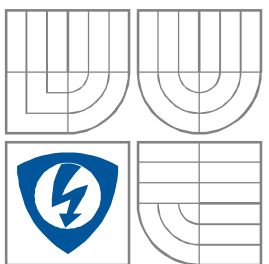


VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY



**FAKULTA ELEKTROTECHNIKY A KOMUNIKAČNÍCH
TECHNologií**

**ÚSTAV VÝKONOVÉ ELEKTROTECHNIKY
A ELEKTRONIKY**

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

VÝKONOVÝ MĚNIČ PRO SVAŘOVÁNÍ STEJNOSMĚRNÝM OBLOUKEM

POWER CONVERTER FOR THE ELECTRIC DC ARC WELDING

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

BACHELOR'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

DANIEL VRANÁK

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

doc. Dr. Ing. MIROSLAV PATOČKA

BRNO 2015



**VYSOKÉ UČENÍ
TECHNICKÉ V BRNĚ**

**Fakulta elektrotechniky
a komunikačních technologií**

Ústav výkonové elektrotechniky a elektroniky

Bakalářská práce

bakalářský studijní obor
Silnoproudá elektrotechnika a výkonová elektronika

Student: Vranák Daniel
Ročník: 3

ID: 154907
Akademický rok: 2014/2015

NÁZEV TÉMATU:

Výkonový měnič pro svařování stejnosměrným obloukem

POKYNY PRO VYPRACOVÁNÍ:

1. Porovnejte různé typy výkonových měničů vhodných pro realizaci stejnosměrné svářečky napájené z jednofázové sítě 230 V. Výstupní stejnosměrný proud měniče bude regulován v rozsahu 50 A až 130 A. Měnič bude možno také přepnout do režimu napětového zdroje regulovatelného v rozsahu 0 až 24 V s výstupním proudem do 15 A.
2. Měnič podle bodu 1 navrhnete obvodově i konstrukčně..
3. Realizujte výkonové i řídicí obvody měniče.
4. Experimentálně ověřte činnost výkonových i řídicích obvodů měniče.

DOPORUČENÁ LITERATURA:

- [1] Patočka M.: Magnetické jevy a obvody. VUTIUM, Brno, 2011.
- [2] Patočka M.: Vybrané statě z výkonové elektroniky, sv. 1. Skriptum, FEKT, VUT Brno.
- [3] Patočka M.: Vybrané statě z výkonové elektroniky, sv. 2. Skriptum, FEKT, VUT Brno.

Termín zadání: 22.09.2014

Termín odevzdání: 02.06.2015

Vedoucí práce: doc. Dr. Ing. Miroslav Patočka

Konzultanti bakalářské práce:



UPOZORNĚNÍ:

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

Abstrakt

Cieľom práce bolo vytvorenie návrhu výkonového meniča pre zváranie jednosmerným oblúkom, ktorý by bol určený pre používanie v pravidelnej prevádzke. Pre potreby návrhu bolo potrebné sa najskôr oboznámiť s možnými spôsobmi používaných meničov, ktorých rozdelenie a vysvetlenie princípu činnosti sa nachádza v začiatku práce. Ďalej bol prevedený podrobný návrh jednotlivých súčiastok použitých pre stavbu silovej časti zvaračky.

Abstract

The main aim of thesis was produce a draft power converters for DC arc welding, which would be suitable for use in regular service. For the purpose of the proposal, first must be acquainted with the possible methods used converters whose distribution and explain the principle place in beginning thesis. Next it was transferred detailed design of individual components, which was used for the construction of the power part of the welder.

Klíčové slová

Výkonový menič; zvaračka; transformátor; usměrňovač; filtrační tlumivka

Keywords

Power converter; welding machine; transformer; rectifier; filter choke

Bibliografická citácia

VRANÁK, D. *Výkonový měnič pro svařování stejnosměrným obloukem*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, 2015. 45 s. Vedoucí bakalářské práce doc. Dr. Ing. Miroslav Patočka.

Prehlásenie

Prehlasujem, že svoju bakalársku prácu na tému Výkonový měnič pro svařování stejnosměrným obloukem som vypracoval samostatne pod vedením vedúceho bakalárskej práce a s použitím odbornej literatúry a ďalších informačných zdrojov, ktoré sú všetky citované v práci a uvedené v zozname literatúry na konci práce.

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

V Brne dňa

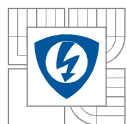
Podpis autora

Pod'akovanie

Ďakujem vedúcemu bakalárskej práce doc. Dr. Ing. Miroslavi Patočkovi za účinnú metódickú, pedagogickú a odbornú pomoc a ďalšie cenné rady pri spracovávaní mojej bakalárskej práce.

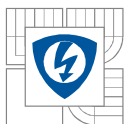
V Brne dňa

Podpis autora



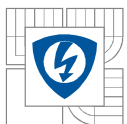
OBSAH

1 ÚVOD	9
2 ZÁKLADNÁ CHARAKTERISTIKA MENIČOV A ICH ROZDELENIE	10
2.1 JEDNOČINNÝ PRIEPUSTNÝ MENIČ S IMPULZNÝM TRANSFORMÁTOROM	11
2.2 DVOJČINNÝ PRIEPUSTNÝ MENIČ S IMPULZNÝM TRANSFORMÁTOROM.....	12
2.2.1 DVOJČINNÝ PRIEPUSTNÝ MENIČ – CELÝ MOSTÍK.....	13
2.2.2 DVOJČINNÝ PRIEPUSTNÝ MENIČ – POLOVIČNÝ MOSTÍK	16
2.2.3 DVOJČINNÝ PRIEPUSTNÝ MENIČ – PUSH-PULL.....	17
2.3 JEDNOČINNÝ BLOKUJÚCI MENIČ S IMPULZNÝM TRANSFORMÁTOROM	18
2.4 POROVNANIE MENIČOV A VÝBER MENIČA PRE STAVBU ZVÁRAČKY	18
3 NÁVRH A REALIZÁCIA JEDNOTLIVÝCH KONŠTRUKČNÝCH PRVKOV	20
3.1 NÁVRH TRANSFORMÁTORA.....	20
3.2 DIMENZOVANIE TRANZISTOROV URČENÝCH PRE STRIEDAČ	23
3.3 NÁVRH DIÓD SEKUNDÁRNEHO USMERŇOVAČA	24
3.4 NÁVRH VÝSTUPNEJ FILTRAČNEJ TLMIVKY	25
4 POPIS FUNKČNÝCH BLOKOV REALIZOVANÉHO MENIČA	28
4.1 SILOVÁ ČASŤ MENIČA	28
4.2 RIADIACE OBVODY MENIČA	30
4.3 POMOCNÝ OBVOD PRE RIADENIE MENIČA.....	31
5 ZÁVER.....	32
LITERATÚRA	35
PRÍLOHY	37



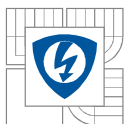
ZOZNAM OBRÁZKOV

Obr. 2.1-1 Zapojenie jednočinného priepustného meniča (upravené z[1])	12
Obr. 2.1-2 Priebehy významných veličín v zapojení jednočinného meniča (modifikované [1])....	12
Obr. 2.2-1 Zapojenie dvojčinného priepustného meniča - celého mostíka (použité z [1])	13
Obr. 2.2-2 Časové priebehy veličín vyskytujúcich sa pri použití prvom riadiacom algoritme riadenia dvojčinného meniča (prevzaté z [1])	14
Obr. 2.2-3 Časové priebehy veličín vyskytujúcich sa pri použití druhom riadiacom algoritme riadenia dvojčinného meniča (prevzaté z [1])	16
Obr. 2.2-4 Zapojenie dvojčinného priepustného meniča ako polovičný mostík (prevzaté z[1])....	17
Obr. 2.2-5 Zapojenie dvojčinného priepustného meniča v prevedení – push-pull (použité z [1]).	17
Obr. 2.3-1 Zapojenie jednočinného blokujúceho meniča (použité z [1]).....	18
Obr. 3.1-1 Tvar použitého jadra pre návrh transformátora (prevzaté z [7])	21
Obr. 3.1-2 Rozmery použitého jadra pri návrhu transformátora (prevzaté z [6]).....	21
Obr. 4.0-1 Blokové usporiadanie obvodov meniča	28
Obr. 4.3-1 Blokové znázornenie pomocného obvodu riadenia, regulačná slučka meniča	32



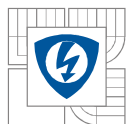
ZOZNAM SYMBOLOV A SKRATIEK

Symbol, skratka	Význam	Jednotka
f	Frekvencia	[Hz]
k	Činiteľ väzby vinutia transformátora	[-]
L	Indukčnosť	[H]
N_1	Počet závitov primárneho vinutia transformátora	[závit]
N_2	Počet závitov sekundárneho vinutia transformátora	[závit]
p	Prevod transformátora	[-]
s	Strieda, predstavuje dobu zopnutia vzhľadom k celej perióde daného signálu	[-]
s_{max}	Maximálna strieda	[-]
T	Periódá priebehu signálu	[s]
t_0	Ochranná doba, odskok, (dead time)	[s]
t_{off}	Vypínacia doba tranzistora	[s]
t_z	Doba zopnutia	[s]
U_d	Jednosmerné medziláhlé napätie medziobvodu	[V]
ΔI	Zvlnenie prúdu	[A]
μ_0	Permeabilita vákua	[H/m]
π	Konštanta, Ludolfovo číslo, jeho hodnota pri uvažovaných výpočtoch je 3,14	[-]
σ	Prúdová hustota	[A/m ²]
Φ	Magnetický tok	[Wb]
AC/DC menič	Menič, prevádzajúci striedavý signál na jednosmerný s požadovanými parametrami	
DC-bus	Jednosmerný medziobvod	
IGBT	Bipolárny tranzistor s odizolovaným hradlom schopný spínať pri vysokej frekvencii	
LC-filter	Kombinácia zapojenia filtračnej tlmivky a kondenzátora	
MOS-FET	Polom riadený tranzistor, typ použitého tranzistora	
OZ	Operačný zosilňovač	
primár	Primárna strana transformátora, s primárnymi závitmi N_1	
PWM	Impulzná šírková modulácia	
sekundár	Sekundárna strana transformátora so sekundárnymi závitmi N_2	



1 ÚVOD

Cieľom práce bolo zostrojiť zväračku, ktorá by bola schopná sa konkurenčne vyrovnat' dnešným zväracím zariadeniam. Návrh bol preto orientovaný na realizáciu výkonového meniča, pracujúceho s frekvenciou 60 kHz. Vďaka zvýšeniu frekvencie možno postaviť zariadenie s menšími rozmermi a nižšou hmotnosťou, čo sa osvedčí najmä pri častom používaní a prenose tohto zariadenia na rôzne pracoviská. Dosiahnutie výkonu 3,4 kW pri požadovanom maximálnom nastavenom zväracom prúde 140 A, rovnako ako komfortnosť nastavovania zväracieho prúdu pri zväraní možno považovať za ďalšie výhody tohto typu stavby zariadenia. Práca sa bude ďalej zaoberať podrobným návrhom jednotlivých častí výkonového meniča.



2 ZÁKLADNÁ CHARAKTERISTIKA MENIČOV A ICH ROZDELENIE

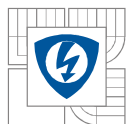
Priepustné meniče sa vyznačujú tým, že sa energia prenáša zo vstupu meniča na výstup v dobe, kedy sa spínací prvok, tranzistor nachádza v zopnutom stave. Naopak, opačného princípu sa využíva u meničov blokujúcich, kde k prenosu energie dôjde, ak je tranzistor vo vypnutom stave. Transformátorom, ktorý býva využívaný na ich stavbu sa dosahuje zároveň galvanické oddelenie vstupnej a výstupnej strany meniča. Ak dochádza k tomu, že vstupné napätie pochádza z usmernenia striedavej siete, nazývajú sa takéto meniče ako sieťové spínané zdroje. Celý reťazec radených výkonových častí pozostáva zo : sieťového usmerňovača, jednosmerného medziobvodu, vlastného meniča, alebo to býva radenie : akumulátora, jednosmerného medziobvodu a vlastného meniča.

Jednosmerný medziobvod (DC-bus) býva realizovaný ako napäťový medziobvod, pretože sa chová voči po ňom nasledujúcom meniču ako ideálny zdroj napätia s nulovou vnútornou impedanciou. Realizuje sa LC-filtrom alebo použitím kondenzátora o veľkej kapacite. Veľkej kapacity možno dosiahnuť skupinou paralelne zapojených kondenzátorov. Ak dochádza k dvojcestnému usmerneniu jednofázovej siete 1 x 230 V, získava sa v medziobvode na zberacom kondenzátore jednosmerné medziľahlé napätie U_d o hodnote približne 300 V. Ak sa usmerní šesťpulzne trojfázová sieť 3 x 400 V vznikne jednosmerné napätie so strednou hodnotou 542 V.

Na hladine 542 V sa zvyčajne používajú tranzistory IGBT so záverným napätím 1200 V, pracujúce so spínacím kmitočtom od 25 kHz do 60 kHz, závisí to predovšetkým od prenášaného výkonu. Kmitočet je obvykle obmedzený najmä prepínacími stratami v tranzistoroch. Na hladine 300 V sa prevažne využívajú tranzistory MOS-FET so záverným napätím 600 V. Ich rýchlosť je veľmi vysoká preto uvažovaná oblasť ich použitia je až do frekvencie 300 kHz. Pracovný kmitočet meničov sa pohybuje v oblasti od 40 kHz do 60 kHz, pričom platí, že pri zvyšovaní kmitočtu klesá veľkosť transformátora ako aj výstupnej tlmivky a dochádza tak k požadovanému zmenšovaniu rozmerov a hmotnosti realizovaného meniča [1].

Obvykle prevláda snaha nezvyšovať kmitočet meničov nad 200 kHz, pretože [1]:

- V pásme nad 200 kHz prudko rastú hysterézne straty, potom je ich nutné obmedzovať prostredníctvom znižovania maximálnej pracovnej indukcie, čo pôsobí proti zmenšovaniu veľkosti transformátora.
- V tejto oblasti kmitočtov vznikajú problémy so skinefektom vo vinutí transformátora, čo predstavuje povrchový jav, kde dochádza k vytláčaniu prúdu prechádzajúceho vodičom zo stredu smerom pod jeho povrch, pričom dochádza k zvyšovaniu prúdovej hustoty a teda aj teploty. Je potrebné použiť ako vinutie transformátora vysokofrekvenčné lanko, primárne vinutie s väčším počtom závitov a menším prierezom a sekundárne vinutie s malým počtom závitov a väčším prierezom. Vďaka tomu dôjde k poklesu činiteľa plnenia vo vinutí, ktorý spôsobuje zmenšenie rozmerov použitého transformátora, teda vo výsledku by bolo nutné použiť jadro transformátora o väčších rozmeroch.
- S rastúcim kmitočtom výrazne rastie aj reaktancia výstupnej rozptylovej indukčnosti transformátora. Transformátor je mäkký a nie je schopný preniesť potrebný výkon.



Potom sa musí dosiahnuť čo najväčšieho činiteľa väzby, u ktorého sa počíta s hodnotou minimálne $k = 0,995$.

- S rastúcim kmitočtom rastie aj vplyv parazitných medzizávitových kapacít vinutí, čo je nežiaducim javom.

Jednotlivé meniče obsahujú impulzný transformátor, ktorý pracuje na frekvencii v oblasti rádovo desiatok kHz, pričom táto hodnota frekvencie môže presiahnuť aj hodnotu 100 kHz [1]. Rozdelenie jednotlivých meničov s popisom princípu ich činnosti a charakteristickými vlastnosťami je vysvetlené v nasledujúcich podkapitolách.

2.1 Jednočinný priepustný menič s impulzným transformátorom

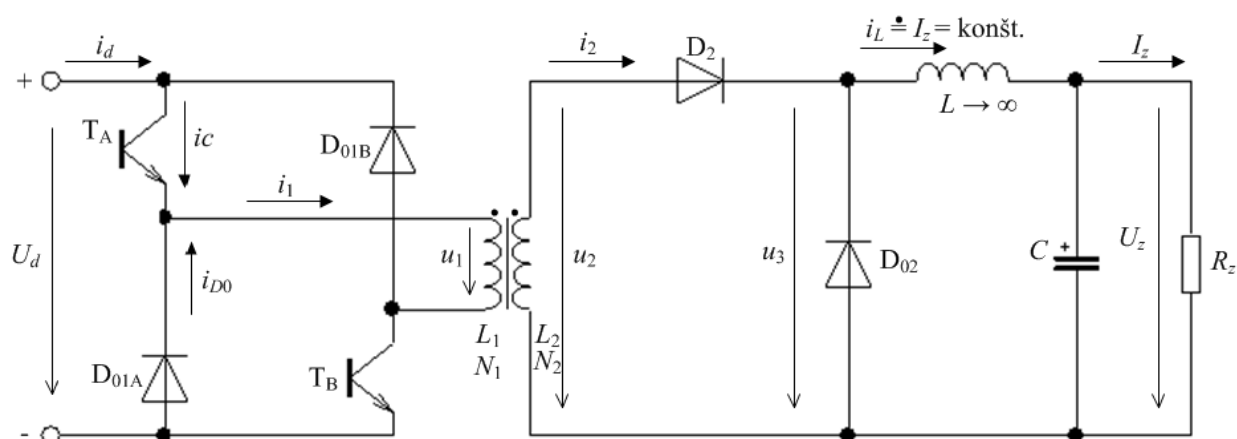
Pre objasnenie činnosti a vlastností meniča platí predpoklad, že tlmička výstupného LC-filtra má veľkú indukčnosť, prúd tlmičky je hladký, minimálne zvlnený a možno ho považovať za prúd záťaže, ktorý je konštantný. Transformátor má dokonalú magnetickú väzbu, kde $k = 1$. Nepočíta sa s výstupnou rozptylovou indukčnosťou. Schéma zapojenia meniča tohto typu sa nachádza na Obr. 2.1-1 [1], priebehy veličín vyskytujúcich sa v obvode sú znázornené na Obr. 2.1-2 [1].

Menič pracuje tak, že obidva tranzistory sú zapnuté alebo vypnuté vždy naraz, súčasne. Strieda je daná podľa vzťahu

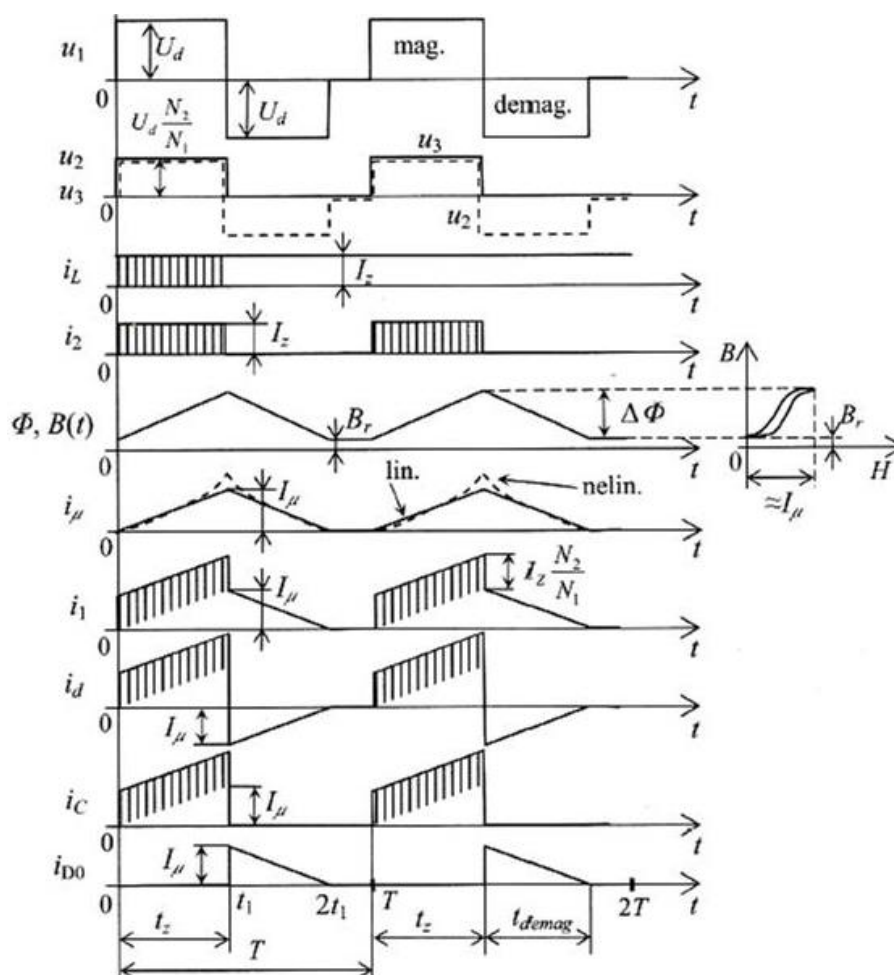
$$s = \frac{t_z}{T}, \quad s_{max} = 0,5, \quad t_z < \frac{T}{2}. \quad (2.1-1)$$

Maximálna doba zopnutia nesmie prekročiť hodnotu $T/2$, pretože by mohlo dôjsť k presýteniu jadra transformátora. V okamihu zapnutia oboch tranzistorov má primárne napätie hodnotu $u_1(t) = +U_d$. Magnetizačný prúd predstavuje integrál z tohto konštantného napätia, teda narastá lineárne po zanedbaní nelinearity magnetizačnej charakteristiky. V čase t_1 dôjde k vypnutiu oboch tranzistorov. Avšak vďaka magnetizačnej indukčnosti L nedôjde k zániku magnetizačného prúdu, snaží sa ho udržať na pôvodnej hodnote, vďaka tomu prúd pretečie oboma diódami zapojenými k primáru impulzného transformátora. Cez obe zopnuté diódy sa pripojí primárne vinutie na napájacie napätie U_d , ale opačnej polarizácie, teda $u_1(t) = -U_d$. Vďaka tomuto napätiu sa demagnetizuje jadro transformátora, integrál zo zápornej hodnoty napätia U_d predstavuje klesajúcu priamku, magnetizačný prúd klesá. Primárne napätie klesá na nulu v okamihu odpojenia primárneho vinutia od U_d , stáva sa neutrálnym vodičom neobsahujúcim energiu.

Sekundárne napätie u_2 má rovnaký tvar ako napätie u_1 , je len zmenšené o prevod N_2/N_1 . Dôležité je, že záporný demagnetizačný impulz nesmie byť využitý na prenos energie, inak by došlo k narušeniu procesu demagnetizácie. Preto je na sekundári transformátora zapojený iba jednocestný usmerňovač D_2 s nulovou diódou D_{02} , ktorá vedie prúd tlmičky v čase, kedy sú oba tranzistory vypnuté a D_2 je polarizovaná v závernom smere. Napätie u_3 na vstupe LC-filtra má tvar jednopolaritných impulzov o maximálnej striede s hodnotou 0,5. Sekundárny prúd i_2 má tvar pravouhlých impulzov, vďaka veľkej indukčnosti tlmičky. Pre priebeh magnetického toku Φ , či magnetickej indukcie B platí, že sú integrálom z napätia u_1 , preto ich priebeh je trojuholníkový, bez ohľadu na nelinearitu feromagnetika. Celkový prúd primára transformátora je daný ako súčet magnetizačného a sekundárneho prúdu prepočítaného na primár transformátora i_2' . Prúd i_d predstavuje medziľahlý prúd v jednosmernom medziobvode s napätím U_d . Ak sa menič nachádza v chode naprázdno, $i_2' = 0$, je stredná hodnota magnetizačného a demagnetizačného trojuholníkového prúdu nulová, tak aj stredný, činný výkon odoberaný zo zdroja je nulový. Prúd i_c predstavuje kolektorový prúd tranzistora, i_{d0} je prúd protiľahlej nulovej diódy [1].



Obr. 2.1-1 Zapojenie jednočinného priepustného meniča (upravené z[1])



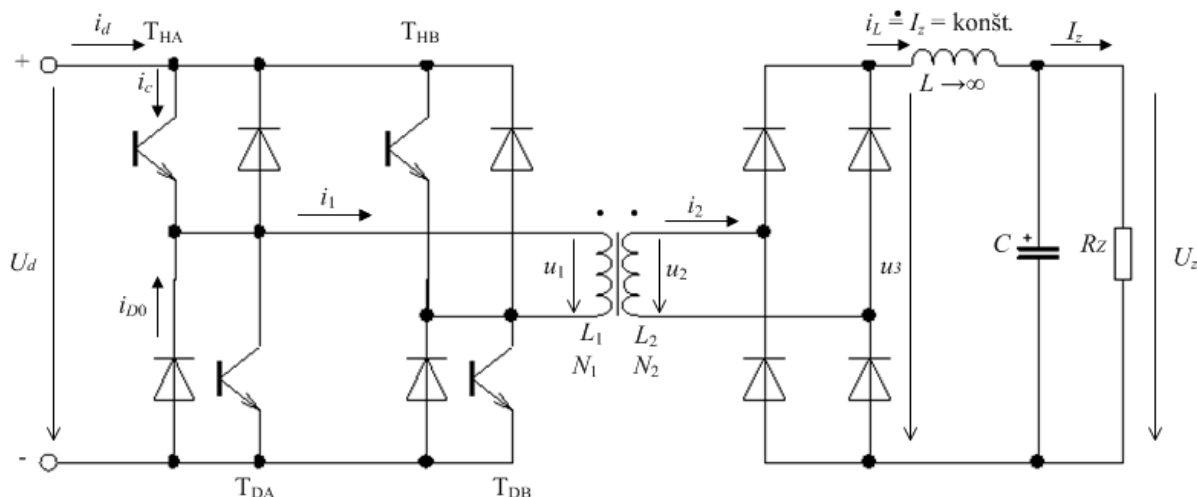
Obr. 2.1-2 Priebehy významných veličín v zapojení jednočinného meniča (modifikované [1])

2.2 Dvojčinný priepustný menič s impulzným transformátorom

Tento typ meniča sa zväčša uplatňuje, ak sa uvažuje o voľbe zariadenia, ktoré bude pracovať s výkonom väčším ako 1 kW. Tieto meniče sa delia ďalej podľa druhu zapojenia a danej aplikácii. Rozlišujeme dvojčinný priepustný menič zapojený ako celý mostík, polovičný mostík alebo push-pull [1]. Ich princípy činnosti a vlastnosti budú približené v nasledujúcich podkapitolách.

2.2.1 Dvojčinný priepustný menič – celý mostík

Základná schéma popisujúca tento druh meniča sa nachádza na Obr. 2.2-1 [1]. Ide o celý mostík, kde môžu byť využité dva rôzne algoritmy pre jeho riadenie.



Obr. 2.2-1 Zapojenie dvojčinného priepustného meniča - celého mostíka (použité z [1])

• Prvý riadiaci algoritmus dvojčinného meniča – celý mostík

Činnosť meniča je založená na tom, že dochádza k spínaniu tranzistorov v uhlopriečne naraz. Vo vedení sa pravidelne striedajú obidve uhlopriečky. Priebiehy významných veličín sú znázornené na Obr. 2.2-2 [1].

Strieda je udaná pre jednu uhlopriečku vzťahom

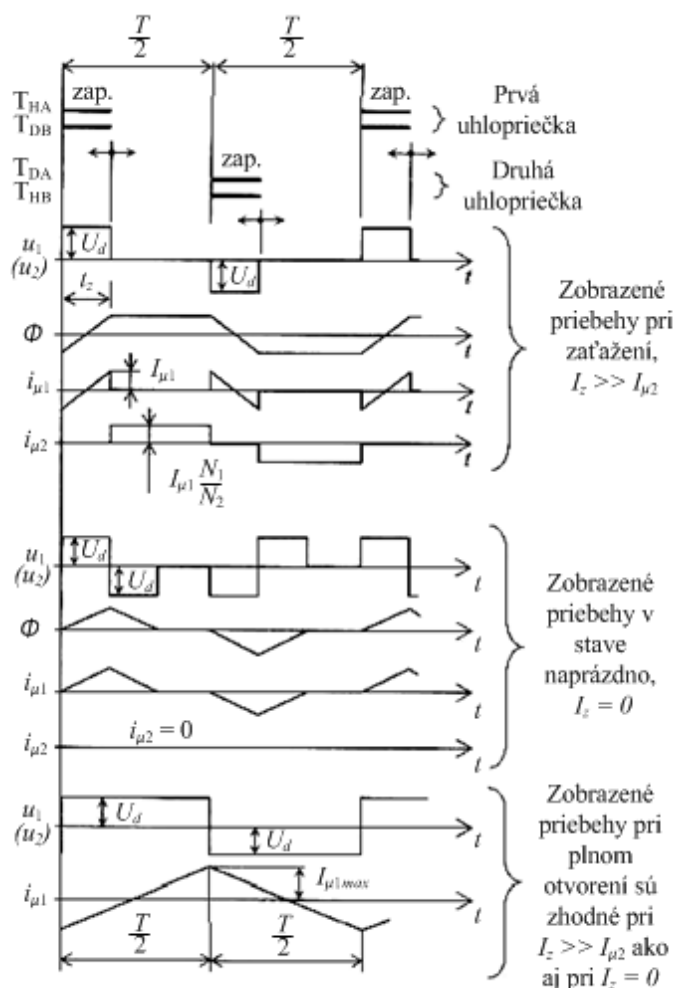
$$s = \frac{t_z}{T}, \quad s_{max} = 0,5, \quad t_z < \frac{T}{2}. \quad (2.2-1)$$

Musí platiť, aby nedošlo k prekryvaniu doby vedenia horného a dolného tranzistora, že maximálna doba zopnutia t_z musí byť menšia ako hodnota $T/2$, inak by mohlo dôjsť ku skratu zdroja s medziľahlým napätím U_d . Maximálna doba t_z by mala byť menšia ako $T/2$ o určitú ochrannú dobu t_0 , ktorá by mala byť minimálne dvakrát väčšia ako celková vypínacia doba t_{off} tranzistorov, ktoré budú použité. Z Obr. 2.2-2 [1] je vidieť, že priebehy magnetického toku a magnetizačného prúdu sú odlišné podľa toho, či menič pracuje naprázdno alebo pri zaťažení. V oboch prípadoch je magnetický tok daný integrálom zo svorkového napätia transformátora.

V stave naprázdno sa časové priebehy vstupného napätia u_1 transformátora, výstupného napätia transformátora u_2 ako aj magnetický tok Φ podobajú priebehom jednočinného meniča s tým rozdielom, že v druhej pol perióde sú priebehy preklopené podľa vodorovnej osi do záporných hodnôt, pretože dochádza k zopnutiu druhej uhlopriečky s inou dvojicou tranzistorov, pričom dôjde k otočeniu primárneho napätia do zápornej hodnoty [1].

V stave zaťaženia sa predpokladá, že výstupný prúd I_z je dostatočne veľký, pričom platí, že $I_z \gg I_{\mu 2}$, kde $I_{\mu 2} = I_{\mu 1} \cdot (N_1/N_2)$, pričom $I_{\mu 2}$ predstavuje magnetizačný prúd na strane sekundárneho vinutia vzniknutý prechodom magnetizačného prúdu $I_{\mu 1}$ cez primárne vinutie. V časových intervaloch, kde sú všetky tranzistory vypnuté nemôže nastať demagnetizácia jadra, magnetický tok zostáva na konštantnej hodnote zintegrovanej z predchádzajúceho deja. Je to dané tým, že všetky diódy výstupného usmerňovača teraz fungujú ako jedna sério-paralelná nulová dióda, cez

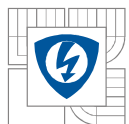
ktorú sa uzatvára konštantný prúd tlmivky. Tento prúd sa rozdelí približne na polovicu, pričom každá polovica prúdu preteká cez jednu vetvu mostíkového usmerňovača [1].



Obr. 2.2-2 Časové priebehy veličín vyskytujúcich sa pri použití prvom riadiacom algoritme riadenia dvojčinného meniča (prevzaté z [1])

Sekundárne napätie transformátora musí byť nulové, ak sú úbytky na všetkých štyroch diódach rovnaké. Prúdovo napájaný diódový mostík udržiava v uhlopriečke pomerne tvrdé nulové napätie u_2 na sekundári transformátora, čo predstavuje pre sekundárne vinutie transformátora zdanlivý skrat. Toto nulové napätie sa s prevodom transformuje na primár transformátora, teda musí platiť, že aj napätie u_1 bude rovno nule. Z toho plynie, že nemôže dôjsť k otvoreniu primárnych diód, v okamihu uzatvorených tranzistorov, zároveň nemôže pretiecť ani magnetizačný prúd cez primárne vinutie transformátora. V tomto čase tečie magnetizačný prúd cez sekundárne vinutie transformátora, cez zdanlivý skrat. Tok je udržiavaný na konštantnej hodnote z predchádzajúceho deja, pretože, integrál z nulového napätia u_2 , je rovnako nulový. Magnetický tok, ktorý sa prejavuje v jadre transformátora nezávisí na tom, ktorým vinutím transformátora bude tiecť dobrovoľný tokotvorný magnetizačný prúd [1].

V stave plného otvorenia, pri situácii, kedy $s_{\max} = 0,5$ nezáleží na tom, či menič pracuje naprázdno, alebo pri zaťažení, priebehy magnetického toku ako aj prúdu sú v oboch prípadoch rovnaké. Z tohto stavu sa vychádza pri návrhu transformátora.



Výhodou tejto metódy riadiaceho algoritmu je, že rovnaké riadiace signály možno využiť ako u meniča dvojčinného v zapojení s celým mostíkom, tak aj u dvoch jednočinných meničov pracujúcich v protitakte.

Nevýhodou môže byť možnosť vzniku nevyváženia sekundárneho diódového usmerňovača, kedy bude napätie u_2 obsahovať určitú hodnotu jednosmernej zložky, vďaka ktorej dôjde k trvalej jednosmernej magnetizácii jadra prúdom. Ak by bolo nevyváženie mostíka malé, môže sa nevyváženie zanedbať, ale určité možné nebezpečenstvo tu existuje, preto aby sa mohlo predísť tomuto problému bol vyvinutý druhý algoritmus pre riadenia celého mostíka [1].

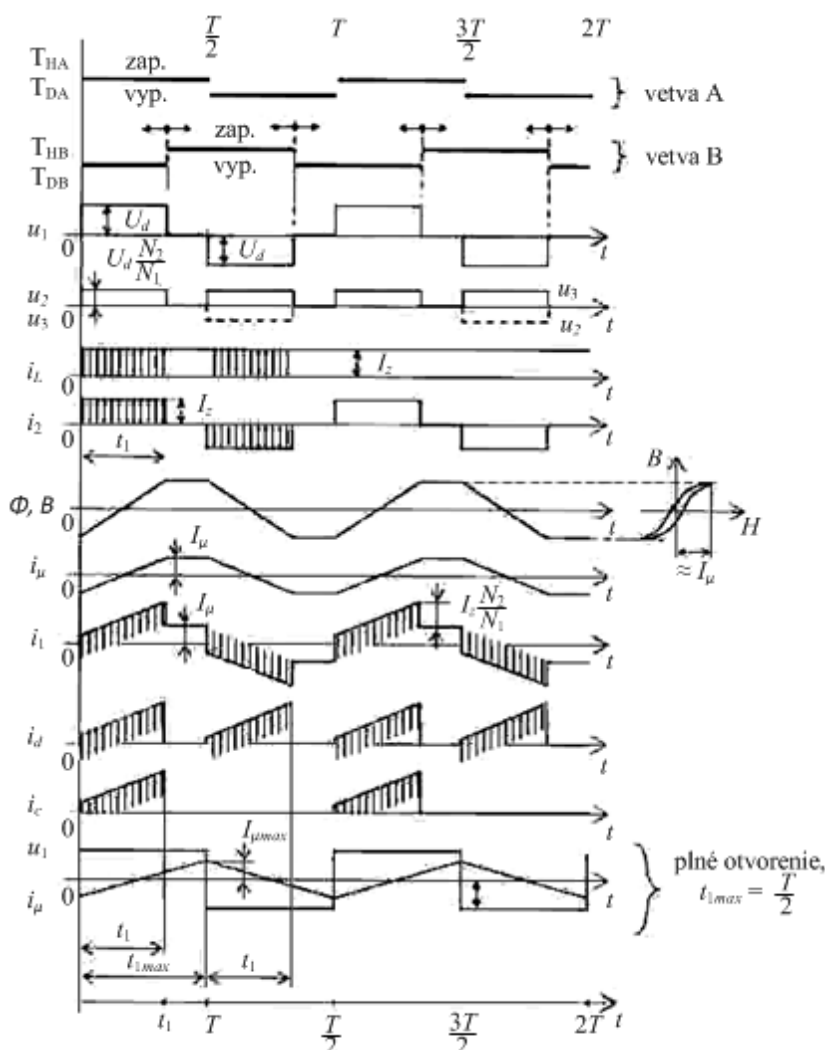
• Druhý riadiaci algoritmus dvojčinného meniča – celý mostík

Tento spôsob riadenia meniča je naznačený na Obr. 2.2-3 [1], ktorého princíp činnosti je založený na tom, že horný a dolný tranzistor v jednej vetve – dvojica tranzistorov nad sebou je zopnutá počas maximálnej doby $T/2$. Z dôvodu, aby nedošlo k poškodeniu prehorením danej vetvy je potrebné stanoviť určitú ochrannú dobu t_0 pri spínaní tranzistorov. Obidve vetvy sú riadené obdobne s dodržaním fázového posunu t_1 , ktorý nadobúda hodnotu od 0 do $T/2$. Šírka impulzov primárneho napätia u_1 je priamo úmerná dobe t_1 medzi danými vetvami. Strieda je potom definovaná vzťahom

$$s = \frac{t_z}{T}, \quad s_{max} = 0,5, \quad t_z < \frac{T}{2}. \quad (2.2-2)$$

Fázový posun nemôže nadobúdať hodnoty väčšie ako $T/2$, teda aj strieda môže nadobúdať maximálnej hodnoty 0,5. Z priebehov dôležitých veličín, znázornených na Obr. 2.2-3 [1] vyplýva, že v každej pracovnej pol perióde $T/2$ je primárne vinutie transformátora tvrdo skratované po dobu $T/2$ zmenšenú o čas t_1 , tento stav platí pre obidva smery prúdu. Možno teda povedať, že pravidelne dochádza ku skratom kde sú raz zopnuté dva horné tranzistory v oboch vetvách a raz dolné tranzistory v obidvoch vetvách. Takto postupne vznikajúce skraty spôsobujú tok magnetizačného prúdu len primárnym vinutím transformátora a sekundárne vinutie sa nepodieľa na magnetizácii, teda vplyv nesymetrie sekundárneho usmerňovača možno vylúčiť, a odstrániť tak nevýhodu spočívajúcu v nevyvážení mostíka výstupného usmerňovača, o ktorej je potrebné uvažovať pri prvom riadiacom algoritme. Magnetizačný prúd i_μ ako aj magnetický tok Φ sú dané ako integrál zo vstupného napätia u_1 , pričom platí, že nezáleží či je sekundár transformátora zatážený alebo sa nachádza v stave naprázdno. Primárny prúd pretekajúci transformátorom je daný súčtom magnetizačného i_μ a sekundárneho prúdu i_2 , daného prevodom transformátora na primár. Pre návrh transformátora sú obecné využívané priebehy vstupného napätia u_1 a magnetizačného prúdu i_μ .

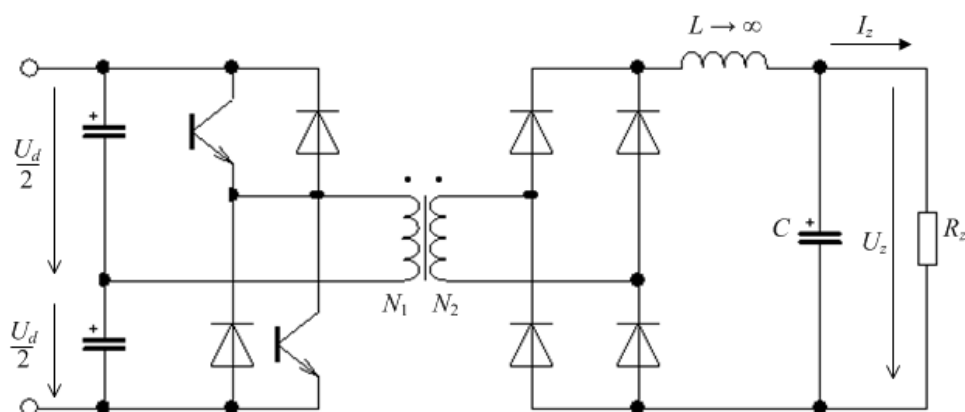
Z časových priebehov z Obr. 2.2-3 [1] je zrejmé, že obidve vetvy sa zúčastňujú vedenia magnetizačného prúdu, kedy vo vetve A vedú prúd za každých okolností len tranzistory, na rozdiel od vetvy B, kde na prechode magnetizačného prúdu sa podieľajú iba diódy. Je to spôsobené tým, že fázové riadenie vetvy B je fázovo spomalené vzhľadom k vetve A. Pri zmene riadiacich signálov oboch vetiev by došlo k zmene magnetizačného prúdu vo vetvách na opačný. Tento prúd možno zanedbať vzhľadom na pracovný prúd, vďaka čomu je prúdové zaťaženie použitých polovodičových súčiastok takmer rovnomerné [1].



Obr. 2.2-3 Časové priebehy veličín vyskytujúcich sa pri použití druhom riadiacom algoritme riadenia dvojčinného meniča (prevzaté z [1])

2.2.2 Dvojčinný priepustný menič – polovičný mostík

Tento typ meniča zobrazeného na Obr. 2.2-4 [1] sa vyznačuje tým, že sa skladá len z jednej vetvy, chýbajúca je nahradená využitím kapacitného deliča, na ktorom sa rozdelí napätie jednosmerného medziobvodu, napájajúceho menič, na dve polovice. Použitie tohto typu meniča môže byť občas obtiažne, najmä ak nebude zaručená symetria riadiacich signálov prichádzajúcich do tranzistorov, vďaka čomu by došlo k nerovnomernému rozloženiu napätia na deliči. Pre jeho riadenie sa využíva len prvý algoritmus riadenia dvojčinného meniča. Nevýhoda oproti predchádzajúcemu typu dvojčinného meniča – celého mostíka je v tom, že primárne napätie nadobúda polovičnej veľkosti napätia U_d , kde sú ale tranzistory namáhané plnou hodnotou napätia U_d , z toho plynie, že pri prenášaní energie, ak dôjde k poklesu napätia na polovicu, musí sa prúd zvýšiť na dvojnásobok pre udržanie konštantného výkonu. Naopak za výhodu možno považovať potrebný menší počet budičov pre daný typ použitých tranzistorov. Ak sa použije tento typ dvojčinného meniča v aplikácii, kde dochádza k šesť pulznému usmerneniu trojfázovej siete, vznikne napätie v medziobvode o hodnote približne 542 V, ktoré sa následne vyfiltruje pomocou dvojice sériovo zapojených kondenzátorov, ktoré takto môžu tvoriť potrebný kapacitný delič potrebný pre správnu činnosť tohto typu meniča [1].

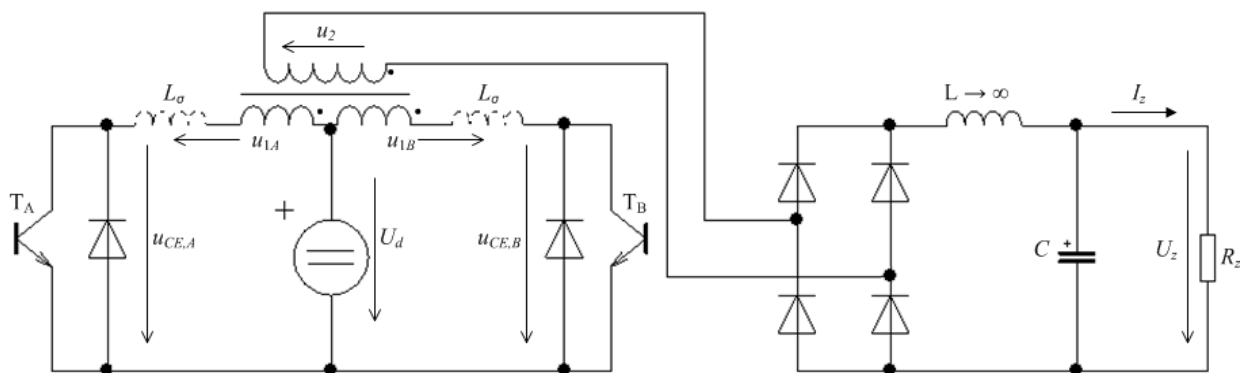


Obr. 2.2-4 Zapojenie dvojčinného priepustného meniča ako polovičný mostík (prevzaté z[1])

2.2.3 Dvojčinný priepustný menič – push-pull

Tento typ meniča obsahuje polovičné množstvo tranzistorov oproti dvojčinnému priepustnému meniču pracujúceho v zapojení celého mostíka. Je ale za potreby myslieť na to, že tranzistory sú namáhané až dvojnásobným napätím U_d a pri dimenzovaní súčiastok je potrebné tento fakt zohľadniť. Dvojité vinutie s vyvedeným stredom pracuje ako autotransformátor. Ak dôjde k zopnutiu jedného z dvojice tranzistorov, vzniká na druhom tranzistore napätie zdroja zväčšené o pretransformované napätie z jedného vinutia, do druhého vinutia, ktoré je v danom momente nečinné, pričom táto transformácia prebieha v nezmenenom pomere. Takto vzniknuté dvojnásobné napätie sa ešte navýši o napäťové špičky pochádzajúce z rozptylových indukčností prevládajúcimi medzi polovicami rozdeleného primárneho vinutia označených v zapojení ako L_σ na Obr. 2.2-5 [1]. Diódy sú pripojené k jednotlivým tranzistorom antiparalelne, plnia funkciu nulových diód, ktoré sa podieľajú na demagnetizácii jadra použitého transformátora.

Táto varianta meniča sa používa najmä v nízkovoltových batériových oblastiach využitia, pretože v oblasti veľkých hodnôt napätí U_d vznikajúce nežiaduce napäťové špičky sú úmerné zvyšujúcemu sa prechádzajúcemu pracovnému prúdu cez transformátor. Za výhodu možno ešte považovať nepotrebnosť galvanického oddelenia riadiacich obvodov pre tranzistory od silových obvodov, nakoľko sú emistory použitých tranzistorov pripojené na rovnaký, záporný potenciál použitej batérie [1].

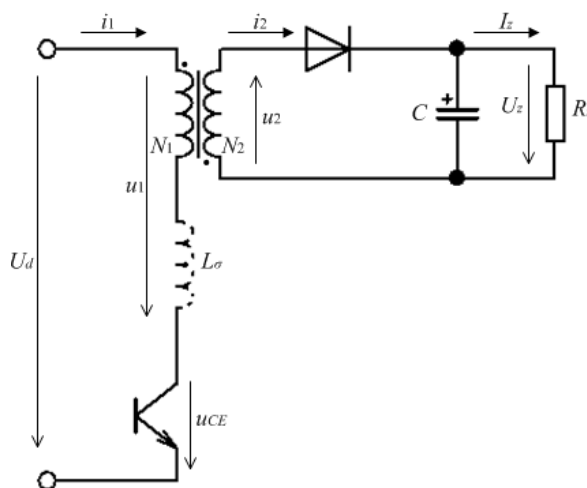


Obr. 2.2-5 Zapojenie dvojčinného priepustného meniča v prevedení – push-pull (použitá z [1])

2.3 Jednočinný blokujúci menič s impulzným transformátorom

Princíp tohto typu meniča je založený na úvahe, že k prenosu energie dochádza práve v čase, kedy sa nachádza spínací prvok – tranzistor vo vypnutom stave, na rozdiel od priepustných meničov, kde prenos energie nastáva v dobe zopnutia tranzistorov. Znázornenie zapojenia jednočinného blokujúceho meniča sa nachádza na Obr. 2.3-1 [1]. Vinutie transformátora má opačnú orientáciu z dôvodu výskytu kladného pólu napätia na kondenzátore po usmernení napätia zo sekundára transformátora. V obvode sa vyskytuje nežiaduca rozptyľová indukčnosť L_σ , ktorá sa prejaví v zvyšovaní napäťových prekmitov, ktoré sú nechcené pri vypínaní tranzistora. Hodnota prekmity rastie v závislosti na zvyšovaní prúdu.

Ak v určitom čase dôjde k zopnutiu tranzistora, prebieha magnetizácia transformátora prúdom i_1 . V tomto čase sa dióda nachádza v stave nečinnosti, záťaž nie je napájaná zo sekundára transformátora ale odoberá energiu z nabitého kondenzátora nachádzajúceho sa za usmerňovačom. V určitom čase sa tranzistor vypne, kedy nastane demagnetizácia jadra transformátora cez sekundárne vinutie pričom dióda sa otvorí a napája kondenzátor trojuholníkovým priebehom prúdu i_2 , v tomto čase je sekundárne vinutie pripojené na napätie U_z , ktoré nadobúda konštantnej hodnoty, a spôsobuje jeho demagnetizáciu. Pre zabezpečenie konštantnej hodnoty napätia je potrebné použiť kondenzátor s dostatočne veľkou kapacitou. Pri činnosti meniča magnetizačný prúd transformátora i_1 vždy rastie s časom, naopak demagnetizačný prúd jadra transformátora i_2 s časom vždy klesá a ich priebehy sú lineárne v závislosti na čase. Prenášaný výkon meničom sa dá zvýšiť tak, že sa zvýši hodnota striedy s , transformátor by ale pracoval v režime neprerušovaného spojitého magnetického toku, pričom by nedochádzalo k úplnej demagnetizácii jadra transformátora a tento režim by bol nevhodný a nespoľahlivý [1].

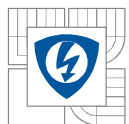


Obr. 2.3-1 Zapojenie jednočinného blokujúceho meniča (použitý z [1])

2.4 Porovnanie meničov a výber meniča pre stavbu zväračky

Základným rozdielom medzi meničom blokujúcim a meničom priepustným spočíva v prenose energie cez menič. Zatiaľ čo u priepustného meniča dochádza k tomuto prenosu v okamžiku, kedy sa nachádza spínací prvok – tranzistor v zopnutom stave, u meniča blokujúceho je to práve naopak, prenos sa uskutoční práve pri vypnutom spínači [1].

Jednotlivé meniče sa líšia počtom spínacích prvkov. Jednočinný priepustný menič obsahuje dvojicu tranzistorov, ktoré tvoria jednu vetvu. Dvojčinný priepustný menič býva zložený zo

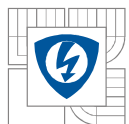


štvorice tranzistorov takto tvoriace dve vetve v prevedení celého mostíka, alebo dvojice tranzistorov vo variante dvojčinného meniča ako polovičný mostík alebo zapojení push-pull. Každý tranzistor má svoju diódu, ktorá je nevyhnutná pre spoľahlivý a bezporuchový chod meniča. Jednočinný blokujúci menič je vybavený jedným spínacím tranzistorom. Pre prenos konštantného výkonu meniča platí, že koľkokrát sa v danom zapojení vyskytuje menej tranzistorov, toľkokrát je potrebné zvýšiť prúd prechádzajúci cez menič a zároveň, toľkokrát budú súčiastky namáhané vo vypnutom stave vyšším napätím. Istou výhodou sa môže stať, menší počet budiacich obvodov pri menšom počte použitých tranzistorov [1].

Z porovnania meniča jednočinného a meniča dvojčinného pre dosiahnutie rovnakého prenášaného výkonu plyní, že v prípade stavby transformátora použitého spolu s dvojčinným meničom bude jeho veľkosť a teda aj hmotnosť približne polovičná, čo je veľmi pozitívny prínos. Na druhej strane bude potrebný dvojnásobný počet spínacích prvkov, teda aj budiacich obvodov pre tranzistory. Zložitosť návrhu a realizácie bude väčšia a v neposlednom rade vznikajúci problém s parazitnou jednosmernou magnetizáciou jadra použitého impulzného transformátora.

Rovnako sa dajú zhodnotiť kladné a záporné stránky meniča dvojčinného pracujúceho v zapojení ako celý mostík alebo push-pull. Ak by bol prevedený podrobný návrh transformátora pre obidve zapojenia, vyšlo by, že použitý transformátor pre stavbu by mal menší objem v zapojení celého mostíka, približne o 13 %, dôvodom je nie príliš výhodné využitie medi v dvojnásobnom primárnom vinutí meniča push-pull. Tranzistory meniča push-pull sú namáhané dvojnásobným napätím a prekmitom pri ich vypínaní, na čo je potrebné dbať pri dimenzovaní tranzistorov. Naopak, za výhodu možno považovať, nepotrebné galvanické oddelenie silových a riadiacich obvodov [1].

Pri návrhu zväračky bol využitý dvojčinný priepustný menič v zapojení ako celý mostík. Dvojčinné priepustné meniče je výhodné použiť vo výkonovej oblasti nad 1 kW, výkon navrhovaného zariadenia by sa mal pohybovať v oblasti 3,4 kW. Hmotnosť navrhovaného transformátora bude teda menšia ako by bolo pri použití jednočinnom priepustnom meniči. Transformátor by mal pracovať s frekvenciou 60 kHz. Pre návrh použitého meniča bola potrebná štvorica tranzistorov, kde každý potreboval svoj budiaci obvod ako zdroj impulzov pre zopnutie tranzistora v potrebnom čase. Za transformátorom bol navrhnutý sekundárny usmerňovač v prevedení dvojcestného uzlového usmerňovača bez nulovej diódy.



3 NÁVRH A REALIZÁCIA JEDNOTLIVÝCH KONŠTRUKČNÝCH PRVKOV

Pri návrhu jednotlivých prvkov meniča bol kladený dôraz na to, aby boli dosiahnuté čo najmenšie rozmery a hmotnosti, ale zároveň aby nedošlo k poddimenzovaniu súčiastok a aby bola takto zaistená spoľahlivá prevádzka zariadenia pri jeho používaní. Neraz však je potrebné zabezpečiť nielen tieto parametre, ale musí sa prihliadať tiež na cenu komponentov použitých pri stavbe ako aj na ich dostupnosť na trhu. V nasledujúcich podkapitolách je uvedený návrh vždy pre určitú dielčiu časť meniča.

3.1 Návrh transformátora

Pre transformátor, ktorý predstavuje jednu z hlavných častí meniča bolo použité feritové jadro, umožňujúce dosiahnuť vyšších kmitočtov, narozdiel od klasických transformátorov vyhotovených z navzájom poskladaných plechov, ktoré sú určené pre prácu so sieťovou frekvenciou o hladine 50 Hz. Navrhovaný menič pracuje s frekvenciou $f = 60$ kHz. Požadovaný prúd na výstupe bol $I_z = 140$ A, napätie pri vzniku oblúku poklesne na hodnotu $U_z = 24$ V. Zvolená strieda bola $s = 0,35$, uvažovaná maximálna magnetická indukcia $B_{max} = 0,31$ T a hodnota prúdovej hustoty $\sigma = 3 \cdot 10^6$ A/m². Uvažovaná hodnota napätia v jednosmernom medziobvode, na vstupe tranzistorového striedača bola $U_d = 300$ V.

Prenášaný výkon cez menič sa spočíta podľa vzťahu

$$P_z = U_z I_z ,$$

$$P_z = 24 \cdot 140 = 3360 \text{ W} = 3,36 \text{ kW.} \quad (3.1-1)$$

Z vypočítaného výkonu sa podľa [1] môže určiť elektromagnetická veľkosť jadra transformátora, ktorá je udaná súčinom prierezu jadra S_{FE} a plochou okna jadra S_0

$$S_0 S_{FE} = \frac{1}{2 \sqrt{2}} \frac{P_{\xi}}{k_{p,Cu} \sigma f B_{max} \sqrt{s}} ,$$

$$S_0 S_{FE} = \frac{1}{2 \cdot \sqrt{2}} \cdot \frac{3360}{0,4 \cdot 3 \cdot 10^6 \cdot 60 \cdot 10^3 \cdot 0,31 \cdot \sqrt{0,35}} = 8,996 \cdot 10^{-8} \text{ m}^4 . \quad (3.1-2)$$

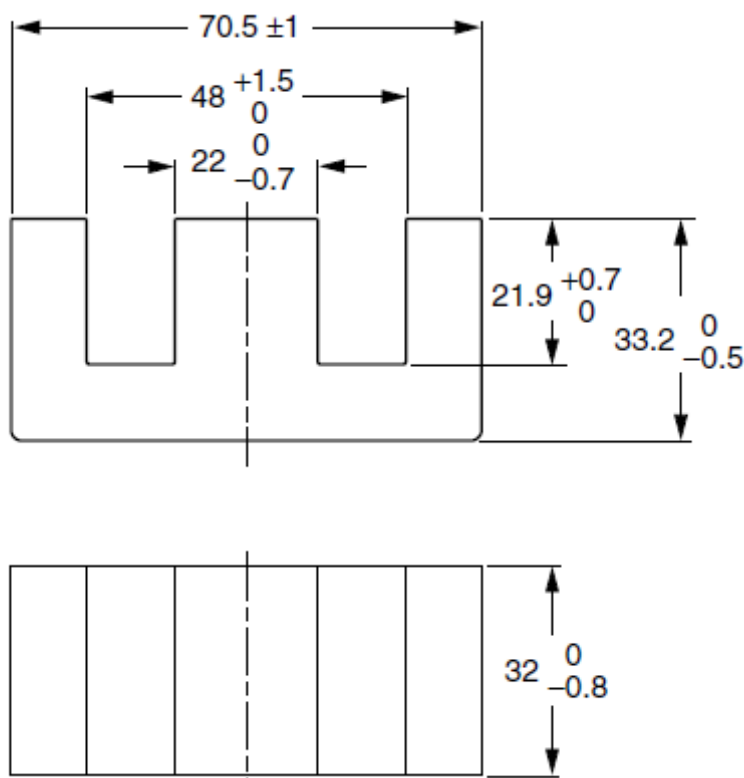
Konštanta $k_{p,Cu}$ použitá pri výpočte elektromagnetickej veľkosti jadra je definovaná ako podiel celkového prierezu medi uvažovaného bez izolácie použitého vinutia transformátora k ploche okna jadra transformátora, ktorou sa myslí priestor nezaplnený materiálom jadra určený pre uloženie jeho vinutia. Celkový činiteľ plnenia je udaný ako súčin troch súčiniteľov. Uvažovaný činiteľ tvaru k_t , je závislý na tvare prierezu použitého vodiča vinutia a uloženia vodičov v jednotlivých vrstvách vinutia. Činiteľ izolácie k_i udávajúci pomer medzi priemerom medeného vodiča bez izolácie a priemerom medeného vodiča vrátane jeho izolácie. Tretím činiteľom je činiteľ prídavný $k_{př}$, ktorý zohľadňuje hrúbku vodiča, veľkosť vinutia, počet závitov, hrúbku stien kostry, či zručnosť pracovníka pri navíjaní transformátora. Jeho hodnotu možno stanoviť podobne ako u k_i z grafického priebehu podľa priemeru vodiča vrátane jeho izolácie. V praxi platí, že sa môže voliť celkový činiteľ plnenia pre transformátor v hodnotách $k_{p,Cu} = 0,3$ až $0,4$ pre tlmivky je $k_{p,Cu} = 0,5$ až $0,75$. [1] Vo výpočte bol zvolený $k_{p,Cu} = 0,4$.

Z dostupných vyrábaných feritových jadier bolo potrebné vybrať jadro, ktorého hodnota S_{FE} musí byť väčšia ako hodnota, ktorá sa získa po odmocnení $S_0 S_{FE}$, teda väčšia ako hodnota

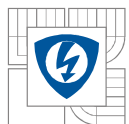
299,933 m², pri uvažovaní zjednodušenia, keď S_0 sa dá považovať za približne rovnakú hodnotu ako je hodnota S_{FE} [1]. Z katalógu [6] vyrábaných feritových jadier bolo vybrané jadro typu E71 33/32 – 3C90. Výrobca udáva, že $S_{FE} = 683 \text{ mm}^2$. Jadrá boli umiestnené dve oproti sebe stiahnuté v pevnej kostre, kvôli potrebe eliminovať tesnosťou jadier proti sebe vznik vírivých prúdov medzi protiľahlými vztyčnými plochami oboch jadier. Zároveň bolo tak zabezpečené pevné uloženie jadra v konštrukcii zariadenia zabráňujúce poškodenie pri častom prenose a manipulácii so zariadením. Tvar jadra s rozmermi je znázornený na Obr. 3.1-1[7] a Obr. 3.1-2 [6].



Obr. 3.1-1 Tvar použitého jadra pre návrh transformátora (prevzaté z [7])



Obr. 3.1-2 Rozmery použitého jadra pri návrhu transformátora (prevzaté z [6])



Po vybrání presného typu jadra použitého pre stavbu zväračky bola prevedená ešte spätná kontrola výpočtu elektromagnetickej veľkosti jadra pre hodnoty udané výrobcom. Veľkosť S_0 sa spočíta z geometrických rozmerov jadra

$$S_0 = \frac{48,8-21,7}{2} \cdot (22,2 + 22,4) = 604,33 \text{ mm}^2. \quad (3.1-3)$$

Potom hodnota elektromagnetickej veľkosti jadra bude daná súčinom vypočítanej veľkosti S_0 a hodnotou S_{FE} udanej výrobcom

$$S_0 S_{FE} = 604,33 \cdot 10^{-6} \cdot 683 \cdot 10^{-6} = 41,276 \cdot 10^{-8} \text{ m}^4. \quad (3.1-4)$$

Je vidieť že táto hodnota je naozaj väčšia s dostatočne veľkou rezervou ako teoreticky spočítaná hodnota elektromagnetickej veľkosti jadra $8,996 \cdot 10^{-8} \text{ m}^4$.

Pri stanovení počtu závitov primárneho vinutia sa postupovalo podľa nasledovného vzťahu

$$N_1 = \frac{U_d}{4 f B_{max} S_{FE}},$$
$$N_1 = \frac{300}{4 \cdot 60 \cdot 10^3 \cdot 0,31 \cdot 683 \cdot 10^{-6}} = 5,9. \quad (3.1-5)$$

Po zaokrúhlení bol počet zvolených primárnych závitov $N_1 = 6$.

Pri návrhu závitov sekundárneho vinutia transformátora sa vychádzalo zo vzťahu

$$U_z = U_d \frac{N_2}{N_1} 2 s. \quad (3.1-6)$$

Odtiaľ po vyjadrení N_2 možno získať počet závitov sekundárneho vinutia transformátora

$$N_2 = \frac{U_z N_1}{2 U_d s},$$
$$N_2 = \frac{24 \cdot 6}{2 \cdot 300 \cdot 0,35} = 0,686. \quad (3.1-7)$$

Po zaokrúhlení, vyšlo, že na sekundári bude navinuté dvakrát po jednom závite.

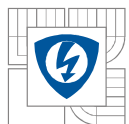
Z počtu závitov primárneho a sekundárneho vinutia sa následne určil prevod navrhovaného transformátora

$$p = \frac{N_2}{N_1},$$
$$p = \frac{1}{6} = 0,167. \quad (3.1-8)$$

Určenie prierezu vodiča použitého na sekundári vinutia transformátora, kde najskôr bolo potrebné vypočítať efektívnu hodnotu prúdu I_{ef2} prechádzajúceho sekundárnym vinutím

$$I_{ef2} = \frac{I_z}{2} \sqrt{2s + 1},$$
$$I_{ef2} = \frac{140}{2} \sqrt{(2 \cdot 0,35) + 1} = 91,269 \text{ A}. \quad (3.1-9)$$

Pre dosadenie za maximálnu striedu, kde $s_{max} = 0,5$, by bola hodnota prúdu podľa vzťahu (3.1-9) $I_{2ef} = 99 \text{ A}$.



Prierez vodičov sekundárneho vinutia transformátora sa spočítal nasledovne

$$S_{Cu2} = \frac{I_{ef2}}{\sigma},$$
$$S_{Cu2} = \frac{91,269}{3 \cdot 10^6} = 30,423 \text{ mm}^2. \quad (3.1-10)$$

Na navinutie sekundárneho vinutia bola použitá medená fólia o hrúbke 1,5 mm, o šírke 21 mm.

Určenie prierezu primárneho vinutia spočívalo rovnako v stanovení veľkosti efektívnej hodnoty prúdu I_{ef1} , ktorý ním bude prechádzať, pri jeho určení výpočet vychádzal z prevodu transformátora a prúdu sekundárneho vinutia I_{ef2}

$$I_{ef1} = I_{ef2} \frac{N_2}{N_1},$$
$$I_{ef1} = 91,269 \frac{1}{6} = 15,212 \text{ A}. \quad (3.1-11)$$

Prierez primárneho vinutia bol určený vzt'ahom

$$S_{Cu1} = \frac{I_{ef1}}{\sigma},$$
$$S_{Cu1} = \frac{15,212}{3 \cdot 10^6} = 5,071 \text{ mm}^2. \quad (3.1-12)$$

Pre realizáciu primárneho vinutia transformátora bola využitá medená fólia o hrúbke 0,12 mm a šírke 43 mm.

3.2 Dimenzovanie tranzistorov určených pre striedač

Pre potreby výberu vhodného tranzistora z katalógového listu bolo nevyhnutné stanoviť nasledujúce parametre

$$I_{C\check{s}p} = I_{\mu max} + I_z \frac{N_2}{N_1}, \quad (3.2-1)$$

$$I_{CSTR} = I_z \frac{N_2}{N_1} s, \quad (3.2-2)$$

$$I_{Cef} = I_z \frac{N_2}{N_1} \sqrt{s}, \quad (3.2-3)$$

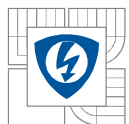
$$U_{CEmax} = U_d. \quad (3.2-4)$$

Pri výpočte strednej I_{CSTR} a efektívnej hodnoty prúdu I_{Cef} tranzistora sa zanedbáva magnetizačný prúd $I_{\mu max}$, ale pri určení špičkovej hodnoty prúdu $I_{C\check{s}p}$ tranzistora je potrebné s ňou uvažovať, hodnota permeability vákua je tabuľkový údaj pre vákuum, $\mu_0 = 4 \pi 10^{-7} \text{ H/m}$ [1] a hodnota relatívnej permeability pre vybrané jadro transformátora je $\mu_{rFE} = 1180$ [8], potom bola hodnota magnetizačného prúdu spočítaná podľa vzťahu

$$I_{\mu max} = \frac{4 f B_{max}^2 l_{FE} S_{FE}}{U_d \mu_0 \mu_{rFE}},$$
$$I_{\mu max} = \frac{4 \cdot 60 \cdot 10^3 \cdot 0,31^2 \cdot 159,26 \cdot 10^{-3} \cdot 683 \cdot 10^{-6}}{300 \cdot 4 \cdot \pi \cdot 10^{-7} \cdot 1880} = 3,54 \text{ A}. \quad (3.2-5)$$

Z geometrických rozmerov transformátora bola určená dĺžka magnetického obvodu ako

$$l_{FE} = 2 (l_1 + l_2),$$



$$l_{FE} = 2 \cdot (24,53 + 55,1) = 159,26 \text{ mm} . \quad (3.2-6)$$

Rozmer l_1 bol získaný ako

$$l_1 = 13,55 + (2 \cdot 5,49) = 24,53 \text{ mm} . \quad (3.2-7)$$

Rozmer l_2 bol vypočítaný ako

$$l_2 = 2 \cdot (22,2 + 5,35) = 55,1 \text{ mm} . \quad (3.2-8)$$

Po dosadení číselných hodnôt boli vyčíslené hodnoty prúdov

$$I_{Csp} = 3,54 + 140 \cdot \frac{1}{6} = 26,87 \text{ A} , \quad (3.2-1)$$

$$I_{CSTR} = 140 \cdot \frac{1}{6} \cdot 0,35 = 8,17 \text{ A} , \quad (3.2-2)$$

$$I_{Cef} = 140 \cdot \frac{1}{6} \cdot \sqrt{0,35} = 13,80 \text{ A} , \quad (3.2-3)$$

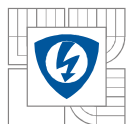
$$U_{CEmax} = 300 \text{ V} . \quad (3.2-4)$$

Pre realizáciu boli zvolené štyri MOS-FET tranzistory z katalógu [8] typu IPW60R045CP s hodnotou kolektorového prúdu $I_D = 60 \text{ A}$, napätím medzi kolektorom a emitorom $U_{DS} = 650 \text{ V}$. Puzdro navrhovaného tranzistora s ďalšími parametrami sú znázornené v Prílohe A [8].

3.3 Návrh diód sekundárneho usmerňovača

Pre potreby vzniku jednosmerného prúdu na oblúku pri zváraní je potrebné tento prúd získať zo striedavého prúdu pretransformovaného cez transformátor meniča pomocou sekundárneho usmerňovača zapojeného na výstupe z transformátora. U dvojčinných meničov bývajú využívané dvojcestné usmerňovače v mostíkovom alebo uzlovom zapojení, pričom usmerňovače v uzlovom zapojení bývajú zapojené s nulovou diódou alebo bez nej. Výhodou uzlových usmerňovačov je, že prúd tečie vždy cez jednu diódu oproti usmerňovačom v mostíkovom zapojení, kde pri prechode prúdu vzniká úbytok napätia na dvoch v diódach zapojených za sebou, ale oproti uzlovým usmerňovačom nepotrebujú na výstupe zapojenú nulovú diódu, pretože diódy usmerňovača sú zároveň aj nulové diódy v čase kedy je sekundárne napätie nulové. Za nevýhodu uzlových usmerňovačov možno považovať, že efektívna hodnota prúdu pretekajúceho cez sekundárne vinutie nie je polovicou celkového sekundárneho prúdu pri dvojnásobnom počte sekundárnych závitov, ale 0,707 násobok prúdu, ktorý by tiekol sekundárnym vinutím ak by bol použitý mostíkový usmerňovač. Z toho plynie, že nie je docielené ideálne využitie materiálu použitého na sekundárne vinutie transformátora.

Pri návrhu sekundárneho usmerňovača použitého v zväračke bol využitý dvojcestný usmerňovač bez nulovej diódy. Prítomnosť nulovej diódy nebola potrebná, pretože v čase, keď je na výstupe sekundárneho vinutia transformátora nulové napätie, vďaka tlmivke zapojenej za usmerňovačom, ktorá spôsobuje, že prúd v tomto čase tečie obvodom aj naďalej zo záťaže po strednom vodiči, kde sa potom rozdelí a má snahu sa vracieť naspäť, lenže jeho magnetické účinky sa vyrušia a indukčnosť sekundárneho vinutia sa neprejaví. V čase, kedy je na výstupe sekundára transformátora nulová hodnota napätia, pracujú obidve diódy uzlového usmerňovača ako jedna nulová dióda. V dobe, keď nie je nulová hodnota sekundárneho napätia, pracujú obidve diódy ako usmerňovacie, s menším úbytkom napätia ako by to bolo pri mostíkovom zapojení [1].



Pri dimenzovaní diód sekundárneho usmerňovača sa vychádzalo zo vzťahu pre výpočet efektívnej hodnoty prúdu sekundárneho vinutia transformátora

$$I_{ef2} = \frac{I_z}{2} \sqrt{2s + 1} = \frac{140}{2} \sqrt{(2 \cdot 0,35) + 1} = 91,269 \text{ A} . \quad (3.3-1)$$

Pre potreby prúdového a napäťového dimenzovania diód a nasledovného výberu vhodnej súčiastky z katalógu boli potrebné nasledovné spočítané hodnoty

$$I_{DSTR} = \frac{I_z}{2} = \frac{140}{2} = 70 \text{ A} , \quad (3.3-2)$$

$$I_{Def} = I_{ef2} = \frac{I_z}{2} \sqrt{1 + 2s} = \frac{140}{2} \sqrt{(2 \cdot 0,35) + 1} = 91,269 \text{ A} , \quad (3.3-3)$$

$$U_{KAmax} = \frac{U_z}{2s} = \frac{24}{2 \cdot 0,35} = 34,290 \text{ A} . \quad (3.3-4)$$

Pre vyhotovenie sekundárneho usmerňovača realizovaného v uzlovom zapojení boli vybrané diódy typu DSEI 2x121-02A, v prevedení s púzdom SOT227B s parametrami $I_f = 123 \text{ A}$, $U_{Rmax} = 200 \text{ V}$, $U_f = 1,1 \text{ V}$, $t_{rr} = 35 \text{ ns}$. Ďalšie charakteristické hodnoty použitého typu diód sa nachádzajú v Prílohe B [9].

3.4 Návrh výstupnej filtračnej tlmivky

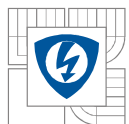
Na parametroch filtračnej tlmivky, na kvalite jej návrhu a následnom vyhotovení značne závisia zväracie vlastnosti realizovanej zväračky. Pri výpočte indukčnosti je potrebné vhodne si zvoliť veľkosť zvlnenia prúdu, pričom je nutné mať na pamäti, že toto zvlnenie zvyšuje hodnotu špičkového opakovateľného prúdu použitých polovodičov, umiestnených na obidvoch stranách použitého transformátora. Preto je potrebné použiť filtračnú tlmivku so vzduchovou medzerou. Pri voľbe materiálu použitého na stavbu tlmivky sa rozhoduje na základe prejavu vznikajúcich vírivých strát. Môžu byť použité magneticky orientované plechy s hrúbkou okolo 0,35 mm, vzduchovej cievky možno využiť u vysokoprúdových a zároveň nízkonapäťových meničov. Okrem predchádzajúcich dvoch riešení sa môže využiť na stavbu tlmivky jadro z feritových materiálov, u ktorých sa pohybuje maximálna indukcia v okolí hodnôt 0,35 T a ich vírivé straty možno neuvažovať. Veľmi dobrým riešením je možnosť postaviť tlmivku na jadre z práškoveho železa s vysokou hodnotou maximálnej indukcie, ktorá býva udávaná okolo 1,2 T. Býva vyhotovená v podobe prstenca so vzduchovou medzerou, ktorú navonok nevidno, nachádza sa vo vnútri materiálu v podobe stlačených bubliniek vzduchu. Pri výpočte je nutné stanoviť najskôr minimalizovaný objem tlmivky, potom stanoviť počet závitov a prierez použitého vodiča na vinutie, podobne ako u transformátora, a v neposlednom rade sa určí dĺžka potrebnej vzduchovej medzery [1].

Pri návrhu tlmivky s feromagnetickým jadrom a vzduchovou medzerou bolo potrebné najskôr určiť elektromagnetickú veľkosť jadra podľa vzťahu

$$S_0 S_{FE} = \frac{L I_{max}^2 k_z}{k_{p,Fe} k_{p,Cu} B_{max} \sigma} = \frac{L I_{max} I_{ef}}{k_{p,Fe} k_{p,Cu} B_{max} \sigma} . \quad (3.4-1)$$

V predchádzajúcom vzťahu bolo potrebné určiť hodnotu indukčnosti L a pre jej výpočet bolo treba vhodne zvoliť veľkosť zvlnenia prúdu, pričom platí, že ak bude zvlnenie prúdu príliš malé, hodnota L bude nadobúdať väčších hodnôt, bude potrebné konštruovať tlmivku väčších rozmerov, čo môže byť v praxi často nevýhodné kvôli snahe dosiahnuť čo najmenších minimálnych rozmerov a hmotnosti celého zariadenia [1]. Preto bolo zvolené zvlnenie prúdu

$$\Delta I \cong 15 \% \text{ z } I_z \cong 0,15 \cdot 140 = \pm 21 \text{ A} . \quad (3.4-2)$$



Pre výpočet indukčnosti bolo ešte stanovené, že špičková hodnota napätia za usmerňovačom U_{3sp} sa dá zjednodušene stanoviť cez prevod transformátora, ak sa zanedbá úbytok napätia na diódach, čo má vplyv na väčšiu hodnotu L , potom hodnota napätia bude

$$U_{3sp} = p U_d = \frac{1}{6} \cdot 300 = 50 \text{ V}. \quad (3.4-3)$$

Hodnota indukčnosti tlmivky potom bola nasledovná, pričom strieda s je dvojnásobná oproti pôvodnej hodnote strede $s = 0,35$, teraz $s = 0,7$

$$L = \frac{U_{3sp} (1-s)s}{2 f \Delta I} = \frac{50 \cdot (1-0,7) \cdot 0,7}{2 \cdot 60 \cdot 10^3 \cdot 21} = 4,2 \text{ } \mu\text{H}. \quad (3.4-4)$$

Pre maximálnu veľkosť prúdu na tlmivke platí

$$I_{max} = I_z + \Delta I = 140 + 21 = 161 \text{ A}. \quad (3.4-5)$$

Pre efektívnu hodnotu prúdu prechádzajúceho tlmivkou platí

$$I_{ef} = I_{Def} = I_{ef2} = \frac{I_z}{2} \sqrt{1 + 2s} = \frac{140}{2} \sqrt{1 + (2 \cdot 0,35)} = 91,269 \text{ A}. \quad (3.4-6)$$

Za zjednodušujúceho predpokladu, že S_0 možno približne považovať za rovno S_{FE} , potom hodnota vypočítaného prierezu materiálu bola

$$S_j = \sqrt{\frac{L I_{max} I_{ef}}{k_{p,Fe} k_{p,Cu} B_{max} \sigma}} = \sqrt{\frac{4,2 \cdot 10^{-6} \cdot 161 \cdot 91,269}{1 \cdot 0,5 \cdot 0,32 \cdot 3 \cdot 10^6}} = 359 \text{ mm}^2. \quad (3.4-7)$$

Pričom boli zvolené parametre maximálna indukcia $B_{max} = 0,32 \text{ T}$, prúdová hustota $\sigma = 3 \text{ A/mm}^2$, celkový činiteľ plnenia pre tlmivku $k_{p,Cu} = 0,5$ a činiteľ plnenia železa, v návrhu tlmivky sa jedná o ferit, potom $k_{p,Fe} = 1$.

Z dostupných feritových jadier, ktoré sú ponúkané na trhu bolo vybrané také jadro, aby prierez feritového jadra S_{FE} bol väčší ako hodnota S_j . Navrhovaná tlmivka pozostávala z troch jadier, typu a rozmeroch T25/15x10 H60 [10] a vzduchovou medzerou 2 mm, navzájom uložených vedľa seba. Ich celková $S_{FE} = 450 \text{ mm}^2$, ktorá bola určená z geometrických rozmerov ako 15x10 a násobené tromi, pretože pre stavbu boli použité tri jadrá.

Pre určenie potrebného počtu závitov je nutné vypočítať dĺžku siločiar feromagnetického materiálu zjednodušene, podľa obvodu okna použitého jadra na stavbu filtračnej tlmivky

$$l_{Fe} \cong 6 \sqrt{S_0} \cong 6 \sqrt{S_j} \cong 6 \sqrt{450} \cong 127,28 \text{ mm}. \quad (3.4-8)$$

Pre výpočet hodnoty vzduchovej medzere platí vzťah

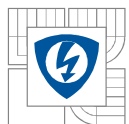
$$l_v = \frac{N \mu_0 I_{max}}{B_{max}} - \frac{l_{Fe}}{\mu_{rFe}}. \quad (3.4-9)$$

Keďže bolo vybrané jadro, ktoré má od výrobcu už vopred vyhotovenú vzduchovú medzeru na dĺžku $l_v = 2 \text{ mm}$, hodnota relatívnej permeability je $\mu_{rFe} = 1050$, tak z predchádzajúceho vzťahu možno vyjadriť počet závitov N

$$N = \frac{(l_v + \frac{l_{Fe}}{\mu_{rFe}}) B_{max}}{\mu_0 I_{max}} = \frac{(2 \cdot 10^{-3} + \frac{127,28 \cdot 10^{-3}}{1050}) \cdot 0,32}{4 \cdot \pi \cdot 10^{-7} \cdot 161} = 3,36. \quad (3.4-10)$$

Pre navinutie tlmivky boli zvolené 4 závit, prierez vodiča na vinutie sa určil

$$S_{Cu} = \frac{I_{ef}}{\sigma} = \frac{91,27}{3 \cdot 10^6} = 30,42 \text{ mm}. \quad (3.4-11)$$



Priemer použitého vodiča sa určil podľa vzťahu

$$d_{Cu} = 2 \sqrt{\frac{S_{Cu}}{\pi}} = 2 \sqrt{\frac{30,42}{\pi}} = 6,23 \text{ mm} . \quad (3.4-12)$$

Ako vinutie výstupnej filtračnej tlmivky bol zvolený medený vodič, ktorý je v podobe vysokofrekvenčného lanka zložený zo súboru dvanástich vodičov, každý o priemere $D = 1,8 \text{ mm}$, potom celkový prierez vinutia bude

$$S_{Cu, cel} = 12 \pi \left(\frac{D}{2}\right)^2 = 12 \cdot \pi \cdot \left(\frac{1,8}{2}\right)^2 = 30,52 \text{ mm}^2 . \quad (3.4-13)$$

Pre navrhovaný prierez platí, že $S_{Cu, cel} > S_{Cu}$, previedol sa ešte spätný prepočet indukčnosti pre zvolené 4 závit

$$L = \frac{N B_{max} S_{FE}}{I_{max}} = \frac{4 \cdot 0,32 \cdot 450 \cdot 10^{-6}}{161} = 3,58 \text{ } \mu\text{H} . \quad (3.4-14)$$

Je vidieť, že hodnota indukčnosti L sa znížila z pôvodnej hodnoty $4,2 \text{ } \mu\text{H}$ na hodnotu $3,58 \text{ } \mu\text{H}$. Môže sa previesť ešte spätná kontrola celkového činiteľa plnenia tlmivky

$$k_{pCu} = \frac{N S_{Cu}}{S_0} \cong \frac{4 \cdot 30,42}{450} = 0,27 . \quad (3.4-15)$$

Potrebné bolo ešte previesť kontrolu vzduchovej medzery tlmivky, podľa podmienky

$$\frac{l_{Fe}}{\mu_{rFe}} < l_v \ll \sqrt{S_{FE}} . \quad (3.4-16)$$

Po číselnom dosadení do rovnice (3.4-16) bola vyčíslená a overená podmienka, kde musí platiť

$$\frac{127,3}{1050} < 2 \ll \sqrt{450} ,$$

čo odpovedá tomu, že podmienka naozaj bola splnená, po úprave

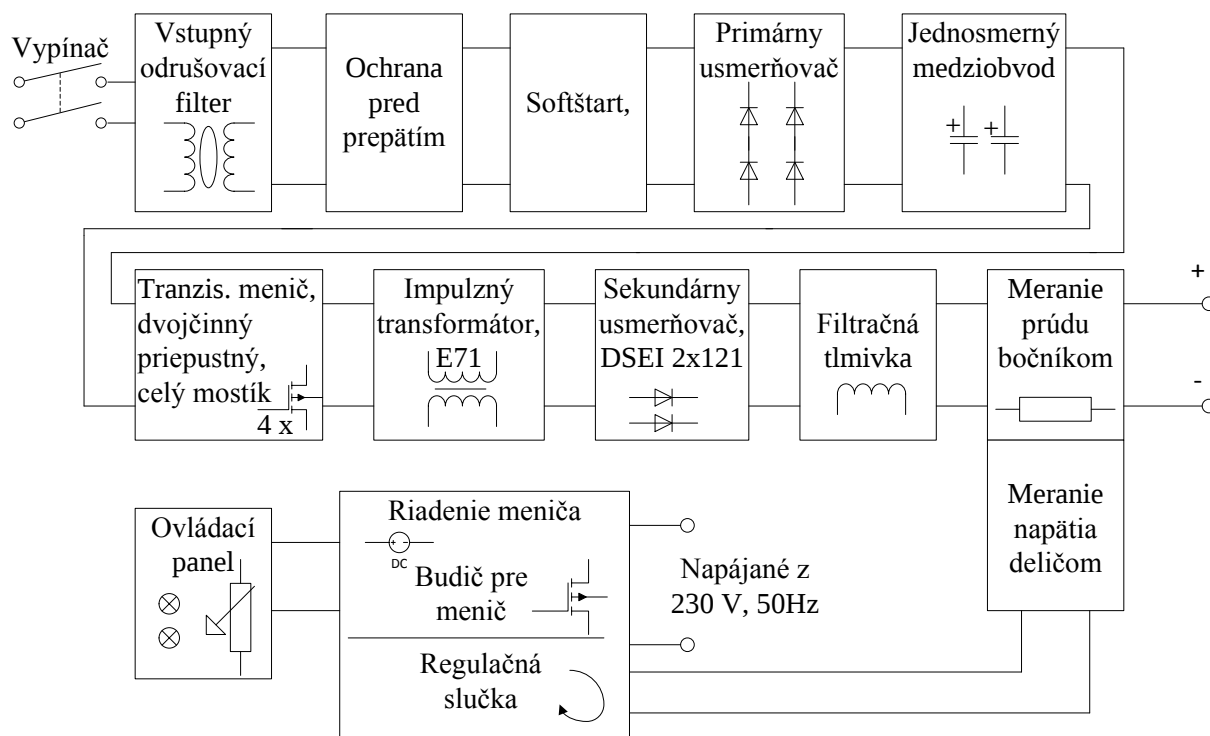
$$0,12 \text{ mm} < 2 \text{ mm} \ll 21,21 \text{ mm} .$$

Podmienka bola splnená, ak by nedošlo k jej splneniu bol by potrebný nový výpočet jednotlivých hodnôt potrebných pre návrh filtračnej tlmivky. Hodnota spätne vypočítaného činiteľa plnenia tlmivky sa mierne líši od jeho uvažovanej hodnoty $0,5$, ktorá bola použitá pri výpočte veľkosti jadra, je to dané najmä výberom jadra z dostupných na ponúkanom trhu.

4 POPIS FUNKČNÝCH BLOKOV REALIZOVANÉHO MENIČA

Celé zariadenie bolo zostavené z niekoľkých častí, blokov, ktoré boli usporiadané tak, aby bolo možné dosiahnuť čo najmenších rozmerov a hmotnosti, ale zároveň aby sa jednotlivé časti obvodov navzájom medzi sebou nerušili a aby bolo zaistené čo najefektívnejšie chladenie jednotlivých komponentov. Zváračka bola navrhnutá tak, aby bolo možné rozdeliť obvody na určité bloky, ktoré bolo možné samostatne napájať, čo uľahčilo prácu pri oživovaní a overovaní potrebných vlastností meniča. Obvody boli medzi sebou poprepávané prostredníctvom konektorov, zásuvných kontaktov a vodičov, ktoré bolo možné rozpojiť, čo poskytovalo výhodu v ľahšej manipulácii a prístupnosti k jednotlivým súčiastkam pri vzniku potrebnej opravy, kedy bolo možné vytiahnuť celú časť obvodu a prevádzať na nej úpravy.

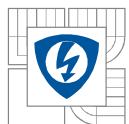
Menič bol realizovaný z nasledujúcich častí. Najväčšiu oblasť priestoru zaberala silová časť. Do silovej časti boli zakomponované riadiace obvody skladajúce sa z dvoch plošných spojov. Na ovládacom paneli boli umiestnené ovládacie mechanizmy potrebné pre komfortné riadenie meniča v podobe potenciometrov, signalizačných prvkov, vypínačov a prepínačov. Usporiadanie jednotlivých blokov meniča je znázornené na Obr. 4.0-1. Podrobné rozobratie funkčných celkov sa nachádza v nasledujúcich podkapitolách.



Obr. 4.0-1 Blokové usporiadanie obvodov meniča

4.1 Silová časť meniča

Na vstupné svorky meniča bolo privádzané jednofázové striedavé napätie s hodnotou 230V a kmitočtom 50 Hz. Prívod energie bol prevedený prostredníctvom počítačovej zásuvky a prívodného kábla, ktorý možno odpojiť od zariadenia, bez väčšieho mechanického zásahu. Dôvod použitia spočíval v ľahšej manipulácii so zariadením pri jeho prenose. Na ovládacom paneli bol umiestnený hlavný vypínač s funkciou podsvietenia, ktorá poskytovala lepšiu orientáciu, či sa zariadenie nachádzalo v chode, alebo bolo vypnuté, v stave nečinnosti. Silová časť bola chránená poistkou s hodnotou 15 A, pre napájanie riadiacej časti vyvedenej zo silovej



časti bola použitá poistka s hodnotou 1 A. Na vstupe meniča sa nachádzal odrušovací filter, tvorený filtračnou tlmivkou vinutou 2 x po 13 závitov s indukčnosťou 0,17 mH a kondenzátormi C_2 a C_3 s hodnotami 470nF. Použitý LC-filter mal slúžiť na odfiltrovanie rušivých napätí s vyšším počtom harmonických putujúcich zo zariadenia do siete. Za LC-filtrom bol umiestnený varistor VDR_1 určený pre chránenie zariadenia proti možnému výskytu prepätia pochádzajúceho z napájacej siete. Do meniča bolo zabudované relé, ktoré po uplynutí krátkeho časového intervalu spôsobilo preklopenie kontaktov, ktoré boli v prvom okamihu rozopnuté, čo malo za následok, že elektrolytické kondenzátory C_7 a C_8 sa nabíjali malou hodnotou prúdu. Takýmto spôsobom malo dôjsť k ich správne naformovaniu a zabráneniu vzniku nežiaduceho nadprúdu, pri ich nabíjaní, pričom by mohol tento nadprúd spôsobiť ich poškodenie. Po ich naformovaní sa kontakt relé K_1 preklopí tak, že skratuje odpor R_1 a prechádzajúca hodnota prúdu už nespôsobí poškodenie kondenzátorov nachádzajúcich sa v jednosmernom medziobvode. Obvod pozostávajúci so zapojeného tyristora Ty_1 a tranzistora T_6 bol určený pre opätovné vybitie a následné nabitie kondenzátorov aj pri krátkom vypnutí a následnom znovu zapnutí zariadenia.

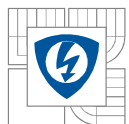
Pre usmernenie striedavého napätia s frekvenciou 50 Hz bol určený primárny usmerňovač Br_1 pozostávajúci so štvorice zapojených diód v jednom puzdre. Za ním bol umiestnený jednosmerný medziobvod pozostávajúci z dvojice paralelne zapojených elektrolytických kondenzátorov s hodnotou 680 uF. Na jeho výstupe bolo tak získané jednosmerné napätie približne o hodnote 300 V.

Menič bol realizovaný ako dvojčinný priepustný, v zapojení celý mostík. Preto, pre jeho stavbu bola využitá štvorica tranzistorov, pričom tranzistory bolo potrebné spínať v diagonále, čo znamená, že tranzistory museli byť spínané v uhlopriečkach. Použité MOS-FET tranzistory typu IPW60R045 mali pripojené medzi kolektor a emitor odpor $1k\Omega$ do série s kondenzátorom s hodnotou kapacity 100 pF/1600 V, pričom úlohou RC člena bolo mariť energiu na každom tranzistore práve v čase kedy sa daná dvojica tranzistorov nachádzala vo vypnutom stave. Fóliové odrušovacie kondenzátory C_9 a C_{11} s hodnotami kapacity 680 nF boli určené pre potlačenie parazitnej indukčnosti a s ňou spojeným rušením, ktorého možný vznik bol opodstatnený vysokou frekvenciou spínania tranzistorov.

K tranzistorovému striedaču bol pripojený primár impulzného transformátora, postaveného na jadre typu E71-3C90. Doňho smerovali pravouhlé impulzy s kmitočtom 60 KHz vytvorené tranzistorovým striedačom. Transformátor mal za úlohu pretransformovať striedavý signál s prevodom na jeho sekundárnu stranu. V primári transformátora bol umiestnený odpor R_5 zapojený v sérii s kondenzátorom C_5 , ich úlohou bolo odfiltrovať krátke špičky vznikajúce pri zopínaní. Kondenzátor C_{10} realizovaný ako paralelná kombinácia šiestich kondenzátorov s kapacitou 6 x 1 uF bol určený pre potlačenie vzniku jednosmernej zložky napätia, ktorá činnosti transformátora škodí. Transformátor bol vyrobený s vyvedeným stredným vodičom tak, že mal navinutý dvakrát sekundár, čo bolo potrebné pre vytvorenie 0 V.

Do sekundára transformátora bol zapojený uzlový usmerňovač pre získanie jednosmerného napätia potrebného pri zváraní. Diódy D_1 a D_2 boli použité v prevedení s puzdrami typu DSEI 2 x 121-02, kde sa v každom puzdre nachádzala dvojica paralelne zapojených diód. Paralelne ku každému modulu diódy bola pripojená sériová kombinácia 6 W odporu s hodnotou 5 Ω a kondenzátora s hodnotou 10 nF, ktoré boli určené pre zmarenie špičiek vznikajúce v časoch, kedy danou diódou prestal pretekať prúd.

Na výstupe usmerňovača bola pripojená filtračná tlmivka L_3 s indukčnosťou 3,6 uH, jej návrh a vyhotovenie značne vplýval na výsledné zväracie vlastnosti meniča. Meranie prúdu bolo



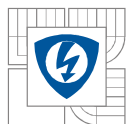
realizované pomocou bočníka, ktorý pozostával z ôsmich paralelne zapojených odporových drôtov, aby bol schopný vydržať maximálny zvárací prúd, zároveň na ňom vznikol úbytok napätia približne 100 mV, pričom tento signál bol ďalej spracovaný v riadiacich obvodoch. Delič napätia pripojený k výstupným svorkám bol určený k vyhodnocovaniu napätia. Zapojenie silovej časti meniča sa nachádza v PRÍLOHE C [5].

4.2 Riadiace obvody meniča

Riadiace obvody boli umiestnené na dvoch samostatných doskách, ktoré boli zakomponované do zariadenia. Jedna doska bola určená pre vytvorenie potrebného napätia pre riadiace obvody a jej hlavnou funkciou bolo vytvoriť správne riadiace impulzy o potrebných parametroch a kvalite pre výkonové tranzistory umiestnené v silovej časti. Druhá doska sa zaoberala reguláciou meniča a nastavovaním zváracích parametrov, ktoré by boli požadované od obsluhy. Ďalšou vlastnosťou obvodu regulačnej slučky bola možnosť prepínania medzi režimom zvárací, kedy bolo možné regulovať prúd až do rozsahu 140 A a režimom zdroja napätia s možnosťou regulácie napätia, pričom bol zdroj takto schopný dodávať do záťaže prúd o maximálnej hodnote 15 A s možnosťou nastavovania napätia do hodnoty 30 V.

Pre napájanie riadiacich obvodov bol použitý AC/DC menič, ktorého výstup poskytoval napätie o hodnote 20 V. Následne bolo toto napätie stabilizované na napätie 15 V pomocou stabilizátora L7815ABV. Tlmivka L_2 v jednoduchom prevedení zložená z dvoch feritových paralelne spojených jadier o rozmeroch 8 x 10 mm a vinutými dvoma závitmi medeného vodiča v spolupráci s tlmivkou L_1 o indukčnosti 100 uH a kondenzátormi C_{22} C_{23} o hodnote 100 nF a C_{25} tvorili filtračný blok riadiacich obvodov. Zariadenie bolo chránené proti prehriatiu a následnému poškodeniu súborom do série zapojených tepelných poistiek, pričom transformátor mal navrhnutú poistku na maximálnu teplotu 80 °C, tranzistory na chladiči mali umiestnenú poistku reagujúcu pri prekročení 60 °C, rovnako ako aj diódy v sekundárnom usmerňovači. V prípade, ak by došlo k prekročeniu teploty na danom prvku, došlo by k rozpojeniu poistky a červená kontrolka mala signalizovať prehriatie zariadenia. Po vychladení sa poistka znovu zopla, kontrolka zhasla a zariadenie mohlo naďalej pokračovať v svojej činnosti. Diódy D_{16} , D_{15} , D_{14} slúžili v pre možnosť použitia napájania pri využití ďalších prídavných obvodov slúžiacich k zlepšeniu komfortnosti pri zváraní potrebných k svojej činnosti zápornú hodnotu napätia – 2 V.

Činnosť budiča, ktorého obvod pozostával zo štvorice MOS-FET tranzistorov, kde TB_1 a TB_2 boli použité typu FU9024 s obohacovacím P kanálom. Tranzistory TB_3 a TB_4 boli rovnako MOS-FET typu FU210 s obohacovacím N kanálom. Diódy D_1 a D_2 boli umiestnené v jednom puzdre typu A7W7d rovnako aj diódy D_3 a D_4 . Každá z diód bola umiestnená v hradle tranzistora a ich význam spočíval v rýchlom zopnutí daných tranzistorov. Obidve vetvy budiča boli riadené z výstupov PWM modulátora typu SG3525 označené ako Out A a Out B. Tento integrovaný obvod pracoval s napájacím napätím 15 V. Pracovný kmitočet celého meniča bol nastavený prostredníctvom odporu R_t a kondenzátora C_t na hodnotu 60 kHz. Dead-time, čas vypnutia pracujúcich tranzistorov v silovej časti bol nastavený pomocou trimra na hodnotu 680 ns. Impulzný transformátor T205.0 bol vyhotovený s vinutými štvormi sekundármi. Jedna dvojica sekundárov vytvárala riadiace impulzy naraz, druhá dvojica ich posúva do proti fáze. Dôvodom bolo, aby tranzistory v silovej časti spínali v diagonále po správnom privedení impulzov cez odpory, ktoré boli vložené do ich hradla, ich hodnota bola 3.3 Ω . Zapojenie riadiacich obvodov zobrazuje PRÍLOHA D.



4.3 Pomocný obvod pre riadenie meniča

Pre efektívnu reguláciu prúdu, prípadne napätia, ak by zariadenie pracovalo ako zväčšovač, zdroj prúdu, alebo ako zdroj napätia, bolo potrebné zhotoviť obvod, ktorý by bol schopný snímať signál pochádzajúci zo zariadenia a umožňovať pohotovú reakciu na zmenu nastavovaných veličín požadovaných obsluhou pri práci so zariadením. Realizácia zapojenia obvodu sa nachádza v PRÍLOHE E. Signál bol snímaný prostredníctvom bočníka, ktorý bol následne vyhotovený tak, aby na ňom vznikol úbytok napätia približne -100 mV. Výstup z obvodu predstavoval potrebný signál určený pre zmenu striedy spínania tranzistorov umiestnených v budiči označených ako TB_1 až TB_4 . Tento signál bol následne vedený do vstupu integrovaného obvodu VR typu SG3525.

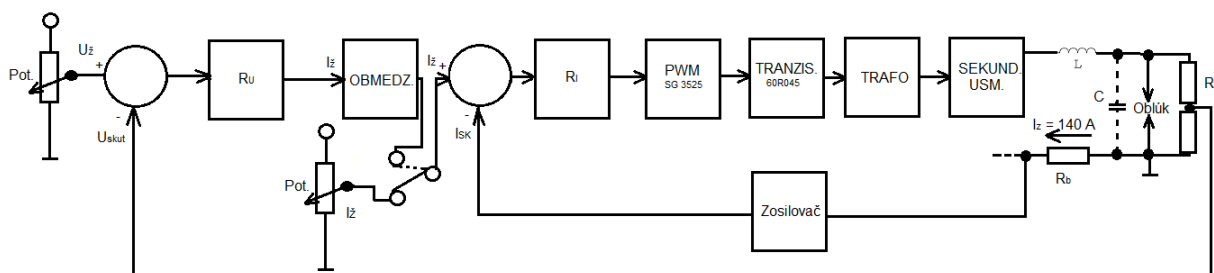
Prichádzajúci signál z bočníka prechádzal najskôr cez filter tvorený kondenzátorom C_1 a odporom R_1 , ktorých hodnoty boli stanovené tak aby nevznikla príliš veľká časová konštanta spomaľujúca činnosť obvodu pri reakcii na zmenu signálu. Základ pomocného obvodu riadenia – obvodu regulačnej slučky bol vyhotovený s použitím desiatich operačných zosilňovačov, ktoré boli umiestnené vždy po dvoch v piatich puzdách typu TL072CP. Ich napájanie bolo riešené premenou napätia pochádzajúceho z napájania riadiacej časti na napätie symetrické o hodnote +15 V a -15 V. Celý obvod bol rozdelený na dve časti, ktorých voľbu bolo možno prepínať medzi sebou prostredníctvom prepínača S_1 umiestneného na ovládacom paneli. Bolo tak možné dosiahnuť, aby zariadenie mohlo pracovať v dvoch režimoch, ako zdroj prúdu, alebo ako zdroj napätia. Zadávanie žiadaných parametrov bolo prostredníctvom 10 k Ω potenciometrov. Potenciometer POT_1 slúžil pre nastavovanie požadovaného prúdu pri zväzovaní. Potenciometerom POT_2 sa nastavovala požadovaná hodnota napätia. Potenciometer s označením ako POT_3 bol určený pre nastavenie prúdového obmedzenia, ak by zariadenie pracovalo ako zdroj napätia. Napätie do zadávacích potenciometrov bolo privádzané z výstupu stabilizátora L7809CV, ktorý znižoval napájacie napätie +15 V na hodnotu +8V.

Operačný zosilňovač OZ_1 umiestnený v puzdre TL_1 zapojený ako neinvertujúci člen, bol určený na zosilňovanie signálu privádzaného z bočníka o hodnote -0,1 V na hodnotu -8 V. Tento signál bol považovaný akoby za skutočnú hodnotu prúdu označenú na Obr. 4.3-1 ako I_{SK} . Regulátor prúdu označený ako OZ_2 umiestnený v tom istom puzdre mal na vstupe delič v podobe dvoch paralelne zapojených odporov s hodnotami 10 k Ω do svojho invertujúceho vstupu, pričom boli do nich privádzané signály v podobe I_{SK} a žiadanej hodnoty prúdu I_z , ktoré regulátor porovnával. Regulátor mal snažiť pracovať tak, aby obidve veličiny s navzájom opačnými znamienkami sa vyrovnali a takto vytvorili umelú nulu na vstupe regulátora. Z výstupu OZ_2 pochádzal signál daný jeho zosilnením na hodnotu -14 V, ktorý bol následne prevedený na signál s úrovňou +6 V vďaka zoslabeniu OZ_3 umiestneného v puzdre TL_2 . Takto spracovaný signál viedol priamo na vstup SG3525.

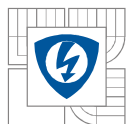
Podobný proces regulácie prebiehal aj v nadradenej regulačnej slučke, ktorá obsahovala časť s nastavením prúdového obmedzenia. Skutočná hodnota napätia bola snímaná prostredníctvom deliča napätia tvoreného odporami R_{15} a R_{16} , ktoré boli umiestnené v silovej časti meniča, na výstupných svorkách. Tento snímaný signál sa prevádzal so zosilnením 1:1 z napätia +8V na napäťovú úroveň -8 V prostredníctvom OZ_6 . Žiadaná hodnota napätia prichádzala z výstupu L7809CV cez zadávací potenciometer POT_2 a OZ_5 v podobe +8 V. Obidva ako OZ_6 aj OZ_5 boli umiestnené v rovnakom puzdre TL_4 . Signály U_{SK} a U_z sa porovnávali na vstupe regulátora napätia označeného ako OZ_7 . Jeho činnosť bola podobná ako u regulátora prúdu, pričom sa snažil doregulovať obidve veličiny tak, aby sa rovnali. Z jeho výstupu sa zosilnený signál premenil z

hodnoty -14 V opäť na hodnotu $+8\text{ V}$ vďaka zosilovacej vlastnosti OZ_8 umiestneného v rovnakom puzdre ako bol OZ_7 s označením TL_5 .

Nastavovanie prúdového obmedzenia prebiehalo s nastavením maximálnej hodnoty prúdu I_{max} za pomoci POT_3 , ktorý bol obdobne pripojený k výstupu stabilizátora TL_3 . Signál z POT_3 bol vedený do neinvertujúceho vstupu OZ_9 , ktorý spolu s rezervným OZ_{10} bol umiestnený v puzdre s označením TL_6 . Takto zostavený obvod umožňoval efektívnu reguláciu požadovaných veličín ako aj výhodnú vlastnosť spočívajúcu v polyfunkčnom využití celého zariadenia, ktoré mohlo tak pracovať ako zdroj prúdu do hodnoty 140 A ako aj zdroj napätia do 30 V s maximálnym prúdom nepresahujúcim 15 A .



Obr. 4.3-1 Blokové znázornenie pomocného obvodu riadenia, regulačná slučka meniča



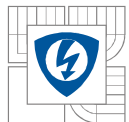
ZÁVER

Stavba tohto typu zariadenia predstavovala veľmi veľké nároky na vedomosti, praktické skúsenosti a najmä veľkú zásobu trpezlivosti. Na druhej strane je tu možnosť získať veľké množstvo vedomostí a praktických rád, ktoré sa dajú uplatniť v širokej oblasti dnešného priemyslu. Pri stavbe zväračky bolo potrebné dbať na to, aby zariadenie mohlo pracovať v ľubovoľných pracovných podmienkach, pri rôznych teplotách. Aby sa zariadenie vyrovnalo dnešným konkurenčným zväracím zariadeniam bolo zapotreby dosiahnuť čo najmenšie rozmery a hmotnosť konečného prevedenia, ale aby bolo zároveň možné spoľahlivo prenášať požadovaný výkon. Vďaka minimalizácii objemu celého zariadenia bola zaistená ľahká manipulácia pri častých prenosoch zväračky na rôzne pracoviská, komfort a pohodlnosť v nastavovaní zväracích parametrov ako aj možnosť použitia zariadenia aj v teréne, kedy by sa dalo napájať z elektrocentrály s jednofázovým napätím, či zmenu zväračky na zdroj napätia, možno považovať za hlavné výhody zrealizovaného zariadenia.

Počas vývoja a postupného vylepšovania a testovania prešiel menič mnohými úpravami. V pôvodnom návrhu mali byť vyhotovené budiče umiestnené v riadiacej časti z dvoch impulzných transformátorov typu SD250-3 Coilcraft, ktoré mali budiť, spínať štvoricu IGBT tranzistorov. Lenže ich dostupnosť na slovenskom a českom trhu bola nemožná, na americkom trhu bola obtiažna. Preto boli navrhnuté nové dva budiace transformátory, ktoré mali nahradiť pôvodné, pričom každý mal navinuté po dva sekundäre na feritovom jadre a mali sa tak podieľať na vytvorení spínacích impulzov o potrebných parametrov pre výkonové tranzistory. Táto varianta sa rovnako neosvedčila, už pri prvom testovaní funkčnosti riadiacich obvodov došlo k tomu, že nedochádzalo k spoľahlivému budeniu tranzistorov dvojčinného meniča, v istom okamihu došlo k tomu, že dvojica tranzistorov zopla nie v diagonále, ale pod sebou, čím došlo k vytvoreniu skratu a následnému nezvratiteľnému poškodeniu tranzistorov IGBT v silovej časti. Pred touto poruchou vznikla ešte jedna, ktorej príčina spočívala v nedostatočnej kvalite odizolovania výkonových tranzistorov od chladiča, keďže mal každý tranzistor vyvedený kolektor na chladiacu plochu svojho čipu a boli umiestnené všetky na spoločnom chladiči. Vďaka týmto poruchám došlo k zničeniu jedného výkonového modulu usmerňovacej diódy typu DSEI 2x121-02, ktorej cena je pomerne vysoká rovnako bola potrebná výmena celej štvorice IGBT tranzistorov.

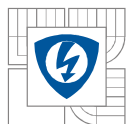
Bola navrhnutá tretia verzia pre riadenie celého meniča. Riadenie bolo založené, rovnako ako v predchádzajúcich spôsoboch, na princípe šírko-impulznej modulácie, kde dochádzalo k porovnávaniu dvoch signálov pomocou modulátora SG3525. Z jeho výstupov putoval signál do tranzistorového striedača, ktorý tvoril striedavý signál potrebný k činnosti budiaceho transformátora. Transformátor bol tento krát iba jeden a mal navinuté na svojom jadre štyri sekundäre. Takto vytvorené impulzy mohli spoľahlivo spínať štvoricu tranzistorov, kde pôvodné tranzistory IGBT typu HGTG20N60A nahradili pre nižšiu cenu použité MOS-FET, typu IPW60R045CP. Toto prevedenie sa doposiaľ osvedčilo.

Menič bol ďalej vybavený pomocným obvodom riadenia, ktorého úlohou bolo vyhodnocovať merané hodnoty veličín, napätia a prechádzajúceho prúdu, vyskytujúcich sa na výstupe zariadenia a vhodným spôsobom, reagovať na zmenu parametrov zadávaných obsluhou, či v prípade vzniku poruchy. Výstup z obvodu bol pripojený do vstupu SG3525, v ktorom dochádzalo k zmene striedy pre spínanie tranzistorov a k celkovej regulácii prenášaného výkonu.



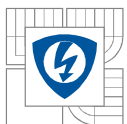
Pôvodné meranie prúdu bolo realizované pomocou meracieho transformátora prúdu. V konečnom riešení zväračky bolo nahradené za dva bočníky, pričom jeden bočník bol určený pre režim prúdového zdroja a druhý pre režim napäťového zdroja. Dôvod použitia takéhoto riešenia bol, v spoľahlivejšom vyhodnocovaní signálu. Dva použité bočníky boli preto, aby bola získaná spoľahlivá informácia o veličine pre každý režim zvlášť. Riešenie jedným bočníkom pre veľký rozsah medzi režimom prúdu a režimom zdroja napätia by bol nepresný a zároveň by nebolo možné použiť nízko prúdový bočník pri zváraní pretože by to nevydržal účinok prechádzajúcej veľkej hodnoty prúdu. Rovnako tak nebolo možné použiť vysoko prúdový bočník na meranie malých prúdov v režime zdroja napätia, pretože vzniknutý úbytok na ňom by nepodal žiadnu informáciu riadiacim obvodom. Vďaka tomu, že zariadenie mohlo pracovať v dvoch režimoch, čím sa zvýšila jeho efektivita využitia, bolo potrebné bočníky medzi sebou prepínať, čo nesie so sebou značné nároky na vlastnosti vypínača, ktorý by to umožňoval.

Vzhľadom na to, že zbieranie vedomostí a stavba celého zariadenia trvala pomerne rozsiahle časové obdobie, bol prínos z práce obrovský v podobe nadobudnutia množstva vedomostí a poznatkov v oblasti činnosti, konštrukčného návrhu spínaných zdrojov a s nimi spojenou reguláciou. Zariadenie bolo experimentálne odskúšané a zaťažené s poskytnutím výkonu o hodnote 1,5 kW, čo odpovedá hodnote dodávaného prúdu do záťaže približne 60 A. Do budúcnosti by bolo možné rozšíriť zariadenie o možnosť pracovať v režime zvárania nielen s použitím obalovanej elektródy ale aj s využitím argónu.

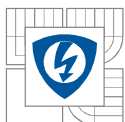


LITERATÚRA

- [1] PATOČKA, Miroslav. *Magetické jevy a obvody ve výkonové elektronice, měřící technice a silnoproudé elektrotechnice*. Vysoké učení technické v Brně: VUTIMUM, 2011. ISBN 978-80-214-4003-6.
- [2] PATOČKA, Miroslav. *VYBRANÉ STATĚ Z VÝKONOVÉ ELEKTRONIKY: Svazek I Tepelné jevy, činný výkon*. čtvrté, upravené. Vysoké učení technické v Brně: Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií Ústav výkonové elektrotechniky a elektroniky, 2010. ISBN 978-80-214-4176-0.
- [3] PATOČKA, Miroslav. *VYBRANÉ STATĚ ZVÝKONOVÉ ELEKTRONIKY: Svazek II Měniče bez impulsního transformátoru*. čtvrté, upravené. Vysoké učení technické v Brně: Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií Ústav výkonové elektrotechniky a elektroniky, 2010. ISBN 978-80-214-4177-0.
- [4] KONSTANTINOVICH ROZANOV, Jurij. *ZÁKLADY VÝKONOVÉ MĚNIČOVÉ TECHNIKY*. Praha: SNTL, 1985. ISBN L25-B3-IV-31/52 576.
- [5] SVARINFO: MAGAZÍN PRAKTICKÉHO SVAŘOVÁNÍ. SVARWEB: PORTAL VAŠEHO SVAŘOVÁNÍ[online]. 2005 [cit. 2014-11-19]. Dostupné z: <http://www.svarbazar.cz>
- [6] *Dokumentácia E71/33/32-3C90*. Ferroxcube, 2008. Dostupné z: <http://www.tme.eu/sk/Document/dd9523903096165e9e485f5e65d39a3e/e713332.pdf>
- [7] Electronics components. *ON-LINE katalóg elektronických súčiastok* [online]. 1990 [cit. 2014-11-19]. Dostupné z: www.tme.sk
- [8] *Dokumentácia 60R045CP*. Infineon, 2006. Dostupné z: <http://html.alldatasheet.com/html-pdf/153053/INFINEON/IPW60R045CP/388/1/IPW60R045CP.html>
- [9] *Dokumentácia DSEI 2x121-02A*. IXYS, 2000. Dostupné z: <http://www.tme.eu/sk/Document/e3eb938bc5d56aa60576846c4db66a6c/DSEI2x121-02A.pdf>
- [10] Prodej feritových jader a eln. součástek. *E-shop feritových jader a příslušenství k nim* [online]. 2010 [cit. 2014-11-19]. Dostupné z: www.ferity.cz
- [11] MALINA, Václav. *Poznáváme elektroniku VI od A do Z*. 1. vyd. České Budějovice: Koop, 2001, 287 s. ISBN 80-7232-146-3.
- [12] MALINA, Václav. *Poznáváme elektroniku I*. 2. vyd. České Budějovice: KOPP, c1994, 173 s. ISBN 80-858-2825-1.
- [13] MALINA, Václav. *Poznáváme elektroniku II*. 1. vyd. České Budějovice: KOPP, c1995, 193 s. ISBN 80-858-2855-3.
- [14] MALINA, Václav. *Poznáváme elektroniku III*. dotisk 1. vyd. České Budějovice: Kopp, 2003, 240 s. ISBN 80-858-2887-1.
- [15] MALINA, Václav. *Poznáváme elektroniku IV*. 1. vyd. České Budějovice: KOPP, c1998, 220 s. ISBN 80-723-2173-0.
- [16] MALINA, Václav. *Poznáváme elektroniku V*. 1. vyd. České Budějovice: KOPP, c2000, 343 s. ISBN 80-723-2114-5.



- [17] MALINA, Václav. *Poznáváme elektroniku VIII.* 1. vyd. České Budějovice: Kopp, 2006, 430 s. ISBN 80-723-2271-0.
- [18] TKOTZ, Klaus. *Příručka pro elektrotechnika.* 2. dopl. vyd. Praha: Europa-Sobotáles, 2006, 623 s. ISBN 80-867-0613-3.
- [19] Vytvoření citací. *Copyright 2012 Citace.com a Ústřední knihovna VUT v Brně* [online]. 2012 [cit. 2014-11-19]. Dostupné z: <http://citace.lib.vutbr.cz/>



PRÍLOHY

• PRÍLOHA A Katalógový list použitých MOS-FET tranzistorov, typu IPW60R45CP



IPW60R045CP

CoolMOS® Power Transistor

Features

- Worldwide best $R_{ds,on}$ in TO247
- Ultra low gate charge
- Extreme dv/dt rated
- High peak current capability
- Qualified according to JEDEC¹⁾ for target applications
- Pb-free lead plating; RoHS compliant

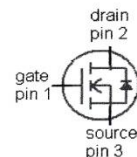
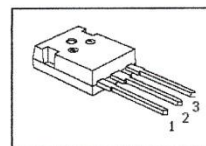
Product Summary

$V_{DS} @ T_{jmax}$	650	V
$R_{DS(on),max}$	0.045	Ω
$Q_{g,typ}$	150	nC

CoolMOS CP is specially designed for:

- Hard switching SMPS topologies

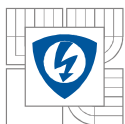
PG-TO247-3-1



Type	Package	Ordering Code	Marking
IPW60R045CP	PG-TO247-3-1	SP000067149	6R045

Maximum ratings, at $T_j=25^\circ\text{C}$, unless otherwise specified

Parameter	Symbol	Conditions	Value	Unit
Continuous drain current	I_D	$T_C=25^\circ\text{C}$	60	A
		$T_C=100^\circ\text{C}$	38	
Pulsed drain current ⁽²⁾	$I_{D,pulse}$	$T_C=25^\circ\text{C}$	230	
Avalanche energy, single pulse	E_{AS}	$I_D=11\text{ A}$, $V_{DD}=50\text{ V}$	1950	mJ
Avalanche energy, repetitive $t_{AR}^{(2),3)}$	E_{AR}	$I_D=11\text{ A}$, $V_{DD}=50\text{ V}$	3	
Avalanche current, repetitive $t_{AR}^{(2),3)}$	I_{AR}		11	A
MOSFET dv/dt ruggedness	dv/dt	$V_{DS}=0\ldots 480\text{ V}$	50	V/ns
Gate source voltage	V_{GS}	static	± 20	V
		AC ($f>1\text{ Hz}$)	± 30	
Power dissipation	P_{tot}	$T_C=25^\circ\text{C}$	431	W
Operating and storage temperature	T_j , T_{stg}		-55 ... 150	$^\circ\text{C}$
Mounting torque		M3 and M3.5 screws	60	Ncm



• **PRÍLOHA B Katalógový list použitých usmerňovacích diód typu DSEI 2x123 A**

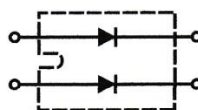


**Fast Recovery
Epitaxial Diode (FRED)**

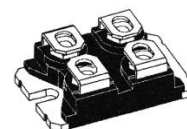
DSEI 2x 121

**$I_{FAVM} = 2x\ 123\ A$
 $V_{RRM} = 200\ V$
 $t_{rr} = 35\ ns$**

V_{RSM} V	V_{RRM} V	Type
200	200	DSEI 2x 121-02A



miniBLOC, SOT-227 B
E72873

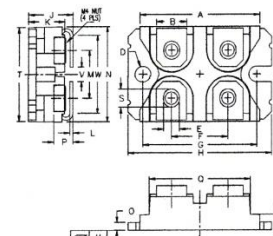


Symbol	Test Conditions	Maximum Ratings (per diode)	
I_{FRMS} I_{FAVM} I_{FRM}	$T_{VJ} = T_{VJM}$ $T_C = 70^\circ C$; rectangular, $d = 0.5$ $t_p < 10\ \mu s$; rep. rating, pulse width limited by T_{VJM}	150 123 600	A A A
I_{FSM}	$T_{VJ} = 45^\circ C$; $t = 10\ ms\ (50\ Hz)$, sine $t = 8.3\ ms\ (60\ Hz)$, sine	1200 1300	A A
	$T_{VJ} = 150^\circ C$; $t = 10\ ms\ (50\ Hz)$, sine $t = 8.3\ ms\ (60\ Hz)$, sine	1080 1170	A A
I^2t	$T_{VJ} = 45^\circ C$ $t = 10\ ms\ (50\ Hz)$, sine $t = 8.3\ ms\ (60\ Hz)$, sine	7200 7100	A ² s A ² s
	$T_{VJ} = 150^\circ C$; $t = 10\ ms\ (50\ Hz)$, sine $t = 8.3\ ms\ (60\ Hz)$, sine	5800 5700	A ² s A ² s
T_{VJ}		-40...+150	°C
T_{VJM}		150	°C
T_{stg}		-40...+150	°C
P_{tot}	$T_C = 25^\circ C$	250	W
V_{ISOL}	50/60 Hz, RMS $I_{ISOL} \leq 1\ mA$	2500	V~
M_d	Mounting torque Terminal connection torque (M4)	1.5/13 1.5/13	Nm/lb.in. Nm/lb.in.
Weight		30	g

Features

- International standard package miniBLOC (ISOTOP compatible)
- Isolation voltage 2500 V~
- 2 independent FRED in 1 package
- Planar passivated chips
- Very short recovery time
- Extremely low switching losses
- Low I_{RM} -values
- Soft recovery behaviour

miniBLOC, SOT-227 B

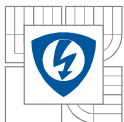


M4 screws (4x) supplied

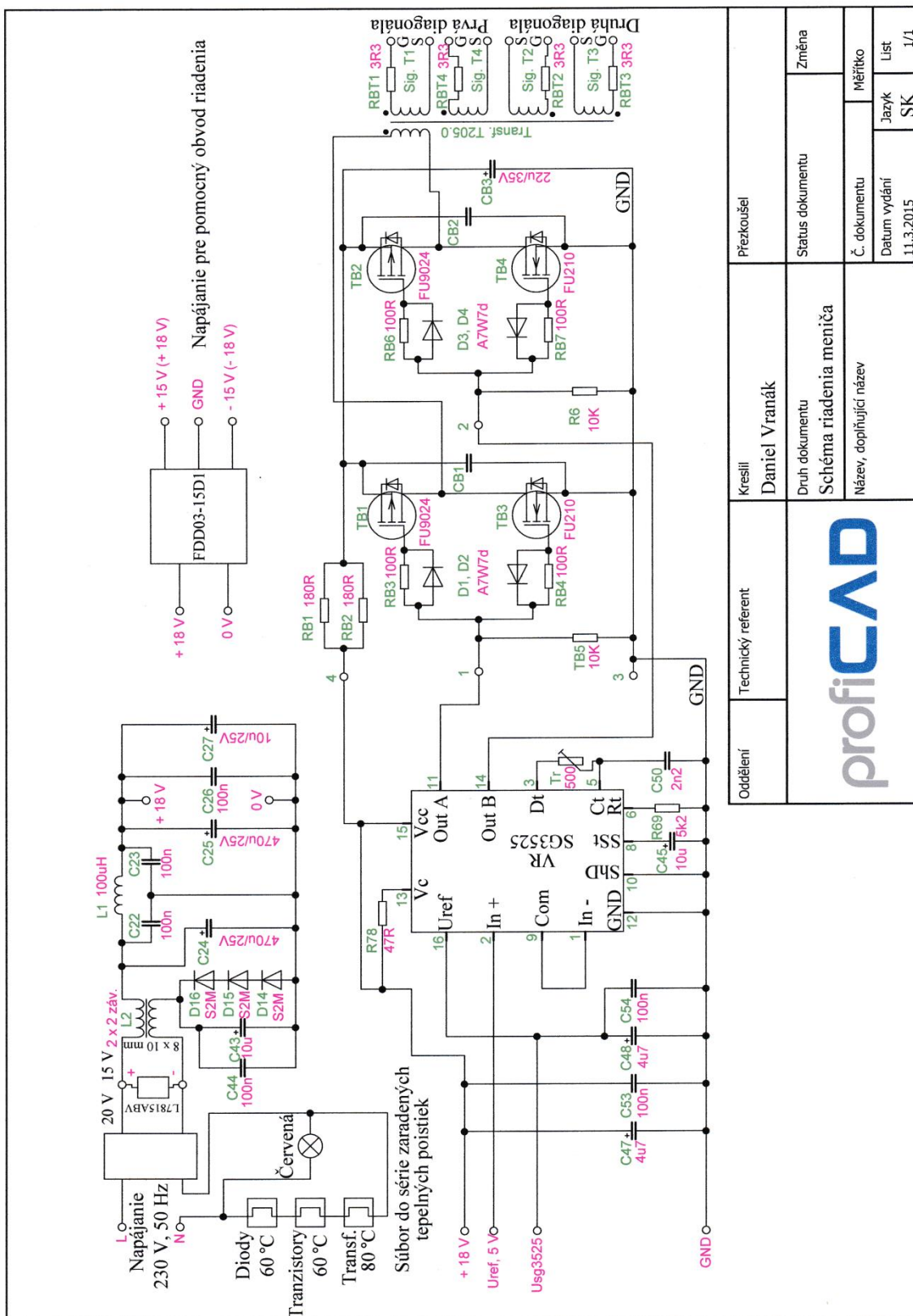
Dim.	Millimeter		Inches	
	Min.	Max.	Min.	Max.
A	31.50	31.88	1.240	1.255
B	7.80	8.20	0.307	0.323
C	4.09	4.29	0.161	0.169
D	4.09	4.29	0.161	0.169
E	4.09	4.29	0.161	0.169
F	14.91	15.11	0.587	0.595
G	30.12	30.30	1.186	1.193
H	37.80	38.20	1.489	1.505
J	11.68	12.22	0.460	0.481
K	8.92	9.60	0.351	0.378
L	0.76	0.84	0.030	0.033
M	12.60	12.85	0.496	0.506
N	25.15	25.42	0.990	1.001
O	1.98	2.13	0.078	0.084
P	4.95	5.97	0.195	0.235
Q	26.54	26.90	1.045	1.059
R	3.94	4.42	0.155	0.174
S	4.72	4.85	0.186	0.191
T	24.59	25.07	0.968	0.987
U	-0.05	0.1	-0.002	0.004
V	3.30	4.57	0.130	0.180
W	0.780	0.830	0.031	0.033

① I_{FAVM} rating includes reverse blocking losses at T_{VJM} , $V_R = 0.8 V_{RRM}$, duty cycle $d = 0.5$
Data according to IEC 60747
IXYS reserves the right to change limits, test conditions and dimensions

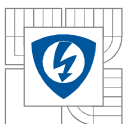
Obr. P.C-1 Zapojenie silovej časti meniča (upravené z[5])



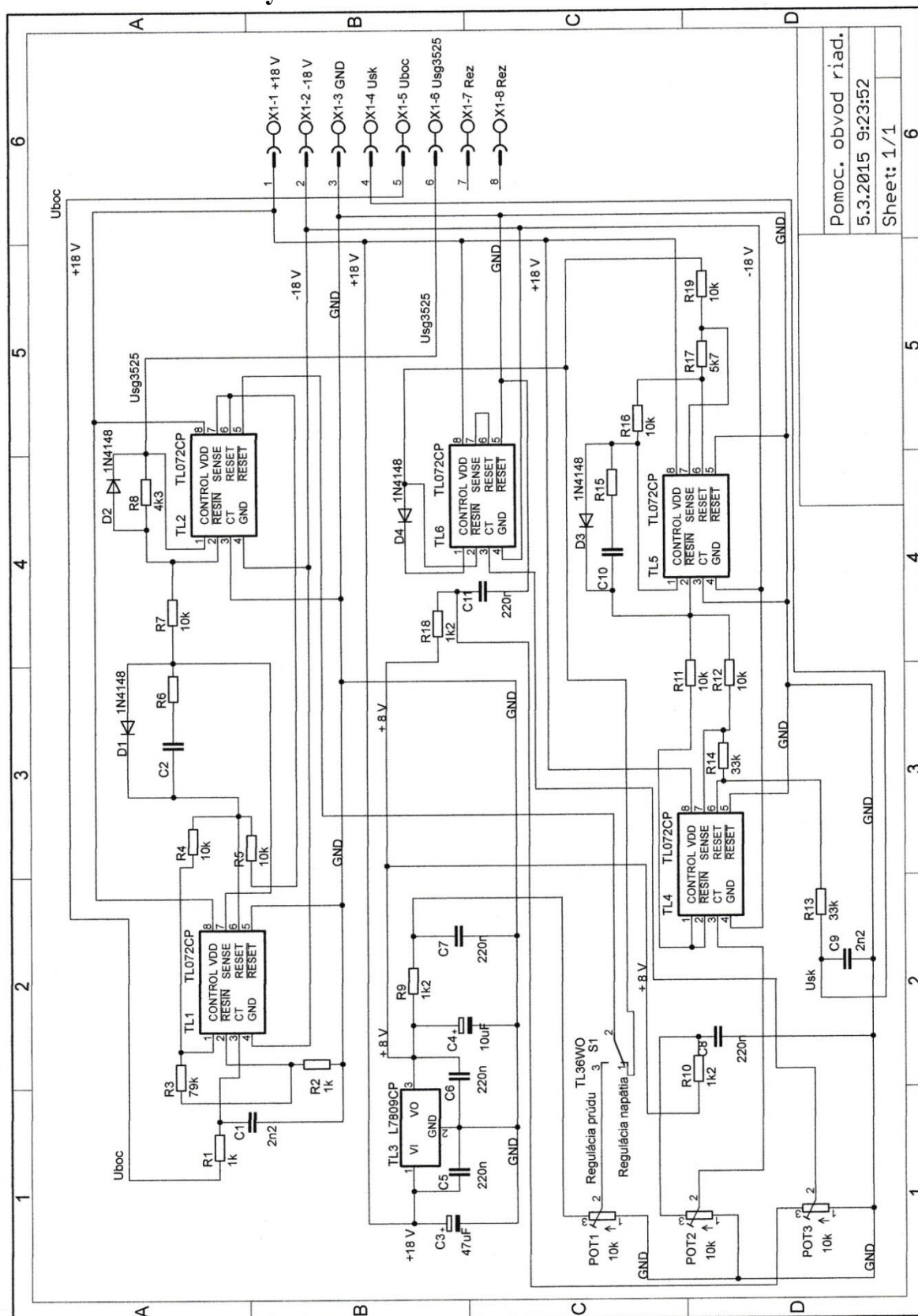
• PRÍLOHA D Zapojenie riadiacich obvodov meniča



Obr. P.D-1 Zapojenie riadiacej časti meniča

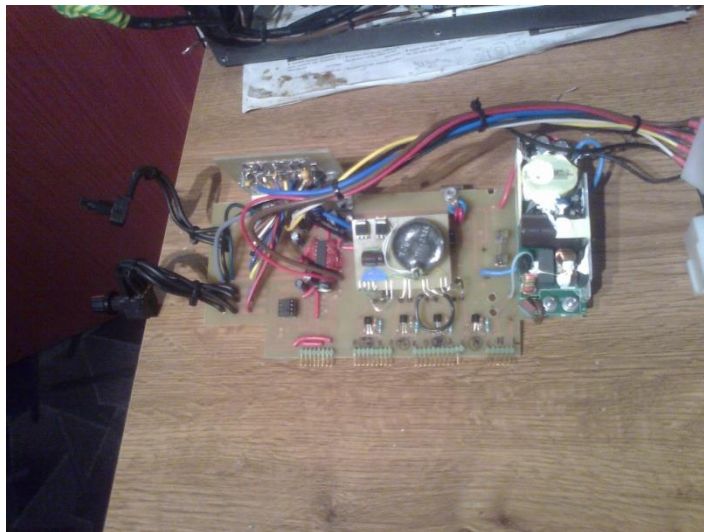


• **PRÍLOHA E Zapojenie pomocného obvodu riadenia meniča, regulačnej slučky**

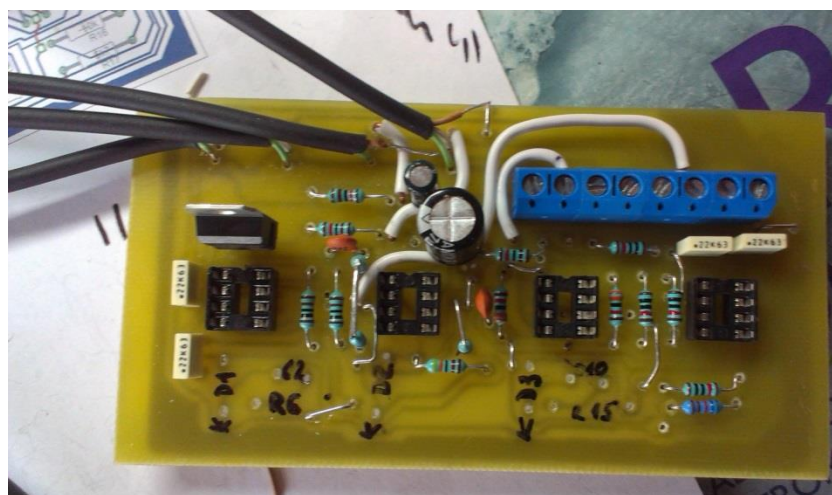


Obr. P.E-1 Zapojenie pomocného obvodu pre riadenie meniča, schéma regulačnej slučky

- PRÍLOHA F Praktická realizácia jednotlivých funkčných blokov meniča**



Obr. P.F-1 Pohľad do riadiacej časti zvaračky spolu s budiacim obvodom

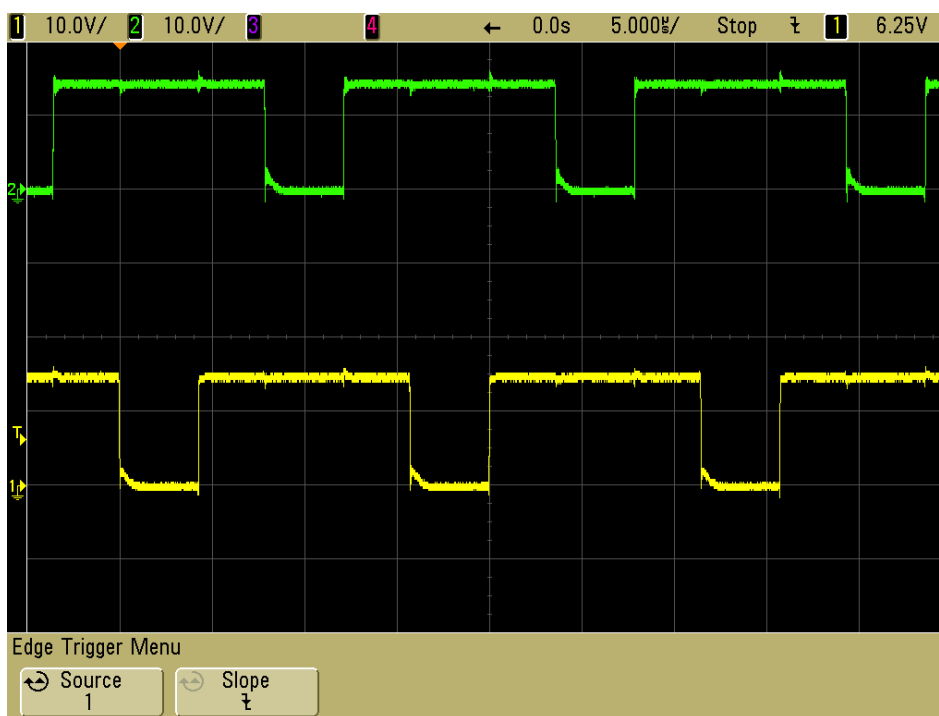


Obr. P.F-2 Prevedenie zhotoveného obvodu regulačnej slučky



Obr. P.F-3 Ukážka konštrukcie silovej časti meniča

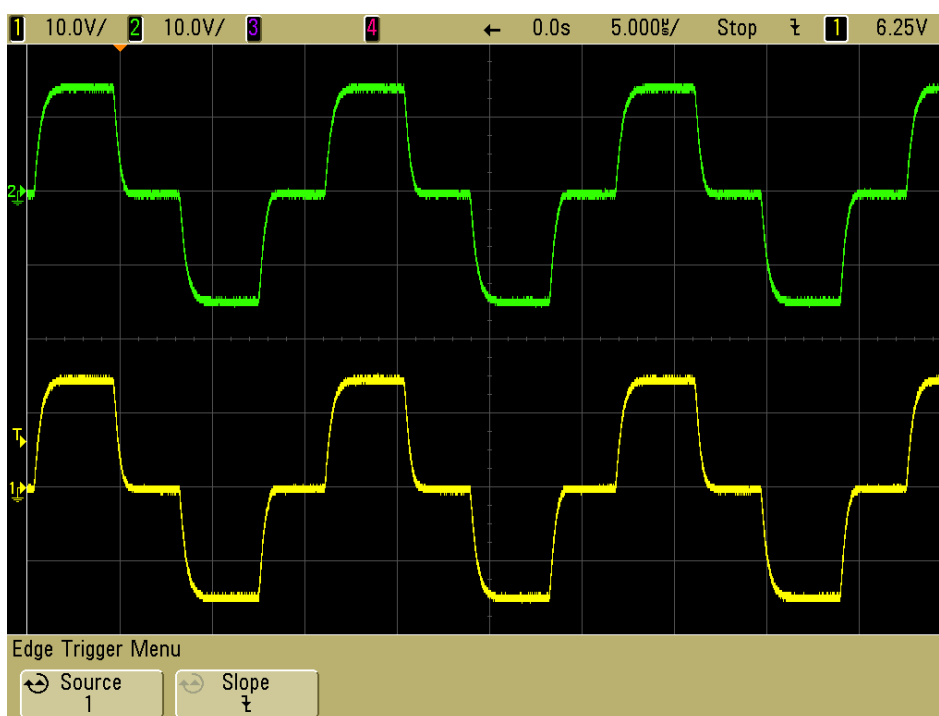
• **PRÍLOHA G Zmerané priebehy signálov pri činnosti skonštruovaného zariadenia**



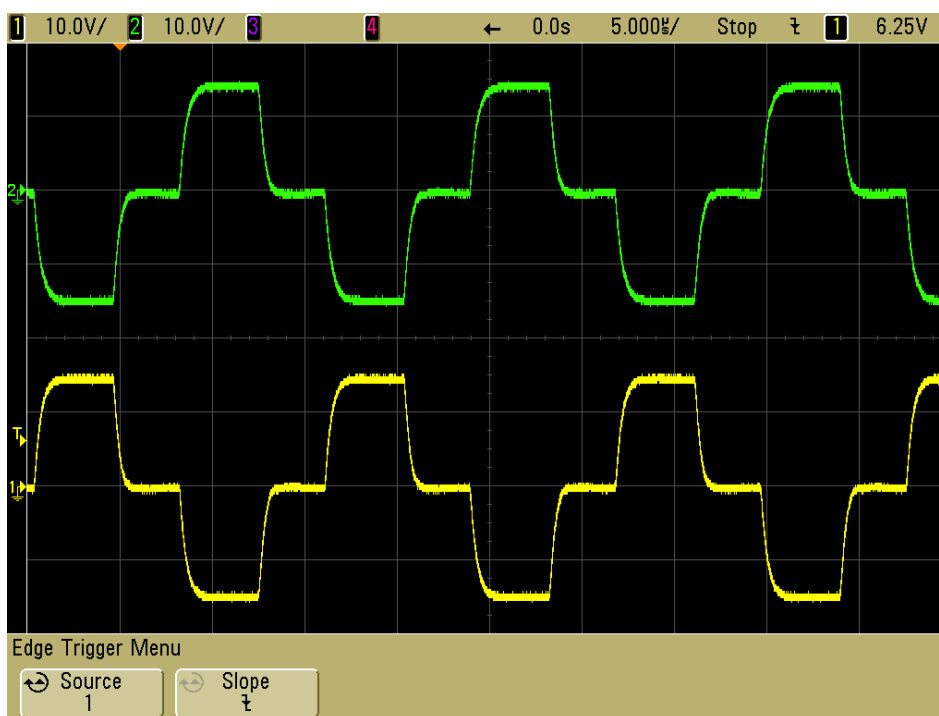
Obr. P.G-1 Priebehy signálov na spoločných kolektoroch budiacich MOS-FET tranzistoroch, z ktorých je napájaný primár budiaceho transformátora T205.0, priebeh napätia na dvojici TB₁ a TB₃ a dvojici TB₂ a TB₄ podľa zapojenia v PRÍLOHE D



Obr. P.G-2 Vykreslené priebehy signálov pri spínaní výkonových tranzistorov typu IPW60R045CP v diagonále, signál pri zopínaní tranzistora T₁ a tranzistora T₄, pri nastavenej minimálnej hodnote striedy, podľa zapojenia v PRÍLOHE C



Obr. P.G-3 Znárodné priebehy signálov pri spínaní výkonových tranzistorov typu IPW60R045CP v uhlopriečke, signál pri zopínaní a vypínaní tranzistora T_2 a tranzistora T_3 , pri nastavenej striede približne s hodnotou 0,3, rozlíšenie označenia tranzistorov je uvedené v PRÍLOHE C



Obr. P.G-4 Zobrazené priebehy signálov pri spínaní dvoch výkonových tranzistorov typu IPW60R045CP umiestnených v schéme nachádzajúcej sa v PRÍLOHE C ako dva spodné, susedné, signál pri zopínaní tranzistora T_3 a tranzistora T_4 , pri nastavenej striede približne s hodnotou 0,3