

VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

Fakulta elektrotechniky
a komunikačních technologií

DIPLOMOVÁ PRÁCE

Brno, 2022

Bc. Róbert Mihályi



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA ELEKTROTECHNIKY A KOMUNIKAČNÍCH TECHNOLOGIÍ

FACULTY OF ELECTRICAL ENGINEERING AND COMMUNICATION

ÚSTAV VÝKONOVÉ ELEKTROTECHNIKY A ELEKTRONIKY

DEPARTMENT OF POWER ELECTRICAL AND ELECTRONIC ENGINEERING

NABÍJEČKA OLOVĚNÝCH AKUMULÁTORŮ 12 V S PULZNÍM MĚNIČEM

LEAD-ACID BATTERY CHARGER WITH A PULSE CONVERTER

DIPLOMOVÁ PRÁCE

MASTER'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Bc. Róbert Mihályi

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

doc. Ing. Pavel Vorel, Ph.D.

BRNO 2022

Diplomová práce

magisterský navazující studijní program **Silnoproudá elektrotechnika a výkonová elektronika**

Ústav výkonové elektrotechniky a elektroniky

Student: Bc. Róbert Mihályi

ID: 203292

Ročník: 2

Akademický rok: 2021/22

NÁZEV TÉMATU:

Nabíječka olověných akumulátorů 12 V s pulzním měničem

POKyny PRO VYPRACOVÁNÍ:

1. Proveďte potřebná ověřovací měření a případné modifikace zapojení řídicích obvodů zhotovených v semestrálním projektu 2.
2. Propojte řídicí obvody se silovými obvody a postupně celý měnič oživte.
3. Realizujte mechanickou konstrukci nabíječky a měnič do ní zabudujte.
4. Proveďte sérii měření pro ověření funkčnosti nabíječky.

DOPORUČENÁ LITERATURA:

- [1] Vorel, P., Patočka M.: Průmyslová elektronika. Skriptum FEKT VUT. 2007
- [2] Erickson, R.W., Maksimovic, D.: Fundamentals of Power Electronics. 2004
- [3] Vorel, P.: Řídicí členy v elektrických pohonech. Skriptum FEKT VUT. 2007

Termín zadání: 7.2.2022

Termín odevzdání: 22.5.2022

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

doc. Ing. Ondřej Vítek, Ph.D.
předseda rady studijního programu

UPOZORNĚNÍ:

Autor diplomové práce nesmí při vytváření diplomové práce porušit autorská práva třetích osob, zejména nesmí zasahovat nedovoleným způsobem do cizích autorských práv osobnostních a musí si být plně vědom následků porušení ustanovení § 11 a následujících autorského zákona č. 121/2000 Sb., včetně možných trestněprávních důsledků vyplývajících z ustanovení části druhé, hlavy VI. díl 4 Trestního zákoníku č.40/2009 Sb.

Abstrakt

Táto diplomová práca popisuje kompletný návrh nabíjačky, ktorá funguje na princípe jednočinného priepustného meniča. Obsahuje návrh všetkých vinutých aj polovodičových súčiastok. Návrh a popis jednotlivých častí schém silového obvodu a riadiaceho obvodu je tiež zahrnutý do tejto práce. Práca ďalej disponuje popisom výroby vinutých súčiastok a dosiek plošných spojov. Náplňou tejto práce je aj oživenie nabíjačky vrátane popisu jednotlivých uskutočnených úprav, ktoré boli potrebné pre správnu, spoľahlivú a bezpečnú funkciu. Obsahom je aj séria realizovaných meraní pre overenie správnej funkcie nabíjačky.

Kľúčové slová

nabíjačka, olovený akumulátor, jednočinný priepustný menič, transformátor, chladenie polovodičov, riadiaci obvod, silový obvod

Abstract

This master's thesis discusses on complete designing of a lead-acid accumulator charger. Charger operates with the principle of a two-switch forward converter. It contains the design and manufacturing of all the proposed winding subcomponents, the semiconductor components, the control circuit board and the power circuit board. This thesis includes also the design and description of the individual parts of the power circuit and control circuit. The revival of the charger, including a description of the individual adjustments that were necessary for proper and reliable operation is also in the content. This thesis contains too a series of measurement performed to verify the correct function of the charger.

Keywords

charger, lead-acid accumulator, two-switch forward converter, transformer, semiconductor cooling, control circuit, power circuit

Bibliografická citácia

MIHÁLYI, Róbert. *Nabíječka olověných akumulátorů 12 V s pulzním měničem* [online]. Brno, 2022 [cit. 2022-05-18]. Dostupné z: <https://www.vutbr.cz/studenti/zav-prace/detail/142722>. Diplomová práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, Ústav výkonové elektrotechniky a elektroniky. Vedoucí práce Pavel Vorel

Prehlásenie autora o pôvodnosti diela

Meno a priezvisko študenta:	Bc. Róbert Mihályi
VUT ID študenta:	203292
Typ práce:	Diplomová práca
Akademický rok:	2021/22
Téma záverečnej práce:	Nabíjačka olovených akumulátorov 12 V s pulzným meničom

Prehlasujem, že svoju diplomovú prácu som vypracoval samostatne pod vedením vedúceho semestrálnej práce a s použitím odbornej literatúry a ďalších informačných zdrojov, ktoré sú všetky citované v práci a uvedené v zozname literatúry na konci práce.

Ako autor uvedenej diplomovej práce ďalej prehlasujem, že v súvislosti s vytvorením tejto diplomovej práce som neporušil autorské práva tretích osôb, hlavne som nezasiahol nedovoleným spôsobom do cudzích autorských práv osobnostných a som si plne vedomí následkov porušenia ustanovenia § 11 a nasledujúcich autorského zákona č. 121/2000 Sb., vrátane možných trestnoprávných dôsledkov vyplývajúcich z ustanovení časti druhej, hlavy VI. diel 4 Trestného zákoníku č. 40/2009 Sb.

V Brne dna: **22. máj 2022**

podpis autora

Pod'akovanie

Ďakujem vedúcemu svojej diplomovej práce pánovi doc. Ing. Pavlovi Vorlovi, Ph.D. za odborné rady, podporu a hlavne motiváciu, bez ktorej by táto diplomová práca nevznikla.

V Brne dna: **22. máj 2022**

podpis autora

Obsah

ZOZNAM OBRÁZKOV	9
ZOZNAM TABULIEK	10
ÚVOD	11
1. PRIEPUSTNÉ MENIČE	13
1.1 JEDNOČINNÝ PRIEPUSTNÝ MENIČ	13
1.2 DVOJČINNÝ PRIEPUSTNÝ MENIČ	16
2. NÁVRH ZAPOJENIA SILOVÉHO OBVODU.....	17
2.1 VSTUPNÝ FILTER	17
2.2 DVOJCESTNÝ USMERŇOVAČ S NABÍJACÍM KONDENZÁTOROM	17
2.3 VÝKONOVÉ TRANZISTORY A NULOVÉ DIÓDY	18
2.4 IMPULZNÝ VÝKONOVÝ TRANSFORMÁTOR	19
2.5 SYNCHRÓNNY USMERŇOVAČ	19
2.6 VÝSTUPNÝ LC FILTER.....	19
2.7 NAPÁJANIE RIADIACEHO OBVODU	20
2.8 BUDIACI OBVOD VÝKONOVÝCH TRANZISTOROV	20
2.9 SCHÉMA SILOVÉHO OBVODU	21
3. NÁVRH VINUTÝCH SÚČIASTOK.....	22
3.1 VÝKONOVÝ TRANSFORMÁTOR	22
3.2 NÁVRH VÝSTUPNEJ TLMIVKY	24
3.3 NÁVRH PRÚDOVÉHO TRANSFORMÁTORA.....	25
3.4 NÁVRH BUDIACEHO TRANSFORMÁTORA	27
4. DIMENZOVANIE POLOVODIČOVÝCH SÚČIASTOK.....	29
4.1 VSTUPNÝ USMERŇOVACÍ MOSTÍK.....	29
4.2 VÝKONOVÝ TRANZISTOR	29
4.3 DEMAGNETIZAČNÁ DIÓDA	30
4.4 SYNCHRÓNNY USMERŇOVAČ	30
4.4.1 <i>Usmerňovací tranzistor</i>	31
4.4.2 <i>Nulový tranzistor</i>	31
5. DIMENZOVANIE CHLADIČA.....	32
5.1 VÝPOČET TEPELNÉHO ODPORU CHLADIČA	32
5.2 VÝPOČET TEPLoty ČIPOV PRI KRÁTKODOBOM NADPRÚDE.....	32
6. NÁVRH RIADIACICH OBVODOV.....	34
6.1 OBVOD MERANIA	34
6.2 PWM GENERÁTOR	34
6.3 PI REGULÁCIA VÝSTUPNÉHO NAPÄTIA A PRÚDU.....	35
6.4 BUDIČ VÝKONOVÝCH TRANZISTOROV.....	35
6.5 BUDIČ SYNCHRÓNNEHO USMERŇOVAČA	36
6.6 OCHRANNÝ KOMPARÁTOR PRE NULOVÝ TRANZISTOR	36
6.7 CELKOVÁ SCHÉMA RIADIACEHO OBVODU	37

7. VÝROBA VINUTÝCH SÚČIASTOK	38
7.1 VÝKONOVÝ TRANSFORMÁTOR	38
7.2 VÝSTUPNÁ TLMIVKA	39
7.3 PRÚDOVÝ TRANSFORMÁTOR	40
7.4 BUDIACI TRANSFORMÁTOR	41
8. NÁVRH A VÝROBA DOSIEK PLOŠNÉHO SPOJA	42
8.1 NÁVRH DPS RIADIACEHO OBVODU	42
8.2 VÝROBA DPS RIADIACEHO OBVODU	43
8.3 NÁVRH DPS SILOVÉHO OBVODU	44
8.4 VÝROBA DPS SILOVÉHO OBVODU	45
9. OŽIVENIE A DOĽADOVANIE	46
9.1 OŽIVENIE RIADIACEHO OBVODU	46
9.2 OŽIVENIE SILOVÉHO OBVODU	47
9.3 DOĽADENIE	49
10. MERANIE	52
10.1 MERANIE VÝKONOVÝCH TRANZISTOROV	52
10.2 MERANIE SYNCHRÓNNEHO USMERŇOVAČA	55
10.3 MERANIE JEDNOSMERNÉHO MEDZIOBVODU	59
10.4 MERANIE VÝKONOV, ÚČINNOSTI A ÚČINNÍKU	60
ZÁVER	63
LITERATÚRA	65
ZOZNAM SYMBOLOV A SKRATIEK	66
ZOZNAM PRÍLOH	69

ZOZNAM OBRÁZKOV

Obrázok 1 Základné zapojenie jednočinného priepustného meniča [1].....	13
Obrázok 2 Priebehy napätia v meniči [1].....	14
Obrázok 3 Priebehy prúdov v meniči [1].....	15
Obrázok 4 Základné zapojenie dvojčinného priepustného meniča [1]	16
Obrázok 5 Výsledná schéma silového obvodu	21
Obrázok 6 Rozmery jadra výkonového transformátora	23
Obrázok 7 Rozmery jadra výstupnej tlmivky	25
Obrázok 8 Rozmery jadra prúdového transformátora.....	27
Obrázok 9 Celková schéma riadiaceho obvodu	37
Obrázok 10 Výkonový transformátor	38
Obrázok 11 Výstupná tlmivka	39
Obrázok 12 Prúdový transformátor.....	40
Obrázok 13 Budiaci transformátor.....	41
Obrázok 14 DPS riadiaceho obvodu	42
Obrázok 15 Hotová DPS riadiaceho obvodu	43
Obrázok 16 DPS silového obvodu	44
Obrázok 17 Hotová DPS silového obvodu	45
Obrázok 18 Riadiaci signál výkonových tranzistorov primárnej strany	47
Obrázok 19 Meranie výstupného krátkodobého prúdu	48
Obrázok 20 Hotová nabíjačka – s krytom.....	50
Obrázok 21 Hotová nabíjačka - bez krytu	51
Obrázok 22 Priebehy na riadiacich elektródach dolného výkonového tranzistora primárnej strany a usmerňovacieho tranzistora.....	52
Obrázok 23 Priebehy na riadiacej elektróde a draine výkonového tranzistora bez záťaže	53
Obrázok 24 Priebehy na riadiacej elektróde a draine výkonového tranzistora so záťažou	54
Obrázok 25 Detail vypínacieho deja výkonového tranzistora	54
Obrázok 26 Detail zapínacieho deja výkonového tranzistora	55
Obrázok 27 Priebehy napätí na synchrónnom usmerňovači pri prúde 54 A	56
Obrázok 28 Detail časového oneskorenia pri prúde 54 A.....	56
Obrázok 29 Detail časového oneskorenia pri prúde 20 A.....	57
Obrázok 30 Priebehy napätí synchrónneho usmerňovača pri prúde 9,2 A	59
Obrázok 31 Zvlnenie napätia v DC medziobvode (meranie so striedavou väzbou)	59
Obrázok 32 Priebehy sieťového napätia a prúdu pri malom výkone	60
Obrázok 33 Priebehy sieťového napätia a prúdu pri nominálnom výkone	61

ZOZNAM TABULIEK

Tabuľka 1 Vypočítané hodnoty teplôt čipov polovodičov.....	33
--	----

ÚVOD

Táto diplomová práca je zameraná na kompletný návrh a výrobu nabíjačky olovených akumulátorov 12 V, ktorý pracuje na princípe jednočinného priepustného meniča (pulzný menič). Napriek tomu, že v poslednej dobe sú čoraz viac rozšírené batérie na báze nových technológií ako napríklad Li-ion batérie, stále sa ešte používajú aj olovené. Téma návrhu nabíjačky zapadá do oblasti výkonovej elektroniky, presnejšie do oblasti meničov.

Na princíp oloveného akumulátora prišiel nemecký vojenský lekár J. W. Sinstedem už v roku 1854. Následne prvú olovenú batériu skonštruovali vo Francúzku. Tento akumulátor bol vyrobený z olovených dosiek, ktoré boli ponorené do roztoku kyseliny sírovej. Veľkou výhodou olovených akumulátorov je, že majú veľmi malý vnútorný odpor (zhruba 1 mΩ) a tak sú schopné krátkodobo dodať veľký prúd pri malom poklese svorkového napätia. Veľký krátkodobý prúd je žiaduci pri štartovaní spaľovacích motorov. Keďže sú tieto batérie značne rozšírené v oblasti dopravných prostriedkov sú potrebné aj nabíjačky k nim.

Na základe charakteristík, poznáme tri rôzne druhy nabíjania olovených akumulátorov. Prvým je nabíjanie konštantným napätím, kedy počas celej doby nabíjania udržujeme konštantné napätie na úrovni 14,5 až 14,7 V. Tento typ nabíjania sa vyznačuje tým, že na začiatku nabíjania batéria odoberá značne veľký prúd, ktorý časom klesá. Výhodou tohto „rýchleho“ nabíjania je, že vybitú batériu sme schopný za krátky čas nabiť až na 80 %. Druhým typom nabíjania je konštantným prúdom. V tomto prípade počas celej doby nabíjania dodávame do batérie konštantný prúd, pričom tu neexistuje jav „rýchle“ nabíjanie. Akumulátor pri tomto type nabíjania je plne nabitý až na konci nabíjania. Tretím typom je kombinácia týchto dvoch nabíjacích charakteristík, kedy v prvej fáze nabíjame konštantným prúdom. V druhej fáze, kedy batéria dosiahla napätie 14,5 – 14,7 V dobíjame konštantným napätím.

Podľa zadania nabíjačka musí byť schopná dlhodobo, čiže niekoľko hodín, dodávať do akumulátora prúd 50 A, pričom musí byť schopná krátkodobo dodať až 100 A. Takýto krátkodobý zaťažovací prúd sa môže využiť napríklad aj pri štartovaní dopravných prostriedkov, ktoré majú spaľovacie motory s menším objemom.

Pred návrhom nabíjačky si bolo potrebné najprv ujasniť princíp fungovania jednočinných priepustných meničov, ktorý je popísaný v prvej kapitole. Prvým krokom pri návrhu bol návrh zapojenia silového obvodu.

V tretej kapitole sme sa venovali návrhu vinutých súčiastok, ktoré sme následne vyrobili. Vo štvrtej a piatej kapitole je popísaný návrh jednotlivých výkonových polovodičových spínacích súčiastok a dimenzovanie chladiča pre tieto súčiastky.

Ďalšou kapitolou je návrh riadiacich obvodov, ktoré sa starajú o správne spínanie jednotlivých výkonových spínacích tranzistorov a zároveň podľa výstupných elektrických veličín riadia nabíjačku.

Podľa navrhnutých schém silového a riadiaceho obvodu je v kapitole osem približený návrh a výroba jednotlivých dosiek plošných spojov.

Predposlednou kapitolou je popis priebehu oživovania riadiaceho obvodu a silového obvodu vrátane popisu jednotlivých malých zmien, ktoré sme museli uskutočniť pre spoľahlivú a bezpečnú prevádzku nabíjačky.

V poslednej, desiatej kapitole je naznačené meranie napätí a prúdov v jednotlivých častiach nabíjačky. Týmito meraniami sme overovali správnu funkciu jednotlivých dielčích prvkov/obvodov v nabíjačke [14].

1. PRIEPUSTNÉ MENIČE

Základnou charakteristikou priepustných meničov je, že energia sa prenáša iba v čase keď sú tranzistory zapnuté. V dobe, keď sú tranzistory vypnuté sa energia neprenáša zo vstupu na výstup. Priepustné meniče obsahujú okrem tranzistorov aj impulzný transformátor, ktorý oddeľuje jednosmerný medziobvod od výstupného obvodu meniča a zároveň zaisťuje aj galvanické oddelenie vstupných svoriek od výstupných. Tieto impulzné transformátory pracujú na vyšších frekvenciách než sieťové transformátory a preto majú oveľa menšie rozmery pri rovnakom výkone. Z dôvodu, že pracujú na vyšších frekvenciách je nutné používať transformátory s feritovým jadrom.

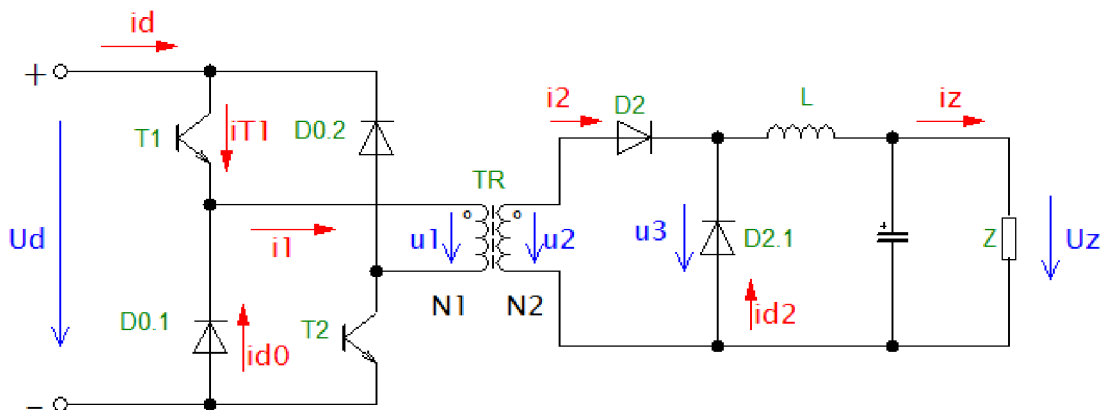
Jednosmerné medziobvody môžu pracovať na rôznych napätiach. Napätovú hladinu jednosmerného medziobvodu určuje spôsob napájania. V prípade, že sa jedná o dvojcestné usmernenie jednofázového sieťového napätia 230 V, jednosmerný medziobvod pracuje na hladine napätia okolo 300 V. Pre prípad, keď sa jedná o trojfázové šesťpulzné usmernenie, tak napätie v jednosmernom medziobvode dosahuje veľkosti zhruba 540 V.

Podľa veľkosti napätia v jednosmernom medziobvode sa používajú tranzistory MOS-FET (pre 300 V) alebo tranzistory IGBT (pre 540 V).

Následne medzní maximálny pracovný kmitočet určuje použitý typ spínacieho tranzistora. Pre IGBT tranzistory je to 60 kHz a pre tranzistory MOS-FET 300 kHz. Ak sú v meniči použité tranzistory MOS-FET tak medzný maximálny kmitočet je okolo 200 kHz, pretože nad touto hodnotu frekvencie sa už začínajú vyskytovať problémy so zvýšenými hysteréznymi stratami v magnetickom obvode, objavujú sa problémy so skinefektom a začínajú sa prejavovať aj parazitné vlastnosti jednotlivých súčiastok [1].

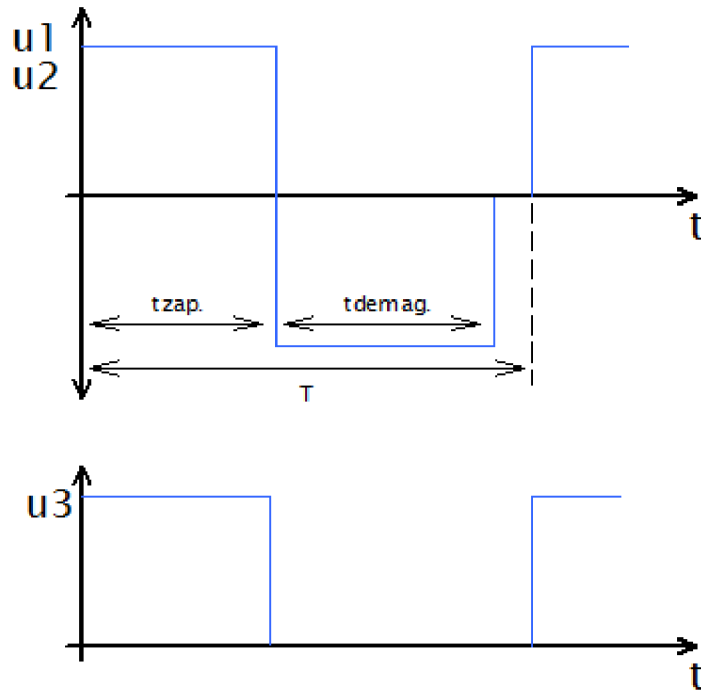
1.1 Jednočinný priepustný menič

Jednočinný priepustný menič je veľmi jednoduchej konštrukcie, pretože sa skladá iba z pár súčiastok. Základné zapojenie jednočinného meniča je na obrázku 1, na ktorom si budeme vysvetľovať aj princíp jeho fungovania.



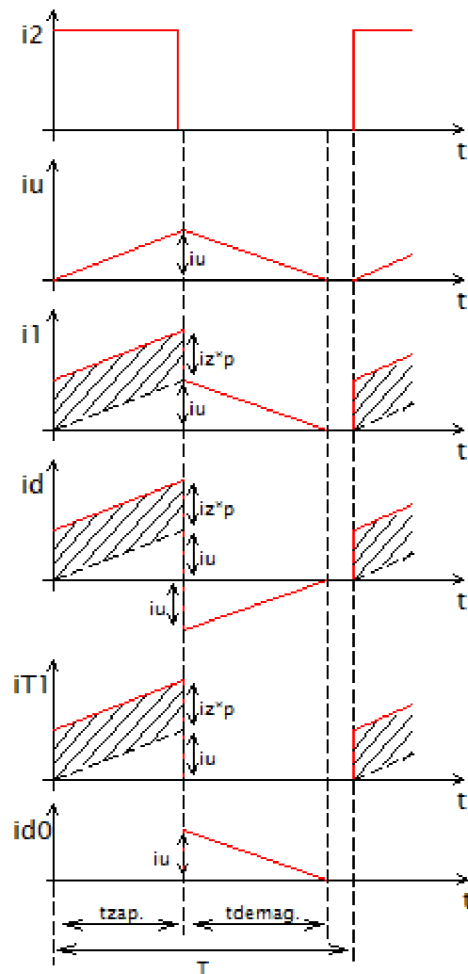
Obrázok 1 Základné zapojenie jednočinného priepustného meniča [1]

Menič je napájaný zo zdroja napätia, ktorá má hodnotu U_d . Tento zdroj napätia môže tvoriť dvojcestné usmernenie jednofázového sieťového napätia, šestipulzné usmernenie trojfázového sieťového napätia alebo iný zdroj napätia, napríklad baterka. Tranzistory T_1 a T_2 sú ovládané naraz, čiže sa zapínajú a vypínajú súčasne. Na obrázku 2 je možné vidieť priebehy napätia v meniči.



Obrázok 2 Priebehy napätia v meniči [1]

V čase t_{zap} sú oba tranzistory T_1 a T_2 zapnuté, a primárne vinutie impulzného transformátora je pripojené na zdroj napätia U_d . V okamžiku, keď sa pripojí primárne vinutie transformátora na zdroj napätia, sa objaví napätie aj na jeho sekundárnej strane (samozrejme veľkosť sekundárneho napätia je závislá na prevode transformátora). Kým je primárne vinutie transformátora pripojené na zdroj napätia cez tranzistory je dióda D_2 polarizovaná v priepustnom smere a tak sa objaví napätie u_3 na výstupe jednocestného usmerňovača. S tým, že sa vypnú tranzistory T_1 a T_2 ešte nezanikne prúd pretekajúci primárnym vinutím ale sa uzavrie cez diódy $D_{0.1}$ a $D_{0.2}$. Keď sa otvoria tieto diódy primárne vinutie transformátora sa pripojí opačnou polaritou na napájacie napätie. Toto záporné napätie pomáha demagnetizácií jadra transformátora. Diódy $D_{0.1}$ a $D_{0.2}$ sú otvorené iba počas doby t_{demag} , ktorý je rovnaký časový interval ako t_{zap} , pretože demagnetizácia trvá rovnako dlho ako magnetizácia jadra. Ako vidíme na obrázku 2 záporné napätie sa objaví aj na sekundárnej strane impulzného transformátora, ale dióda D_2 obmedzí túto zápornú hodnotu a tak na výstupe meniča sa objaví nulové napätie u_3 .



Obrázok 3 Priebehy prúdov v meniči [1]

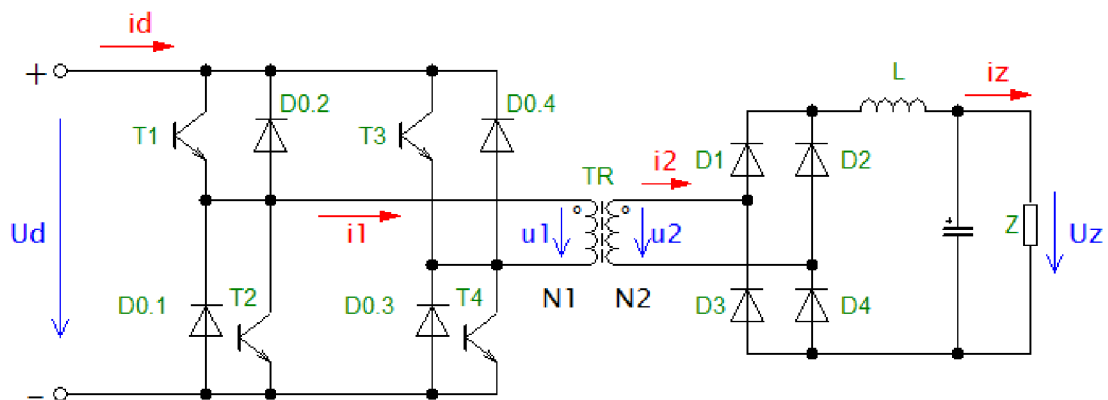
Na obrázku 3 sú znázornené jednotlivé priebehy prúdov v meniči. Priebeh prúdu i_2 je v sekundárnom vinutí transformátora, ktorý tečie cez usmerňovaciú diódu D_2 do výstupného LC filtra. Pomocou LC filtra je tento obdĺžnikový priebeh vyhladený a do záťaže sa dodáva konštantný prúd (prípadne zvlnení). Priebeh i_u znázorňuje magnetizačný prúd transformátora. Magnetizačný prúd narastá v čase, keď je primárne vinutie pripojené na napájacie napätie v kladnom zmysle a klesá v čase keď sa vypnú tranzistory a cez nulové diódy sa primárne vinutie pripojí na napájacie napätie v zápornom zmysle. Priebeh i_1 ukazuje prúd, ktorý odoberá transformátor. Počas doby t_{zap} tečie primárnym vinutím výstupný prúd meniča prepočítaný prevodom transformátora (vyšrafovaná oblasť) ktorý je doplnený o magnetizačný prúd. Odoberaný prúd zo zdroja napätia je na priebehu i_d . Na priebehu i_{T1} vidíme, že tranzistorom tečie prúd (prepočítaný výstupný prúd plus magnetizačný prúd) iba počas doby t_{zap} a nulovou diódou tečie iba demagnetizačný prúd počas doby t_{demag} .

Pre správne fungovanie jednočinného priepustného meniča je dôležitou podmienkou, že strieda meniča nikdy nesmie presiahnuť 0,5. Čo znamená, že doba t_{zap} nesmie byť väčšia ako doba t_{demag} . Ak by bola strieda vyššia ako 0,5 nedochádzalo by k dokonalej

demagnetizácie jadra transformátora a tak by došlo k presýteniu jadra. Presýtenie jadra transformátora by malo za dôsledok zvýšenie odoberaného prúdu a následne by došlo ku zničeniu najslabšieho prvku v konštrukcii [1].

1.2 Dvojčinný priepustný menič

Priepustný menič môže byť vytvorený aj ako dvojčinný. Základné zapojenie dvojčinného priepustného meniča s impulzným transformátorom je možné vidieť na obrázku 4.



Obrázok 4 Základné zapojenie dvojčinného priepustného meniča [1]

Rozdiel medzi jednočinným a dvojčinným priepustným meničom je na prvý pohľad zrejмый. Primárne vinutie impulzného transformátora sa môže pripojiť na napájacie napätie v kladnom zmysle ale aj v zápornom zmysle. To znamená, že priebeh napätia u_1 bude mať bipolárny charakter s pravouhlými pulzmi. Skutočnosť, že transformátor je napájaný bipolárnym napätím znamená, že na sekundárne vinutie transformátora je nutné zapojiť dvojcestný usmerňovač. Pre hladký priebeh výstupného napätia a prúdu sa na výstup dvojcestného usmerňovača zapája ešte napríklad LC filter [1].

2. NÁVRH ZAPOJENIA SILOVÉHO OBVODU

Podľa zadania má naša nabíjačka pracovať na princípe jednočinného priepustného meniča s impulzným transformátorom. To znamená, že pri návrhu zapojenia silového obvodu budeme vychádzať z obrázku 1 z podkapitoly 1.1. Pri návrhu budeme postupovať od vstupných svoriek smerom ku výstupným svorkám. V tejto kapitole označenie jednotlivých prvkov silového obvodu sa vzťahujú na výslednú schému silového obvodu, ktorá je znázornená na obrázku 5.

2.1 Vstupný filter

Na napájanie meniča budeme používať dvojcestné usmernenie s nabíjacím kondenzátorom. Tento typ napájania ale dodáva výrazné rušenie do siete, ktoré musíme odfiltrovať. Z tohto dôvodu je potrebné hneď na vstupné svorky nabíjačky pripojiť filter, ktorý toto rušenie obmedzí.

Filter sa bude skladať z dvoch prúdovo kompenzovaných tlmiviek L_1 , ktoré budú slúžiť na odrušenie súfázových zložiek odoberaného prúdu. Tlmivky budú navinuté na spoločnom jadre bez vzduchovej medzery a každá tlmivka bude mať indukčnosť 3 mH. Aby tlmivky predstavovali pre sieťovú frekvenciu nulovú indukčnosť, je potrebné ich navinúť tak, aby smer vinutia prvej tlmivky bol opačný ako smer vinutia druhej tlmivky.

Ďalším prvkom filtra bude kondenzátor C_3 , ktorý bude zapojený medzi fázový vodič a neutrálny vodič. Tento kondenzátor slúži na odrušenie protifázových zložiek rušivých prúdov. Kondenzátor C_3 bude mať kapacitu o hodnote 470 nF.

Posledným prvkom filtra budú kondenzátory C_1 a C_2 , ktoré budú zapojené medzi pracovnými (fázový a neutrálny vodič) vodičmi a ochranným vodičom. Kondenzátory C_1 a C_2 slúžia na odrušenie súfázových zložiek rušivého signálu medzi pracovnými vodičmi a ochranným vodičom. Hodnotu kapacity týchto kondenzátorov sme stanovili na 10 nF.

Rezonančnú frekvenciu vstupného filtra určíme podľa Thomsonovho vzťahu [2].

$$f_r = \frac{1}{2 \cdot \pi \cdot \sqrt{L_n \cdot 2 \cdot C_y}} = \frac{1}{2 \cdot \pi \cdot \sqrt{3 \cdot 10^{-3} \cdot 2 \cdot 10 \cdot 10^{-6}}} = 20,55 \text{ kHz} \quad (2.1.1)$$

2.2 Dvojcestný usmerňovač s nabíjacím kondenzátorom

Pre vytvorenie jednosmerného napätia, s ktorým bude jednočinný priepustný menič napájaný, sme si zvolili najjednoduchší spôsob – dvojcestné usmernenie (graetzov mostík) sieťového napätia doplnené o nabíjací elektrolytický kondenzátor.

Dvojcestný usmerňovač sa skladá zo štyroch diód, ktoré sínusové napájacie sieťové napätia usmernia. Na výstupe usmerňovača dostaneme sínusové pol kmity jednej polaritty s dvojnásobnou frekvenciou.

Kondenzátor zapojený na výstupe usmerňovača funguje ako špičkový detektor. To znamená, že sa nabije na maximálnu hodnotu napätia a pomaličky sa vybíja. Výsledkom je jednosmerné zvlnené napätie, ktoré už je vhodné na napájanie nášho jednočinného priepustného meniča. Pre výpočet vhodnej kapacity kondenzátora sme si zvolili maximálne zvlnenie napätia na 25 V. Amplitúda sieťového jednofázového napätia je 325 V. K výpočtu sme potrebovali aj strednú hodnotu prúdu v jednosmernom napäťovom medziobvode. Túto hodnotu sme vypočítali tak, že výstupný výkon meniča sme podelili minimálnou hodnotou napätia v jednosmernom napäťovom medziobvode.

$$I_{str_{DCm.}} = \frac{I_{výstup} \cdot U_{výstup}}{U_1} = \frac{50 \cdot 15}{300} = 2,5 \text{ A} \quad (2.2.1)$$

Následne sme vypočítali merný pokles napätia, ktorý sme potrebovali na určenie kapacity kondenzátora.

$$\delta = \frac{\Delta U}{U_{max}} = \frac{25}{325} = 0,07692 \text{ [-]} \quad (2.2.2)$$

Kapacitu kondenzátora sme vypočítali podľa nasledujúceho vzťahu.

$$\begin{aligned} C_n &= \frac{1}{2 \cdot f_s} \cdot \frac{I_{str_{DCm.}}}{\Delta U} \cdot \left[1 - \frac{1}{\pi} \cdot \cos^{-1}(1 - \delta) \right] = \\ &= \frac{1}{2 \cdot 50} \cdot \frac{2,5}{25} \cdot \left[1 - \frac{1}{\pi} \cdot \cos^{-1}(1 - 0,07692) \right] = 874,33 \text{ } \mu\text{F} \end{aligned} \quad (2.2.3)$$

Kvôli obmedzeným rozmerom sme si vybrali kondenzátor C_5 s kapacitou 560 μF .

V okamžiku prvého zapnutia nabíjačky dôjde k odberu s veľkým prúdovým nárazom. Tento náraz spôsobí kondenzátor C_5 , ktorý vo vybitom stave predstavuje skrat. Pre obmedzenie tohto prúdového nárazu na vstup usmerňovača pripojíme NTC termistor R_1 s odporom 4 Ω pri teplote 25 $^{\circ}\text{C}$, ktorý sa po prechode pracovného prúdu zahreje a jeho odpor klesne. Aby tento termistor nebol zaťažovaný trvalo s pracovným prúdom pomocou malého relé K_1 ho premostíme. Toto relé sa zapne až v okamžiku, keď na jeho ovládacom kontakte objaví napätie z pomocného rozbehového transformátora TR_1 .

2.3 Výkonové tranzistory a nulové diódy

Pre vytvorenie obdĺžnikového napätia o vhodnej frekvencií budeme používať tranzistory T_1 a T_2 typu N-MOS-FET a nulové diódy D_1 a D_2 typu Schottky, ktoré sú rýchlejšie než obyčajné diódy a tak na nich vznikajú menšie prepínacie straty. Blízko k dvojici tranzistor – dióda sa ešte pripoja RC členy tvorené kondenzátormi C_7 a C_8 a paralelnou zapojením rezistorov R_2 , R_3 a R_4 , R_5 , ktoré slúžia na odfiltrovanie prekmitov pri spínaní a tak sa zmenšia straty na týchto výkonových polovodičových súčiastkach. Paralelným zapojením týchto rezistorov získame lepšie rozloženie stratového výkonu pri malých rozmeroch SMD súčiastok. Pre obmedzenie malých prekmitov do tohto jednosmerného medziobvodu zapojíme aj kondenzátory C_4 a C_5 .

Do série s primárnym vinutím impulzného transformátora TR_2 sa zapojí ešte aj primárne vinutie prúdového transformátora TR_4 , ktorý bude slúžiť na meranie výstupného prúdu jednočinného priepustného meniča.

2.4 Impulzný výkonový transformátor

Výkonový impulzný transformátor TR_2 slúži na efektívne pretransformovanie jednosmerného napätia z medziobvodu na výstupné napätie a zároveň zvýšenie výstupného prúdu. Ďalej slúži aj ako galvanické oddelenie vstupných svoriek od výstupných. Výkonový impulzný transformátor bude navinutý na feritové toroidné jadro. Bude mať jednu primárnu cievku, ktorá bude pripojená na dvojicu tranzistor – dióda a dve sekundárne vinutia. Prvé sekundárne vinutie bude slúžiť na vytvorenie sekundárneho napätia a prúdu, ktorým bude menič po usmernení a vyhladení nabíjať olovený akumulátor. Druhé sekundárne vinutie bude slúžiť na napájanie riadiaceho obvodu.

2.5 Synchronný usmerňovač

Na výstupné svorky silového sekundárneho vinutia impulzného transformátora sa pripojí synchronný jednocestný usmerňovač. Zvolili sme si synchronný usmerňovač z toho dôvodu, že v porovnaní s diódovým usmerňovačom má menšie prepínacie straty a tak dôjde ku zvýšeniu celkovej účinnosti nabíjačky.

Synchronný usmerňovač budú tvoriť dva MOS-FET tranzistory Q_1 a Q_2 . Prvý „usmerňovací“ tranzistor Q_1 bude zapojený sériovo so sekundárnym vinutím impulzného transformátora a bude slúžiť na usmernenie napätia. Druhý „nulový“ tranzistor Q_2 bude zapojený za usmerňovacím tranzistorom a bude slúžiť na vedenie prúdu v dobe, keď sa impulzný transformátor demagnetizuje.

K týmto tranzistorom budú paralelne pripojené RC články tvorené rezistormi R_6 a R_7 a kondenzátormi C_{10} a C_{11} ktoré budú slúžiť na obmedzenie prekmitov pri spínaní.

Jedinou nevýhodou tohto typu usmerňovača je, že je nutné aj tieto tranzistory riadiť (vhodne zapínať a vypínať). Pričom usmerňovacie diódy nie je potreba nijak riadiť.

2.6 Výstupný LC filter

Na výstup synchronného usmerňovača sa zapojí ešte LC filter tvorené tlmivkou L_2 a kondenzátormi C_{12} a C_{13} , ktorý vyhladí výstupný prúd a napätie do požadovanej miery. Keďže nabíjačka musí obsahovať nadriadenú napäťovú slučku je potrebné výstupné napätie nabíjačky snímať. Z tohto dôvodu bude signál s výstupným napätím vedený späť do riadiaceho obvodu.

2.7 Napájanie riadiaceho obvodu

O napájanie riadiaceho obvodu sa stará jednocestný usmerňovač s filtračným kondenzátorom fungujúcim ako špičkový detektor. Výkonový transformátor má dve sekundárne vinutia, jedno vinutie patrí k silovému obvodu a druhé slúži na napájanie riadiaceho obvodu. Podobne ako v silovom obvode, aj tu je na výstup sekundárneho vinutia pripojený jednocestný usmerňovač, ktorý usmerní sekundárne napätie. O jednocestné usmernenie sa stará dióda D_7 . Špičkový detektor tvorí elektrolytický kondenzátor C_{15} . Pre stabilizovanie výstupného napätia slúži stabilizátor IC_1 typu LM7812, ktorý dáva na jeho výstupnej svorke napätie 12 V jednosmerných. K stabilizátoru napätia sa ešte pripoja keramické kondenzátory C_{16} a C_{17} , ktoré slúžia na chránenie stabilizátora proti parazitnému kmitaniu na vysokofrekvenčných kmitočtoch.

V čase zapnutia nabíjačky, keď ešte výkonové tranzistory nepracujú, o napájanie sa stará malý sieťový transformátor TR_1 s mostíkovým usmernením (diódy D_3 až D_6), ktorý je pripojený na vstup stabilizátora napätia. Taktiež tento napájací obvod (či už transformátor TR_1 alebo sekundár výkonového transformátora TR_2) okrem napájania riadiaceho obvodu sa bude starať aj o napájanie už spomínaného „premostovacieho“ relé K_1 a o napájanie budiaceho obvodu výkonových tranzistorov [1,3].

2.8 Budiaci obvod výkonových tranzistorov

Budiaci obvod slúži na vytvorenie vhodných napätových impulzov pre obe výkonové tranzistory T_1 a T_2 . Z technickej dokumentácie výkonových tranzistorov sme odčítali doporučenú hodnotu predradného odporu (R_8 a R_{11}), cez ktorý sa privádza napätový impulz do riadiacej elektródy. Budiaci obvod tvorí budiaci transformátor TR_3 , ktorý má jedno primárne vinutie a dve sekundárne vinutia. Napätový impulz z riadiaceho obvodu je pripojený na začiatok primárneho vinutia a zároveň pomocou tranzistoru Q_3 sa spojí koniec primárneho vinutia so zemou. Čo znamená, že na sekundárnom vinutí sa objaví kladné napätie, ktoré cez diódy (D_9 až D_{12}) a predradné rezistory zapne výkonové tranzistory. Kladné napätie na sekundárnej strane budiaceho transformátora nedokáže zapnúť PNP tranzistory Q_4 a Q_5 a tak vybijacie rezistory R_{10} a R_{13} budú odpojené.

V čase, keď výkonové tranzistory majú byť vypnuté, riadiaci obvod pripojí začiatok primárneho vinutia budiaceho transformátora TR_3 na zem, s ktorým sa zároveň vypne tranzistor Q_3 , ten odpojí koniec primárneho vinutia od zeme. Nulová dióda D_8 sa otvorí, čím sa pripne koniec primárneho vinutia na kladné napájacie napätie U_{cc} . Takto sa na všetkých vinutiach budiaceho transformátora objaví záporné napätie. Toto záporné napätie už zapne PNP tranzistory Q_4 a Q_5 cez bázové rezistory R_9 a R_{12} . Zapnutím týchto tranzistorov sa skratuje riadiaci kontakt výkonového tranzistoru s emitorom (source) cez rezistor R_{10} a R_{13} a tak dôjde k vypnutiu výkonových tranzistorov T_1 a T_2 [1,3,5].

3. NÁVRH VINUTÝCH SÚČIASTOK

Z dôvodu, že nabíjačka bude mať pracovnú frekvenciu 100 kHz je nutné všetky vinuté súčiastky konštruovať na takúto frekvenciu. Takto vysoká frekvencia už vyžaduje vhodný materiál pre magnetické obvody a pre vinutie. Magnetický obvod vinutých súčiastok bude vyrobený z feritu.

3.1 Výkonový transformátor

Výkonový transformátor bude napájaný z jednosmerného medziobvodu, kde pri uvažovaní úbytku napätia na súčiastkach a poklese napätia v sieti je najnižšie napätie 300 V. Magnetický obvod transformátora bude tvoriť feritové toroidné jadro typu T4919 - CF297. Maximálnu hodnotu magnetickej indukcie v jadre sme stanovili na 0,25 T. Z technickej dokumentácie jadra sme odčítali prierez, ktorý má hodnotu 160,9 mm². Pri návrhu transformátora sme najprv vypočítali počet primárnych závitov, ktoré sme zaokrúhlili na celé číslo.

$$N_1 = \frac{U_1}{2 \cdot f \cdot B_{max} \cdot S_{fe}} = \frac{300}{2 \cdot 100 \cdot 10^3 \cdot 0,25 \cdot 160,9 \cdot 10^{-6}} = 37,3 \rightarrow 37 \text{ z.} \quad (3.1.1)$$

Na to aby sme mohli vypočítať magnetizačný prúd transformátora sme museli určiť indukčnosť primárnej cievky. Pre výpočet indukčnosti sme potrebovali počet závitov primárneho vinutia a z technickej dokumentácie jadra odčítať strednú dĺžku magnetických siločiar ktorá má hodnotu 123,1 mm a relatívnu permeabilitu s hodnotou 2300.

$$L_1 = N_1^2 \cdot \mu_0 \cdot \mu_r \frac{S_{fe}}{l_{fe}} = 37^2 \cdot 4 \cdot \pi \cdot 10^{-7} \cdot 2300 \cdot \frac{160,9 \cdot 10^{-6}}{123,1 \cdot 10^{-3}} = 5,17 \text{ mH} \quad (3.1.2)$$

$$I_{\mu max} = \frac{U_1}{2 \cdot f \cdot L_1} = \frac{300}{2 \cdot 100 \cdot 10^3 \cdot 5,17 \cdot 10^{-3}} = 0,29 \text{ A} \quad (3.1.3)$$

Amplitúdu napätia v sekundárnom vinutí sme stanovili z výstupného napätia transformátora, ktoré musí mať hodnotu 15 V a z pracovnej striedy meniča, ktorú sme stanovili na 0,35.

$$U_2 = \frac{U_{výstup}}{s_p} = \frac{15}{0,35} = 42,86 \text{ V} \quad (3.1.4)$$

Počet sekundárnych závitov sme vypočítali už zo známych hodnôt primárneho a sekundárneho napätia a z počtu primárnych závitov. Výsledok sme zaokrúhlili na celé číslo.

$$N_2 = \frac{U_2 \cdot N_1}{U_1} = \frac{42,86 \cdot 37}{300} = 5,29 \rightarrow 5 \text{ z.} \quad (3.1.5)$$

Pre výpočet prierezu sekundárneho vinutia sme potrebovali určiť efektívnu hodnotu sekundárneho prúdu. Výstupný jednosmerný prúd nabíjačky je 50 A. Maximálna prípustná hodnota striedy je 0,43 a prúdová hustota vo vodiči je 3 A/mm².

$$I_{2ef} = I_{výstup} \cdot \sqrt{s_m} = 50 \cdot \sqrt{0,43} = 32,79 \text{ A} \quad (3.1.6)$$

$$S_{cu2} = \frac{I_{2ef}}{\sigma} = \frac{32,79}{3} = 10,93 \text{ mm}^2 \quad (3.1.7)$$

Pre stanovenie prierezu primárneho vinutia sme vypočítali efektívnu hodnotu primárneho prúdu podľa ktorého sme určili prierez primárneho vinutia. Prúdovú hustotu v primárnom vinutí sme stanovili na rovnakú hodnotu (3 A/mm^2) ako v sekundárnom vinutí.

$$I_{1ef} = I_{2ef} \cdot \frac{N_2}{N_1} = 32,79 \cdot \frac{5}{37} = 4,43 \text{ A} \quad (3.1.8)$$

$$S_{cu1} = \frac{I_{1ef}}{\sigma} = \frac{4,43}{3} = 1,48 \text{ mm}^2 \quad (3.1.9)$$

Následne sme vypočítali celkový prierez vinutí, ktorý sme potrebovali pre určenie činiteľa plnenia okna jadra transformátora.

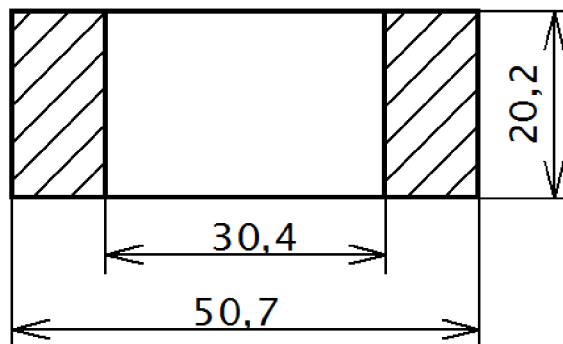
$$S_{cu} = N_1 \cdot S_{cu1} + N_2 \cdot S_{cu2} = 37 \cdot 1,48 + 5 \cdot 10,93 = 109,29 \text{ mm}^2 \quad (3.1.10)$$

Pre výpočet činiteľa plnenia okna bolo potrebné ešte poznať aj prierez okna jadra. Priemer okna sme odčítali z technickej dokumentácie jadra transformátora. Na obrázku 6 sú znázornené dôležité rozmery jadra.

$$S_o = \pi \cdot \frac{D_o^2}{4} = \pi \cdot \frac{30,4^2}{4} = 725,83 \text{ mm}^2 \quad (3.1.11)$$

Činiteľ plnenia okna sme stanovili ako jednoduchý podiel celkového prierezu vinutia a prierezu okna. Výsledný činiteľ nesmie byť väčší ako 0,3, pretože prierez vodičov vinutia bude zväčšený o izoláciu a bude závisieť aj na type vodiča [1,4].

$$k_{pl} = \frac{S_{cu}}{S_o} = \frac{109,29 \cdot 10^{-6}}{725,83 \cdot 10^{-6}} = 0,15 [-] \quad (3.1.12)$$



Obrázok 6 Rozmery jadra výkonového transformátora

3.2 Návrh výstupnej tlmivky

Pre výstupnú tlmivku budeme používať jadro typu ETD 5922 – CF297. Výstupná tlmivka musí mať požadovanú indukčnosť, ktorú sme určili z amplitúdy sekundárneho napätia výkonového transformátora, z pracovnej frekvencie, z pracovnej striedy meniča a z maximálnej hodnoty zvlnenia (6 A) výstupného prúdu pri maximálnom zaťažení.

$$L_{v.tl.} = \frac{U_2}{2 \cdot f \cdot \Delta I} \cdot (1 - s_p) \cdot s_p = \frac{42,86}{2 \cdot 100 \cdot 10^3 \cdot 6} \cdot (1 - 0,35) \cdot 0,35 = 8,13 \mu H \quad (3.2.1)$$

Potrebný počet závitov výstupnej tlmivky sme stanovili z požadovanej indukčnosti, z maximálneho výstupného prúdu, z maximálnej hodnoty magnetickej indukcie v jadre a z prierezu jadra, ktorý sme odčítali z technickej dokumentácie jadra. Výslednú hodnotu počtu závitov sme zaokrúhlili na celé číslo.

$$N_{v.tl.} = \frac{L_{v.tl.} \cdot I_{max_{v.tl.}}}{B_{max_{v.tl.}} \cdot S_{fe_{v.tl.}}} = \frac{8,13 \cdot 10^{-6} \cdot 106}{0,32 \cdot 368 \cdot 10^{-6}} = 7,3 \rightarrow 7 z. \quad (3.2.2)$$

Pre výpočet prierezu okna výstupnej tlmivky sme z technickej dokumentácie jadra odčítali vnútorný priemer stredu jadra d_{stred} a vonkajší priemer stredu jadra D_{stred} . Na obrázku 7 sú znázornené rozmery jadra výstupnej tlmivky.

$$S_{o_{v.tl.}} = \left(\frac{D_{stred}}{2} - \frac{d_{stred}}{2} \right) \cdot 2 \cdot h = \left(\frac{44,7}{2} - \frac{21,65}{2} \right) \cdot 2 \cdot 22,45 = 517,47 mm^2 \quad (3.2.3)$$

Prierez vodiča vinutia výstupnej tlmivky bude rovnaký ako prierez sekundárneho vinutia výkonového transformátora. Podľa už známych hodnôt počtu závitov a prierezu sme určili celkový prierez vinutia.

$$S_{cu_{v.tl.}} = N_{v.tl.} \cdot S_{cu2} = 7 \cdot 10,93 = 76,5 mm^2 \quad (3.2.4)$$

Podľa prierezu okna výstupnej tlmivky a celkového prierezu vinutia sme ručili činiteľ plnenia okna, ktorý aj v tomto prípade musí byť menšie ako 0,3.

$$k_{pl_{v.tl.}} = \frac{S_{cu_{v.tl.}}}{S_{o_{v.tl.}}} = \frac{76,5}{517,47} = 0,15 [-] \quad (3.2.5)$$

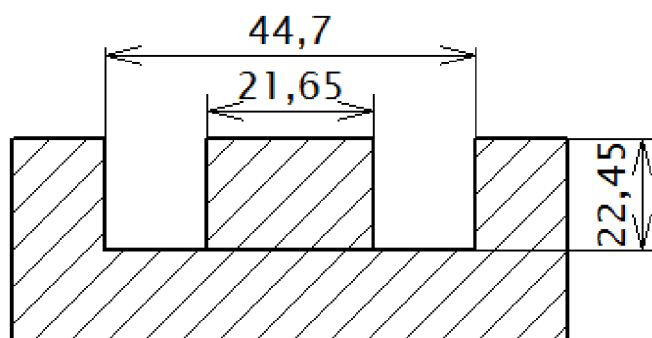
Pre správnu funkciu výstupnej tlmivky bolo potrebné ešte určiť približnú dĺžku vzduchovej medzery. Skutočnú vzduchovú medzeru bolo vhodné nastaviť na už navinutej tlmivke pomocou merania indukčnosti RLC metrom. Hodnotu relatívnej permeability - 2300 a strednú dĺžku magnetických siločiar - 139 mm sme odčítali z technickej dokumentácie jadra.

$$l_{vzd} = \frac{N_{v.tl.} \cdot \mu_0 \cdot I_{max_{v.tl.}}}{B_{max_{v.tl.}}} - \frac{l_{fe_{v.tl.}}}{\mu_{r_{v.tl.}}} = \frac{7 \cdot 4 \cdot \pi \cdot 10^{-7} \cdot 106}{0,32} - \frac{139 \cdot 10^{-3}}{2300} = 2,85 mm \quad (3.2.6)$$

Výstupná tlmivka bude doplnená o filtračný kondenzátor. Pre výpočet kapacity kondenzátora bolo potrebné stanoviť zvlnenie výstupného napätia. Toto zvlnenie sme stanovili na 0,1 V.

$$C_{v.tl.} = \frac{\Delta I}{8 \cdot f \cdot \Delta U} = \frac{6}{8 \cdot 100 \cdot 10^3 \cdot 0,1} = 75 \mu F \rightarrow 6600 \mu F \quad (3.2.7)$$

Vypočítaná kapacita výstupného filtračného kondenzátora má až príliš malú hodnotu, a preto použijeme dve paralelne spojené kondenzátory s celkovou kapacitou 6600 μF , ktoré majú menší sériový odpor a tak aj menší stratový výkon. Kondenzátory s väčšiu kapacitou majú väčšie puzdro a tak je zabezpečený lepší odvod tepla [1,5].



Obrázok 7 Rozmery jadra výstupnej tlmivky

3.3 Návrh prúdového transformátora

Prúdový transformátor, ktorý bude zapojený na primárne vinutie výkonového transformátora bude vyhotovený podobne ako ostatné vinuté súčiastky na feritovom jadre, konkrétne z typu T1605 – CF 191. V prvom kroku bolo nutné zistiť amplitúdu prúdu primárnou cievkou výkonového transformátora pri maximálnom výstupnom nadprúde. Maximálnu hodnotu nadprúdu sme stanovili na 110 A (pri tejto hodnote bude reagovať prúdová ochrana). Amplitúdu primárnou cievkou výkonového transformátora sme stanovili z prevodu.

$$I_{1max_{nadp.}} = I_{2_{nadp.}} \cdot \frac{N_2}{N_1} = 110 \cdot \frac{5}{37} = 14,86 A \quad (3.3.1)$$

Pre výpočet maximálnej hodnoty magnetickej indukcie v jadre prúdového transformátora sme potrebovali určiť maximálny čas jedného pulzu.

$$t_{1max} = \frac{1}{f} \cdot s_m = \frac{1}{100 \cdot 10^3} \cdot 0,43 = 4,3 \mu s \quad (3.3.2)$$

Primárne vinutie bude tvorené jedným závitom ako pri každom prúdovom transformátore. Počet sekundárnych závitov sme stanovili na 50. Pre určenie chyby transformátora sme potrebovali stanoviť napätie v bode, kde sa bude toto napätie snímať. V snímanom bode musí mať napätie hodnotu 2,5 V pri nadprúde 110 A. Tento bod sa nachádza za dvomi diódami (v riadiacom obvode), ktoré majú prahové napätie 0,5 V. Pre výpočet chyby sme ešte museli odčítať koeficient A_L z technickej dokumentácie jadra transformátora.

$$N_{ptr.1} \cdot N_{ptr.2} \gg \frac{U_{2max} + 2 \cdot U_F}{I_{1max.nadp.} \cdot A_L}$$

$$1 \cdot 50 \gg \frac{2,5 + 2 \cdot 0,5}{14,86 \cdot 2200 \cdot 10^{-9}}$$

$$50 \gg 0,46 \quad (3.3.4)$$

Podmienkou prijateľnej chyby prúdového transformátora je, že súčin počtu závitov musí byť oveľa väčší než podiel napätia a prúdu vynásobené koeficientom A_L . Túto podmienku sme splnili, pretože súčin počtu závitov je viac ako 100 násobok podielu.

Následne sme vypočítali maximálnu hodnotu magnetickej indukcie v jadre prúdového transformátora. Prierez jadra sme odčítali z technickej dokumentácie jadra.

$$B_{ptr.max} = \frac{(U_{2max} + U_F) \cdot t_{1max}}{N_{ptr.2} \cdot S_{ptr.fe}} = \frac{(2,5 + 0,5) \cdot 4,3 \cdot 10^{-6}}{50 \cdot 15,7 \cdot 10^{-6}} = 0,016 T \quad (3.3.5)$$

Odpor, ktorým musíme sekundárne vinutie prúdového transformátora zaťažiť bolo vypočítané nasledujúcim spôsobom.

$$R_z = \frac{(U_{2max} + 2 \cdot U_F) \cdot N_{ptr.2}}{I_{1max.nadp.} \cdot N_{ptr.1}} = \frac{(2,5 + 2 \cdot 0,5) \cdot 50}{14,86 \cdot 1} = 11,77 \Omega \quad (3.3.6)$$

Ako aj v predchádzajúcich prípadoch, aj v tomto prípade sme museli určiť amplitúdu a efektívnu hodnotu sekundárneho prúdu transformátora pre výpočet priemeru a prierezu drôtu.

$$I_{2max.nadp.} = I_{1max.nadp.} \cdot \frac{N_{ptr.1}}{N_{ptr.2}} = 14,86 \cdot \frac{1}{50} = 0,3 A \quad (3.3.7)$$

$$I_{2ef.nadp.} = I_{2max.nadp.} \cdot \sqrt{s_m} = 0,3 \cdot \sqrt{0,43} = 0,19 A \quad (3.3.8)$$

Priemer použitého vodiča sme určili podľa efektívnej hodnoty prúdu a prúdovej hustoty, ktorý činí $3 A/mm^2$.

$$d_{cu2.nadp.} = \sqrt{\frac{I_{2ef.nadp.} \cdot 4}{\sigma \cdot \pi}} = \sqrt{\frac{0,19 \cdot 4}{3 \cdot \pi}} = 0,28 mm \quad (3.3.9)$$

Efektívnu hodnotu primárneho prúdu sme určili rovnakým spôsobom ako v predchádzajúcom prípade.

$$I_{1ef.nadp.} = I_{1max.nadp.} \cdot \sqrt{s_m} = 14,86 \cdot \sqrt{0,43} = 9,75 A \quad (3.3.10)$$

Určili sme aj prierez primárneho závitú podľa uvažovanej prúdovej hustoty.

$$S_{cu1.nadp.} = \frac{I_{1ef.nadp.}}{\sigma} = \frac{9,75}{3} = 3,25 mm^2 \quad (3.3.11)$$

Následne sme vypočítali celkový prierez vodičov v okne transformátora a aj prierez okna jadra transformátora. Priemer okna jadra sme odčítali z technickej dokumentácie.

$$S_{cu.nadp.} = N_{ptr.1} \cdot S_{cu1.nadp.} + N_{ptr.2} \cdot \frac{I_{2ef.nadp.}}{\sigma} =$$

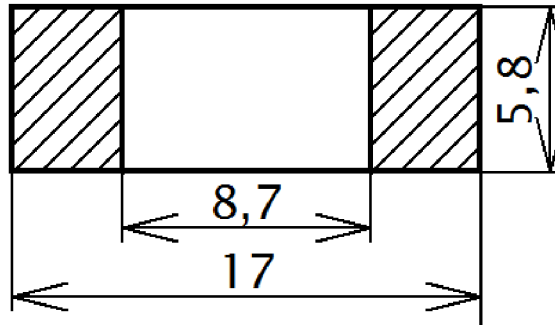
$$= 1 \cdot 3,25 + 50 \cdot \frac{0,19}{3} = 6,5 mm^2 \quad (3.3.12)$$

$$S_{o_{ptr.}} = \pi \cdot \frac{D_{o_{ptr.}}^2}{4} = \pi \cdot \frac{8,7^2}{4} = 59,45 \text{ mm}^2 \quad (3.3.13)$$

Posledným krokom pri návrhu prúdového transformátora bolo vypočítať činiteľ plnenia okna jadra transformátora. Činiteľ plnenia aj v tomto prípade môže mať maximálnu hodnotu 0,3.

$$k_{pl_{ptr.}} = \frac{S_{cu_{nadp.}}}{S_{o_{ptr.}}} = \frac{6,5}{59,45} = 0,11 [-] \quad (3.3.14)$$

Na obrázku 9 je možné vidieť dôležité rozmery jadra prúdového transformátora.



Obrázok 8 Rozmery jadra prúdového transformátora

3.4 Návrh budiaceho transformátora

Budiaci transformátor je zapojený na výstupe riadiaceho obvodu. Cez tento budiaci transformátor sa dodáva napätie do riadiacich hradiel výkonových tranzistorov. Budiaci transformátor má jedno primárne vinutie a dve sekundárne vinutia. Jeho návrh je veľmi podobný návrhu výkonového transformátora. Jadro budiaceho transformátora bude z feritového materiálu typu T2021-CF138. Toto jadro má prierez 48 mm^2 a nami zvolená maximálna indukcia má hodnotu $0,22 \text{ T}$. V prvom kroku sme si určili počet závitov primárneho vinutia. Z dôvodu, že nami zvolená maximálna indukcia je dosť vysoká, počet závitov primárneho vinutia nakoniec sme zvýšili o jeden a tak sme dosiahli menšiu indukciu v jadre. Napätie primárneho vinutia je 12 V , keďže celý riadiaci obvod je napájaný zo zdroja napätia 12 V .

$$N_{1_{btr.}} = \frac{U_{1_{btr.}}}{2 \cdot f \cdot B_{max_{btr.}} \cdot S_{fe_{btr.}}} + 1 = \frac{12}{2 \cdot 100 \cdot 10^3 \cdot 0,22 \cdot 48 \cdot 10^{-6}} + 1 = 6,68 \rightarrow 7 \text{ z.} \quad (3.4.1)$$

Sekundárne vinutia budú mať rovnaký počet závitov ako primárne vinutie.

$$N_{2_{btr.}} = N_{1_{btr.}} = 7 \text{ z.} \quad (3.4.2)$$

Pomocou koeficientu A_L a počtu primárnych závitov sme určili indukčnosť transformátora.

$$L_{1_{btr.}} = N_{1_{btr.}}^2 \cdot A_L = 15^2 \cdot 2200 \cdot 10^{-9} = 0,11 \text{ mH} \quad (3.4.3)$$

Podľa indukčnosti transformátora, napájacieho napätia a pracovnej frekvencie sme určili magnetizačný prúd.

$$I_{\mu max_{btr.}} = \frac{U_{1_{btr.}}}{2 \cdot f \cdot L_{1_{btr.}}} = \frac{12}{2 \cdot 100 \cdot 10^3 \cdot 0,11 \cdot 10^{-3}} = 0,56 \text{ A} \quad (3.4.4)$$

Maximálnu hodnotu sekundárneho napätia sme určili pomocou napätia primárneho vinutia a prevodu transformátora.

$$U_{2_{btr.}} = U_{1_{btr.}} \cdot \frac{N_{2_{btr.}}}{N_{1_{btr.}}} = 12 \cdot \frac{7}{7} = 12 \text{ V} \quad (3.4.5)$$

Výkonový tranzistor má parazitnú kapacitu medzi jeho riadiacim hradlom a emitorom, čo znamená, že v okamžiku zapínania tranzistora, kým tieto kapacity nie sú nabité, predstavujú skrat. Z toho plynie, že v momente, keď sa objaví napätie na sekundárnej cievke budiaceho transformátora prúd do tranzistora je obmedzený iba predradným sériovým odporom s hodnotou 10Ω . Čiže pomocou Ohmovho zákona sme vypočítali sekundárny prúd transformátorom (jedná sa iba o prúdový impulz, ktorý nabíjaním parazitnej kapacity klesá).

$$I_{2max_{btr.}} = \frac{U_{2_{btr.}}}{R_G} = \frac{12}{10} = 1,2 \text{ A} \quad (3.4.6)$$

Efektívnu hodnotu prúdu sme vypočítali pomocou maximálnej striedy meniča. Následne sme určili prierez sekundárneho vinutia.

$$I_{2ef_{btr.}} = I_{2max_{btr.}} \cdot \sqrt{s_m} = 1,2 \cdot \sqrt{0,43} = 0,79 \text{ A} \quad (3.4.7)$$

$$S_{cu2_{btr.}} = \frac{I_{2ef_{btr.}}}{\sigma} = \frac{0,79}{3} = 0,26 \text{ mm}^2 \quad (3.4.8)$$

Efektívnu hodnotu primárneho prúdu sme určili pomocou prevodu transformátora a v ďalšom kroku sme určili prierez primárneho vinutia.

$$I_{1ef_{btr.}} = 2 \cdot I_{2ef_{btr.}} \cdot \frac{N_{2_{btr.}}}{N_{1_{btr.}}} = 2 \cdot 0,79 \cdot \frac{7}{7} = 1,57 \text{ A} \quad (3.4.9)$$

$$S_{cu1_{btr.}} = \frac{I_{1ef_{btr.}}}{\sigma} = \frac{1,57}{3} = 0,52 \text{ mm}^2 \quad (3.4.10)$$

Ako aj v predchádzajúcich kapitolách aj tu sme určili celkový prierez vinutia v okne jadra transformátora.

$$S_{cu_{btr.}} = N_{1_{btr.}} \cdot S_{cu1_{btr.}} + 2 \cdot N_{2_{btr.}} \cdot S_{cu2_{btr.}} = 7 \cdot 0,52 + 2 \cdot 7 \cdot 0,26 = 7,34 \text{ mm}^2 \quad (3.4.11)$$

Činiteľ plnenia okna budiaceho transformátora sme určili jednoduchým podielom celkového prierezu vinutia ku prierezu okna jadra transformátora. Budiaci transformátor bude navinutý na jadre, ktorý má prierez okna $65,76 \text{ mm}^2$ [1,5].

$$k_{pl_{btr.}} = \frac{S_{cu_{btr.}}}{S_{o_{btr.}}} = \frac{7,34 \cdot 10^{-6}}{65,76 \cdot 10^{-6}} = 0,11 [-] \quad (3.4.12)$$

4. DIMENZOVANIE POLOVODIČOVÝCH SÚČIASTOK

Polovodiče, podobne ako ostatné súčiastky v nabíjačke budú namáhané napätím a prechádzajúcim prúdom. Z toho dôvodu, že polovodičové súčiastky sú citlivé na takéto namáhanie je potreba ich dostatočne napäťovo aj prúdovo dimenzovať. Dôležitou časťou je stratový výkon, ktorý vzniká na týchto polovodičových súčiastkach. Stratový výkon sa mení na teplo a tak sú súčiastky namáhané aj tepelne. Pre dimenzovanie chladiča, ktorý bude obsahom ďalšej kapitoly bolo potrebné vypočítať tieto stratové výkony hlavne v súčiastkach v silovom obvode. Pri výpočtoch budeme uvažovať maximálny dlhodobý výstupný prúd nabíjačky 50 A [1,6,7].

4.1 Vstupný usmerňovací mostík

Ako to už bolo spomenuté v predchádzajúcich kapitolách, nabíjačka bude napájaná z jednofázového sieťového napätia. Pri napäťovom dimenzovaní usmerňovacieho mostíku vychádzame z amplitúdy jednofázového napätia, ktoré má hodnotu 325 V. Zo širokej ponuky usmerňovacích mostíkov sme si vybrali typ GBJ3510, ktoré je navrhnuté na napätie 1000 V a je schopný preniesť dostatočný prúd aj pri krátkodobom výstupnom prúde 100 A. Diódy tohto mostíka majú prahové napätie 1,05 V. Pre výpočet stratového výkonu sme si najprv vypočítali strednú hodnotu prúdu tečúcu cez tento mostík.

$$I_{str_{usm.}} = I_{výstup} \cdot \frac{U_{výstup}}{U_1} = 50 \cdot \frac{15}{300} = 2,5 \text{ A} \quad (4.1.1)$$

Podľa strednej hodnoty prúdu usmerňovača a prahového napätia sme boli schopný vypočítať stratový výkon celého usmerňovacieho mostíka [1,6,7,8].

$$P_{str_{usm.}} = 2 \cdot U_{p_{usm.}} \cdot I_{str_{usm.}} = 2 \cdot 1,05 \cdot 2,5 = 5,25 \text{ W} \quad (4.1.2)$$

4.2 Výkonový tranzistor

Výkonový tranzistor slúži na vytvorenie obdĺžnikového napätia, ktoré následne výkonový transformátor pretransformuje na nižšie napätie. V nabíjačke budeme používať tranzistory typu UF3C065080K4S. Efektívnu hodnotu prúdu výkonovým tranzistorom sme vypočítali z výstupného prúdu, prevodu transformátora a z maximálnej striedy meniča.

$$I_{ef_{vtr.}} = I_{výstup} \cdot \frac{N_2}{N_1} \cdot \sqrt{s_m} = 50 \cdot \frac{5}{37} \cdot \sqrt{0,43} = 4,43 \text{ A} \quad (4.2.1)$$

Špičkovú hodnotu, prúdu výkonovým tranzistorom sme vypočítali podľa výstupného prúdu nabíjačky a prevodu výkonového transformátora ku ktorej sme pričítali magnetizačný prúd výkonového transformátora.

$$I_{max_{vtr.}} = I_{výstup} \cdot \frac{N_2}{N_1} + I_{\mu max} = 50 \cdot \frac{5}{37} + 0,29 = 7,05 \text{ A} \quad (4.2.2)$$

Z katalógu vybraného tranzistora sme odčítali stratovú prepínicu energiu W_{kat} , ktorá je udávaná pri prúde 20 A a napätí 400 V. Pomocou jednoduchkej trojčlenky sme určili prepínicu stratovú energiu pre maximálne napätie jednosmerného medziobvodu meniča a pre maximálny prúd.

$$W_{c_{vtr.}} = \frac{W_{kat_{vtr.}} \cdot U_{amp_{1f}} \cdot I_{max_{vtr.}}}{I_{kat_{vtr.}} \cdot U_{kat_{vtr.}}} = \frac{162 \cdot 10^{-6} \cdot 325 \cdot 7,05}{20 \cdot 400} = 46,38 \mu\text{J} \quad (4.2.3)$$

Prepínicie straty výkonovým tranzistorom sme určili podľa prepínickej stratovej energie a pracovnej frekvencie.

$$P_{prep_{vtr.}} = W_{c_{vtr.}} \cdot f = 46,43 \cdot 10^{-6} \cdot 100 \cdot 10^3 = 4,64 \text{ W} \quad (4.2.4)$$

Straty vedením tranzistora sme určili pomocou súčinu dynamického odporu v zapnutom stave a kvadrátu efektívnej hodnoty prúdu.

$$P_{ved_{vtr.}} = R_{DSon_{vtr.}} \cdot I_{ef_{vtr.}}^2 = 141 \cdot 10^{-3} \cdot 4,43^2 = 2,77 \text{ W} \quad (4.2.5)$$

Celková strata v jednom výkonovom tranzistore je súčet strát vedením a prepínaním. A zároveň je to výkon ktorý sa mení v tranzistore na teplo, ktoré musíme vhodným chladičom odvieť do okolia [1,6,7,9].

$$P_{str_{vtr.}} = P_{prep_{vtr.}} + P_{ved_{vtr.}} = 4,64 + 2,77 = 7,41 \text{ W} \quad (4.2.6)$$

4.3 Demagnetizačná dióda

V predchádzajúcich kapitolách bolo ujasnené, že demagnetizačnou diódou, ktorá je pripojená k výkonovému tranzistoru, tečie v okamžiku vypnutia výkonových tranzistorov špičková hodnota prúdu, ktorá s vysokou strmost'ou klesá a magnetizačný prúd výkonového transformátora. Demagnetizačná dióda bude typu C4D05120A, ktorá podľa technickej dokumentácie má prahové napätie 3 V. Keďže magnetizačný prúd má trojuholníkový priebeh, jeho strednú hodnotu sme vypočítali ako polovicu maximálnej hodnoty magnetizačného prúdu výkonového transformátora vynásobené maximálnou striedou meniča.

$$I_{str_{do}} = \frac{I_{\mu max}}{2} \cdot s_m = \frac{0,29}{2} \cdot 0,43 = 62 \text{ mA} \quad (4.3.1)$$

Následne stratový výkon na jednej demagnetizačnej dióde sme vypočítali podobne ako v prípade usmerňovača [1,6,7,10].

$$P_{str_{do}} = I_{str_{do}} \cdot U_{p_{do}} = 62 \cdot 10^{-3} \cdot 3 = 0,19 \text{ W} \quad (4.3.2)$$

4.4 Synchronný usmerňovač

Synchronný usmerňovač sa skladá z dvoch tranzistorov typu IRF100P218. Keďže každý tranzistor pracuje s iným prúdom a s inou striedou museli sme stratový výkon na každom z nich vypočítať odlišne.

4.4.1 Usmerňovací tranzistor

Jedná sa o tranzistor, ktorý je zapojený v sérii so sekundárnym vinutím výkonového transformátora. Z dôvodu, že tento tranzistor sa zapína skôr ako výkonové tranzistory, odpadá na ňom prepínacia strata. Pred tým ako sme mohli vypočítať stratu vedením sme museli určiť efektívnu hodnotu prechádzajúceho prúdu pomocou maximálnej striedy a výstupného prúdu.

$$I_{efustr.} = I_{výstup} \cdot \sqrt{s_m} = 50 \cdot \sqrt{0,43} = 32,79 \text{ A} \quad (4.4.1.1)$$

Stratu vedením prúdu usmerňovacím tranzistorom sme určili podobne ako v prípade výkonového tranzistora. Podľa technickej dokumentácie tento tranzistor má dynamický odpor v zapnutom stave $1,5 \text{ m}\Omega$ [1,6,7,11].

$$P_{vedustr.} = R_{DSonustr.} \cdot I_{efustr.}^2 = 1,5 \cdot 10^{-3} \cdot 31,79^2 = 1,61 \text{ W} \quad (4.4.1.2)$$

4.4.2 Nulový tranzistor

Nulovým tranzistorom nazývame tranzistor v synchronnom usmerňovači, ktorý slúži na vedenie prúdu v čase, keď výkonové tranzistory sú vypnuté. Znamená to, že tento tranzistor pracuje s inou striedou ako usmerňovací tranzistor. Pre výpočet tejto striedy sme potrebovali čas $t_{deadtime}$, ktorý má v našom prípade hodnotu $0,5 \mu\text{s}$.

$$\begin{aligned} s_{nultr.} &= (1 - s_m) - (2 \cdot t_{deadtime} \cdot f) = \\ &= (1 - 0,43) - (2 \cdot 0,5 \cdot 10^{-6} \cdot 100 \cdot 10^3) = 0,47 [-] \end{aligned} \quad (4.4.2.1)$$

Keďže tranzistor typu IRF100P218 má v sebe parazitnú diódu, ktorá tiež vedie prúd, museli sme vypočítať straty v dióde a straty vedením v tranzistore. Nulový tranzistor na rozdiel od usmerňovacieho tranzistoru vedie plnú hodnotu výstupného prúdu, čiže 50 A .

$$\begin{aligned} P_{vednultr.} &= s_{nultr.} \cdot I_{výstup}^2 \cdot R_{DSonnultr.} = \\ &= 0,47 \cdot 50^2 \cdot 1,5 \cdot 10^{-3} = 1,76 \text{ W} \end{aligned} \quad (4.4.2.2)$$

Z technickej dokumentácie tranzistora sme odčítali prahové napätie parazitnej diódy, ktorá má hodnotu $1,2 \text{ V}$.

$$\begin{aligned} P_{diodnultr.} &= 2 \cdot t_{deadtime} \cdot f \cdot I_{výstup} \cdot U_{pnultr.} = \\ &= 2 \cdot 0,5 \cdot 10^{-6} \cdot 100 \cdot 10^3 \cdot 50 \cdot 1,2 = 6 \text{ W} \end{aligned} \quad (4.4.2.3)$$

Celkové straty na nulovom tranzistore dostaneme súčtom straty vedení a straty v parazitnej dióde [1,6,7,11].

$$P_{strnultr.} = P_{vednultr.} + P_{diodnultr.} = 1,76 + 6 = 7,76 \text{ W} \quad (4.4.2.4)$$

5. DIMENZOVANIE CHLADIČA

V predchádzajúcej kapitole sme vypočítali stratový výkon na jednotlivých polovodičoch silového obvodu nabíjačky olovených akumulátorov. Vypočítané stratové výkony sa menia v polovodičoch na teplo, ktoré je treba odvádzať do okolia.

5.1 Výpočet tepelného odporu chladiča

Chladič, ktorý bude odvádzať teplo z polovodičoch sme dimenzovali na stratový výkon, ktorý sa vytvorí pri trvalom výstupnom prúde 50 A. Maximálnu hodnotu teploty chladiča sme stanovili na 70 °C, pričom sme uvažovali teplotu okolia 40 °C. Všetky chladené polovodičové súčiastky budú umiestnené na jednom chladiči. Pred výpočtom tepelného odporu chladiča sme museli určiť celkový stratový výkon, ktorý sa mení na teplo.

$$\begin{aligned} P_{str_{50A}} &= P_{str_{usm.}} + 2 \cdot P_{str_{vtr.}} + 2 \cdot P_{str_{do}} + P_{ved_{ustr.}} + P_{str_{nultr.}} = \\ P_{str_{50A}} &= 5,25 + 2 \cdot 7,41 + 2 \cdot 0,19 + 1,61 + 7,76 = 29,81 \text{ W} \end{aligned} \quad (5.1.1)$$

Následne sme určili tepelný odpor chladiča.

$$R_{\theta H} = \frac{T_H - T_0}{P_{str_{50A}}} = \frac{70 - 40}{29,81} = 1,01 \text{ KW}^{-1} \quad (5.1.2)$$

Z dôvodu malého stratového výkonu ktoré je potrebné odvádzať od okolia sme si vybrali hliníkový plech o hrúbke 6 mm a o rozmeroch 190 mm x 265 mm, ktorý bude slúžiť ako chladič. Tento plech je hrúbky 6 mm a plne dostačuje na odvádzanie vzniknutého tepla. Zároveň tento hliníkový plech bude základným konštrukčným prvkom nabíjačky na ktorý sa pripevní doska plošného spoja silového obvodu, kryt nabíjačky a gumené nožičky ktoré umožnia prúdenie vzduchu aj pod nabíjačkou [6].

5.2 Výpočet teploty čipov pri krátkodobom nadprúde

Keďže nabíjačku navrhujeme tak, aby bola schopná krátkodobo dodať nadprúd až 100 A, musíme sa uistiť, že ani v tom prípade nepresiahne teplota čipov jednotlivých polovodičoch maximálnu dovolenú hodnotu. Uvažovali sme najhorší možný prípad, kedy nabíjačka je z pohľadu teploty v ustálenom stave pri výstupnom prúde 50 A, a náhle zvýšime výstupný prúd na 100 A. Teplotu čipov vypočítame podľa nasledujúceho vzťahu:

$$T_{\check{c}} = T_H + (R_{\theta CH} + R_{\theta JC}) \cdot P_{str} \quad (5.2.1)$$

Kde $R_{\theta CH}$ je tepelný odpor medzi puzdrom polovodiča a chladiča, $R_{\theta JC}$ je tepelný odpor medzi čipom a puzdrom polovodiča a P_{str} je stratový výkon, ktorý sa mení v polovodiči na teplo pri výstupnom prúde 100 A. Teplotu chladiča T_H sme uvažovali 70 °C.

V tabuľke 1 sú uvedené jednotlivé tepelné odpory, stratové výkony a výsledné teploty čipov. Stratové výkony sme vypočítali rovnako ako v kapitole 4, s tým rozdielom, že výstupný prúd sme uvažovali 100 A.

Tabuľka 1 Vypočítané hodnoty teplôt čipov polovodičov

	Vstupný usmerňovač	Výkonový tranzistor	Demag. dióda	Usmerňovací tranzistor	Nulový tranzistor
$R_{\theta JC}$ [KW ⁻¹]	1,4	0,79	1,85	0,27	0,27
$R_{\theta CH}$ [KW ⁻¹]	0,6	0,6	0,6	0,6	0,6
$P_{str-100A}$ [W]	10,50	20,16	0,19	6,45	19,05
T_{ξ} [°C]	83,65	98,02	70,46	75,61	86,57

Ako vidíme z tabuľky 1, najvyššiu teplotu dosiahne čip výkonového tranzistora. Z dôvodu, že pri zaťažovaní nabíjačky dlhodobo (niekoľko hodín) menovitým výstupným prúdom 50 A by mohlo dôjsť k prekročeniu dovolených teplôt jednotlivých súčiastok, do nabíjačky umiestnime ventilátor, ktorý bude pomáhať cirkulácií vzduchu a tak bude dochádzať k lepšiemu odvodu tepla. Ďalej riadiaci obvod navrhne tak, aby v prípade núdze (podľa výsledkov zaťažovacích skúšok) bolo možné na chladič umiestniť termostat, ktorý vypne celú nabíjačku [1,6].

6. NÁVRH RIADIACICH OBVODOV

Nabíjačka olovených akumulátorov, ktorá pracuje na princípe jednočinného priepustného meniča potrebuje okrem silového obvodu aj riadiaci obvod, ktorý sa stará o správne spínanie výkonových tranzistorov a synchronného usmerňovača. Ďalej riadiaci obvod musí snímať výstupné napätie, a výstupný prúd aby v prípade potreby mohol korigovať tieto hodnoty. Označenie jednotlivých prvkov riadiaceho obvodu v tejto kapitole sa vzťahujú na celkovú schému riadiaceho obvodu znázornenú na obrázku 9 [1,3].

6.1 Obvod merania

Riadiaci obvod musí dostávať informácie o tom, čo sa deje v silovom obvode. Tieto signály dostávame cez obvod merania, ktorý sníma výstupné napätie a výstupný prúd. Výstupné napätie sa sníma priamo na výstupných svorkách nabíjačky (cez konektor $U_{výst}$) pomocou odporového deliča R_8 a R_9 . Namerané napätie je vedené priamo do PWM generátora cez diódu. Výstupný prúd sa sníma pomocou prúdového transformátora TR_4 cez konektor $I_{primPTR}$, ktorý má jednu sekundárnu svorku uzemnenú a druhú cez diódu D_2 zaťaženú ďalším odporovým deličom R_5 a R_6 . Napätie z toho deliča je cez rezistor R_{13} privedený priamo do PWM generátora. Diódy D_6 a D_7 tvoria spolu logickú funkciu OR. To znamená, že do generátora PWM signálu je privedený signál buď z výstupných svoriek nabíjačky (konektor $U_{výst}$) alebo z prúdového transformátora (cez konektor $I_{primPTR}$). Pre správnu funkciu synchronného usmerňovača je privedené aj plné napätie z deliča R_5 , R_6 do integrovaného obvodu IC_5 . Pre obmedzenie rušenia a kvôli dostatočnej kvalite uzemnenia je prúdový transformátor TR_4 priamo uzemnený na „spodný“ rezistor odporového deliča R_5 , R_6 (konektor $I_{primPTRGND}$) [1,12,13].

6.2 PWM generátor

PWM generátor nabíjačky tvorí integrovaní obvod IC_2 typu UC3845, ktorý vytvára PWM signál pre riadenie výkonových tranzistorov. Nižšie sú popísané jednotlivé piny tohto integrovaného obvodu:

1. Tento vývod je výstupom operačného zosilňovača, ktorý sa chová ako napäťový zdroj s prúdovým obmedzením. Pomocou externého rezistoru sa napätie na tomto vývode prítahuje k zemi a tým sa reguluje šírka jednotlivých pulzov (strieda), čiže sa obmedzuje špičková hodnota výstupného prúdu.
2. Tento vývod je invertujúcim vstupom (neinvertujúci vstup je vo vnútornej štruktúre pripojené na referenčné napätie 2,5 V) operačného zosilňovača, ktorý slúži ako komparátor pre vypnutie PWM. Na tento vývod sa privádza napätie z meracieho obvodu.

3. Vývod, ktorý tvorí vstup pre prúdový komparátor. V prípade, že sa prekročí nastavená okamžitá hodnota prúdu (ktorá je nastavená napätím na vývode č.1) dôjde ku zostupnej hrane PWM výstupu ktorým je takto zaistená pulzná šírková modulácia doplnené o obmedzenie špičkovej hodnoty prúdu.
4. Tento vývod je súčasťou vnútorného RC oscilátoru a pomocou externého rezistoru R_{11} a kondenzátoru C_5 sa nastavuje pracovná frekvencia.
5. Vývod, ktorý sa pripája na zem.
6. Výstupný vývod, ktorý dáva PWM signál pre výkonové tranzistory.
7. Napájací vývod, kde sa pripája napájanie integrovaného obvodu.
8. Vývod, ktorý vytvára referenčné napätie 5V [1,12,13].

6.3 PI regulácia výstupného napätia a prúdu

PWM obvod UC3845 nabíjačky je ovládaný PI regulátorom, ktorá slúži ako nadriadená napäťová regulácia. PI regulátor tvorí integrovaný obvod IC_1 typu TLC272, z ktorého je využitý iba jeden operačný zosilňovač. Na invertujúci vstup (-) je privedené napätie z odporového deliča $R_3 - R_2$, ktorý je pripojený priamo na výstupné svorky nabíjačky. Tento delič je nastavený tak, aby napätie na rezistore R_2 bolo 5V pri výstupnom napätí 14,5 V. Zenerová dióda ZD_1 paralelne s rezistorom R_2 slúži ako ochrana. Na neinvertujúci (+) vstup operačného zosilňovača je pripojené referenčné napätie 5 V vytvorené hlavným riadiacim členom IC_2 .

Na výstup prvého operačného zosilňovača je pripojená signalizačná LED dióda (cez rezistor R_4), ktorá sa rozsvieti ak výstupné napätie je menšie ako 14,5 V. Tento operačný zosilňovač cez diódu D_1 sťahuje napätie z vývodu č. 1 obvodu UC3845 k zemi. Pomocou pripojeného potenciometra je toto napätie tiež znižované a tým sa nastaví žiadaná hodnota výstupného prúdu. Zapojenie obvodu UC3845 (prúdová slučka) a obvodu TLC272 (napäťová regulácia) tvorí kaskádnu regulačnú štruktúru. Zmienení termostat v kapitole 5.2 sa pripojuje paralelne k potenciometru a slúži ako tepelná ochrana, ktorá pri presiahnutí určitej teploty chladiča stiahne napätie na nulu čím dôjde ku vypnutiu meniča [1,12,13].

6.4 Budič výkonových tranzistorov

Keďže v nabíjačke bude použitý synchronný usmerňovač (Q_1 a Q_2 v silovom obvode), ktorý musíme vhodne riadiť je potrebné adekvátne riadiť aj výkonové tranzistory. Znamená to, že musíme oneskorene zapnúť výkonové tranzistory. Toto oneskorené zapnutie výkonových tranzistorov docielime integrovaným obvodom IC_3 typu TC4420 a RC členom, ktorý vradíme medzi PWM generátor UC3845 a budiaci transformátor. Napäťový impulz z PWM generátoru najprv cez rezistor R_{12} nabije kondenzátor C_7 a až po nabití tohto kondenzátora sa zapnú výstupné vývody integrovaného obvodu TC4420. Výstupné vývody č. 6 a č. 7 sú pripojené na konektor *Budiaci tranzistor* [1,12,13].

6.5 Budič synchronného usmerňovača

Ako už bolo spomenuté, tranzistory synchronného usmerňovača treba spínať zosynchronizovane s výkonovými tranzistormi. Usmerňovací tranzistor sa má zapínať skôr ako výkonové tranzistory. Následne, nulový tranzistor sa má zapnúť ak je usmerňovací tranzistor vypnutý, pričom je nutné pred opakovaným zapnutím výkonových tranzistorov dokonalo vypnúť tento nulový tranzistor. Pre spínanie týchto tranzistorov použijeme dvojkanálový integrovaný obvod IC_4 typu UCC27524. Popis jednotlivých vývodov je nižšie:

1. Enable A, čiže privedením napätia na tento vývod sa povolí spínanie výstupného vývodu č.7 (kanál A). Naopak ak je tento vývod spojený so zemou tak zakáže spínanie a na výstupnom vývode je potenciál zeme.
2. Vývod, ktorým je ovládaný výstup kanálu A (usmerňovací tranzistor Q_1).
3. Vývod, ktorým je integrovaný obvod pripojený na zem.
4. Vývod, ktorým je ovládaný výstup kanálu B (nulový tranzistor Q_2).
5. Výstupný vývod, ktorý patrí kanálu B.
6. Vývod, cez ktorý je integrovaný obvod napájaný.
7. Výstupný vývod, ktorý patrí kanálu A.
8. Enable B, s rovnakou funkciou ako vývod č.1

Pre spínanie usmerňovacieho tranzistoru sa využíva kanál A, čiže vývody č.1,2,7. Vývod č.1 je pripojený na stále napájacie napätie čím je vždy povolené spínanie výstupu č.7. Riadiaci vývod č.2 kanálu A je pripojený na výstupnú svorku PWM generátora (IC_2). Výstupný vývod č.7 kanálu A je pripojený cez predradný rezistor R_{15} na hradlo usmerňovacieho tranzistoru (cez konektor *Usmerňovací tranzistor*).

Kanál B slúži na spínanie nulového tranzistoru synchronného usmerňovača. Pomocou tranzistora Q_1 (v riadiacom obvode!) je PWM signál invertovaný a týmto signálom je ovládaný výstupný vývod č. 5 kanálu B. Tranzistor Q_1 je ovládaný generátorom PWM signálu. Nulový tranzistor je možné zapnúť až keď výkonové tranzistory sú dokonalo vypnuté, čiže aj tu je použitie RC člen (R_{14} a C_9), ktorý zaistí oneskorené zapnutie nulového tranzistora. Nulový tranzistor netreba spínať pri malom výstupnom prúde, pretože by dochádzalo ku spätnému toku prúdu, ktorý je v našom prípade nežiadajúci jav. Správne spínanie nulového tranzistora docielime pomocou vývodu č. 8 – Enable B, kde pripojíme výstup komparátora IC_5 . Z výstupného vývodu č. 5 je cez predradný rezistor R_{16} napájaný ovládaný nulový tranzistor (cez konektor *Nulový tranzistor*). [1,12,13].

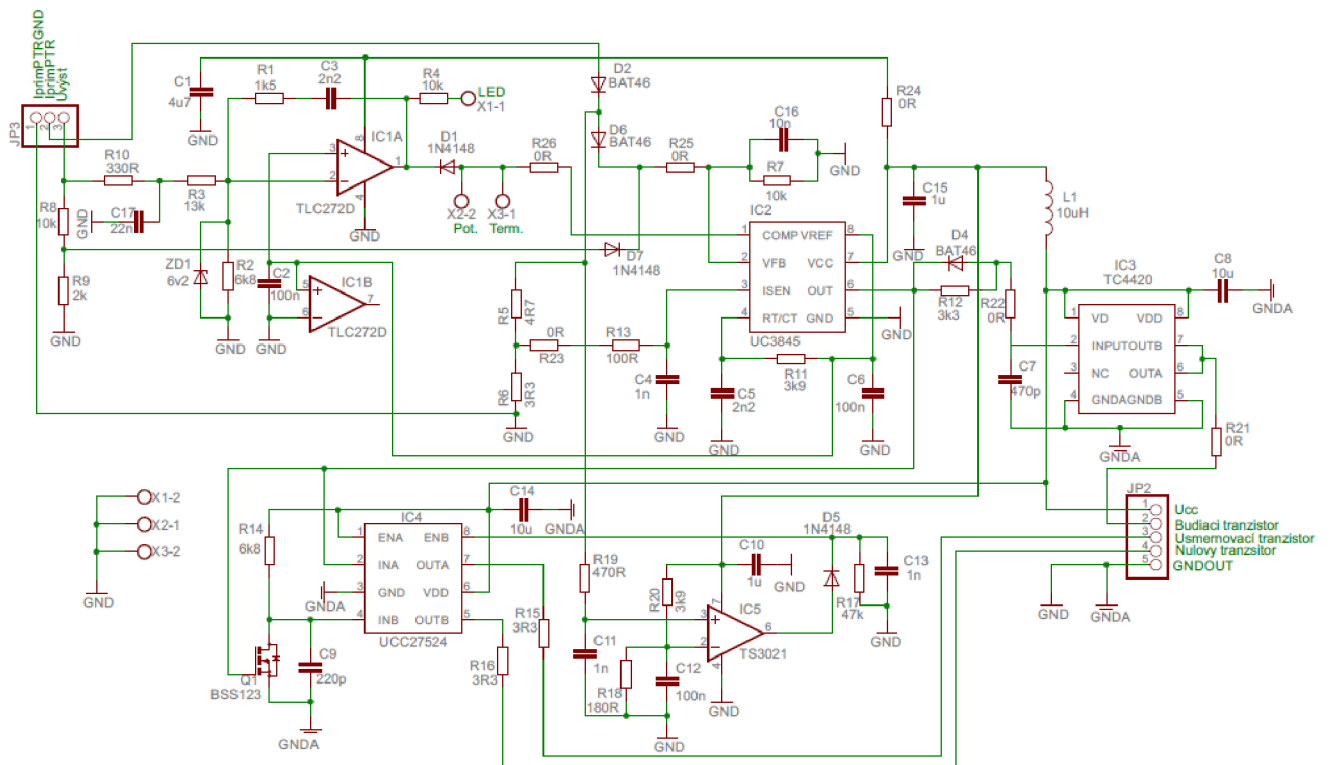
6.6 Ochranný komparátor pre nulový tranzistor

Ako to bolo spomenuté v predchádzajúcej časti, je nutné nulový tranzistor vypnúť, ak nabíjačka dodáva iba malý výstupný prúd do baterky. Pomocou prúdového transformátora TR_4 sme schopný merať výstupný prúd. Napätie zo záťaže (delič R_5 , R_6) prúdového transformátora je privedené cez RC člen (R_{19} a C_{11}) na neinvertujúci vstup komparátora

IC₅ typu TS3021. Komparátor porovnáva toto napätie s napätím na invertujúcom vstupe. Výstupom je napäťový signál, ktorý je pomocou špičkového detektora prevedený na konštantné napätie (logická 1) alebo nulové napätie (logická 0). Špičkový detektor je vytvorený pomocou prvku diódy *D*₅ a RC (*R*₁₇, *C*₁₃) členu. Výstupný signál (logická 0 alebo logická 1) je privedený do integrovaného obvodu *IC*₄ na vývod č.8 - Enable B (budič synchronného usmerňovača). Prúdový transformátor *TR*₄ dáva do invertujúceho vstupu komparátora napätie 3 V pri výstupnom prúde 110 A. Pomocou odporového deliča *R*₂₀ a *R*₁₈ je vytvorené napätie 1 V a privedené do neinvertujúceho vstupu. Čo znamená, že komparátor zakáže zapnutie nulového tranzistora ak je výstupný prúd menšie ako 23 A (necelá jedna-pätina maximálneho výstupného prúdu 110 A) [1,12,13].

6.7 Celková schéma riadiaceho obvodu

Celkovú schému riadiaceho obvodu sme kreslili tiež v programe Eagle podobne ako to bolo pri silovom obvode. Aj pri tejto schéme sme museli dávať pozor na správne schematické značky jednotlivých súčiastok vrátane pomenovania jednotlivých vývodoch integrovaných obvodov. Niektoré súčiastky (a správne puzdra) sme nenašli v databáze programu a tak aj v tomto prípade sme ich vytvorili vlastnoručne. Celková schéma riadiaceho obvodu je znázornená na obrázku 9 nižšie a v prílohe A.



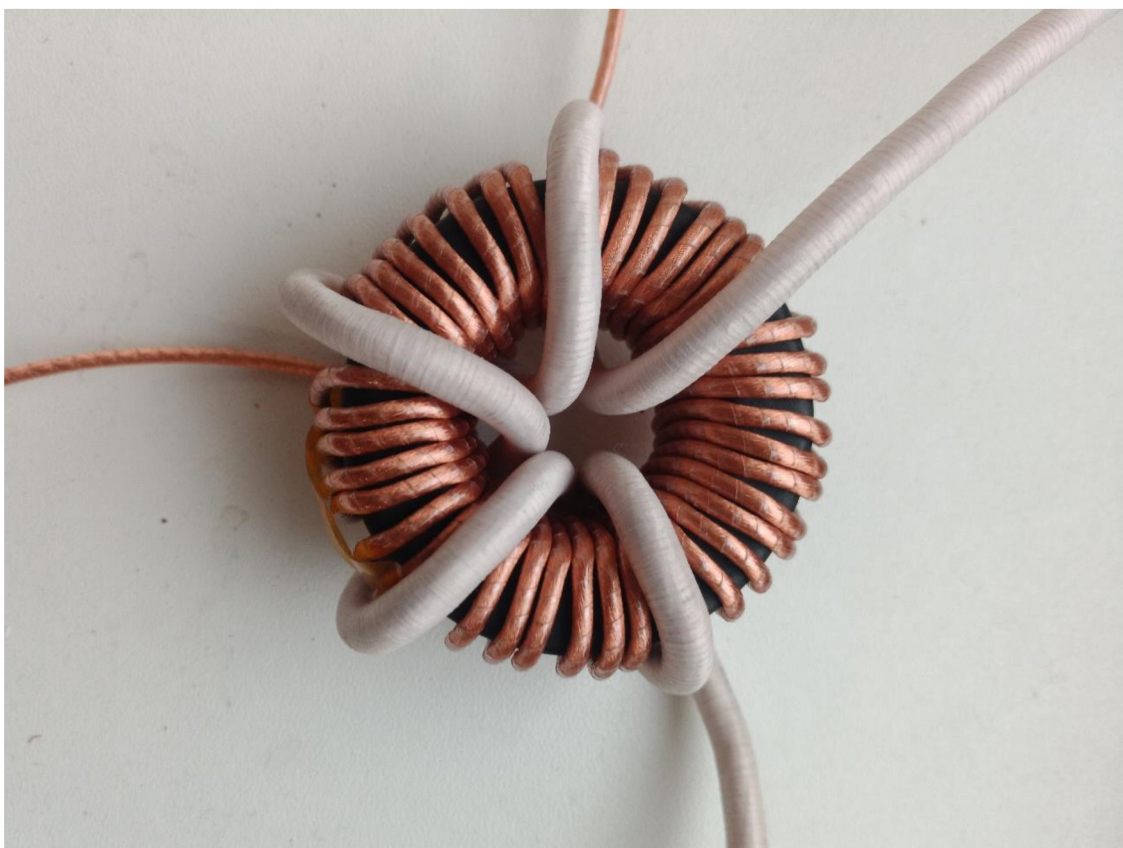
Obrázok 9 Celková schéma riadiaceho obvodu

7. VÝROBA VINUTÝCH SÚČIASTOK

V tejto kapitole je popísaný postup výroby (navíjanie) jednotlivých vinutých súčiastok použitých v nabíjačke. Navíjanie vodičov na jadrá vinutých súčiastok, z dôvodu, že ani jedna súčiastka neobsahuje veľký počet závitov sme robili ručne, pričom sme dávali veľký pozor na správny smer navíjania a na počet závitov.

7.1 Výkonový transformátor

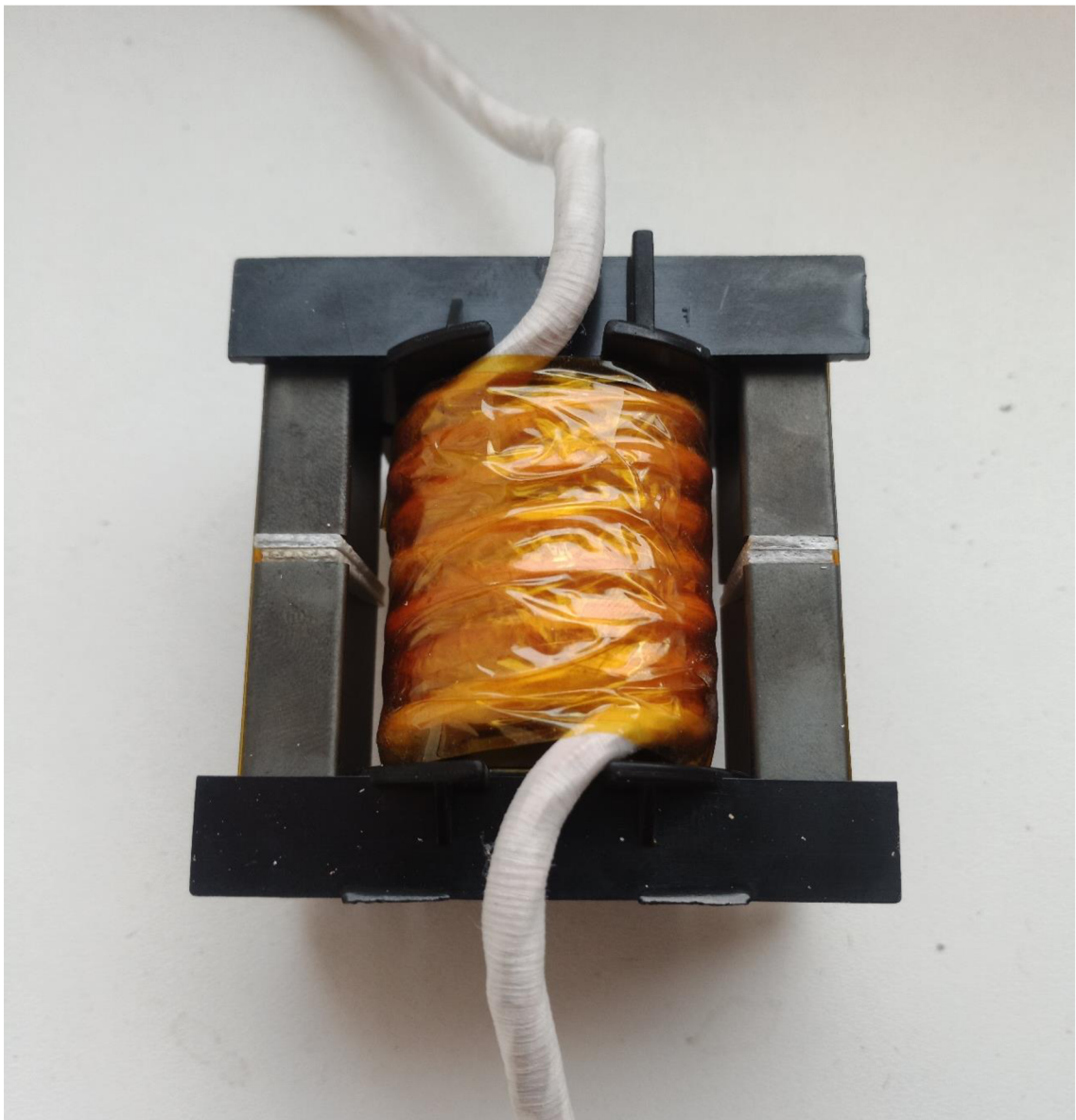
Výrobu vinutých súčiastok sme začínali navíjaním výkonového transformátora. Po pripravení všetkých potrebných prvkov ako jadro, vodič primárneho vinutia a vodič sekundárneho vinutia sme navíjanie začali primárnym vinutím, ktoré má 37 závitov a menší prierez vodiča. Následne sme navinuli sekundárne vinutie, ktoré má iba 5 závitov. Pri navíjaní sme dávali pozor na súhlasný smer cievok. Na obrázku 10 je možné vidieť navinutý výkonový transformátor.



Obrázok 10 Výkonový transformátor

7.2 Výstupná tlmivka

Pri realizácii výstupnej tlmivky sme cievku navíjali na plastovú kostričku, do ktorej sa následne vsunulo feritové jadro. Pre správnu funkciu tlmivky je dôležitá vzduchová medzera, ktorú sme síce vypočítali v predchádzajúcich kapitolách, ale pri realizácii sme vzduchovú medzeru nastavovali podľa požadovanej indukčnosti. Indukčnosť tlmivky sme merali pomocou RLC metra. Pri meraní sme kontrolovali indukčnosť pri frekvenciách 10 kHz aj pri 100 kHz. Rozdiel v indukčnosti pri týchto frekvenciách bolo menej ako $0,2 \mu\text{H}$, čo znamená, že výstupná tlmivka bola správne nadimenzovaná a vyhotovená. Na obrázku 11 je možné vidieť výstupnú tlmivku.



Obrázok 11 Výstupná tlmivka

7.3 Prúdový transformátor

Pri vyhotovení prúdového transformátora bolo potrebné navinúť iba sekundárne vinutie, pretože primárne vinutie bude tvoriť iba jeden závit, ktorý sa bude dať vyhotoviť až pri osadení prúdového transformátora na dosku plošného spoja.

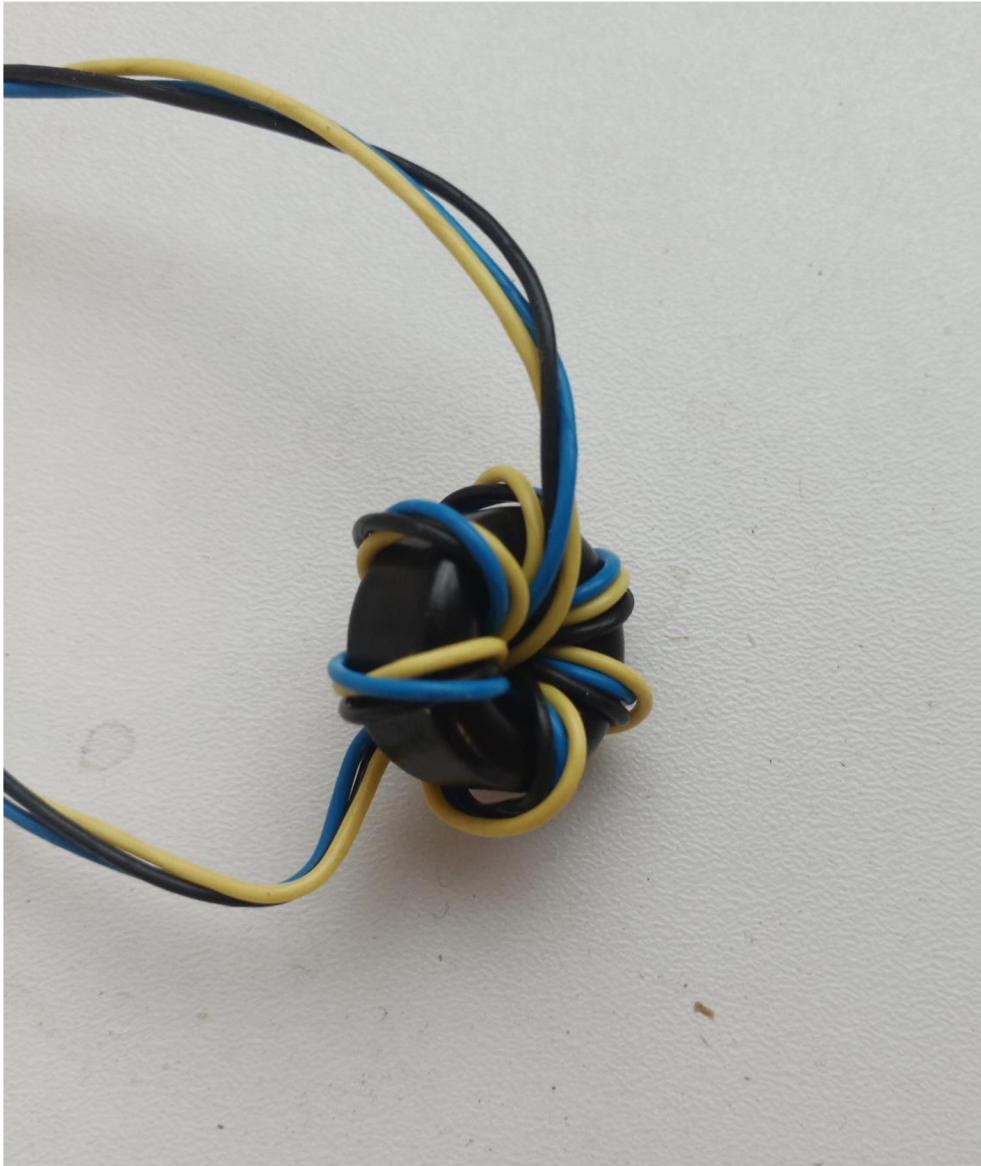
Sekundárne vinutie prúdového transformátora má najviac závitov (50 z.) a je vyhotovené z vodiča s malým prierezom. Malý prierez (tenký vodič) cievky sťažuje následnú kontrolu počtu závitov. Na nasledujúcom obrázku 12 je možné vidieť vyhotovené sekundárne vinutie prúdového transformátora.



Obrázok 12 Prúdový transformátor

7.4 Budiaci transformátor

Budiaci transformátor sme navíjali takým spôsobom, že všetky tri vodiče jednotlivých vinutí sme najprv skrútili a následne sme navinuli všetky tri vinutia naraz. Takto navinuté cievky majú minimálnu nežiadajúcu parazitnú vlastnosť ako je napríklad rozptyl, ale väčšiu parazitnú kapacitu. Na obrázku 13 je vyhotovený budiaci transformátor.



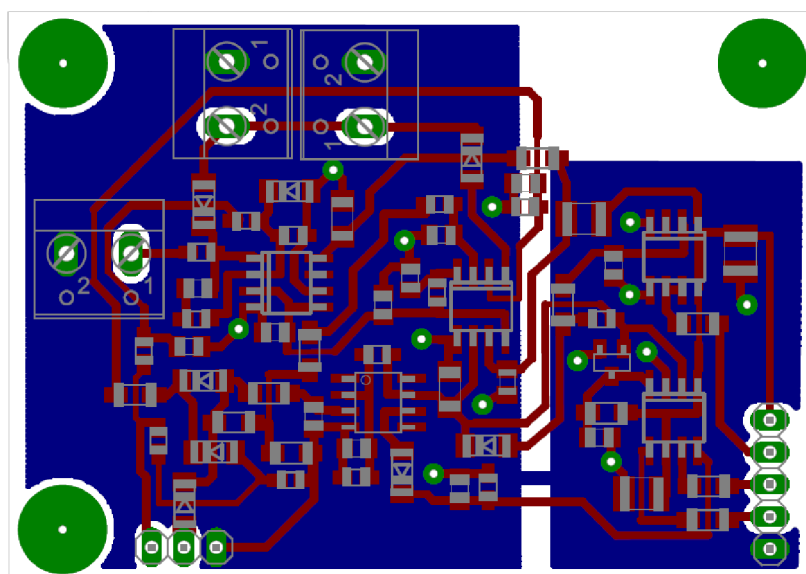
Obrázok 13 Budiaci transformátor

8. NÁVRH A VÝROBA DOSIEK PLOŠNÉHO SPOJA

Pri návrhu dosiek plošných spojov sme vychádzali zo schém, ktoré sú znázornené na obrázkoch 5 a 9. Ako to bolo spomínané v predchádzajúcich kapitolách tieto schémy sme vytvorili v programe Eagle v ktorom sme navrhovali aj dosky plošných spojov. Našu prácu pri návrhu DPS sme si značne uľahčili tým, že sme pri kreslení schém rovno zadefinovali aj puzdrá jednotlivých súčiastok. V prvom kroku sme navrhli dosku plošného spoja riadiaceho obvodu a následne podľa rozmiestnení svoriek (pinhead) na radiacom obvode sme navrhli dosku plošného spoja silového obvodu.

8.1 Návrh DPS riadiaceho obvodu

Pri návrhu DPS riadiaceho obvodu sme dávali veľký pozor na izolačné vzdialenosti medzi jednotlivými cestičkami aby v žiadnom prípade nemohol vzniknúť skrat ani pri vyleptaní a ani pri spájkovaní. Ďalej sme museli dávať veľký pozor na umiestnenie jednotlivých komponent. Napríklad blokovacie kondenzátory (C_1 , C_2 , C_4 , C_8 , C_{10} , C_{14} a C_{15}) ktoré slúžia na filtrovanie rušenia v napájacom napätí sme umiestnili do tesnej blízkosti jednotlivých integrovaných obvodov. Pre uľahčenie práce sme na jednej strane DPS navrhli súvislú vrstvu zeme a pomocou prekovov sme vytvorili v najvhodnejších miestach cestičky zeme aj na strane súčiastok. Vrstvu zeme sme rozdelili do dvoch častí (jedna pre riadiace obvody a druhá pre budiace obvody), ktoré sú spojené iba jednou tenkou cestičkou. Takto rozdelené zeme obmedzujú rušenie v oblasti citlivých integrovaných obvodov. Na obrázku 14 je možné vidieť navrhnutú DPS riadiaceho obvodu (obrázok je zväčšený, rozmery neodpovedajú skutočnosti) a v prílohe A.

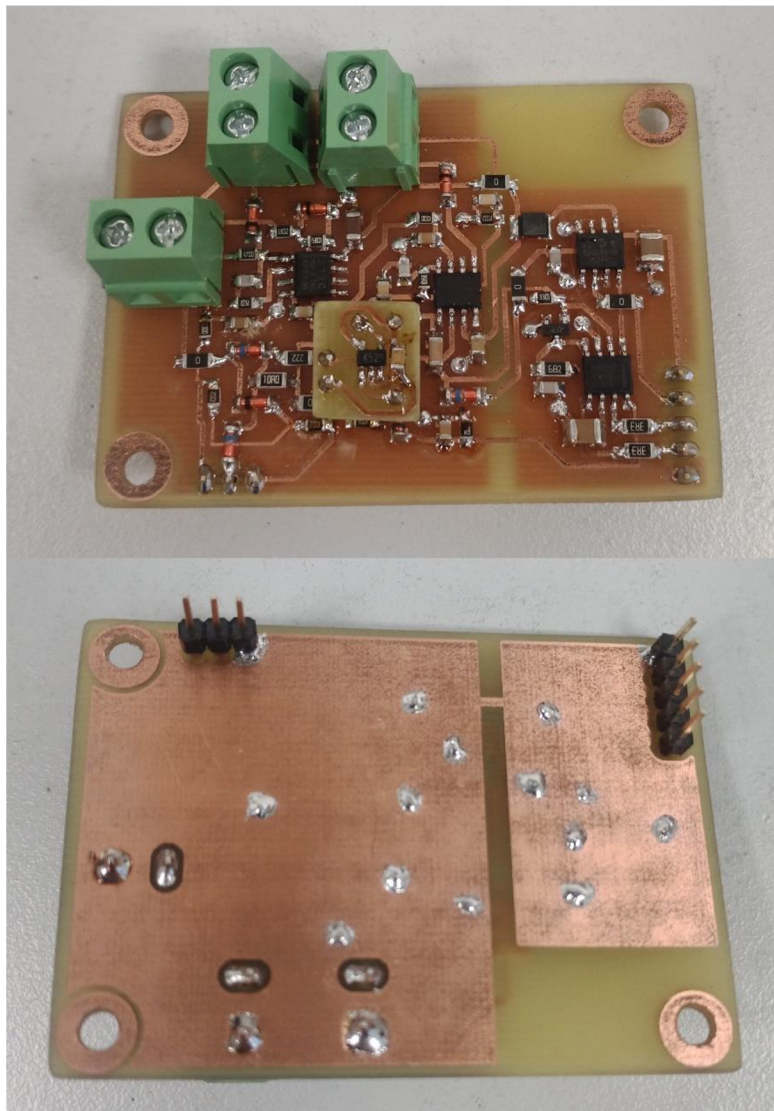


Obrázok 14 DPS riadiaceho obvodu

8.2 Výroba DPS riadiaceho obvodu

Výrobu DPS riadiaceho obvodu sme začali vytlačným jednotlivých vrstiev na priehľadnú fóliu, medzi ktoré sme následne presne umiestnili čerstvú nevyleptanú DPS. Po osvetlení a vyvolaní vrstiev sme vyleptali DPS. Po vyleptaní sme pomocou malej stolovej vŕtačky vyvŕtali diery pre jednotlivé konektory a prekovy. Prekovy sme nalisovali do dierok a následne sme celú DPS z oboch strán nastriekli lakom, ktorý obsahuje kolofónium a uľahčuje spájkovanie.

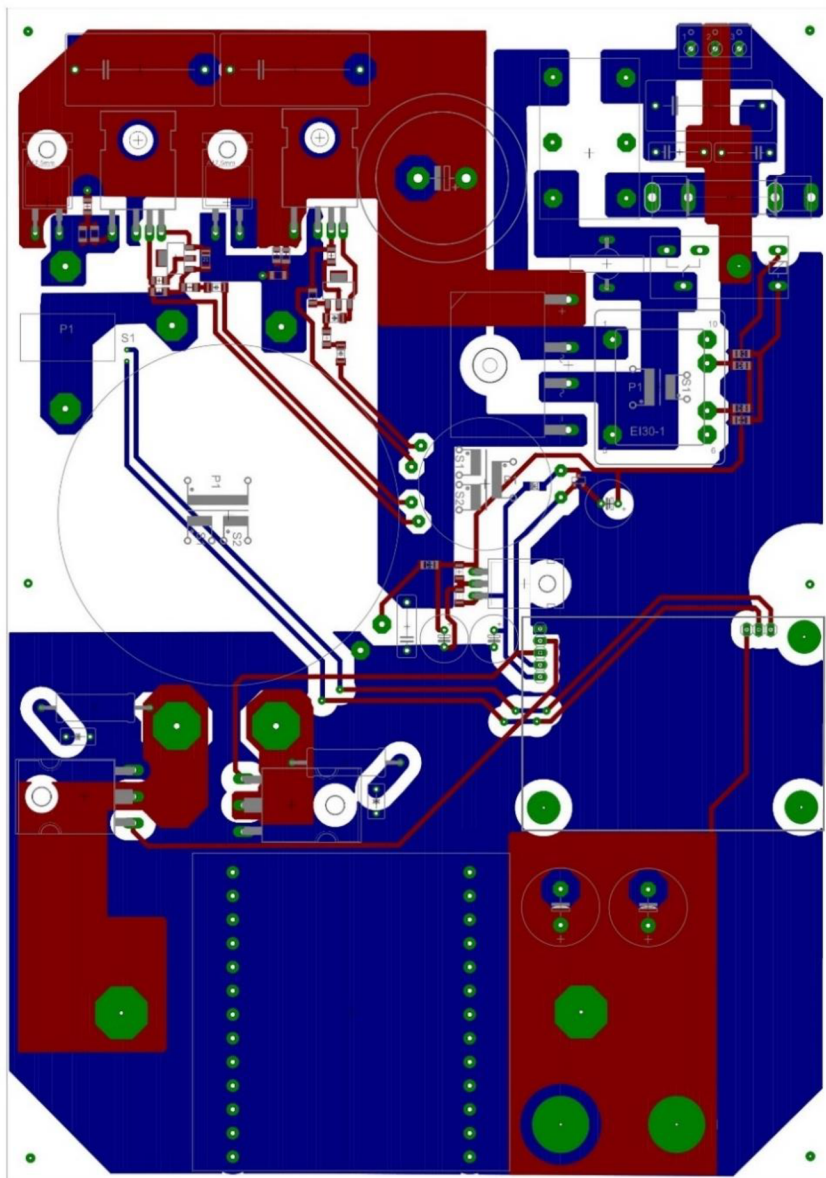
Spájkovanie jednotlivých súčiastok sme začali od najmenších pomocou mikrospájky. Pri osadení integrovaného obvodu IC_5 sme zistili, že pri návrhu puzdra sme urobili veľkú chybu. Chyba spočívala v tom, že integrovaný obvod TS3021 sa nevyrába s puzdrom, ktorým sme nakreslili. Z tohto dôvodu, sme museli vyrobiť ďalšiu malú DPS, ktorú sme umiestnili nad DPS riadiaceho obvodu. Takto vyhotovenú dosku plošného spoja riadiaceho obvodu je možné vidieť na obrázku 15.



Obrázok 15 Hotová DPS riadiaceho obvodu

8.3 Návrh DPS silového obvodu

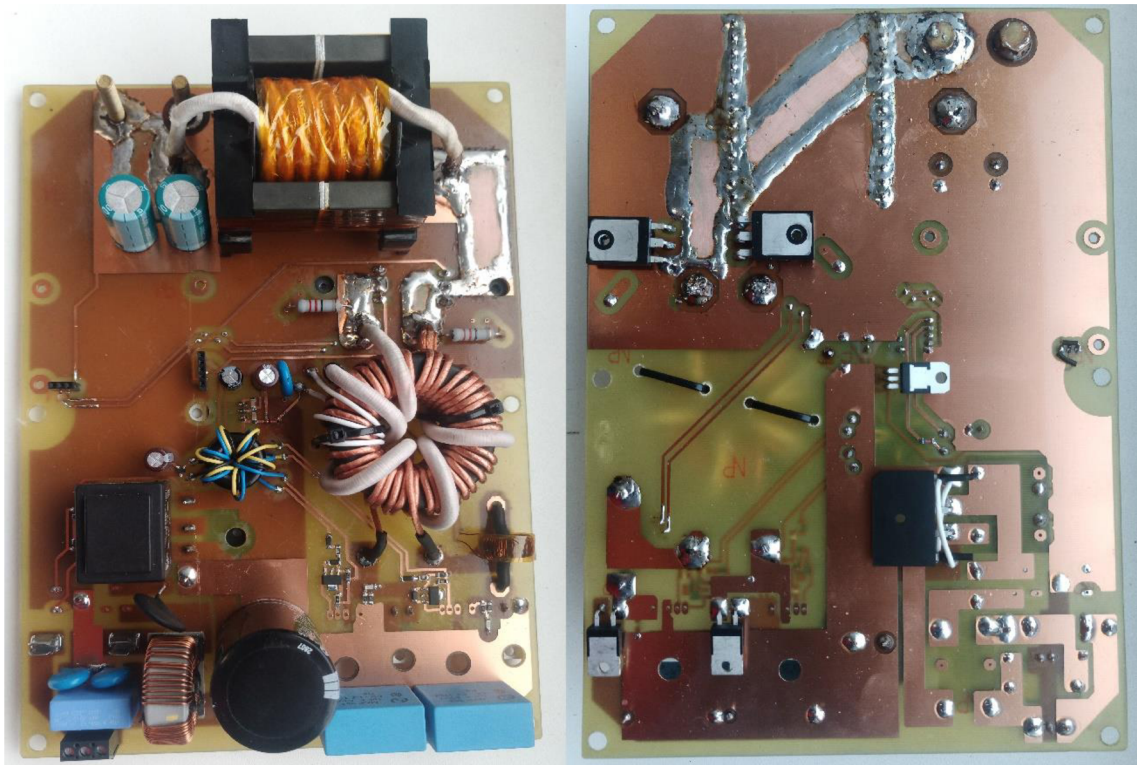
Návrh dosky plošného spoja silového obvodu sme realizovali podobne ako aj riadiaci obvod, v programe Eagle. Keďže v silovom obvode je napätie viac ako 300 V v časti po usmernení fázového sieťového napätia sme museli dávať veľký pozor na izolačné vzdialenosti. Z tohto dôvodu sme sa rozhodli, že na jednej strane DPS bude kladný pól napätia a na druhej strane bude záporný pól napätia. Na DPS silového obvodu sme umiestnili všetky vinuté súčiastky, ktorých rozmery sú dosť veľké a preto aj DPS silového obvodu má veľké rozmery. Výkonové spínacie polovodičové súčiastky, ktoré je potrebné chladieť sme umiestnili na spodnú časť DPS. Všetky ostatné súčiastky sú umiestnené na hornej časti DPS. Na obrázku 16 je DPS silového obvodu navrhnutý v programe Eagle (obrázok je zmenšený, rozmery neodpovedajú skutočnosti) a v prílohe B.



Obrázok 16 DPS silového obvodu

8.4 Výroba DPS silového obvodu

Pri výrobe dosky plošného spoja silového obvodu sme postupovali rovnakým spôsobom ako pri výrobe DPS radiaceho obvodu. Najprv vytlačenie jednotlivých vrstiev na priehľadnú fóliu, potom osvetlenie a vyvolanie cestičiek na nevyleptanom DPS následne vyleptanie v kyseline, vyvrtanie dierok, nalisovanie prekovov lakovanie a nakoniec spájkovanie súčiastok. Spájkovanie sme aj v tomto prípade začali od najmenších súčiastok. Pri umiestnení výkonových súčiastok, ktoré bude treba chladiť sme dávali pozor na ich správnu výšku. Prúdovodné cesty za výkonovým transformátorom, kde bude vedený prúd až 100 A sme posilnili prispájkovaním medených plieškov. Výstupný prúd nabíjačky je vyvedený pomocou mosadzných skrutiek M6. DPS silového obvodu sa umiestni na hliníkový plech o rozmeroch 190 mm x 265 mm, ktorý plní úlohu chladiča výkonových spínacích súčiastok a zároveň je základová doska na ktorý sa upevní okrem DPS silového obvodu aj kryt nabíjačky. Medzi výkonové súčiastky a hliníkový plech sa ešte umiestnia izolačné keramické podložky a teplovodivá pasta na zlepšenie prestupu tepla zo súčiastok do chladiča. Na obrázku 17 je možné vidieť vyhotovenú DPS silového obvodu (bez chladiča).



Obrázok 17 Hotová DPS silového obvodu

9. OŽIVENIE A DOĽADOVANIE

Pri oživovaní nabíjačky sme najprv oživilí dosku plošného spoja riadiaceho obvodu vrátane prekontrolovania všetkých dôležitých priebehov. Následne sme oživilí silový obvod ku ktorému už bol pripojený riadiaci obvod. Pri oživovaní sme zistili niekoľko nedostatkov v návrhu, ktoré sme museli pre dosiahnutie dostatočnej spoľahlivosti nabíjačky odstrániť.

9.1 Oživenie riadiaceho obvodu

Oživovanie riadiaceho obvodu sme začali tým, že sme najprv skontrolovali napájací obvod pomocou multimetra proti skratu. Keďže obvod napájania mal rozumnú hodnotu odporu, sme cez ochranný rezistor pripojili k laboratórnemu stabilizovanému zdroju. Do obvodu sme samozrejme zapojili aj ampérmeter. Po zapnutí zdroja sme zistili, že riadiaci obvod odoberá príliš veľký prúd (cca 240 mA) a integrovaný obvod IC_5 sa príliš prehrieva. Keďže ani po dôkladnej kontrole DPS sme nenašli príčinu nadmerného prehrievania, postupovali sme kontrolou schémy. V schéme sme tiež nenašli chybu. Nakoniec sme z technickej dokumentácie integrovaného obvodu TS3021 vyčítali, že tento obvod má mať napájacie napätie s hodnotu 5 V a nie 12 V ako sme to navrhli v schéme. Aj napriek krátkemu času napájania tohto obvodu takto zvýšením napätím došlo k jeho poškodeniu a preto sme to museli vymeniť za nový. Po výmene sme uskutočnili aj úpravu napájania a to tak, že napájaciu nožičku sme odpojili od napät'ovej hladiny 12 V a pripojili ju k referenčnému napätiu 5 V, ktorý vytvára integrovaný obvod IC_2 . Táto úprava znížila odoberaný prúd zo zdroja na 23 mA, ktorá je už rozumne malá hodnota.

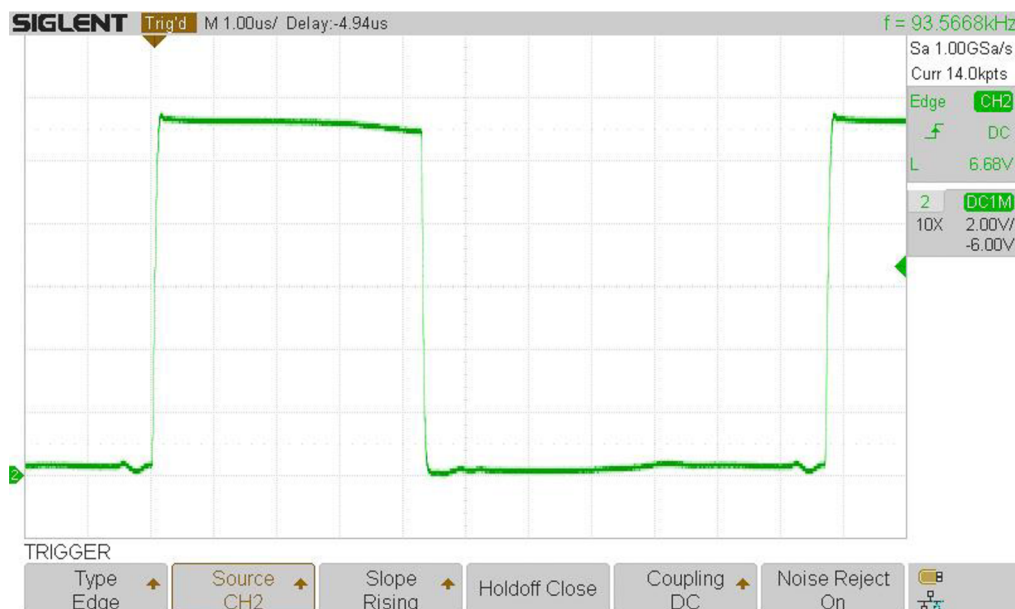
V oživovaní sme postupovali skontrolovaním pracovného kmitočtu RC oscilátoru (R_{11} a C_5), ktorý určuje výslednú pracovnú frekvenciu nabíjačky. Nameraná frekvencia bola 93 kHz, ktorá je trochu nižšia ako nami uvažovaná ale ešte dostatočne vysoká pre spoľahlivú funkčnosť nabíjačky. Zníženie frekvencie mohli spôsobiť nepresné hodnoty odporu a kapacity RC oscilátoru v rámci ich tolerancií.

Po pripojení osciloskopu na výstupné svorky sme zistili, že časové oneskorenie signálu do budiča výkonových tranzistorov (svorka *budiaci tranzistor*) voči signálu do usmerňovacieho tranzistora synchronného usmerňovača (svorka *usmerňovací tranzistor*) je dostatočne veľký. Ale pri porovnaní signálu do nulového tranzistora synchronného usmerňovača (svorka *nulový tranzistor*) so signálom do usmerňovacieho tranzistora sme zistili, že riadiaci obvod dovoľuje spínanie nulového tranzistora aj napriek tomu, že silový obvod nie je pripojený. Ak silový obvod nie je pripojený (a prúdovým transformátorom netiekol žiadny prúd) tak riadiaci obvod by mal zakázať spínanie nulového tranzistora (rovnako ako aj pri malom prúde). Po odmeraní napätia na vývode č. 8 integrovaného obvodu IC_4 sme zistili, že RC člen tvorený odporom R_{17} a kondenzátorom C_{13} nesťahuje

dostatočne napätie na tomto vývode. Úpravu sme uskutočnili pomocou výmeny týchto prvkov. Znížením hodnoty odporu (R_{17}) z $47\text{ k}\Omega$ na $8,2\text{ k}\Omega$ a zvýšením kapacity kondenzátora (C_{13}) z 1 nF na $4,7\text{ nF}$ sme dokázali znížiť napätie na vývode č. 8 integrovaného obvodu IC_4 pod minimálnu hodnotu. Takto upravený obvod už aj pri nepripojenom silovom obvode zakázal spínanie nulového tranzistora synchronného usmerňovača. Opravenú schému riadiaceho obvodu je možné vidieť v prílohe C (príloha neobsahuje úpravu DPS).

9.2 Oživenie silového obvodu

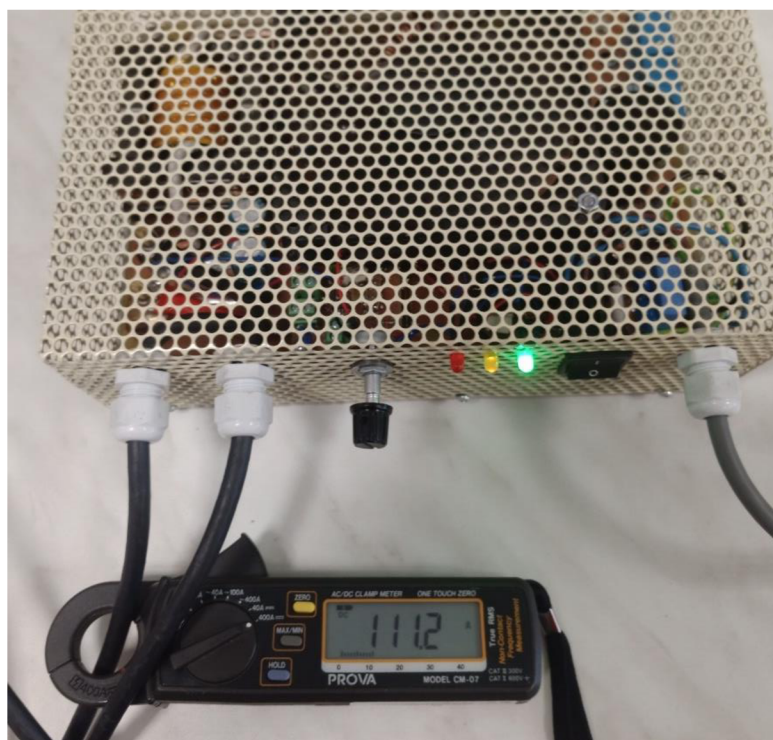
Silový obvod sme oživovali v spojení s už oživením riadiacim obvodom. Silový obvod zo začiatku nebol pripojený k sieťovému napätiu ani zaťažený na výstupe. O napájanie sa staral laboratórny zdroj, ktorým sme napájali vstupnú svorku stabilizátora napätia LM7812. Takto bolo zabezpečené napájanie aj riadiaceho obvodu aj budiaceho obvodu výkonových tranzistorov primárnej strany. Zo stabilizovaného zdroja nabíjačka odoberala prúd 160 mA , ktorá je rozumná hodnota a naznačuje správne fungovanie budiaceho obvodu. Pomocou osciloskopu sme zmerali priebehy napätí na riadiacich elektródach výkonových tranzistorov primárnej strany aj na riadiacej elektróde usmerňovacieho tranzistora synchronného usmerňovača. Tieto priebehy mali pekné obdĺžnikové tvary a uistili nás v správnosti návrhu aj funkčnosti budiaceho obvodu. Na nasledujúcom obrázku 18 je možné vidieť priebeh riadiaceho signálu výkonového tranzistora na primárnej strane, ktorý má dostatočne strmé hrany a neobsahuje veľké zákrmity.



Obrázok 18 Riadiaci signál výkonových tranzistorov primárnej strany

V ďalšom kroku sme z regulovateľného externého zdroja priviedli jednosmerné napätie do jednosmerného medziobvodu cez ochranný rezistor, pričom sme zachovali napájanie stabilizátora LM7812 laboratórnym zdrojom. Touto konfiguráciou napájania sme overili funkčnosť výkonových tranzistorov a usmerňovacieho tranzistora a zároveň sme sa uistili, že výstupné napätie z nabíjačky nepresahuje hodnotu 14,6 V bez zaťaženia. Obmedzenie výstupného napätia naznačuje, že nadradená napäťová regulácia v riadiacom obvode funguje podľa očakávania. Následne sme zaťažili výstupné svorky výkonomým rezistorom cez ampérmeter. Takto zaťažený silový obvod dodával prúd do záťaže. Meraním na nulovom tranzistore synchronného usmerňovača sme overili jeho správnu funkciu ovládania z riadiaceho obvodu. Riadiaci obvod až pri výstupnom prúde 23,8 A povoľuje spínanie tohto tranzistoru. Poslednou skúškou pred konečným pripojením k sieti bolo overenie maximálneho výstupného prúdu a skúška nakrátko. Maximálny nameraný výstupný prúd nabíjačky bol 112 A, čo dokazuje správnu funkciu obvodu merania (kapitola 6.1). Obvod merania (s logickou funkciou OR vysvetlenou v kapitole 6.1) výstupný prúd obmedzil na 112 A aj v prípade priameho skratovania výstupných svoriek.

Po takýchto overeniach sme nabíjačku pripojili na sieťové napätie cez ochranný rezistor. Aj v tomto prípade sme urobili skúšku naprázdno – maximálne výstupné napätie 14,6 V, skúšku so záťažou – nulový tranzistor začal spínať pri výstupnom prúde 23,8 A a maximálny výstupný prúd nepresahoval hodnotu 112 A. Na obrázku 19 je možné vidieť meranie výstupného krátkodobého prúdu.



Obrázok 19 Meranie výstupného krátkodobého prúdu

9.3 Doladenie

Počas oživovania silového obvodu sme zistili niekoľko menších nedostatkov, ktoré síce nie sú výrazné ale môžu ovplyvniť životnosť a spoľahlivosť nabíjačky.

Prvým týmto nedostatkom bolo nadmerné prehrievanie hradlových rezistorov R_{15} a R_{16} na DPS riadiacom obvode patriace k tranzistorom synchronného usmerňovača. K prehrievaniu dochádzalo aj napriek tomu, že sme pre tieto rezistory vybrali väčšie puzdra typu 1206. Dôvodom prehrievania bolo, že stredná hodnota prúdu do riadiacich elektród tranzistorov potrebné na nabitie parazitných kapacít bola príliš vysoká a tak na týchto hradlových rezistoroch vznikal veľký stratový výkon. Tieto rezistory sme na DPS riadiaceho obvodu nahradili nulovými odpormi a na doske plošného spoja silového obvodu sme prerušili cestičku vediacu k riadiacim elektródam synchronného usmerňovača. Prerušené cestičky sme premostili pomocou bezindukčných rezistorov o výkone 2 W. Tieto rezistory už sú schopné kvôli ich veľkosti dostatočne odvádzať vznikajúce teplo.

Druhým nedostatkom bola zle zvolená dióda D_7 na DPS silového obvodu, ktorá slúži na usmernenie sekundárneho napätia z výkonového transformátora pre napájanie riadiaceho a budiaceho obvodu. Táto dióda, kvôli veľkému prúdovému nárazu pri zapínaní spôsobené veľkou kapacitou dvoch pripojených filtračných kondenzátoroch (C_9 a C_{15}) sa odpálila. Riešením bola výmena pôvodnej diódy typu 1N4148 za novú diódu typu SKL110 s väčšou prúdovou odolnosťou. Po odmeraní priebehu napätia za touto diódou sme zistili, že vznikajú veľké napäťové pulzy z výkonového transformátora. Preto sme paralelne ku kondenzátoru C_{16} pripojili zenerovú diódu so záverným napätím 35 V, ktorá slúži ako prepäťová ochrana. Kvôli malému zvlneniu napätia za diódou D_7 a pre zníženie prúdového nárazu pri zapínaní, sme prerušili cestičku ku kladnej svorke kondenzátora C_9 a tak vyradili tento kondenzátor z obvodu.

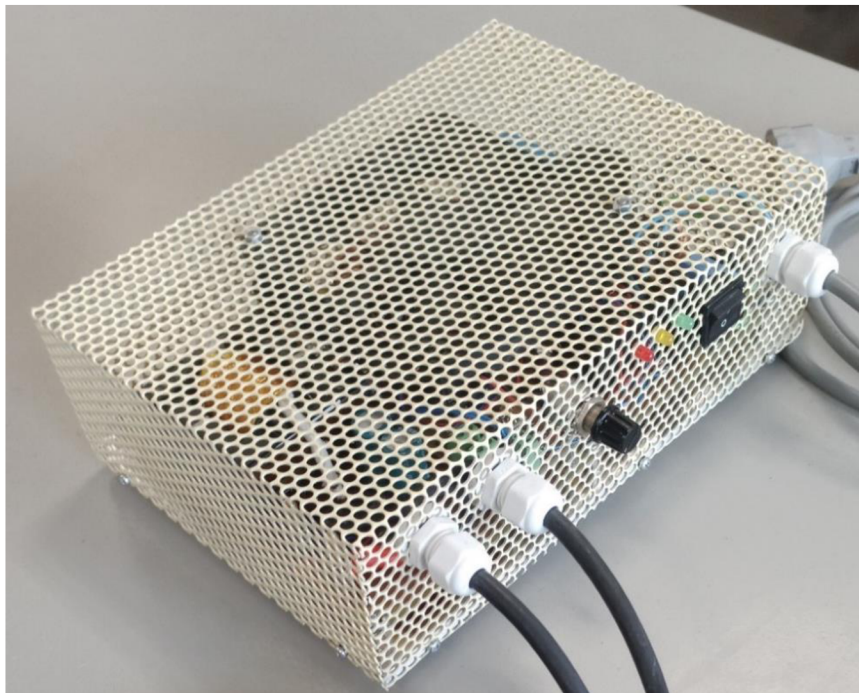
Ďalším nedostatkom bolo to, že relé K_1 v silovom obvode, ktoré slúži na premostenie NTC rezistoru po zapnutí bolo napájané z vstupnej elektródy stabilizátora napätia LM7812, kde napätie dosahovalo až 20 V. Vybrané relé má cievku elektromagnetu navrhnutú na 12 V a tak dochádzalo k zvýšenému odberu prúdu a k prehrievaniu. Po prerušení pôvodnej prívodnej cestičky, sme pomocou izolovanej žili pripojili cievku elektromagnetu relé K_1 na výstupnú elektródu stabilizátora napätia. Takto zapojené relé sa už nebude prehrievať a nehrozí jeho porucha.

Predposledným nedostatkom na DPS riadiaceho obvodu bolo, že PWM generátor IC_2 nedisponoval s podpäťovou ochranou a tak umožňoval spínanie už od cca 7 V napájacieho napätia riadiaceho obvodu. Najjednoduchším riešením bolo znížiť jeho napájacie napätie z pôvodných 12 V na hodnotu 9,8 V pomocou malej zelenej LED diódy zapojenej do série. Táto LED dióda má v priepustnom smere prahové napätie zhruba 2,2 V a tak dochádza k zníženiu napájacieho napätia. Takto napájaný PWM generátor začína pracovať až od napätia cca 9 V meraných v napájacom obvode (pred LED diódou).

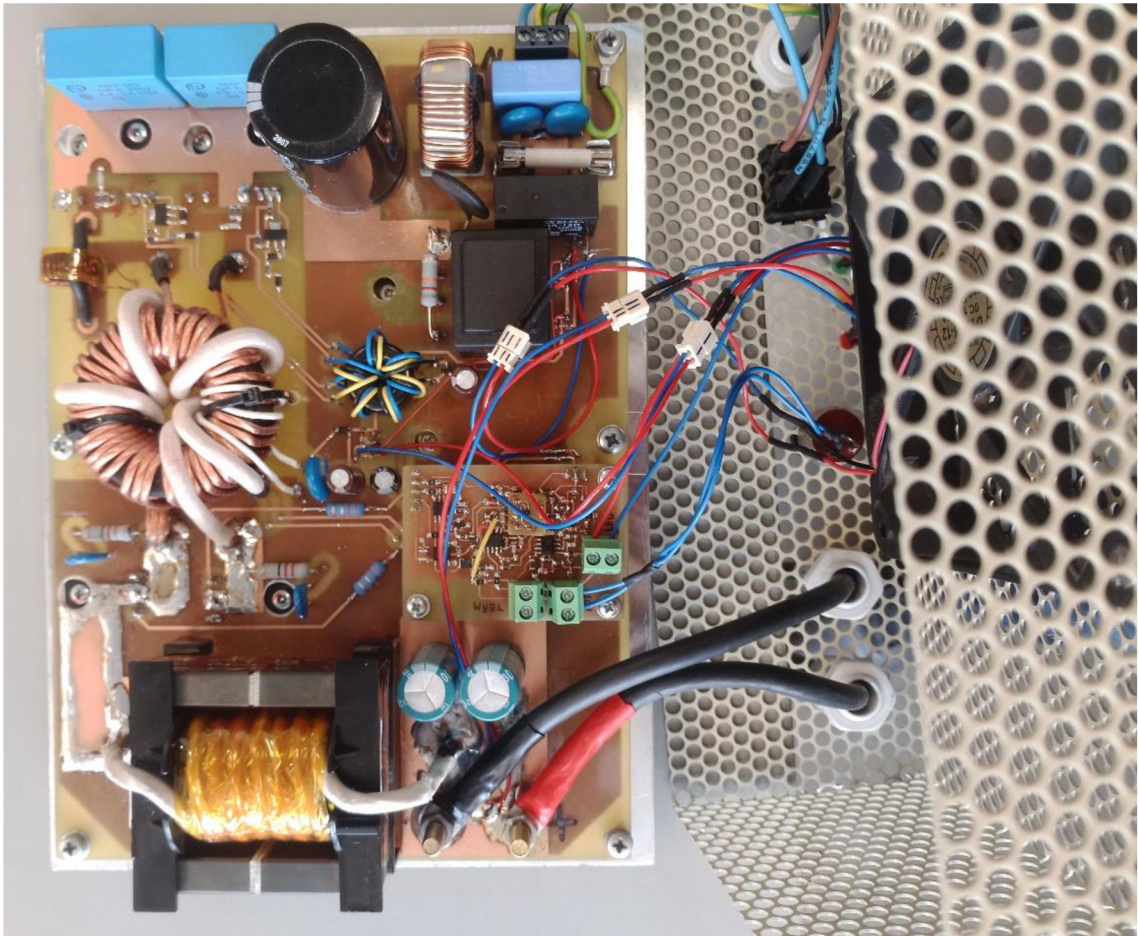
Poslednou úpravou, ktorú sme uskutočnili bolo pripojenie vybijacieho rezistoru R_{16} paralelne ku kondenzátoru C_5 na doske plošného spoja silového obvodu. Tento rezistor s hodnotou $82\text{ k}\Omega$ slúži na vybitie (do jednej minúty) kondenzátora C_5 po vypnutí nabíjačky ale zároveň má dostatočne veľkú hodnotu aby nezhoršovala účinnosť meniča (výkon meniaci na teplo je cca 1 W). Vybíjanie kondenzátora s veľkou kapacitou a s veľkým napätím je dôležité pre ochranu pred úrazom elektrickým prúdom pri opravách nabíjačky v budúcnosti. Bez tohto odporu by sa kondenzátor vybíjal veľmi pomaly, čiže aj po niekoľkých hodinách od vypnutia nabíjačky by mohlo byť dostatočné napätie v medziobvode pre nebezpečný úraz elektrickým prúdom.

V prílohe D je opravená schéma nabíjačky, kde sú zachytené vyššie popísané úpravy.

Po oživení a doladení všetkých drobností sme z perforovaného plechu vytvorili kryt nabíjačky, ktorú sme pomocou skrutiek pripevnili k chladiču nabíjačky. Do krytu sme umiestnili dvojpólový vypínač sieťového napätia, tri signalizačné LED diódy a potenciometer. Zelená LED dióda signalizuje zapnutie nabíjačky a je pripojená cez rezistor do napájacieho obvodu riadiaceho obvodu s napätím 12 V . Oranžová LED dióda je pripojená do riadiaceho obvodu cez rezistor R_4 na výstup prvého operačného zosilňovača integrovaného obvodu IC_1 . Táto LED dióda sa rozsvieti v prípade, že výstupné napätie je menšie ako $14,5\text{ V}$ (nabíjačka dodáva menší prúd). Posledná, červená LED dióda je pripojená na výstupné svorky nabíjačky cez rezistor a zenerovú diódu. Rozsvieti sa v prípade, že výstupné napätie dosiahlo maximálnu úroveň $14,5\text{ V}$ – nabitá batéria. Na výstupné svorky nabíjačky sme pripojili aj ventilátor, ktorú sa stará o dostatočnú cirkuláciu vzduchu vo vnútri nabíjačky. Na obrázku 20 je možné vidieť hotovú nabíjačku aj s krytom. A na obrázku 21 odkrytovanú nabíjačku.



Obrázok 20 Hotová nabíjačka – s krytom



Obrázok 21 Hotová nabíjačka - bez krytu

10. MERANIE

V tejto kapitole si ukážeme sériu uskutočnených meraní na jednotlivých komponentoch nabíjačky ktorými sme overovali jej funkčnosť. Pri týchto meraniach sme kontrolovali jednotlivé priebehy napätí a prúdov aby sme sa uistili, že nabíjačka funguje podľa očakávania a nikde nevznikajú nepriaznivé javy, ktoré by mohli v budúcnosti spôsobiť poruchu nabíjačky.

10.1 Meranie výkonových tranzistorov

Prvým meraním bolo meranie na riadiacich elektródach dolného výkonového tranzistora T_2 primárnej strany (zelený priebeh) a usmerňovacieho tranzistora Q_1 (hnedí priebeh) synchronného usmerňovača. Meranie sa uskutočnilo bez sieťového napájacieho napätia iba s napájaním riadiaceho a budiaceho obvodu. Na obrázku 22 nižšie je možné vidieť tieto priebehy.



Obrázok 22 Priebehy na riadiacich elektródach dolného výkonového tranzistora primárnej strany a usmerňovacieho tranzistora

Na nameraných priebehoch je dobre viditeľné, že signál na zapnutie usmerňovacieho tranzistora predchádza signál na zapnutie výkonového tranzistora o 580 ns. Dôvodom tohto oneskorenia je to, že je nutné aby nulový tranzistor synchronného usmerňovača Q_2 bol vo vypnutom stave, kedy zapneme výkonové tranzistory primárnej strany. Signál do riadiacej elektródy nulového tranzistora je invertovaný signálom do usmerňovacieho tranzistora. Z dôvodu, že meranie bolo uskutočnené naprázdno (nulový tranzistor nebol spínaný) ako referenčný signál sme uvažovali napätie na riadiacej elektróde usmerňovacieho tranzistora.

Na ďalšom obrázku 23 sú zachytené priebehy dolného výkonového tranzistora T_1 primárnej strany. Zelený priebeh je meraný na riadiacej elektróde tranzistora a modrý priebeh je meraný na draine (kolektore). Pri tomto meraní bolo v jednosmernom medziobvode napätie iba 100 V, pretože nad touto hodnotu napätia riadiaci obvod začal sťahovať striedu meniča. Meranie bolo uskutočnené bez záťaže.



Obrázok 23 Priebehy na riadiacej elektróde a draine výkonového tranzistora bez záťaže

Na ďalšom obrázku 24 je možné zase vidieť priebehy napätí na riadiacej elektróde a na draine dolného výkonového tranzistora primárnej strany. V tomto prípade bola nabíjačka zaťažená s výkonovým odporom do ktorého dodávala 54 A pri výstupnom napätí 14 V. Napätie v jednosmernom medziobvode dosahovalo 300 V.

Na obrázku 24 je veľmi dobre viditeľné zakmitanie napätia na draine dolného výkonového tranzistora (modrý priebeh), kedy dochádza k vypnutiu toho tranzistora. Na tomto obrázku zelený priebeh je priebeh riadiaceho napätia tohto istého tranzistora.

Detail vypínacieho deja (napätia) z obrázku 24 (napätie v medziobvode 300 V, výstupný prúd 54 A pri výstupnom napätí 14 V) je vyobrazené na obrázku 25 (zelený priebeh je napäťový signál z riadiaceho obvodu dodávaný na riadiacu elektródu a modrý priebeh je napätie na draine výkonového tranzistora dolného primárnej strany). Na tomto obrázku si môžeme všimnúť napäťový prekmit (modrý priebeh) na draine dolného výkonového tranzistora. Tento prekmit nad hodnotu napätia jednosmerného medziobvodu spôsobuje parazitná indukčnosť v slučke zdroj napätia jednosmerného medziobvodu – výkonový tranzistor – nulová dióda [7].



Obrázok 24 Priebehy na riadiacej elektróde a draine výkonového tranzistora so záťažou



Obrázok 25 Detail vypínacieho deja výkonového tranzistora

Na poslednom obrázku 26 tejto podkapitoly je zachytený detail zapínacieho deja z obrázku 24. Napätie v jednosmernom medziobvode aj v tomto prípade bolo 300 V, výstupný prúd 54 A pri napätí 14 V. Taktiež zelený priebeh je napätie na riadiacej elektróde a modrý priebeh je napätie na draine dolného výkonového tranzistora primárnej strany. Z obrázku 24 a z obrázku 26 vidíme, že napätie na draine pri zapínaní tranzistora

je značne menšie ako napätie v jednosmernom medziobvode. Demagnetizačné diódy D_1 a D_2 sú otvorené iba krátku dobu (cca 500 ns), kým sa jadro výkonového transformátora TR_2 demagnetizuje. Následne tieto diódy sa zavrú a priebeh napätia na draine dolného výkonového tranzistora určujú parazitné indukčnosti a kapacity obvodu. Pred začiatkom zapínacieho deja výkonových tranzistorov by napätie malo dosahovať približne polovicu napätia jednosmerného medziobvodu. Z obrázku 26 vidíme, že v našom prípade napätie na draine výkonového tranzistora primárnej strany dosahovalo zhruba 160 V.

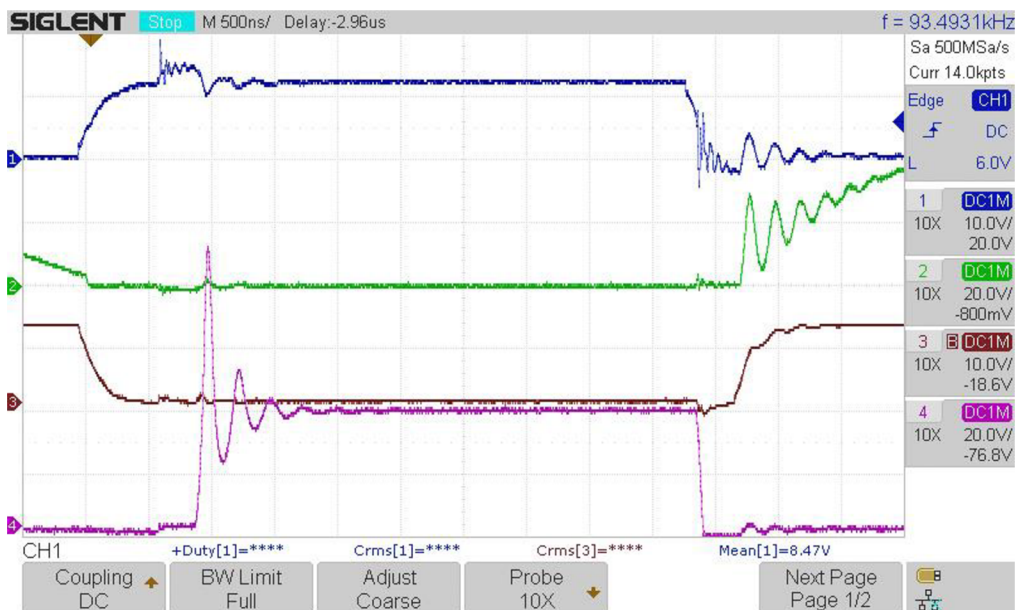


Obrázok 26 Detail zapínacieho deja výkonového tranzistora

10.2 Meranie synchronného usmerňovača

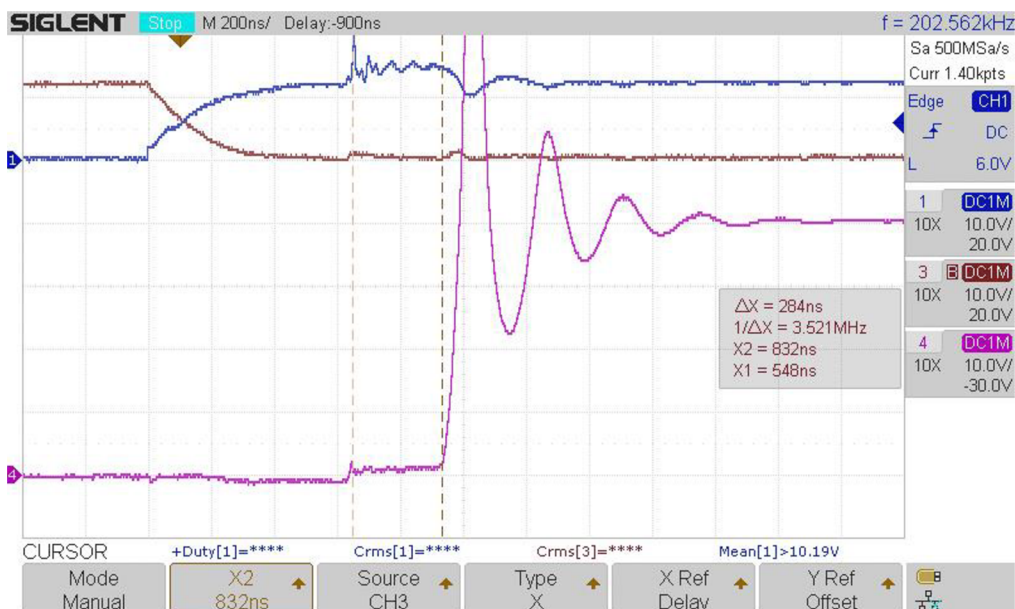
Synchronný usmerňovač, ktorý slúži na usmernenie sekundárneho napätia výkonového transformátora je dôležitou časťou nabíjačky, ktorý znižuje straty. Preto je dôležité skontrolovať priebehy napätia na usmerňovacom tranzistore Q_1 aj na nulovom tranzistore Q_2 .

Na nasledujúcom obrázku 27 sú zobrazené napätia na radiaciach elektródach aj na drainoch synchronného usmerňovača. Priebehy boli merané pri napätí v jednosmernom medziobvode o hodnote 300 V, výstupnom prúde 54 A a výstupným napätím 14 V. Modrý priebeh je napätie na radiacej elektróde usmerňovacieho tranzistora, zelený priebeh je napätie na draine usmerňovacieho tranzistora, hnedí priebeh je napätie na radiacej elektróde nulového tranzistora a fialový je priebeh napätia na draine nulového tranzistora synchronného usmerňovača.



Obrázok 27 Priebehy napätí na synchronnom usmerňovači pri prúde 54 A

Keďže nabíjačka dodávala prúd 54 A, riadiaci obvod dovolil spínanie nulového tranzistora. Na fialovom priebehu napätia (drain nulového tranzistora) si môžeme všimnúť zaujímavosť, že napätie sa tu objaví s časovým oneskorením. Na ďalších dvoch obrázkoch si to priblížime pri rôznych výstupných prúdoch. Na obrázku 28 je toto časové oneskorenie vyznačené a odmerané pomocou kurzorov osciloskopu. (Modrý priebeh je riadiaca elektróda usmerňovacieho tranzistora, hnedí priebeh je riadiaca elektróda nulového tranzistora a fialový priebeh je drain nulového tranzistora.)



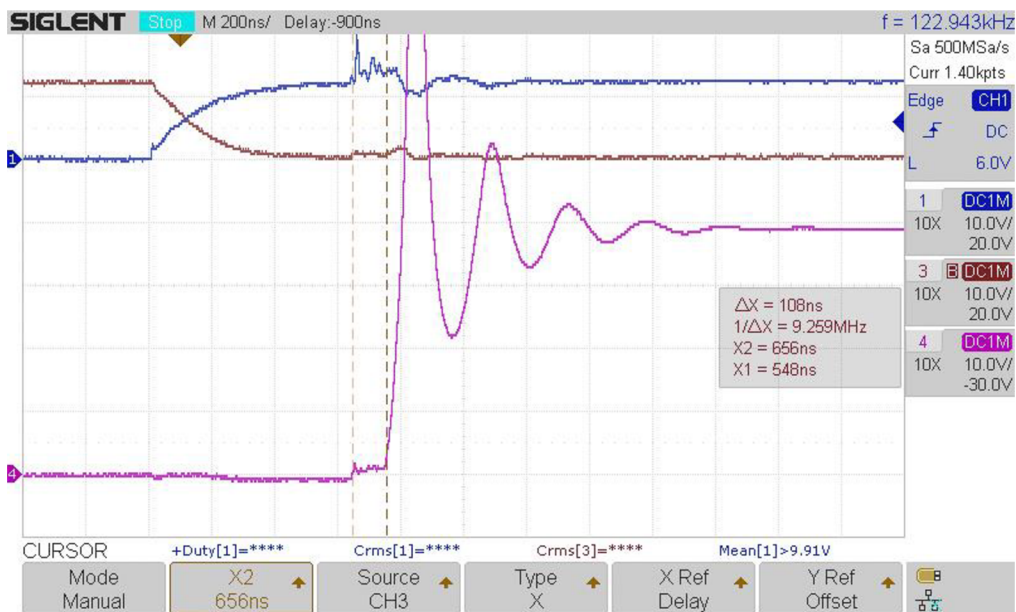
Obrázok 28 Detail časového oneskorenia pri prúde 54 A

Spomínané časové oneskorenie by sme po správnosti mali merať medzi drainom výkonového tranzistora na primárnej strane a drainom nulového tranzistora synchronného usmerňovača. Avšak kvôli zemným potenciálom, ktoré sú v osciloskope spoločné pre všetky kanály nemôžeme tieto dve priebehy naraz odmerať. Preto okamžik zapnutia výkonového tranzistora iba odhadujeme podľa špičky napätia na riadiacej elektróde usmerňovacieho tranzistora na sekundárnej strane. Odmeraný čas je časové oneskorenie medzi zapnutím výkonového tranzistora na primárnej strane a uzavretím nulového tranzistora synchronného usmerňovača.

Časové oneskorenie Δt činí 284 ns pri výstupnom prúde 54 A. Za toto časové oneskorenie zodpovedá rozptylová indukčnosť výkonového transformátora. Zo známych údajov o napätí v jednosmernom medziobvode, o počte závitov výkonového transformátora a o výstupnom prúde sme schopný podľa nasledujúceho vzťahu túto rozptylovú indukčnosť sekundárnej cievky vyčíslieť.

$$L_{\sigma} = \frac{\Delta t \cdot U_d \cdot \frac{N_2}{N_1}}{I_z} = \frac{284 \cdot 10^{-9} \cdot 300 \cdot \frac{5}{37}}{54} = 2,13 \cdot 10^{-7} = 213 \text{ nH} \quad (10.2.1)$$

Pre overenie predchádzajúcej úvahy sme uskutočnili ďalšie meranie pri inom výstupnom prúde. Na obrázku 29 sú zachytené rovnaké priebehy (modrý priebeh je riadiaca elektróda usmerňovacieho tranzistora, hnedí priebeh je riadiaca elektróda nulového tranzistora a fialový priebeh je drain nulového tranzistora) ako na obrázku 28 ale v tomto prípade pri výstupnom prúde 20 A.



Obrázok 29 Detail časového oneskorenia pri prúde 20 A

Časové oneskorenie pri takomto prúde činí 108 ns. Overenie výpočtu rozptylovej indukčnosti pri nových hodnotách prúdu a časového oneskorenia:

$$L_{\sigma} = \frac{\Delta t \cdot U_d \cdot \frac{N_2}{N_1}}{I_z} = \frac{108 \cdot 10^{-9} \cdot 300 \cdot \frac{5}{37}}{20} = 2,18 \cdot 10^{-7} = 218 \text{ nH} \quad (10.2.2)$$

Z dôvodu, že s výstupným prúdom sa mení aj odmerané časové oneskorenie je vypočítaná rozptylová indukčnosť v oboch prípadoch rovnaká (minimálny rozdiel môže spôsobovať nie úplne presné nastavenie kurzorov osciloskopu).

Vypočítaná rozptylová indukčnosť nám umožňuje určiť činiteľa väzby k výkonového transformátora. Činiteľ väzby by mal dosahovať čo najvyššiu hodnotu, čiže veľmi blízku jednej. Podľa [1] tento činiteľ musí mať hodnotu medzi 0,997 až 0,999. Hodnota 0,990 je úplne nevyhovujúca.

Pre výpočet činiteľa väzby bolo potrebné najprv určiť indukčnosť sekundárnej cievky výkonového transformátora. Výpočet sme realizovali podľa nasledujúceho vzorca, ktorý vychádza zo vzorca 3.2.1.

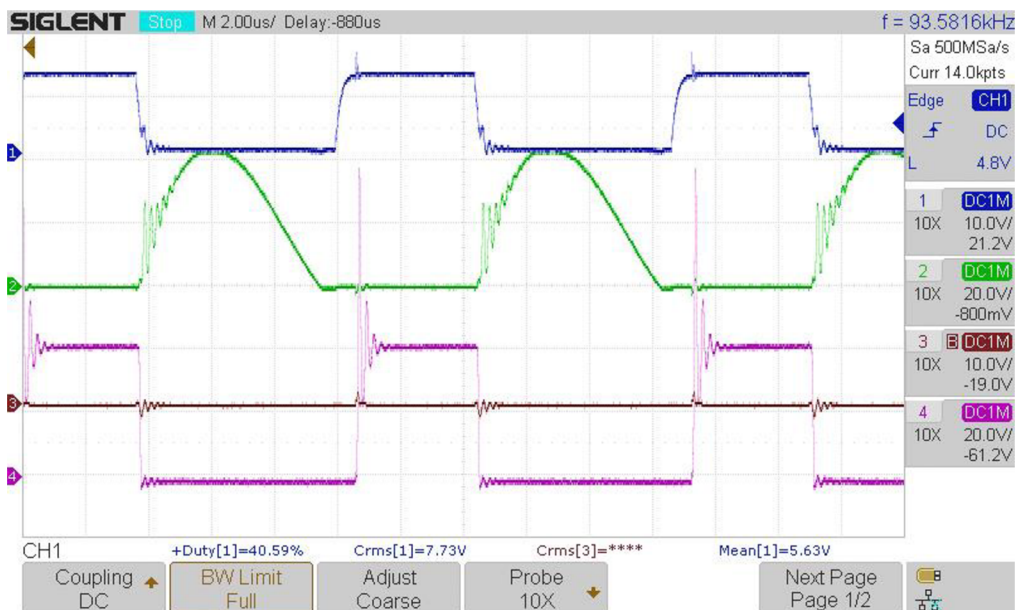
$$L_2 = N_2^2 \cdot \mu_0 \cdot \mu_r \frac{S_{fe}}{l_{fe}} = 5^2 \cdot 4 \cdot \pi \cdot 10^{-7} \cdot 2300 \cdot \frac{160,9 \cdot 10^{-6}}{123,1 \cdot 10^{-3}} = 94,44 \text{ } \mu\text{H} \quad (10.2.3)$$

Zo známej hodnoty indukčnosti sekundárneho vinutia a rozptylovej indukčnosti (priemer z dvoch vypočítaných hodnôt) už bolo jednoduché určiť činiteľ väzby.

$$k = \sqrt{1 - \frac{L_{\sigma}}{L_2}} = \sqrt{1 - \frac{215,5 \cdot 10^{-9}}{94,44 \cdot 10^{-6}}} = 0,9989 \text{ [-]} \quad (10.2.4)$$

Ako vidíme, podľa výpočtu činiteľa väzby, nami navrhnutí a vyrobený transformátor je dostatočne „tvrdý“ pre použitie v meniči pracujúci na kmitočte 100 kHz. Bohužiaľ pri výrobe výkonového transformátora sme nedomerali činiteľ väzby (a už z hotovej nabíjačky sme nechceli vymontovať transformátor) a tak teraz nie sme schopný porovnať tieto dve hodnoty.

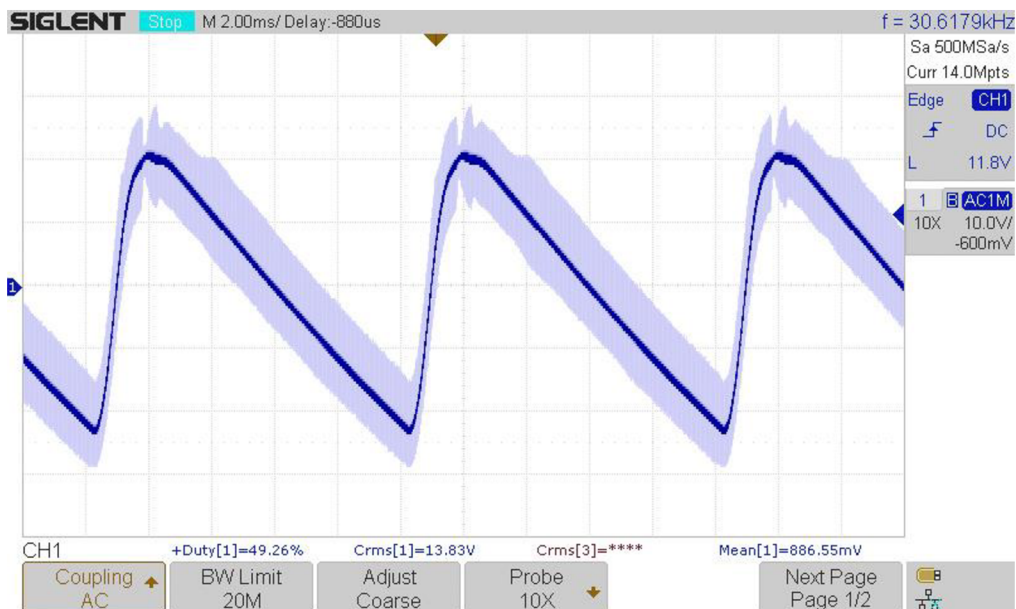
Na ďalšom obrázku 30, ktorý zachytáva rovnaké priebehy ako obrázok 29 (modrý priebeh je napätie na riadiacej elektróde usmerňovacieho tranzistora, zelený priebeh je napätie na draine usmerňovacieho tranzistora, hnedí priebeh je napätie na riadiacej elektróde nulového tranzistora a fialový je priebeh napätia na draine nulového tranzistora) ale pri výstupnom napätí 14,5 V a výstupnom prúde 9,2 A (napätie v jednosmernom medziobvode rovnako 300 V) vidíme, že riadiaci obvod nedovolí spínanie nulového tranzistora pri takto malom výstupnom prúde.



Obrázok 30 Priebeh napätí synchronného usmerňovača pri prúde 9,2 A

10.3 Meranie jednosmerného medziobvodu

Pomocou osciloskopu sme odmerali aj priebeh napätia v jednosmernom napät'ovom medziobvode. Z priebehu napätia na obrázku 31 sme odčítali zvlnenie napätia. Pri tomto meraní bola nabíjačka zaťažená výstupným prúdom 54 A pri výstupnom napätí 14 V.



Obrázok 31 Zvlnenie napätia v DC medziobvode (meranie so striedavou väzbou)

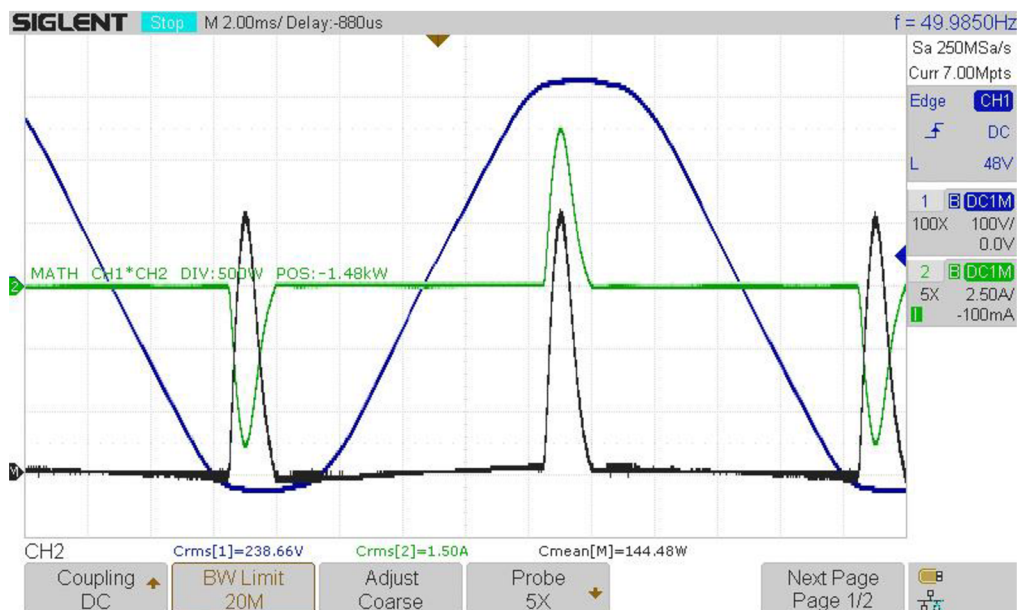
Stredná hodnota napätia podľa merania osciloskopom (s jednosmernou väzbou) bola 307 V.

Zvlnenie podľa tohto merania vychádza na ± 20 V. Podľa kapitoly 2.2, kde sme uvažovali maximálne zvlnenie ± 25 V vidíme, že naše rozhodnutie o použití filtračného kondenzátora s menšou kapacitou než vypočítanou nemal výrazný vplyv na zvlnenie napätia.

10.4 Meranie výkonov, účinnosti a účinníku

Meranie výkonov sme uskutočnili meraním vstupného sieťového napätia a prúdu pomocou osciloskopu a meraním výstupného napätia a prúdu pomocou jednoduchých multimetrov. Na nasledujúcich obrázkoch je modrý priebeh napätie siete, zelený priebeh odoberaného prúdu a čierny priebeh súčin okamžitých hodnôt napätia a prúdu uskutočnené pomocou osciloskopu. Namerané hodnoty napätia a prúdu sú v tomto prípade iba orientačné, pretože meracie sondy napätia a prúdu osciloskopu môžu mať chybu až 10 %. A samotný výpočet (súčin) osciloskopu tiež nie je bezchybná záležitosť.

Prvý obrázok 32, zachytáva tieto priebehy pri výstupnom prúde 8,96 A a napätí 14,5 V.



Obrázok 32 Priebehy sieťového napätia a prúdu pri malom výkone

Výkon dodávaný do záťaže P_2 sme vypočítali jednoduchým súčinom odmeraných údajov pomocou multimetrov.

$$P_2 = U_2 \cdot I_2 = 14,5 \cdot 8,96 = 129,92 \text{ W} \quad (10.4.1)$$

Strednú hodnotu príkonu sme odčítali z osciloskopu $P_I = 144,48 \text{ W}$ a následne sme vypočítali účinnosť nabíjačky.

$$\eta = \frac{P_2}{P_1} = \frac{129,92}{144,48} = 0,899 [-] \quad (10.4.2)$$

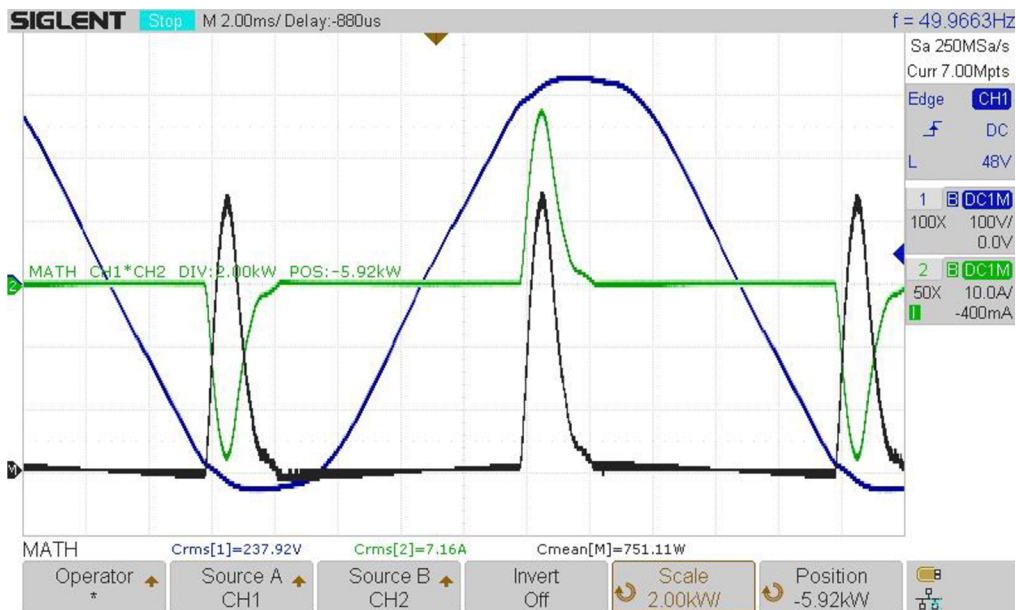
Pomocou strednej hodnoty príkonu P_I a zdanlivej hodnoty príkonu S_I (podľa odčítaných hodnôt z osciloskopu) sme určili skutočný účinník nabíjačky.

$$S_1 = U_{1ef} \cdot I_{1ef} = 238,66 \cdot 1,5 = 357,99 \text{ [VA]} \quad (10.4.3)$$

$$\lambda = \frac{P_1}{S_1} = \frac{144,48}{357,99} = 0,404 [-] \quad (10.4.4)$$

Ako vidíme podľa výpočtu skutočný účinník nabíjačky je veľmi malý. Za túto skutočnosť zodpovedá dvojcestné usmernenie sieťového napätia s nabíjacím kondenzátorom. Použitý usmerňovač s nabíjacím kondenzátorom odoberá značne skreslený prúd zo siete (ako vidíme na zelenom priebehu na obrázku 32).

Výpočet účinnosti a účinníku sme uskutočnili aj pri vyššom výstupnom prúde s hodnotou $50,2 \text{ A}$ a pri výstupnom napätí 14 V . Na obrázku 33 je možné vidieť priebehy sieťového napätia a prúdu pri takto zaťaženej nabíjačke. Výpočtové vzorce sú rovnaké ako v predchádzajúcom prípade.



Obrázok 33 Priebehy sieťového napätia a prúdu pri nominálnom výkone

Z výstupného prúdu a napätia sme určili výstupný výkon.

$$P_2 = U_2 \cdot I_2 = 14 \cdot 50,2 = 702,8 \text{ W} \quad (10.4.5)$$

Z osciloskopu sme odčítali strednú hodnotu príkonu $P_I = 751,11 \text{ W}$ a vypočítali účinnosť nabíjačky.

$$\eta = \frac{P_2}{P_1} = \frac{702,8}{751,11} = 0,936 [-] \quad (10.4.6)$$

Následne sme určili zdanlivý príkon S_I podľa nameraných hodnôt z osciloskopu a vypočítali skutočný účinník nabíjačky.

$$S_1 = U_{1ef} \cdot I_{1ef} = 237,92 \cdot 7,16 = 1\,703,5 \text{ [VA]} \quad (10.4.7)$$

$$\lambda = \frac{P_1}{S_1} = \frac{751,11}{1\,703,5} = 0,441 [-] \quad (10.4.8)$$

ZÁVER

Táto diplomová práca popisuje kompletný návrh nabíjačky olovených akumulátorov s napätím 12 V, ktorý pracuje na princípe jednočinného priepustného meniča. Nabíjačka bola navrhnutá tak, aby bola schopná dodávať do batérie dlhodobý prúd 50 A, pričom krátkodobý umožňuje zaťaženia až na 100 A. Takéto krátkodobé zaťaženie je vhodné napríklad pri štartovaní dopravných prostriedkov s menším spaľovacím motorom ako sú motocykle.

V prvej kapitole je čitateľ oboznámený s princípom fungovania jednočinného priepustného meniča, ktoré bolo potrebné bezpodmienečne nastudovať pre správny návrh nabíjačky.

Obsahom druhej kapitoly je návrh zapojenia silového obvodu nabíjačky vrátane popisu jednotlivých dielčích častí. Zaujímavosťou je, že nabíjačka obsahuje synchronný usmerňovač na sekundárnej strane. Výhodou tohto typu usmerňovača je, že vykazuje menšie straty oproti usmerňovača vytvorené z diód. Na obrázku 5 a v prílohe B je možné vidieť kompletnú schému silového obvodu navrhovanej nabíjačky.

V ďalšej kapitole je podrobne zaznamenaný návrh a výpočet jednotlivých vinutých súčiastok, ktoré nabíjačka obsahuje. Najdôležitejším vinutým prvkom nabíjačky je výkonový transformátor, ktorý slúži na zmenu napäťovej hladiny a na galvanické oddelenie vstupných svoriek nabíjačky od výstupných svoriek. V tejto kapitole je realizovaný aj návrh výstupnej tlmivky LC filtra a aj návrh prúdového transformátora slúžiaceho na meranie výstupného prúdu. Kapitola ďalej obsahuje aj výpočet parametrov budiaceho transformátora. Keďže pracovná frekvencia nabíjačky má byť 100 kHz, všetky vinuté súčiastky musia disponovať magnetickým obvodom vyrobeným z feritu.

Ďalšia kapitola hovorí o napäťovom a prúdovom dimenzovaní jednotlivých výkonových spínacích polovodičových súčiastok. Tieto súčiastky sú namáhané okrem napätia a prúdu aj teplom, ktoré vzniká prechodom prúdu alebo prepínaním stratami. Podľa vypočítaných strát je v nasledujúcej kapitole uskutočnený výpočet chladiča, ktorý bude z týchto tepelne namáhaných súčiastok odvádzať vzniknuté teplo.

V šiestej kapitole je podrobný popis návrhu riadiacich obvodov slúžiacich na správne spínanie jednotlivých výkonových polovodičových súčiastok podľa snímaného výstupného napätia a prúdu. Na obrázku 9 a v prílohe A je možné vidieť kompletnú schému riadiaceho obvodu nabíjačky.

Ďalšia kapitola vysvetľuje výrobu vinutých súčiastok, ktoré boli navrhnuté v tretej kapitole. Ôsma kapitola disponuje okrem návrhu jednotlivých dosiek plošných spojov silového a riadiaceho obvodu, aj ich výrobou vrátane postupu pri osadzovaní súčiastkami.

V predposlednej deviatej kapitole je vysvetlený postup pri oživovaní riadiaceho a silového obvodu. Pri oživovaní sa vyskytli nedostatky v návrhu. Táto kapitola popisuje tieto nedostatky vrátane popisu ich odstraňovania, ktoré mali za následok niekoľko drobných zmien na doskách plošných spojov a v schémach nabíjačky. Nedostatkom bol

napríklad zle zvolená napájacia hladina integrovaného obvodu IC_5 v riadiacom obvode, ktorý sme odstránili prepojením napájacej elektródy na nižšiu napájaciu hladinu. Ďalším nedostatkom bolo zle vybrané puzdro hradlových rezistorov patriace k tranzistorom synchronného usmerňovača, na ktorých tak vznikal veľký stratový výkon. Riešenie sme našli vo výmene týchto rezistorov za iné, s väčším výkonom. Zle prúdovo nadimenzovanú diódu D_7 v silovom obvode sme vymenili za iný typ s väčšou prúdovou odolnosťou. Do jednosmerného medziobvodu sme pridali vybíjací rezistor, ktorý po vypnutí nabíjačky vybije elektrolytický kondenzátor s veľkou kapacitou a tak zníži možnosť úrazu elektrickým prúdom pri budúcich opravách. Na záver sme doplnili tri signalizačné LED diódy, ktoré informujú obsluhu o chode nabíjačky, o aktívnosti prúdového obmedzenia a o nabití akumulátora. Všetky uskutočnené úpravy boli zakreslené do príslušných schém, ktoré sú v prílohách C a D a budú užitočné pre prípadné opravy v budúcnosti.

V poslednej kapitole sú popísané jednotlivé overovacie merania, ktoré sme uskutočnili na nabíjačke. V tejto kapitole je realizovaný aj výpočet účinnosti nabíjačky, ktorá dosahuje hodnôt okolo 94 % a aj výpočet skutočného účinníka s hodnotou okolo 0,45. Avšak tieto údaje sú len informatívne. Na obrázku 19 je možné vidieť meranie výstupného prúdu hotovej nabíjačky. Toto meranie slúži ako dôkaz, že navrhnutá nabíjačka je schopná dodávať krátkodobo prúd viac ako 100 A.

LITERATÚRA

- [1] PATOČKA, Miroslav. *Magnetické jevy a obvody*. Brno: Nakladatelství VUTIUM, 2011. ISBN 9788021440036.
- [2] DŘÍNOVSKÝ, Jiří, Tomáš FRÝZA, Václav RŮŽEK a Jiří ZACHAR. *Elektromagnetická kompatibilita*. Brno, 2017.
- [3] PATOČKA, Miroslav. *Vybrané statě z výkonové elektroniky – svazek II: Pulsní měniče bez transformátoru*. Brno, 2005.
- [4] *Product data approval sheet: Core - T4919* [online]. [cit. 2022-05-06].
Dostupné z: https://semic.cz/!old/files/pdf_www/Lj_139T4919C_CF.pdf
- [5] *Product data approval sheet: Core - ETD5922* [online]. [cit. 2022-5-6].
Dostupné z:
https://semic.cz/!old/files/pdf_www/Lj_139ETD5922AL_CF.pdf
- [6] PATOČKA, Miroslav. *Vybrané statě z výkonové elektroniky – svazek I: Tepelné jevy, Činný výkon*. Brno, 2005.
- [7] PATOČKA, Miroslav. *Vybrané statě z výkonové elektroniky - svazek III: Výkonové polovodičové spínací součástky*. Brno, 2014.
- [8] *GBJ10005 thru GBJ1010: Single Phase Bridge Rectifiers* [online]. [cit. 2022-5-6]. Dostupné z:
https://semic.cz/!old/files/pdf_www/GBJ10005_SF.pdf
- [9] *Datasheet: UF3C065080K4S* [online]. [cit. 2022-05-06]. Dostupné z:
https://www.tme.eu/Document/4a7b061db3141ac5eacca75a454e57e2/U_F3C065080K4S.PDF
- [10] *C4D05120A: Silicon carbide schottky diode* [online]. [cit. 2022-5-6].
Dostupné z: <http://www.farnell.com/datasheets/2047812.pdf>
- [11] *IRF100P218: Mosfet* [online]. [cit. 2022-5-6]. Dostupné z:
https://www.infineon.com/dgdl/Infineon-IRF100P218-DataSheet-v02_01-EN.pdf?fileId=5546d462602a9dc80160e20d3eca4b83
- [12] VOREL, Pavel a Petr PROCHÁZKA. *Řídicí členy v elektrických pohonech*. Brno, 2009.
- [13] VOREL, Pavel a Miroslav PATOČKA. *Průmyslová elektronika*. Brno, 2007.
- [14] Marconi. *Skoro vše o akumulátorech a nabíjení* [online]. 2008 [cit. 2022-05-19]. Dostupné z: <https://paja-trb.cz/konstrukce/nabijecka-autobatererek/o-aku-a-nabijeni.pdf>

ZOZNAM SYMBOLOV A SKRATIEK

Skratky:

FEKT	Fakulta elektrotechniky a komunikačných technológií
GND	Potenciál zeme
DPS	Doska plošného spoja
IGBT	Bipolárny tranzistor s izolovaným hradlom
MOS-FET	Pol'om riadený tranzistor s hradlom izolovaným oxidovou vrstvou
N-MOS-FET	MOS-FET typu N
OR	Logická funkcia
PWM	Pulzná šírková modulácia
TR	Transformátor
VUT	Vysoké učení technické v Brně

Symboly:

μ_0	<i>permeabilita vákua</i>	(Hm^{-1})
μ_r	<i>relatívna permeabilita</i>	(Hm^{-1})
A_L	<i>konštanta materiálu</i>	(H)
B_{max}	<i>amplitúda magnetickej indukcie</i>	(T)
C	<i>kondenzátor</i>	$(-)$
C_x	<i>kondenzátor na odrušenie protifázových zložiek</i>	(F)
C_y	<i>kondenzátor na odrušenie súfázových zložiek</i>	(F)
D	<i>dióda</i>	$(-)$
d_{cu2}	<i>priemer sekundárneho vodiča</i>	(m)
D_o	<i>priemer okna TR</i>	(m)
f	<i>pracovná frekvencia</i>	(Hz)
f_r	<i>rezonančná frekvencia</i>	(Hz)
I	<i>prúd</i>	(A)
i_μ	<i>magnetizačný prúd</i>	(A)
$I_{\mu max}$	<i>amplitúda magnetizačného prúdu</i>	(A)
i_1	<i>prúd primárom výkonového TR</i>	(A)
I_{1ef}	<i>efektívna hodnota primárneho prúdu</i>	(A)
I_{1max}	<i>amplitúda primárneho prúdu</i>	(A)
i_2	<i>prúd sekundárom výkonového TR</i>	(A)
I_{2ef}	<i>efektívna hodnota sekundárneho prúdu</i>	(A)
I_{2max}	<i>amplitúda sekundárneho prúdu</i>	(A)
i_d	<i>prúd v jednosmernom medziobvode</i>	(A)
I_{ef}	<i>efektívna hodnota prúdu</i>	(A)
I_{kat}	<i>katalógová hodnota prúdu</i>	(A)

I_{str}	stredná hodnota prúdu	(A)
i_{TI}	prúd výkonovým tranzistorom	(A)
$I_{výstup}$	výstupný prúd	(A)
k	činiteľ väzby	(-)
k_{pl}	činiteľ plnenia okna TR	(-)
L_1	indukčnosť TR	(H)
l_{fe}	stredná dĺžka magnetických siločiar	(m)
L_{N,L_L}	odrušovacia tlmivka	(H)
l_{vzd}	dĺžka vzduchovej medzery	(m)
L_{σ}	rozptylová indukčnosť	(H)
N_1	počet primárnych závitov	(-)
N_2	počet sekundárnych závitov	(-)
P_1	výkon	(W)
P_2	príkon	(W)
P_{dioda}	straty na dióde	(W)
P_{prep}	straty prepínaním	(W)
P_{str}	stratový výkon	(W)
P_{ved}	straty vedením	(W)
$R_{D_{Son}}$	dynamický odpor	(Ω)
R_g	predradný rezistor	(Ω)
$R_{\theta H}$	tepelný odpor chladiča	(KW^{-1})
$R_{\theta CH}$	tepelný odpor puzdro – chladič	(KW^{-1})
$R_{\theta JC}$	tepelný odpor čip – puzdro	(KW^{-1})
R_z	zaťažovací rezistor	(Ω)
S_1	zdanlivý príkon	(VA)
S_{cu}	celkový prierez vinutia	(m^2)
S_{cu1}	prierez primárneho vodiča	(m^2)
S_{cu2}	prierez sekundárneho vodiča	(m^2)
S_{fe}	prierez jadra	(m^2)
s_m	maximálna strieda	(-)
$s_{nutr.}$	strieda nulového tranzistoru	(-)
S_o	prierez okna TR	(m^2)
s_p	pracovná strieda	(-)
T	tranzistor	(-)
t_{1max}	čas jedného pulzu	(s)
$T_{\check{c}}$	teplota čipu	($^{\circ}C$)
$t_{deadtime}$	čas deadtime	(s)
t_{demag}	čas, keď sú výkonové tranzistory vypnuté	(s)
T_H	teplota chladiča	($^{\circ}C$)
T_o	teplota okolia	($^{\circ}C$)

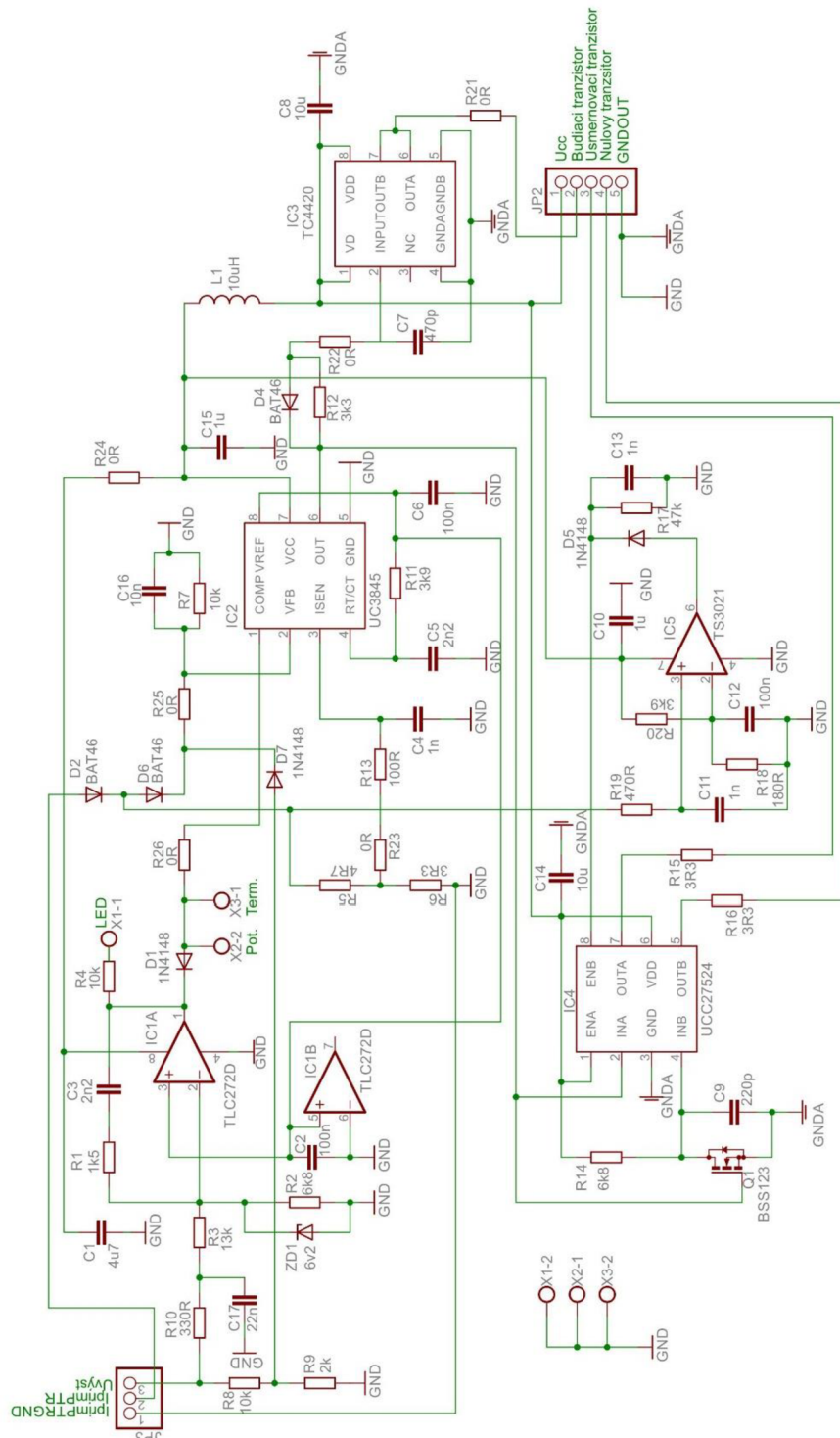
t_{zap}	čas, keď sú výkonové tranzistory zapnuté	(s)
U	napätie	(V)
U_1	napätie primárneho vinutia	(V)
U_2	napätie sekundárneho vinutia	(V)
U_{2max}	amplitúda sekundárneho napätia	(V)
U_{amp}	amplitúda jednofázového napätia	(V)
U_{cc}	napájacie napätie riadiaceho obvodu	(V)
U_d	napätie v jednosmernom medziobvode	(V)
U_F	prahové napätie diódy	(V)
U_{kat}	katalógová hodnota napätia	(V)
U_{MAX}	amplitúda napätia	(V)
U_p	prahové napätie	(V)
$U_{výstup}$	výstupné napätie	(V)
W_c	celkové stratová energia	(J)
W_{kat}	katalógová hodnota stratovej energie	(J)
ZD	zenerová dióda	(-)
ΔI	zvlnenie prúdu	(A)
Δt	časové oneskorenie	(s)
ΔU	zvlnenie napätia	(V)
η	účinnosť	(-)
λ	skutočný účinník	(-)
π	Ludolfovo číslo	(-)
σ	prúdová hustota	(Am ⁻²)

ZOZNAM PRÍLOH

PRÍLOHA A - PÔVODNÁ SCHÉMA RIADIACEHO OBVODU A NÁVRH DPS	70
PRÍLOHA B - PÔVODNÁ SCHÉMA SILOVÉHO OBVODU A NÁVRH DPS.....	71
PRÍLOHA C - UPRAVENÁ SCHÉMA RIADIACEHO OBVODU	72
PRÍLOHA D - UPRAVENÁ SCHÉMA SILOVÉHO OBVODU	73

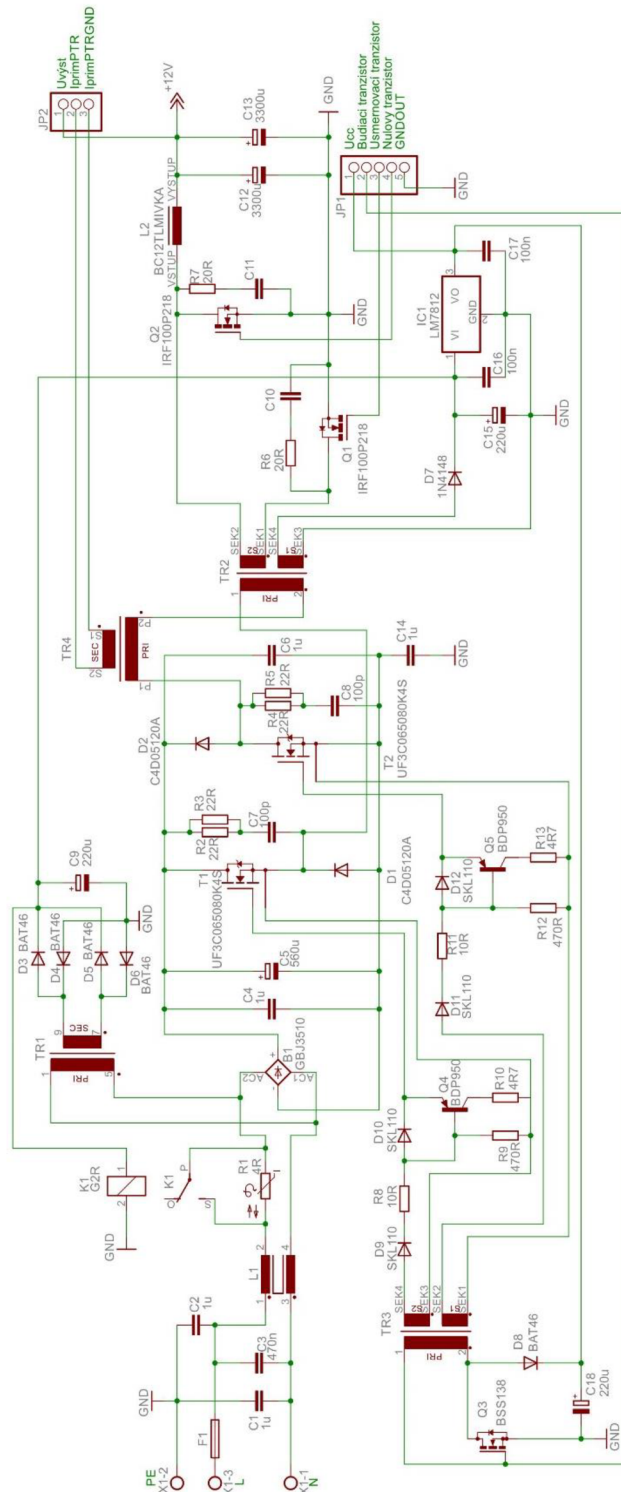
Príloha A - Pôvodná schéma riadiaceho obvodu a návrh DPS

Pôvodná schéma riadiaceho obvodu a pôvodný návrh DPS riadiaceho obvodu vrátane pomocnej dosičky je na priloženom CD v priečniku „Riadiaci obvod – pôvodná“ vytvorené v programe Eagle 5.7.



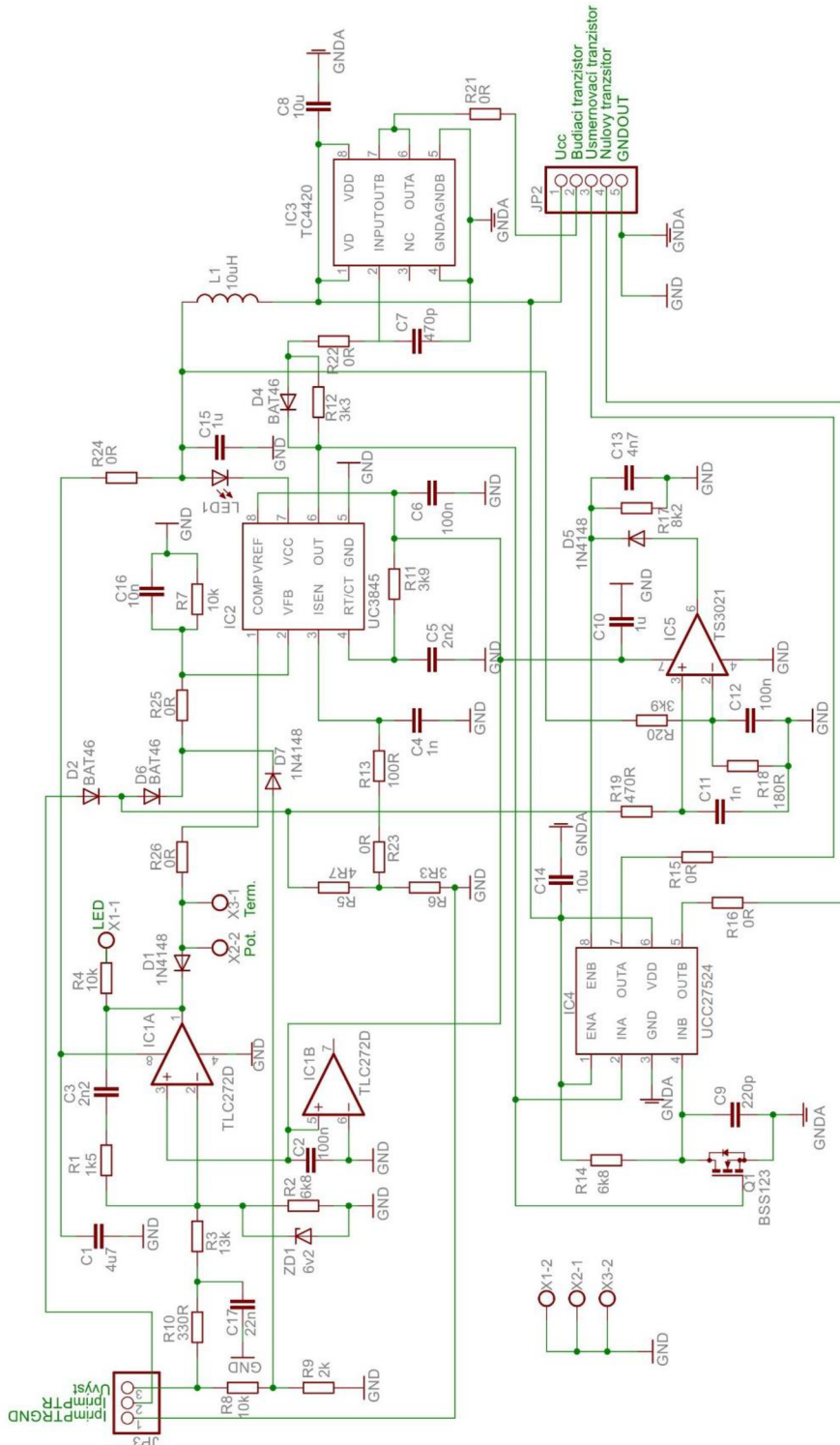
Príloha B - Pôvodná schéma silového obvodu a návrh DPS

Pôvodná schéma silového obvodu a pôvodný návrh DPS silového obvodu je na priloženom CD v priečniku „Silový obvod – pôvodná“ vytvorené v programe Eagle 5.7.



Príloha C - Upravená schéma riadiaceho obvodu

Upravená schéma riadiaceho obvodu je na priloženom CD v priečinku „Riadiaci obvod – upravená“ vytvorené v programe Eagle 5.7.



Príloha D - Upravená schéma silového obvodu

Upravená schéma silového obvodu je na priloženom CD v priečinku „Silový obvod – upravená“ vytvorené v programe Eagle 5.7.

