiče na koniec neboli použité. Nevyhoveli z dôvodov popísaných v kapitole 6. Namiesto týchto budičov boli použité budiče klasickej konštrukcie s impulzným transformátorom. V kapitole 6 je popísaný návrh impulzného transformátora a demagnetizačných diód spolu so schémou zapojenia budiacich obvodov. Budiace obvody boli umiestnené priamo na vývodoch výkonových tranzistorov, kôli zníženiu parazitnej indukčnosti prírodných vodičov. To je vidieť na obrázku 4.8. Na obr. 4.9 je vidieť prevedenie riadiacich a budiacich obvodov na jedenej doske plošných spojov. Z predchádzajúcej diplomovej práci, kde nastali problémy s plným zaťažením rýchlonabíjačky na celkový menovitý prúd 100A, boli vymenené nulové a usmerňovacie diódy na sekundárnej strane výkonového transformátora za výkonnejšie a dokonalejšie SiC diódy. Tieto diódy vydržia omnoho strmou zmenu prúdu  $di/dt$  orpoti pôvodným použitým shotky diodám. Celá rýchlonabíjačka bola úspešne vyskúšaná na menovitú záťaž 100A, to znamená 50A na každý DC menič, čo je aj podložené nameranými priebehmi v poslednej časti diplomovej práce. Popisovaná rýchlonabíjačka je ponímaná ako výzkumná činnosť a samozrejme, že v priebehu mojej práce došlo ku ďalším zmenám zapojenia. Jedna z nich je zníženie počtu kondenzátorov a medziobvode, ďalej zvýšenie počtu kondenzátorov v odľahčovacích obvodoch výkonových tranzistorov pričom kapacita ostala rovnaká. Dôvodom bolo prehrievanie kondenzátorov vďaka vysokým pretekajúcim prúdom v odľahčovacích obvodoch.



## LITERATÚRA

- [1] Škunda, M. *Spínaný zdroj 12/2x24V pre napájanie elektroniky vodíkového článku v automobile*. Brno 2009. 20s. Semestrálna práca 1. VUT Brno
- [2] dei.unipd.it [online] c2009 [cit.2009-11-04].DC/DC converter with push-pull topology. Dostupné z WWW:< [http://www.dei.unipd.it/~pel/Articoli/1994/Apec/Apec\\_94.pdf](http://www.dei.unipd.it/~pel/Articoli/1994/Apec/Apec_94.pdf)>
- [3] Zděnek, F. *Transformátory a tlumivky*. Praha, 12/2002. 68s.
- [4] Dzurko,P.,Dudrik,J. *Rezonančné meniče*. Košice, 2007. 125s. Elektronické skriptum Technická univerzita Košice
- [5] alldatasheet.com [online] c2009 [cit. 2009-11-05]. 3N60 Mosfet transistor. Dostupné z WWW:< <http://www.alldatasheet.com/datasheet-pdf/pdf/186188/UTC/3N60.html>>
- [6] *Regulating pulse width modulators SG3525N* [online] STMicroelectronics c2000 [cit. 2009-11-05]. Text v anglickom jazyku. Dostupné z WWW: < <http://www.datasheetcatalog.org> >
- [7] VOREL, Pavel; PROCHÁZKA, Petr. *Řídící členy v elektrických pohonech*. Brno:FEKT, 2009. 101 s.
- [8] igbt-driver.com [online]. c2009 [cit. 2010-05-05]. 2SD106AI Dual Scale Driver Core,dostupné z WWW:< <http://www.igbt-driver.com/index.php?id=2sd106ai&L=2>>
- [9] Langer, R. *Rychlonabíječka pro trakční akumulátor*. Brno, 2009. 60s Diplomová práce. VUT Brno
- [10]alldatasheet.com [online]. c2004 [cit.2010-05-05].Text v anglickom jazyku. *SIMPLE SWITCHER® 3A Step-Down Voltage Regulator*.Dostupné z WWW: <<http://www.alldatasheet.com/datasheet-pdf/pdf/8763/NSC/LM2576HVT-ADJ.html>>
- [11] datasheetdir.com [online]. c2009 [cit.2010-05-04]. *TM SiC Schottky Diode*. Dostupné z WWW: <<http://www.datasheetdir.com/IDH15S120+Schottky-Diodes>>
- [12]datasheetcatalog.com [online]. c2002 [cit.2010-04-20], *UC 3845 Current Mode PWM Controller*. Dostupné z WWW: <[http://www.datasheetcatalog.com/datasheets\\_pdf/U/C/3/8/UC3845.shtml](http://www.datasheetcatalog.com/datasheets_pdf/U/C/3/8/UC3845.shtml)>



## PRÍLOHY

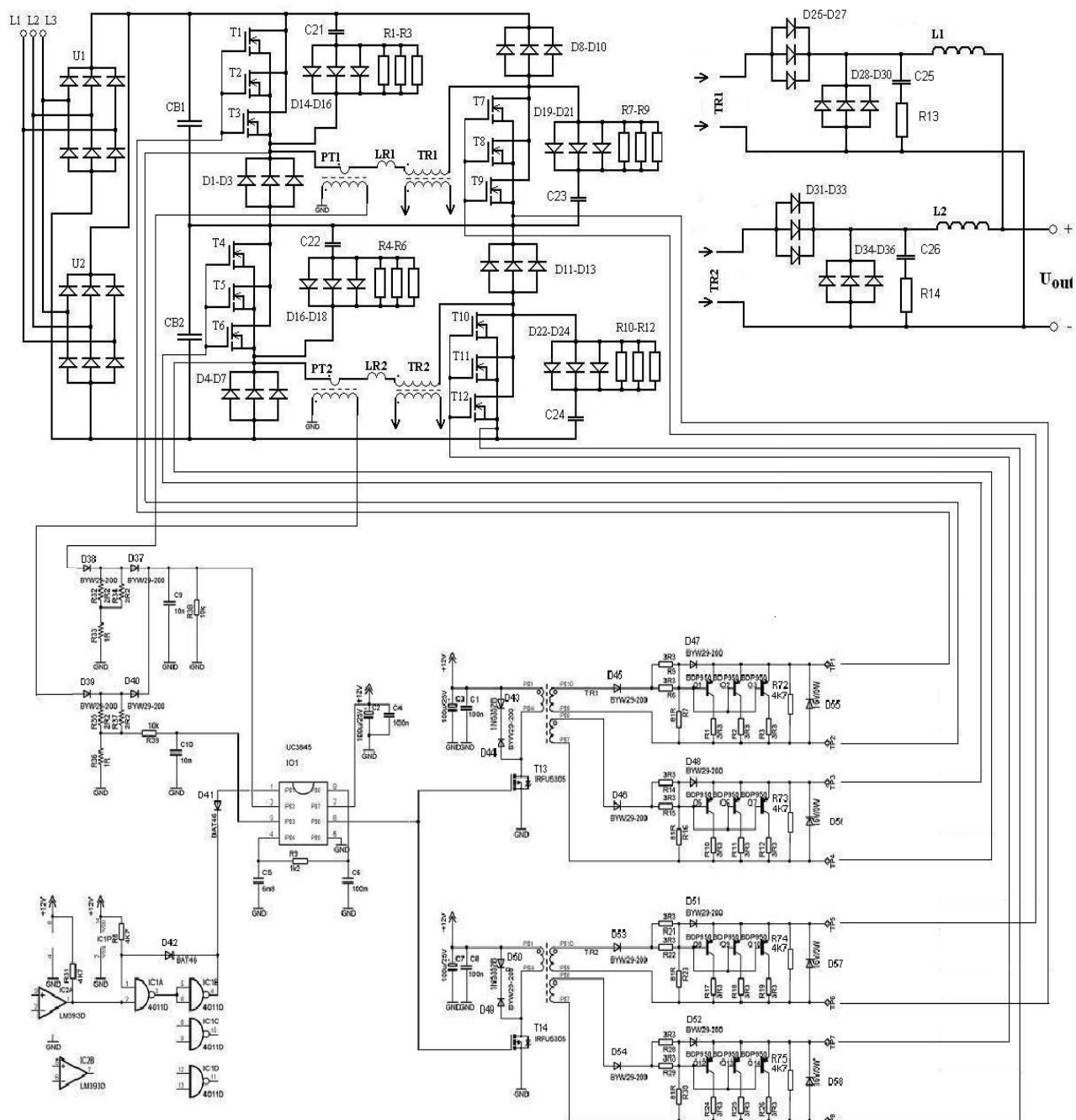
Schéma zapojenia rýchlonabíjačky

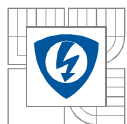
Zoznam použitých súčiastok rýchlonabíjačky

Fotografie vyhotovenej rýchlonabíjačky



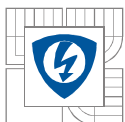
### Schéma zapojenia rýchlonabíjačky:





**Zoznam súčiastok odpovedajúci schéme zapojenia:**

| Značka      | Hodnota       | Popis    | Značka  | Hodnota          | Popis         |
|-------------|---------------|----------|---------|------------------|---------------|
| R1-R3       | 1,5 kΩ,5W     | Výkonový | C2      | 100uF/25V        | elektrolyt    |
| R4-R6       | 1,5 kΩ,5W     | Výkonový | C4      | 100nF            | keramický     |
| R7-R9       | 1,5 kΩ,5W     | Výkonový | C5      | 6n8              | keramický     |
| R10-R12     | 1,5 kΩ,5W     | Výkonový | C6      | 100nF            | keramický     |
| R13,R14     | 20x 1,5kΩ, 5W | Výkonový | C9,C10  | 10nF             | keramický     |
| R32,R34     | 2,2 Ω         |          | C13,C15 | 100uF/25V        | elektrolyt    |
| R33         | 1 Ω           |          | C14,C16 | 100nF            | keramický     |
| R35,R37     | 2,2 Ω         |          | C19     | 100uF/25V        | elektrolyt    |
| R36         | 1 Ω           |          | C20     | 100nF            | keramický     |
| R38,R39     | 10 kΩ         |          | C21-C24 | 3,3nF/2000V      |               |
| R42         | 5,6 kΩ        |          | C25,C26 | 2x 1,5nF/2000V   |               |
| R43         | 27 Ω          |          | CB1     | 40 x 0,47μF/630V |               |
| R44         | 680 Ω         |          | CB2     | 40 x 0,47μF/630V |               |
| R45         | 3,9 kΩ        |          | T1-T12  | SPW47N60CFD      | Mosfet        |
| R47,R48     | 3,3 kΩ        |          | D1-D24  | IDH15S120        | SiC dióda     |
| R49         | 82 Ω          |          | D25-D36 | IDH15S120        | SiC dióda     |
| R40,R41,R46 | 3,3 Ω         |          | D37-D40 | BYW29-200        | Shottky dióda |
| R50,R51,R52 | 3,3 Ω         |          | D41,D42 | BAT46            | Shottky dióda |
| R53,R54     | 3,3 Ω         |          | D43,D50 | 1N5352B          | Zenerová d.   |
| R55         | 82 Ω          |          | D44-D46 | BYW29-200        | Shottky dióda |
| R56,R57,R58 | 3,3 Ω         |          | D49     | BYW29-200        | Shottky dióda |
| R59,R60     | 3,3 Ω         |          | D51-D55 | BYW29-200        | Shottky dióda |
| R61         | 82 Ω          |          | T13,T14 | IRFU5305         | Mosfet        |
| R62,R63,R64 | 3,3 Ω         |          | Q1-Q12  | BDP950           | PNP           |
| R65,R66     | 3,3 Ω         |          | D55-D58 | 16V,5W           | Zenerová d.   |
| R67         | 82 Ω          |          | IC1     | 4011D            |               |
| R68-R71     | 47 kΩ         |          | IC2     | LM393D           | OZ            |
| R72-R75     | 47 kΩ         |          | IO1     | UC3845           | PWM           |



### Fotografie vyhotovené rychlonabíjačky

