



# 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

## SVAŘOVACÍ ZDROJ

WELDING INVERTER

### DIPLOMOVÁ PRÁCE

MASTER'S THESIS

### AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Bc. Ján Lizúch

### VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

Ing. Jan Martiš, Ph.D.

BRNO 2024



# Diplomová práce

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

Ústav výkonové elektrotechniky a elektroniky

**Student:** Bc. Ján Lizúch

**ID:** 220838

**Ročník:** 2

**Akademický rok:** 2023/24

**NÁZEV TÉMATU:**

## Svařovací zdroj

### POKYNY PRO VYPRACOVÁNÍ:

1. Uveďte charakteristiky svařovacích oblouků jak pro klasické svařování obalenou elektrodou tak i pro svařování metodou MIG/MAG. Stanovte potřebné konkrétní parametry navrhovaného svařovacího zdroje.
2. Porovnejte různé topologie silových částí DC/DC měničů, které jsou vhodné pro svařovací zdroje. Vyberte nejvhodnější topologii pro navrhovaný zdroj.
3. Navrhněte schéma zapojení silové části svařovacího zdroje, vyberte výkonové polovodiče, určete ztrátové výkony, dimenzujte chlazení.
4. Navrhněte schéma zapojení řídicí části svařovacího zdroje včetně budičů tranzistorů.
5. Proveďte návrh desek plošných spojů.
6. Svářečku zkonstruujte, oživte ji a proveďte ověřovací měření (oscilogramy, stabilita regulace apod).

### DOPORUČENÁ LITERATURA:

- [1] PATOČKA, M.: Magnetické jevy a obvody ve výkonové elektronice, měřicí technice a silnoproudé elektrotechnice. 1. vyd. Brno: VUTIUM, 2011. 564 s. ISBN 978-80-214-4003-6.
- [2] PATOČKA, M.: Vybrané stati z výkonové elektroniky, svazek 2. Vysoké učení technické v Brně, FEKT, UVEE, 2005. 172 s.
- [3] BARTOŠ, J., BERNAS, J., VEINBERG, J.: Obloukové svařování. 1. vyd. Ostrava: ZEROSS, 1994. 216 s. ISBN 80-85771-21-7.

**Termín zadání:** 5.2.2024

**Termín odevzdání:** 20.5.2024

**Vedoucí práce:** Ing. Jan Martiš, 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 sa zaoberá teoretickým rozborom, návrhom a konštrukciou zväracieho zdroja. V úvode práce je popísaný technologický proces zvárania kovových materiálov, rôzne metódy zvárania, ich oblúkové charakteristiky a požiadavky jednotlivých metód na zväracie zdroje. V ďalšej časti práce sú popísané typy a topológie spínaných zdrojov. Na základe teoretických poznatkov je v tejto časti popísaná vhodnosť použitia jednotlivých zapojení pre účel zväracieho invertora. V závere teoretickej časti práce sú z nadobudnutých poznatkov určené parametre zväracieho zdroja, ktorého návrh je popísaný v ďalších kapitolách práce. V nich sú uvedené postupy a výpočty pri návrhu jednotlivých častí zdroja. Sú tu taktiež uvedené schémy zapojenia jednotlivých častí. Pri výkonových polovodičoch je vypočítaný stratový výkon, vďaka čomu je možné dimenzovať chladenie. Praktická stavba a overenie funkcie meniča sú predmetom poslednej časti práce. Sú v nej uvedené namerané priebehy a snímky z termokamery pri záťažovom teste.

## **KĽÚČOVÉ SLOVÁ**

Zváranie, zväracie metódy, zvärací zdroj, spínaný zdroj

## **ABSTRACT**

The aim of a masters thesis is to design components, circuits and to build welding power source. Description and technological process of welding, arc characteristic and welding methods requirements are included in a first part of the thesis. Switching mode power supply topologies are characterized in a next part of the thesis. At the end of a theoretical part, the parameters of welding power source are determined. Its design is described in the next parts of the thesis where calculations and design process of electrical part is described. There are also schematics of circuits shown. In each power part is power dissipation calculated, what is needed to design cooling. Practical build and tests of welding power source are described in the last part of thesis. Measured waveforms and thermal camera images during load test are included in the last part as well.

## **KEYWORDS**

Welding, welding methods, welding power source, switching mode power supply



LIZÚCH, Ján. *Zváračí zdroj*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, Ústav výkonové elektrotechniky a elektroniky, 2024, 141 s. Diplomová práce. Vedúci práce: Ing. Jan Martiš, PhD.





## Vyhlásenie autora o pôvodnosti diela

**Meno a priezvisko autora:** Bc. Ján Lizúch  
**VUT ID autora:** 220838  
**Typ práce:** Diplomová práca  
**Akademický rok:** 2023/24  
**Téma záverečnej práce:** Zvárací zdroj

Vyhlasujem, že svoju záverečnú prácu som vypracoval samostatne pod vedením vedúcej/cého záverečnej práce, s využitím odbornej literatúry a ďalších informačných zdrojov, ktoré sú všetky citované v práci a uvedené v zozname literatúry na konci práce.

Ako autor uvedenej záverečnej práce ďalej vyhlasujem, že v súvislosti s vytvorením tejto záverečnej práce som neporušil autorské práva tretích osôb, najmä som nezasiahol nedovoleným spôsobom do cudzích autorských práv osobnostných a/alebo majetkových a som si plne vedomý následkov porušenia ustanovenia § 11 a nasledujúcich autorského zákona Českej republiky č. 121/2000 Sb., o práve autorskom, o právach súvisiacich s právom autorským a o zmene niektorých zákonov (autorský zákon), v znení neskorších predpisov, vrátane možných trestnoprávných dôsledkov vyplývajúcich z ustanovenia časti druhej, hlavy VI. diel 4 Trestného zákonníka Českej republiky č. 40/2009 Sb.

Brno .....

.....

podpis autora\*

---

\*Autor podpisuje iba v tlačenej verzii.



## POĎAKOVANIE

Rád by som poďakoval vedúcemu diplomovej práce pánovi Ing. Jánovi Martišovi, Ph.D. za odborné vedenie, konzultácie, trpezlivosť, cenné a podnetné návrhy k práci.



# Obsah

Úvod	19
Cíle práce	21
<b>1 Oblúkové zváranie</b>	<b>23</b>
1.1 Elektrický oblúk . . . . .	23
<b>2 Parametre zváracích zdrojov</b>	<b>25</b>
2.1 Napätie naprázdno . . . . .	25
2.2 Pracovné napätie . . . . .	25
2.3 Zatažovateľ . . . . .	25
2.4 Trvalý a menovitý zvárací prúd . . . . .	26
2.5 Typ zváracieho zdroja . . . . .	26
2.5.1 Napätový zvárací zdroj . . . . .	27
2.5.2 Prúdový zvárací zdroj . . . . .	27
<b>3 Metódy oblúkového zvárania</b>	<b>29</b>
3.1 Metóda MMA . . . . .	29
3.2 Metóda TIG . . . . .	31
3.3 Metóda MIG/MAG . . . . .	32
3.4 Metóda SAW . . . . .	34
<b>4 Faktory pri výbere vhodnej zváraciej metódy</b>	<b>35</b>
4.1 Zloženie zváraného materiálu . . . . .	35
4.2 Hrúbka základného materiálu . . . . .	36
4.3 Technologická a ekonomická náročnosť . . . . .	36
<b>5 Zváracie zdroje</b>	<b>39</b>
5.1 Rotačné zdroje . . . . .	39
5.2 Transformátorové zdroje . . . . .	39
5.2.1 Striedavé transformátorové zdroje . . . . .	39
5.2.2 Jednosmerné transformátorové zdroje . . . . .	40
5.3 Spínané zváracie zdroje . . . . .	40
<b>6 Topológie spínaných zdrojov</b>	<b>43</b>
6.1 Jednočinný priepustný menič . . . . .	43
6.2 Dvojčinný priepustný menič . . . . .	45
6.3 Blokujúci menič . . . . .	49
6.4 Rezonančný menič LLC . . . . .	52

<b>7</b>	<b>Návrh zväracieho zdroja</b>	<b>55</b>
7.1	Volba parametrov a topológie zväracieho zdroja . . . . .	55
7.2	Návrh meniča . . . . .	56
7.2.1	Návrh transformátora . . . . .	56
7.2.2	Vstupný usmerňovač a medziobvod . . . . .	60
7.2.3	Vstupný filter a softstart . . . . .	63
7.2.4	Výstupný usmerňovač a filter . . . . .	64
7.2.5	Tranzistorový menič . . . . .	67
7.2.6	Budič tranzistorov . . . . .	69
7.3	Meracie obvody . . . . .	72
7.3.1	Meranie napätia medziobvodu $U_d$ . . . . .	73
7.3.2	Meranie výstupného napätia $U_z$ . . . . .	74
7.3.3	Meranie primárneho prúdu $I_1$ . . . . .	75
7.3.4	Meranie výstupného prúdu $I_z$ . . . . .	76
7.3.5	Meranie teploty chladičov . . . . .	77
7.3.6	Meranie prúdu motora podávača drôtu . . . . .	79
7.4	Dimenzovanie chladenia . . . . .	79
7.5	Riadiaca časť . . . . .	80
7.5.1	Mikrokontrolér . . . . .	81
7.5.2	Spínač horáka . . . . .	83
7.5.3	Plynový ventil . . . . .	84
7.6	Pomocné zdroje . . . . .	85
7.6.1	Napájací zdroj riadiacej časti a budičov . . . . .	85
7.6.2	Napájací zdroj externých obvodov . . . . .	86
7.6.3	Transformátor . . . . .	86
7.6.4	Výstupný usmerňovač a filter . . . . .	89
7.6.5	Vstupný filter, medziobvod a výkonová časť . . . . .	89
7.6.6	Riadiace obvody . . . . .	92
<b>8</b>	<b>Konštrukcia zdroja</b>	<b>93</b>
8.1	Návrh plošných spojov . . . . .	93
8.2	Zloženie a oživenie pomocného zdroja . . . . .	94
8.3	Zloženie a oživenie zväracieho meniča . . . . .	96
8.3.1	Osadenie plošných spojov a oživenie periférií . . . . .	96
8.3.2	Výroba transformátora a tlmivky . . . . .	98
8.3.3	Osadenie a test budiča tranzistorov . . . . .	100
8.3.4	Test meniča pri plnom napätí medziobvodu . . . . .	103
8.3.5	Teplotné merania . . . . .	109

Záver	113
Literatúra	115
Zoznam symbolov a skratiek	119
A Bloková schéma zvracieho zdroja	122
B Plošný spoj výkonovej a riadiacej časti meniča	124
C 3D model plošného spoja výkonovej a riadiacej časti meniča	126
D Plošný spoj budičov tranzistorov	127
E 3D model plošného spoja budičov tranzistorov	129
F Plošný spoj vstupného filtra	131
G 3D model plošného spoja vstupného filtra	133
H Plošný spoj kondenzátorov	135
I 3D model plošného spoja kondenzátorov	137
J Plošný spoj pomocného zdroja	139
K 3D model plošného spoja pomocného zdroja	141





# Zoznam obrázkov

1.1	VA charakteristika elektrického oblúku. [2]	24
2.1	VA charakteristika elektrického oblúku a napätového zvaracieho zdroja.	27
2.2	VA charakteristika elektrického oblúku a prúdového zvaracieho zdroja.	28
3.1	Základný princíp zvaracej metódy MMA. [3]	29
3.2	Základný princíp zvaracej metódy TIG. [4]	31
3.3	Základný princíp zvaracej metódy MIG/MAG. [4]	32
3.4	Základný princíp zvaracej metódy SAW. [5]	34
4.1	Prehľad zvaracích metód a vhodnosti ich použitia [6]	35
6.1	Jednočinný priepustný menič s dvoma spínačmi [8]	43
6.2	Charakteristické priebehy veličín v jednočinnom meniči [8]	44
6.3	Dvojčinný priepustný menič [8]	45
6.4	Charakteristické priebehy veličín v dvojčinnom meniči [8]	47
6.5	Jednočinný blokujúci menič [8]	49
6.6	Charakteristické priebehy veličín v blokujúcom meniči [8]	50
6.7	Rezonančný menič [10]	52
6.8	Charakteristické priebehy veličín v rezonančnom meniči [11]	53
7.1	Zjednodušená bloková schéma zvaracieho meniča	56
7.2	Schéma medziobvodu s LC filtrom	63
7.3	Schéma vstupného EMI filtra so softstartom	64
7.4	Zapojenie tranzistorov v meniči	68
7.5	Sekundárna časť budiča tranzistorov	70
7.6	Primárna časť budiča tranzistorov	71
7.7	Logická časť budiča tranzistorov	72
7.8	Obvod merania napätia medziobvodu	73
7.9	Obvod merania výstupného napätia	75
7.10	Obvod merania primárneho prúdu	76
7.11	Obvod merania výstupného prúdu	77
7.12	Obvod merania teploty	78
7.13	Obvod merania prúdu motoru	79
7.14	Schéma radenia meniča pomocou PI regulátorov v napätovom móde	80
7.15	Schéma radenia meniča v prúdovom móde	81
7.16	Namapovanie pinov mikrokontroléra	82
7.17	Schéma zapojenia mikrokontroléra	83
7.18	Obvod spínača horáka	84
7.19	Obvod spínania ventilu	84
7.20	Napájací zdroj riadiacej časti a budičov	85
7.21	Vstupný filter a medziobvod	91

7.22	Riadiaca a výstupná časť pomocného zdroja . . . . .	92
8.1	Priebeh budiaceho signálu tranzistora . . . . .	94
8.2	Priebeh napätia $U_{DS}$ na výkonovom tranzistore . . . . .	95
8.3	Zostavený pomocný zdroj . . . . .	95
8.4	Trojfázový vstupný filter . . . . .	96
8.5	Chladič s pripravenými výkonovými prvkami na teplovodivých pod- ložkách . . . . .	97
8.6	Ožiovovanie a testovanie periférií riadiacej časti . . . . .	97
8.7	Výkonový transformátor . . . . .	98
8.8	Výkonová filtračná tlmivka . . . . .	99
8.9	Osadený budič tranzistorov . . . . .	100
8.10	Priebeh budiaceho signálu hradla výkonového tranzistora . . . . .	101
8.11	Priebeh nábežnej hrany riadiaceho signálu voči signálu hradla tranzistora	102
8.12	Priebeh dobežnej hrany riadiaceho signálu voči signálu hradla tranzistora	102
8.13	Menič pri oživovaní . . . . .	103
8.14	Priebehy napätí a prúdov v meniči pri napätí medziobvodu $U_d = 250 V$	104
8.15	Priebeh výstupného prúdu pri skokovej zmene . . . . .	105
8.16	Prekmit napätia na sekundárnej dióde pri menovitom výkone . . . . .	106
8.17	Priebeh napätia na záťažovom rezistore prúdového transformátora . . .	107
8.18	Zvlnenie prúdu na tlmivke pri výstupnom prúde $120 A$ . . . . .	108
8.19	Teplotné meranie výkonového transformátora a diódového bloku . . .	109
8.20	Teplotné meranie plošného spoja s výkonovou a riadiacou časťou . . .	110
8.21	Teplotné meranie umelej záťaže pri menovitom výkone . . . . .	111
A.1	Bloková schéma zväracieho zdroja . . . . .	122
B.1	Plošný spoj výkonovej a riadiacej časti meniča . . . . .	124
C.1	3D model plošného spoja výkonovej a riadiacej časti meniča . . . . .	126
D.1	Plošný spoj budičov tranzistorov . . . . .	127
E.1	3D model plošného spoja budičov tranzistorov . . . . .	129
F.1	Plošný spoj vstupného filtra . . . . .	131
G.1	3D model plošného spoja vstupného filtra . . . . .	133
H.1	Plošný spoj kondenzátorov . . . . .	135
I.1	3D model plošného spoja kondenzátorov . . . . .	137
J.1	Plošný spoj pomocného zdroja . . . . .	139
K.1	3D model plošného spoja pomocného zdroja . . . . .	141

# Úvod

Zváranie elektrickým oblúkom je v dnešnej dobe stále veľmi využívané hlavne v strojárskom priemysle. Od svojich počiatkov prešlo veľkou modernizáciou a v dnešnej dobe sa využíva často v automatizovanej forme na zvaracích linkách. Hlavný cieľ tejto práce je návrh, konštrukcia a oživenie zvaracieho zdroja zvolených parametrov, ktoré sú vyvedené na základe teoretickej časti práce.

Prácu je možné rozdeliť do troch väčších celkov. Prvý celok je teoretická časť. V nej je popísané oblúkové zváranie a jeho podstata. Na túto tému nadväzujú ďalšie časti prvého celku, v ktorých je popísaná teória o parametroch zvaracích zdrojov, pričom každý parameter je samostatne rozpísaný. Práca sa ďalej venuje aj typom zvaracích zdrojov s uvedením ich charakteristík.

V teoretickej časti sú taktiež rozobrané jednotlivé typy zvaracích metód a ich požiadavky na zvarací zdroj, podľa čoho je možné určiť vhodnosť zdroja na jednotlivé metódy zvárania.

S metódami zvárania súvisia aj faktory, ktoré treba brať pri výbere vhodnej zvaracej metódy do úvahy. O tom pojednáva štvrtá kapitola práce, v ktorej sú rozobraté najdôležitejšie technologické faktory pri výbere vhodnej zvaracej metódy.

Výsledkom prvého celku práce sú zvolené parametre zdroja, na základe ktorých sa bude navrhovať.

Druhý celok práce tvoria časti, ktoré sa zaoberajú teóriou spínaných zdrojov, výberom vhodnej topológie a samostatným návrhom zvaracieho zdroja podľa zvolených parametrov. V tejto časti je postupne popísaný návrh transformátora, výkonovej časti, dimenzovanie polovodičov a výpočet výstupného filtra. V tomto celku sú taktiež časti o návrhu obvodového riešenia meniča, ktorý pozostáva z mikrokontroléra a okolitých obvodov, ktoré slúžia na budenie tranzistorov, snímanie napätia, prúdu a ovládanie okolitých periférií. Je tu uvedený aj návrh pomocného zdroja.

Tretí celok práce sa zaoberá praktickou konštrukciou a postupným oživením všetkých jeho častí. Je tu podrobne rozpísaný priebeh oživovania pomocného aj hlavného zdroja, meranie priebehov pri záťaži a taktiež meranie termokamerou.



## Cíle práce

1. Uvedte charakteristiky svařovacích oblouků jak pro klasické svařování obalenou elektrodou tak i pro svařování metodou MIG/MAG. Stanovte potřebné konkrétní parametry navrhovaného svařovacího zdroje.
2. Porovnejte různé topologie silových částí DC/DC měničů, které jsou vhodné pro svařovací zdroje. Vyberte nejvhodnější topologii pro navrhovaný zdroj.
3. Navrhněte schéma zapojení silové části svařovacího zdroje, vyberte výkonové polovodiče, určete ztrátové výkony, dimenzujte chlazení.
4. Navrhněte schéma zapojení řídicí části svařovacího zdroje včetně budičů tranzistorů.
5. Provedte návrh desek plošných spojů.
6. Svářečku zkonstruujte, oživte ji a provedte ověřovací měření (oscilogramy, stabilita regulace apod).



# 1 Oblúkové zváranie

Oblúkové zváranie je technologický proces spájania dvoch alebo viacerých kovových materiálov vytvorením väzieb medzi ich atomárnymi štruktúrami pôsobením tepla vytvoreného pomocou elektrického oblúka. Zdrojom energie pre elektrický oblúk je zvárací zdroj, ktorého parametre musia byť prispôsobené fyzikálnej podstate danej zvárackej metódy.

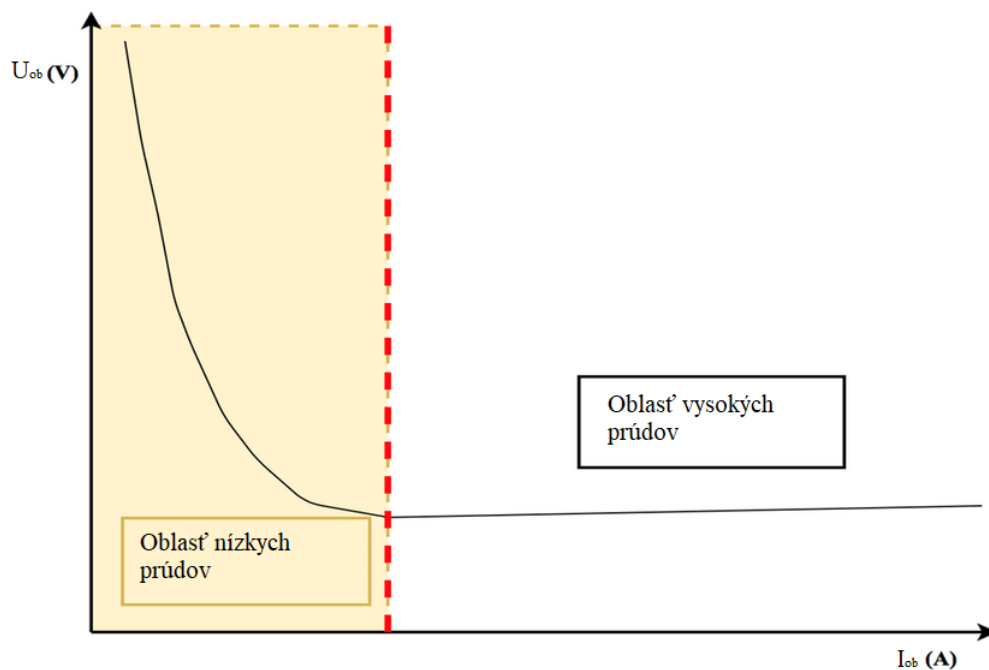
Pri zváraní elektrickým oblúkom, horí oblúk väčšinou medzi zváracou elektródou a základným materiálom. Elektróda je vyrobená z taviaceho alebo netaviaceho sa materiálu, pričom tavitelné elektródy slúžia zároveň ako prídavný materiál, ktorý vytvára zvarový kov a spája natavené zvárané časti základného materiálu. Pri použití netaviacej sa elektródy je potrebné prídavný materiál do zvárannej časti pridávať externe alebo v niektorých prípadoch sa dá zvar vytvoriť roztavením a zliatím základného materiálu.[1]

## 1.1 Elektrický oblúk

Elektrický oblúk je výboj, ktorý horí v plynnom prostredí medzi dvoma elektródami. Je charakteristický extrémne vysokou teplotou a prúdovou hustotou. Pri zváraní vzniká medzi zváracou elektródou a základným materiálom ich dotyk.

Pri dotyku prechádza malou plochou elektródy veľmi vysoký prúd a vďaka prechodovému odporu tepelnými účinkami rozžeraví elektródu spolu so základným materiálom v mieste dotyku. Zahriatím kovu získajú elektróny kinetickú energiu a sú schopné prekonať potenciálovú bariéru. Termoemisiou teda vznikne medzi základným materiálom a zváracou elektródou zvárací oblúk. V niektorých prípadoch, keď sa pri zváraní nemôže dotknúť elektróda základného materiálu, napomáha vytvoreniu oblúku vysokonapäťový pulz.

Pre vhodnú voľbu zváracieho zdroja je taktiež potrebné uviesť VA charakteristiku elektrického oblúku, ktorá je uvedená na obrázku 1.1.



Obr. 1.1: VA charakteristika elektrického oblúku. [2]

Ľavá časť grafu, kde oblúkové napätie strmo klesá, platí pre oblasť nízkych prúdov. Pri oblúkovom zváraní sa však oblúkové napätie pohybuje v pravej časti grafu, ktorá sa dá popísať rovnicou 1.1. Rovnica nepopisuje oblúkové napätie presne, ale ide o približný výpočet, ktorý je však pre účely v zvaracej technike dostačujúci.

$$U_{ob} = 20 + 0.04 \cdot I \text{ [V, A]} \quad (1.1)$$

Z charakteristiky elektrického oblúka a podľa použitej zvaracej metódy sa dajú odvodiť požiadavky na parametre zvaracieho zdroja, ktoré sú popísané v kapitole 2



## 2 Parametre zváracích zdrojov

Vďaka vhodnej voľbe parametrov zváracieho zdroja sa dá dosiahnuť vysoká kvalita zváraného spoja. Voľba parametrov je najdôležitejšou súčasťou návrhu zváracieho zdroja, pretože týmto procesom sa zdroj dimenzuje na jeho použitie, či už pre neprofesionálne zváranie alebo ako prístroj, ktorý je navrhnutý pre profesionálne použitie.

### 2.1 Napätie naprázdno

Napätie naprázdno je napätie ktoré je namerané na výstupných svorkách zváracieho zdroja pri behu naprázdno, teda keď nehorí oblúk a obvodom netečie žiadny prúd. Z dôvodu úrazu elektrickým prúdom je toto napätie obmedzené normou pri zdrojoch striedavého prúdu na efektívnu hodnotu 80 V a pri zdrojoch jednosmerného prúdu na maximálnu hodnotu 100 V.

Čím menšia je hodnota napätia naprázdno, tým menšie je riziko úrazu elektrickým prúdom, no taktiež sa horšie zapaluje oblúk a zhoršuje sa stabilita horenia oblúku. [1]

### 2.2 Pracovné napätie

Pracovné napätie zváracieho zdroja je napätie, ktoré je namerané medzi elektródou a základným materiálom pri horení oblúka, kedy obvodom tečie prúd. Veľkosť tohoto napätia je závislá na dĺžke oblúku, druhu prídavného materiálu a použitom plyne, v ktorom horí oblúk. Obvykle sa pohybuje okolo hodnoty 30 V. [1]

### 2.3 Zatažovateľ

Zatažovateľ určuje pomerom dobu zataženia zváracieho zdroja voči celkovej dobe zváracieho cyklu. Na zdrojoch sa udáva v percentách aspoň pre hodnoty 100 % a 60 %. Dovoľený zatažovateľ sa dá vypočítať podľa rovnice 2.1

$$DZ = \frac{t_z}{t_c} [s, s] \quad (2.1)$$

Kde  $t_z$  predstavuje čas zataženia zdroja a  $t_c$  normalizovaný čas pracovného cyklu, ktorý je normou daný na 10 min.

## 2.4 Trvalý a menovitý zvarací prúd

Trvalý zvarací prúd je maximálny prúd, ktorý môže byť odoberaný zo zvaracieho zdroja nepretržite, teda pri  $DZ = 100 \%$ . Tento údaj má zmysel hlavne pri zvaracích automatoch, kde je potrebné dodávať zvarací prúd a zvarať prakticky nepretržite.

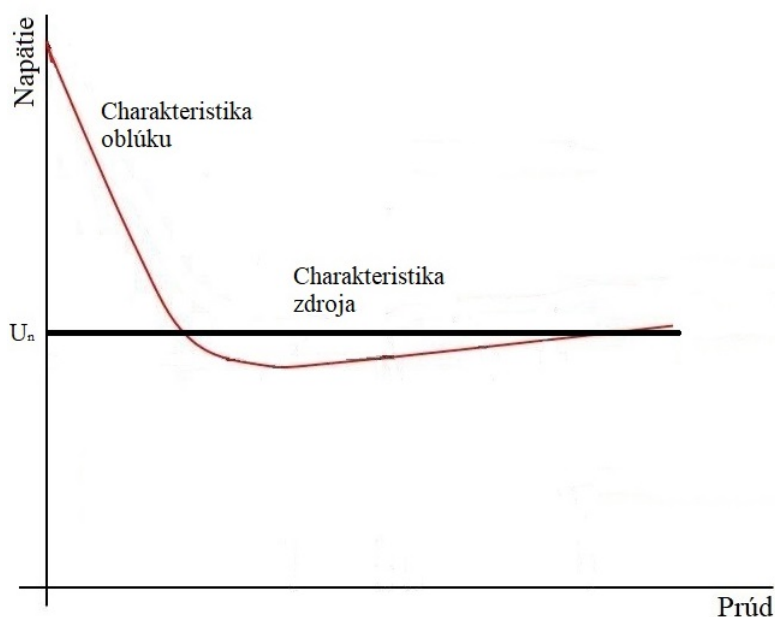
Menovitý zvarací prúd udáva maximálnu hodnotu prúdu, ktorú je možné zo zvaracieho zdroja odoberať pri menovitom zaťažovaní  $DZ = 60 \%$ . Tento parameter má zmysel pri ručnom zvaraní, kedy sa zo zdroja neodoberá zvarací prúd skoro nepretržite a zdroj má čas na ochladenie tepelne namáhaných častí.

## 2.5 Typ zvaracieho zdroja

Všeobecne sa pri oblúkovom zvaraní používajú 2 typy napájacích zdrojov - napätový a prúdový. Tieto dva druhy sa líšia v type spätnej väzby. Prúdový zdroj má zavedenú prúdovú spätnú väzbu a nastavovaným parametrom je prúd, ktorý sa v zdroji reguluje na nastavenú hodnotu. Pri napätovom zdroji je to podobné, ale je zavedená napätová spätná väzba. Nastavovaným parametrom je výstupné napätie, ktoré sa v zdroji reguluje na nastavenú hodnotu. Každý typ je vhodný pre inú metódu a ich bližšie parametre sú popísané v nasledujúcich podkapitolách.

## 2.5.1 Napätový zvärací zdroj

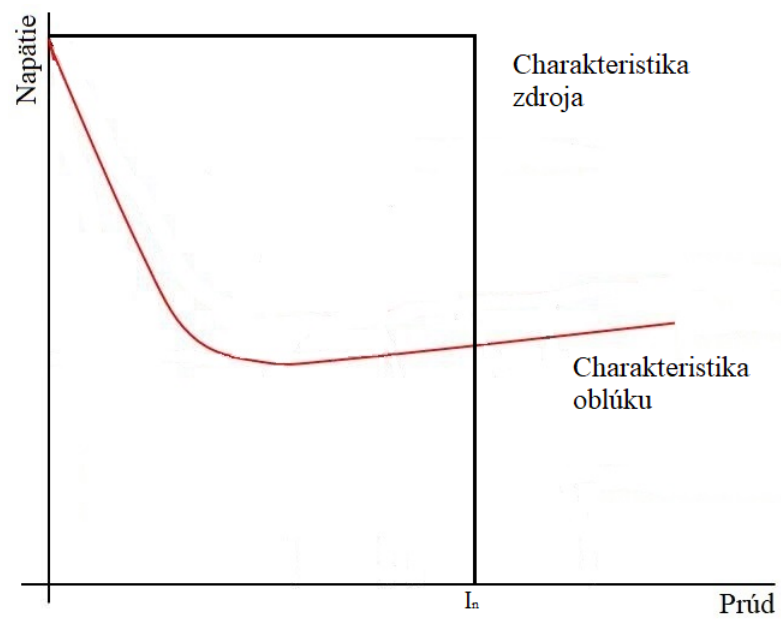
Pri oblúkovom zváraní sa používa napätový napájací zdroj pri zväracích metódach, kde je potrebné dosiahnuť malú dĺžku oblúku a jeho rýchle zhasnutie. VA charakteristika oblúku spolu s charakteristikou napätového zväracieho zdroja je uvedená na obrázku 2.1. Tento typ zdroja je charakteristický malým, ideálne nulovým rozkmitom výstupného napätia, ktoré sa reguluje na určitú nastavenú hodnotu a veľkým rozkmitom výstupného prúdu.



Obr. 2.1: VA charakteristika elektrického oblúku a napätového zväracieho zdroja.

## 2.5.2 Prúdový zvärací zdroj

Prúdový zvärací zdroj sa pri zváraní využíva pri metódach, kde nie je problém s veľkou dĺžkou zhasiacieho oblúku, alebo je vyžadovaná. Prúd je regulovaný na nastavenú hodnotu s malým, ideálne nulovým rozkmitom a veľkým napätovým rozkmitom. Vďaka tomu, zdroju nerobí problém zvärať s postupne sa meniacou dĺžkou oblúku, čo je bežný dej pri ručnom zváraní, kde sa dĺžka oblúku v istej miere s pohybom ruky mení. VA charakteristika oblúku spolu s charakteristikou prúdového zväracieho zdroja je uvedená na obrázku 2.1.



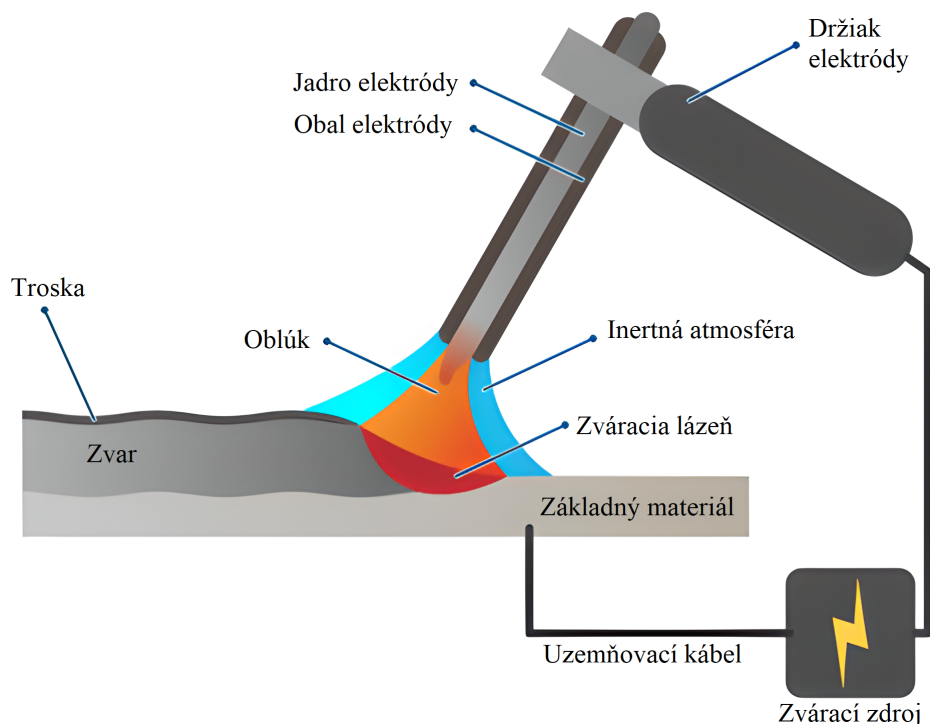
Obr. 2.2: VA charakteristika elektrického oblúku a prúdového zvaracieho zdroja.

## 3 Metódy oblúkového zvarovania

Zváranie elektrickým oblúkom spolu so zvaracími zdrojmi prešli veľkým vývojom a modernizáciou. V dnešnej dobe poznáme niekoľko druhov metód zvarovania elektrickým oblúkom a taktiež mnoho druhov zvaracích zdrojov, ktoré sa líšia hlavne vhodnosťou použitia pre určitú metódu zvarovania. V nasledujúcich kapitolách budú priblížené najpoužívanejšie metódy zvarovania elektrickým oblúkom.

### 3.1 Metóda MMA

Metóda zvarovania Manual Metal Arc (MMA) taktiež nazývaná ako metóda ručného zvarovania elektródou je najrozšírenejšou a najjednoduchšou metódou zvarovania oblúkom. Základný princíp tejto metódy je zobrazený na obrázku 3.1.



Obr. 3.1: Základný princíp zvaracej metódy MMA. [3]

Z obrázku je zrejmé, že sa jedná o jednoduchú metódu, pri ktorej je jeden pól zvaracieho zdroja pripojený ku zvaranému materiálu a na druhý pól je pripevnená obalená zvaracia elektróda do držiaka. Metóda MMA využíva zvarací zdroj s prúdovou charakteristikou. Vďaka širokému sortimentu elektród je na zvaranie možné použiť jednosmerný aj striedavý prúd.

Zváranie prebieha zapálením oblúka medzi elektródou a základným materiálom a následným tavením obalenej elektródy v mieste zvaru. Pri zváraní sa v zvaranej oblasti vytvára troska, ktorú je po vychladnutí potrebné odstrániť. Troska napomáha horeniu oblúka a jej výpary pri zváraní slúžia ako inertná atmosféra, ktorá chráni zvar pred oxidáciou.

Táto metóda sa používa hlavne pre zváranie hrubších kovových materiálov. Je technologicky a ekonomicky nenáročná. Jej nevýhody spočívajú v potrebe odstraňovania trosky a v zvýšenej chybovosti zvarov.

Pri zváraní metódou MMA sa na moderných zváracích zdrojoch využívajú funkcie Hot-Start, Antistick a Arc Force, ktoré výrazne uľahčujú zváranie a pomáhajú zvýšiť kvalitu zvaru.

Funkcia Hot-Start na začiatku zvárania nastaví na elektróde vyšší prúd, aby bolo možné jednoduchšie zapáliť medzi elektródou a základným materiálom oblúk. Po určitom čase je prúd znížený na menovitú nastavenú hodnotu prúdu.

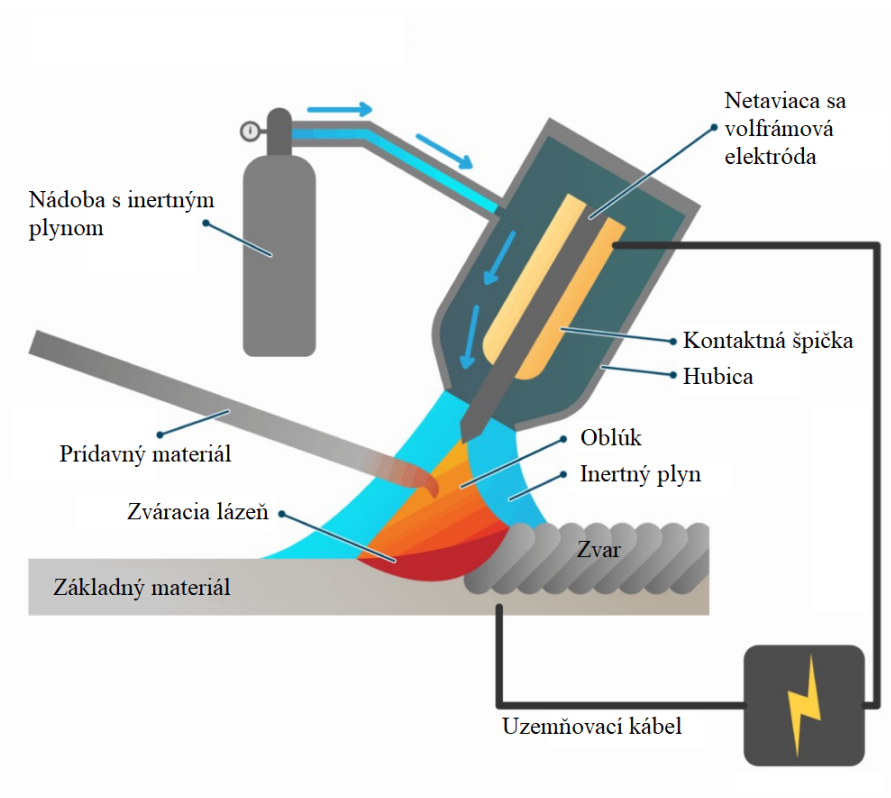
Funkcia Antistick reaguje pri privarení elektródy o základný materiál. Ak by pri tomto stave do elektródy tiekol zvárací prúd, mohla by sa elektróda rozžeraviť a poškodiť, čomu táto funkcia zamedzuje. Pri privarení elektródy sa maximálne zníži zvárací prúd, a potom je možné elektródu jednoducho bez poškodenia odrhnúť od základného materiálu.

Funkcia Arc Force stabilizuje zvárací oblúk a napomáha ku vytvoreniu rovnomerného zvaru. Ak zvárač nevie udržať oblúk medzi elektródou a základným materiálom v konštantnej vzdialenosti, funkcia Arc Force pri predĺžení oblúku uberie prúd, aby sa elektróda tavila menej a pri skrátení oblúku pridá prúd, aby sa elektróda tavila viac, čím sa dĺžka oblúku stabilizuje.

Z hľadiska technickej náročnosti a prípravy na zváranie je metóda MMA veľmi jednoduchá, keďže na zváracom zdroji je potrebné nastaviť v najjednoduchšom prípade iba zvárací prúd. Na základe približného vzťahu  $40 A$  na  $1 mm$  hrúbky zvaracej elektródy, je možné pri tejto metóde vypočítať približný potrebný prúd.

## 3.2 Metóda TIG

Metóda zvarovania Tungsten Inert Gas (TIG) je jednou z technologicky zložitejších a náročnejších metód. Základný princíp tejto metódy je zobrazený na obrázku 3.2.



Obr. 3.2: Základný princíp zvaracej metódy TIG. [4]

TIG využíva netaviacu sa volfrámovú elektródu upevnenú v držiaku a inertný plyn, ktorý je privedený z tlakovej fľaše. Jeden pól zvaracieho zdroja je pripojený na netaviacu sa elektródu a druhý na základný materiál. Medzi elektródou a základným materiálom horí v inertnej atmosfére elektrický oblúk, do ktorého je vkladán prídavný materiál. Táto metóda využíva prúdovú charakteristiku zdroja a používa sa jednosmerný aj striedavý prúd. Ako inertný plyn sa najčastejšie využíva argón.

Výber jednosmerného alebo striedavého zdroja závisí na základnom materiáli, pretože pri niektorých materiáloch ako napr. hliník sa pri zvaraní vytvárajú na povrchu oxidy, ktoré je potrebné odstrániť. Preto sa používa striedavý zdroj, ktorý v jednej polarite prúdu zvara a v opačnej polarite odstraňuje oxid.

Elektrický oblúk vznikne dotykem elektródy so základným materiálom alebo sa využíva technológia SKRATKA HF. S jej použitím je na elektródu privedený vysokonapäťový pulz, vďaka ktorému následne preskočí výboj medzi elektródou a základným materiálom. Tak dôjde ku zapáleniu oblúku bezdotykovo.

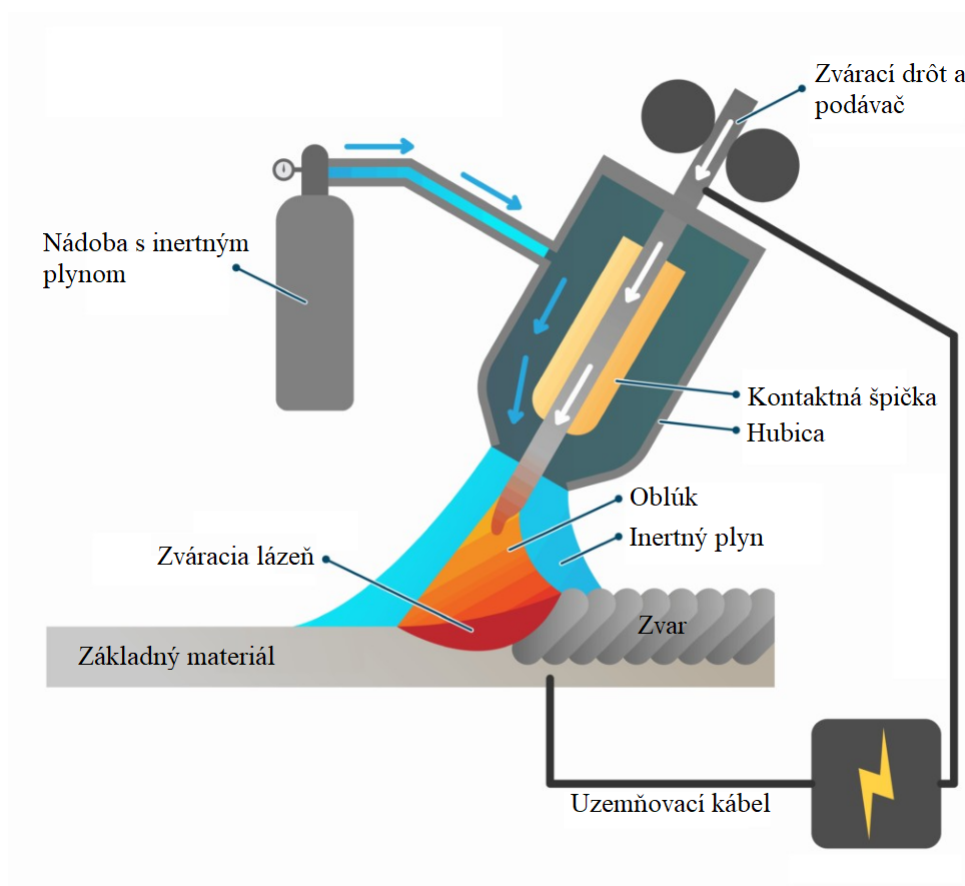
Táto metóda zvarovania je ekonomicky a technologicky náročnejšia a využíva sa najmä na estetické zvary a zvarovanie hliníka. Vďaka veľkému sortimentu základného materiálu je možné zvarovať rôzne druhy kovových materiálov.

Technická náročnosť nastavenia zdroja pri metóde TIG závisí na type zvarovania. Ak je potrebné nastaviť jednosmerný zdroj pre metódu TIG, tak nastavenie je podobné ako pri metóde MMA, pretože sa nastavuje iba prúd a prietok plynu. Pri potrebe nastavenia striedavého zdroja je nastavenie na moderných zdrojoch zložitejšie, pretože je potrebné nastaviť prúd, čas zvarovania v kladnej polarite, čas zvarovania v zápornej polarite a prietok plynu.

### 3.3 Metóda MIG/MAG

Metódy zvarovania Metal Inert Gas (MIG) a Metal Active Gas (MAG) sú v podstate technologicky totožné, líšia sa iba zložením plynu, ktorý sa používa na vytvorenie ochrannej atmosféry.

Základný princíp tejto metódy je zobrazený na obrázku 3.3.



Obr. 3.3: Základný princíp zvaracej metódy MIG/MAG. [4]



Metóda MIG a MAG je založená na princípe automatického posuvu prídavného materiálu, ktorý zabezpečuje podávač zvaracieho drôtu. Zvarací zdroj je zapojený jedným pólom na základný materiál a druhým pólom na hubicu zvaracieho horáka. Zváranie prebieha dotykom prídavného a základného materiálu, medzi ktorými sa vytvorí oblúk v inertnej atmosfére. Prídavný materiál sa taví a je automaticky posúvaný do zvaru. V momente, keď sa prídavný materiál prestane podávať, oblúk zhasne a zváranie sa preruší. Rýchlosť posúvania prídavného materiálu je plne regulovateľná a závisí na napätí zdroja a dĺžke oblúku.

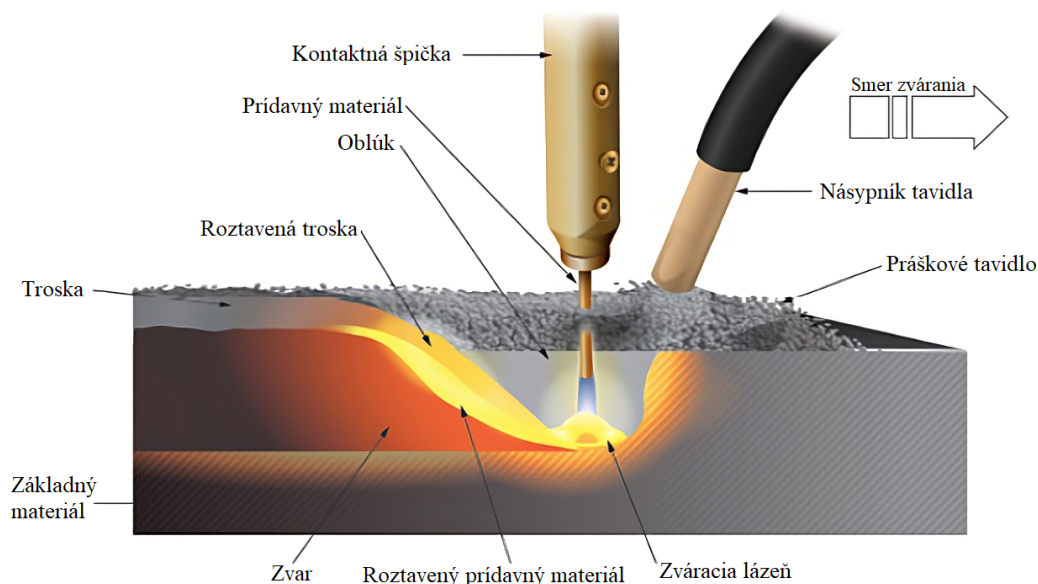
Táto metóda využíva jednosmerný napäťový zvarací zdroj pretože je potrebné rýchle zhasenie oblúka. Podobne ako pri metóde TIG sa využíva inertná atmosféra privedená z tlakovej fľaše. V prípade metódy MIG sa využíva inertný plyn, ktorý slúži iba ako ochranná atmosféra. Je to najčastejšie argón alebo hélium. Metóda MAG využíva aktívny plyn, ktorý sa aktívne podieľa na chemických reakciách v zvaracom procese. Využívajú sa plyny ako oxid uhličitý a jeho zmesi.

Zváranie metódou MIG/MAG patrí medzi technologicky menej náročné a často používané metódy aj v domácich podmienkach. Oproti metóde MMA je metóda MIG/MAG ekonomicky nákladnejšia, ale je možné zvarať aj veľmi tenké materiály, čo je pri MMA problém. Z technologického hľadiska sa pri tejto metóde nevyskytujú závažné problémy zvarov, no je potrebné dôkladné nastavenie parametrov zvaracieho zdroja, rýchlosti posuvu prídavného materiálu a prietoku plynu.

Najmodernejšie zvaracie zdroje v súčasnosti ponúkajú nastavenie parametrov zvaracieho zdroja pomocou režimu synergie. Pri tomto režime je na zdroji nastavený jeden z hlavných parametrov, ako napríklad hrúbka zvaraného materiálu alebo priemer zvaracieho drôtu a zdroj si automaticky nastaví ostatné parametre sám.

## 3.4 Metóda SAW

Metóda zvarovania Submerged Arc Welding (SAW) je oproti predchádzajúcim metódam odlišná, pretože je automatizovaná. Základný princíp tejto metódy je zobrazený na obrázku 3.4.



Obr. 3.4: Základný princíp zvaracej metódy SAW. [5]

Metóda SAW je kombináciou metódy MIG/MAG a MMA. Táto metóda pracuje na princípe metódy MIG/MAG, v ktorých medzi prídavným a základným materiálom horí oblúk, pričom má prídavný materiál automatický posuv. Na rozdiel od MIG/MAG metóda SAW nevyužíva ochrannú atmosféru, ktorá je do okolia oblúka vypúšťaná z externej nádoby, ale do okolia oblúka je automaticky sypaná zmes práškového tavidla, ktoré vytvára ochrannú atmosféru. Vďaka tomu nie je oblúk skoro vôbec viditeľný na rozdiel od predchádzajúcich metód. Po dokončení zvaru sa na jeho povrchu objaví troska, ktorú je rovnako ako pri metóde MMA potrebné odstrániť. Na povrchu zvarovaného materiálu taktiež zostáva nevyužitá prášková zmes tavidla, ktorá sa automaticky zbiera a je použitá na ďalšie zvarovanie.

Táto metóda využíva jednosmerný napätový zdroj rovnako ako metóda MIG/MAG, pretože je potrebné oblúk pri zastavení zvarovania rýchlo zhasiť. Výhody tejto metódy sú vo vysokej kvalite zvaru vďaka automatizácii procesu a možnosti zvarovania veľmi hrubých materiálov, kde táto metóda nachádza najvyššie uplatnenie. Metóda SAW sa najčastejšie využíva spolu v spojení s vysokovýkonnými zdrojmi v priemysle, kde sa zvarujú hrubé kovové potrubia.

## 4 Faktory pri výbere vhodnej zvaracej metódy

Výber zvaracej metódy závisí na mnohých faktoroch, z ktorých najdôležitejšími sú:

1. Zloženie základného materiálu
2. Hrúbka základného materiálu
3. Technologická a ekonomická náročnosť zvarania

### 4.1 Zloženie zvaraného materiálu

Pri voľbe vhodnej zvaracej metódy je zloženie základného materiálu najdôležitejším parametrom, pretože rôzne druhy materiálu si vyžadujú rozdielne zvaracie metódy a rozdielny prídavný materiál. Tento fakt vyplýva z materiálového zloženia zvaraného a prídavného materiálu, z pôsobenia elektrického oblúku na materiál a z chemických procesov, ktoré s tým súvisia.

Pri zvaraní kovových materiálov sa pôsobením chemických procesov na materiáloch vytvárajú rôzne oxidy a zlúčeniny, ktoré môžu pri nevhodnej voľbe metódy kontaminovať zvaraný spoj a tým degradovať jeho pevnosť alebo úplne znemožniť zvaranie vytvorením nevodivých oxidov. Taktiež je dôležité správne vybrať prídavný materiál, ktorého zloženie je vhodné pre vytvorenie spoja medzi zvaraným materiálom. Základné rozdelenie použitia zvaracích metód je uvedené na obrázku 4.1.

	MIG	TIG	MMA
Mäkká ocel	✓	✓	✓
Nerezová ocel	✓	✓	✓
Hliník	✓	✓	
Meď	✓	✓	
Bronz	✓	✓	
Zliatiny zinku		✓	
Titán		✓	
Liatina			✓
Maximálna hrúbka	1mm - 10mm	1mm - 6mm	2mm - 10mm
Ochranná atmosféra	Potrebná	Potrebná	Nepotrebná
Náročnosť	● ○ ○	● ● ●	● ● ○
Rýchlosť zvarania	Rýchle	Pomalé	Rýchle

Obr. 4.1: Prehľad zvaracích metód a vhodnosti ich použitia [6]

Z obrázku 4.1 je zrejmé, že z pohľadu využitia zvaracej metódy na čo najviac materiálov, je jednoznačne najlepšia metóda TIG. Avšak táto metóda je najpomalšia a technologicky najnáročnejšia, čo predstavuje problém pri zváraní hrubších materiálov, kde sa využíva vrstvenie zvarov. V takomto prípade je vhodnejšie použiť metódy, ktoré nie sú univerzálne, ale efektívne na zváranie špecifického typu materiálu.

## 4.2 Hrúbka základného materiálu

S hrúbkou základného materiálu úzko súvisia parametre zvaracieho zdroja. So zvyšujúcou sa hrúbkou zváraného materiálu, je potrebné použiť výkonnejšie zvaracie zdroje, ktoré dokážu dodať a udržať v prípade napätového zdroja dostatočne vysoké napätie alebo v prípade prúdového zdroja dostatočne vysoký prúd. Z tejto úvahy by plynulo, že zváranie hrubých materiálov je problém, pretože je potrebné mať vysokovýkonný zvarací zdroj. To je pravda však iba vtedy, ak je potrebné základný materiál spojiť jedným kontinuálnym zvarom. Na takéto použitie sa používa špeciálna metóda SAW.

Ako bolo spomenuté vyššie, pri hrubých materiáloch sa často používa metóda vrstvenia zvarov, pri ktorej sa hrubý základný materiál spája viacerými vrstvenými zvarmi, na ktoré nie je potrebné použiť vysokovýkonný zdroj a špeciálne zvaracie metódy. Jedinou podmienkou pri použití zdroja nižšieho výkonu, je dosiahnutie dostatočného prievaru základného materiálu.

## 4.3 Technologická a ekonomická náročnosť

Pri zváraní bežných kovov, akými sú rôzne druhy ocele, je zváranie zväčša technologicky nenáročný proces. Problém nastáva pri potrebe zvárania farebných kovov, hliníka, liatiny, nerezovej ocele a iných špeciálnych druhov kovu. V tomto prípade je potrebné využiť technologicky náročnejšie zvaracie metódy, ktoré sú často ekonomicky nákladné a nedostupné v domácich podmienkach. Jedná sa najmä o metódu TIG, ktorá využíva striedavý zvarací zdroj. Rovnako je potrebné použiť prídavné materiály, špeciálne určené pre daný druh základného materiálu a zvaracie plyny, ktoré vytvárajú vhodnú inertnú atmosféru. Z ekonomického hľadiska predstavuje potreba špeciálneho zvaracieho plynu ďalšie náklady a cena sa s potrebou vyššej čistoty plynu rapídne zvyšuje.

Na zváranie v domácich podmienkach sa ako najvhodnejšie metódy ukazujú MMA a MIG/MAG. Z technologického hľadiska je metóda MIG/MAG oproti metóde MMA všestrannejšia, no ekonomicky nákladnejšia. Taktiež cena zvaracieho zdroja pre metódu MMA je rádovo nižšia. Sú tu ale isté obmedzenia, ako napríklad maximálna

hrúbka prídavného materiálu, čo vyplýva z napájania zvaracieho zdroja z jednofázovej siete, a teda z maximálne dosiahnuteľných parametrov.

V sériovej výrobe sa dostávajú do popredia čoraz viac zvaracie automaty, ktoré sú ekonomicky nákladnejšie, ale pri potrebe vysokej kvality zvaru a minimálnej chybovosti sa toto riešenie ukazuje ako veľmi výhodné. Najčastejšie sa jedná o automaty pre zvaráciu metódu SAW alebo taktiež automaty s robotickými zvaracími ramenami pre metódu MIG a MAG.



## 5 Zváracie zdroje

### 5.1 Rotačné zdroje

V priebehu vývoja zváracej techniky sa využívali rôzne zdroje zváracieho prúdu. Jednými z prvých zdrojov boli takzvané rotačné zdroje. Išlo o sústavu dynamu a asynchrónneho motora, ktoré mali priamo prepojené hriadele, čiže dynamo fungovalo v režime konštantných otáčok. Takýto zvárací zdroj je schopný generovať jednosmerný zvárací prúd. Tieto zdroje sa používali približne v rokoch 1950 až 1960.

Regulácia zváracieho prúdu sa jednoducho realizovala reostatom, ktorý slúžil ako premenlivý predradný odpor v obvode budenia. Čím bol odpor nižší, tým do budiacej cievky dynamu tiekol vyšší prúd a proporcionálne sa zvýšil výstupný zvárací prúd.

Tieto zváracie zdroje boli relatívne spoľahlivé, no pri ich používaní mali mnoho obmedzujúcich faktorov. Jedna z najväčších nevýhod spočívala hlavne vo váhe zváracieho zdroja, ktorá sa pohybovala rádovo v stovkách kilogramov. Ďalšia nevýhoda spočívala v použiteľnosti zdroja výhradne na zváranie metódou MMA, čo ale v dobe, keď sa zvárací zdroj používal, nebol veľký problém. Posledným závažnejším obmedzením pri používaní zdroja bola nutnosť trojfázovej sieťovej prípojky, čo vyplýva z použitia výkonného asynchrónneho motora v jeho konštrukcii.

### 5.2 Transformátorové zdroje

Kvôli značným nevýhodám rotačných zdrojov ich postupne nahradili transformátorové zdroje. Boli o niečo menšie, no pri najvýkonnejších modeloch sa ich váha približovala váhe rotačných zdrojov. Kvôli jednoduchosti výroby však plne nahradili rotačné zdroje.

#### 5.2.1 Striedavé transformátorové zdroje

Prvým typom transformátorových zváracích zdrojov boli striedavé transformátorové zdroje. Tieto typy zváracích zdrojov fungovali na princípe výkonného sieťového transformátoru, ktorý znižoval sieťové napätie na nižšie, ktoré bolo vhodné pre zváranie. Regulácia sa realizovala pomocou prepínania odbočiek na primárnom vinutí transformátora, čím sa menil transformačný pomer, a teda aj výstupné napätie a prúd. Nevýhoda regulácie spočívala v tom, že regulácia nebola plynulá ale iba skoková, čo mohlo byť obmedzujúce pre jemné doregulovanie prúdu pri zváraní.

Pri starších typoch transformátorových zdrojov sa regulácia realizovala pomocou zmeny magnetického rozptylu. Na tento účel bol vyrábaný špeciálny rozptylový

transformátor, ktorý mal pohyblivú časť jadra. Pri pohybe jadra sa dal transformátoru regulovať rozptylový tok, čím bolo možné regulovať zvärací prúd.

Ďalší spôsob regulácie spočíval v tlmivke s posuvným jadrom, ktorá bola zaradená do obvodu na sekundárnej strane. Pomocou zmeny dĺžky vzduchovej medzery medzi časťami jadra sa tlmivke menila indukčnosť, a teda aj impedancia, ktorú pre obvod predstavovala, čím sa menil zvärací prúd.

Tento druh zväracieho zdroja bol spoľahlivý, no nevýhoda spočívala vo váhe transformátora a prípadnej regulačnej tlmivky. Taktiež, použitie tohoto zdroja bolo obmedzené iba na metódu MMA.

### 5.2.2 Jednosmerné transformátorové zdroje

Keďže použitie striedavých transformátorových zdrojov bolo obmedzené iba na ručné oblúkové zváranie a špeciálny druh zväracie elektródy, s vývojom novších typov polovodičov sa postupne prešlo na jednosmerné, plynulo regulovateľné zdroje. Ich princíp spočíval v použití riadeného usmerňovača, ktorý využíval tyristory v spojení s diódami. Za usmerňovačom sa vyskytoval filter v podobe robustnej tlmivky, ktorá vyhladzovala zvärací prúd. Regulácia sa realizovala pomocou spínania tyristorov v určitej časti polvlny prúdu, čím sa reguloval podľa spätnoväzobného obvodu zvärací prúd alebo výstupné napätie na žiadanú hodnotu.

Výhody tohoto typu zdroja spočívajú v plynulej regulácii napätia a prúdu a taktiež v spoľahlivosti. Nevýhody spočívajú hlavne vo váhe zdroja, ktorá sa pohybuje kvôli robustnému transformátoru a tlmivke opäť v stovkách kilogramov. Tieto zväracie zdroje značne rozšírili oblasť možností využitia rôznych zväracích metód a boli využívané až do príchodu spínaných zväracích zdrojov.

## 5.3 Spínané zväracie zdroje

S vývojom nových typov polovodičov, ktoré zvládli spínať vyššie napätia a prúdy pri vysokej frekvencii, boli transformátorové zdroje nahradené spínanými zdrojmi, ktoré sa v zväracíj terminológii označujú ako zväracie invertory. Tento typ zdroja pracuje pri oveľa vyšších frekvenciách ako transformátorové zdroje, ktoré pracujú so sieťovou frekvenciou 50 Hz. Vďaka tejto skutočnosti je možné značne zmenšiť veľkosť transformátora a prenášať vysoký výkon. Tým majú tieto zdroje oproti všetkým predchádzajúcim typom zväracích zdrojov značnú výhodu vo váhe a dá sa s nimi jednoducho manipulovať.

Okrem váhy majú tieto zdroje veľkú výhodu v charakteristike zdroja, pretože pri správnom návrhu regulácie je možné dosiahnuť takmer ideálne charakteristiky napätového alebo prúdového zdroja. Všetky tieto prednosti tento typ zdroja predurčujú



na všestranné použitie s rôznymi zväracími metódami. Keďže diplomová práca je zameraná na návrh tohoto typu zdroja, je mu venovaná celá ďalšia kapitola práce.

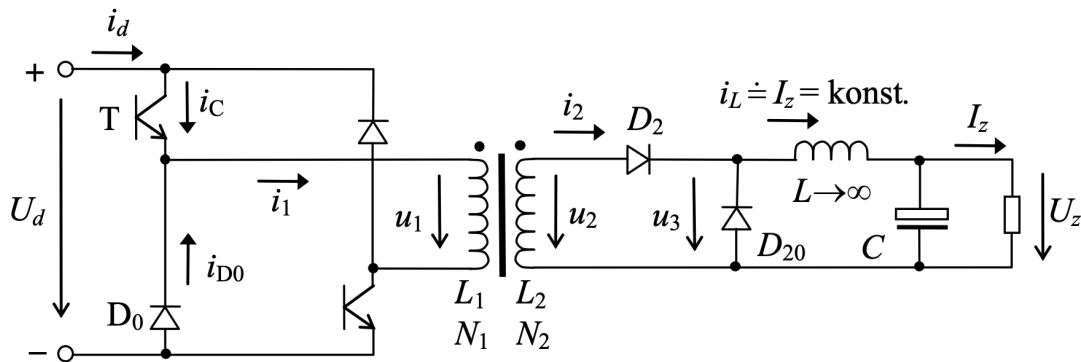


## 6 Topológie spínaných zdrojov

Typov a topológií spínaných zdrojov je mnoho a pre výber vhodnej topológie je potrebné zvážiť niekoľko faktorov, ktorými sú napríklad požadovaný výkon, potreba galvanického oddelenia alebo počet spínacích prvkov. Keďže z hľadiska bezpečnosti sa v zvraciacich invertoroch používajú výhradne topológie s transformátorom, ktorý zaisťuje galvanické oddelenie, budú v tejto kapitole uvedené tieto typy topológií.

### 6.1 Jednočinný priepustný menič

Z dôvodu potreby vyšších prenášaných výkonov pri použití tohoto meniča, ako zvracieho zdroja, nie je uvedené základné zapojenie priepustného zdroja s jedným spínačom. Pre toto použitie je vhodnejšia verzia s dvoma spínačmi, ktorá je uvedená na obrázku 6.1.



Obr. 6.1: Jednočinný priepustný menič s dvoma spínačmi [8]

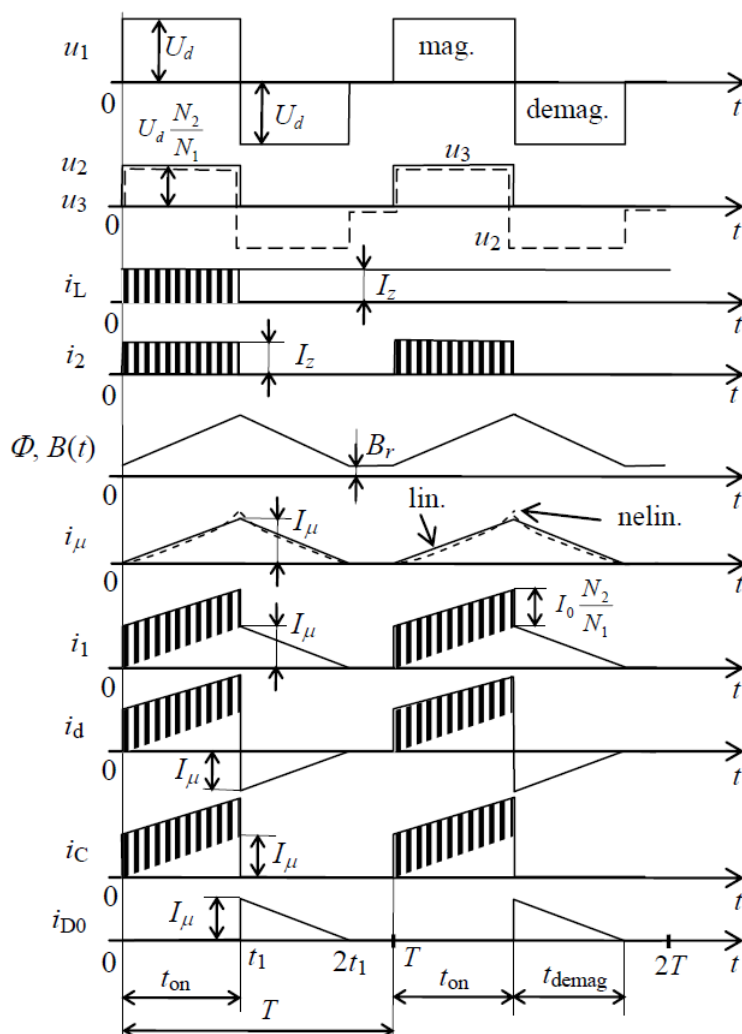
Tento typ meniča pracuje tak, že obidva tranzistory sú súčasne spínané a vypínané. Pri zopnutí tranzistorov sa jednosmerné napätie  $U_d$  objaví na primárnej strane transformátora  $u_1 = U_d$ , obdom tečie prúd a narastá magnetizačný prúd transformátora. Súčasne sa na sekundárnej strane objaví transformované napätie  $u_2$  podľa rovnice 6.1.

$$u_2 = \frac{N_1}{N_2} \cdot u_1 \text{ [V, -, -, V]} \quad (6.1)$$

Keďže napätie je voči dióde  $D_2$  v priepustnej polarite, tečie sekundárnym obdom prúd  $i_2$ , ktorý prechádza cez diódu  $D_2$  do LC filtra a záťaže.

Pri vypnutí tranzistorov, magnetizačná indukčnosť transformátora  $L_1$  nedovolí zánik prúdu. Napätie na indukčnosti sa invertuje na  $u_1 = -U_d$  a prúd tečie cez diódy  $D_0$ , čím sa transformátor demagnetizuje. Z dôvodu úplnej demagnetizácie transformátora je strieda spínania obmedzená teoreticky na  $s_{max} = 0.5$ . V sekundárnej časti obvodu sa invertuje napätie  $u_2$  a dióda  $D_2$  prejde do záverného režimu, teda prúd  $i_2$  obvodom prestane tečť. V LC filtri sa indukčnosť  $L$  snaží udržať konštantný prúd, napätie na nej sa invertuje a otvorí sa dióda  $D_{20}$ . Závažou teda naďalej tečie prúd, ktorý je dodávaný indukčnosťou  $L$  až dokým sa nezopnú tranzistory a celý dej sa opakuje. Menič sa reguluje pomocou PWM, čo je zrejmé z priebehov veličín v zdroji.

Charakteristické priebehy napätí a prúdov v tomto zapojení sú zobrazené na obrázku 6.2.



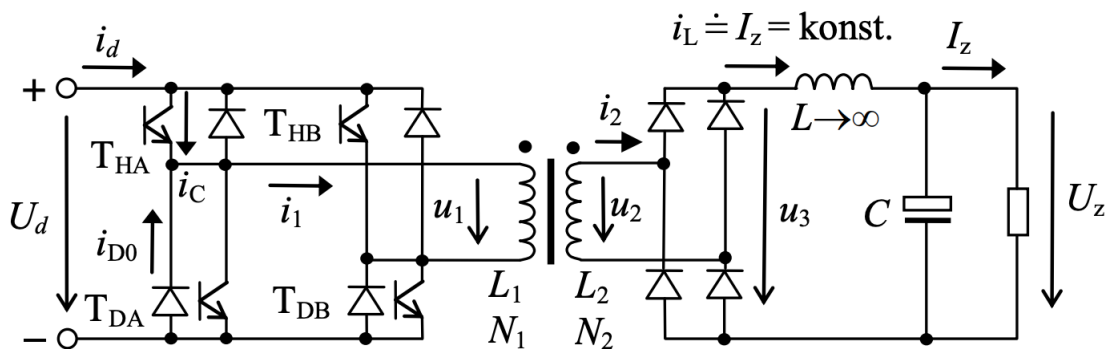
Obr. 6.2: Charakteristické priebehy veličín v jednočinnom meniči [8]

Výhody tohoto zdroja spočívajú v jednoduchosti zapojenia a potrebe iba jedného riadiaceho signálu, ktorými sú súčasne spínané obidva tranzistory. Táto topológia zdroja sa často používa pre zvracacie invertory z dôvodu jednoduchej a rýchlej regulácie, keďže striedu je možné meniť okamžite od jedného pulzu k ďalšiemu. Pri použití tejto topológie výhradne ako prúdového zdroja sa často zavádza regulácia na špičkovú hodnotu prúdu pomocou prúdového transformátora na primárnej strane.

Nevýhod zapojenia je niekoľko. Prvá nevýhoda je v tvrdom spínaní a vypínaní tranzistorov v maxime prúdu, čo sa prejavuje zvýšenými spínacími stratami a znižuje efektivitu meniča. Okrem zvýšenia spínacích strát sa kvôli tvrdému spínaniu prejavuje zvýšené elektromagnetické rušenie spôsobené vysokou strmou  $\frac{dV}{dt}$  a  $\frac{dI}{dt}$ . Z hľadiska prednášaného výkonu je najväčšou nevýhodou tejto topológie nevyužívanie plného potenciálu transformátora, pretože výkon je prenášaný iba v jednej polvlne. S tým súvisí aj potrebná vysoká indukčnosť filtračnej tlmivky, čo súvisí s ekonomickými nákladmi na výrobu meniča.

## 6.2 Dvojčinný priepustný menič

Dvojčinný priepustný menič vychádza zo zapojenia jednočinného meniča s dvoma spínačmi uvedeného na obrázku 6.1, kde sú diódy  $D_0$  nahradené tranzistormi a na sekundárnej strane je pridaný usmerňovací mostík. Tento typ meniča pracuje podobne ako jednočinný menič, ale eliminuje nevýhodu prenášania výkonu iba v jednej polvlne. Zapojenie dvojčinného priepustného meniča je zobrazené na obrázku 6.3.

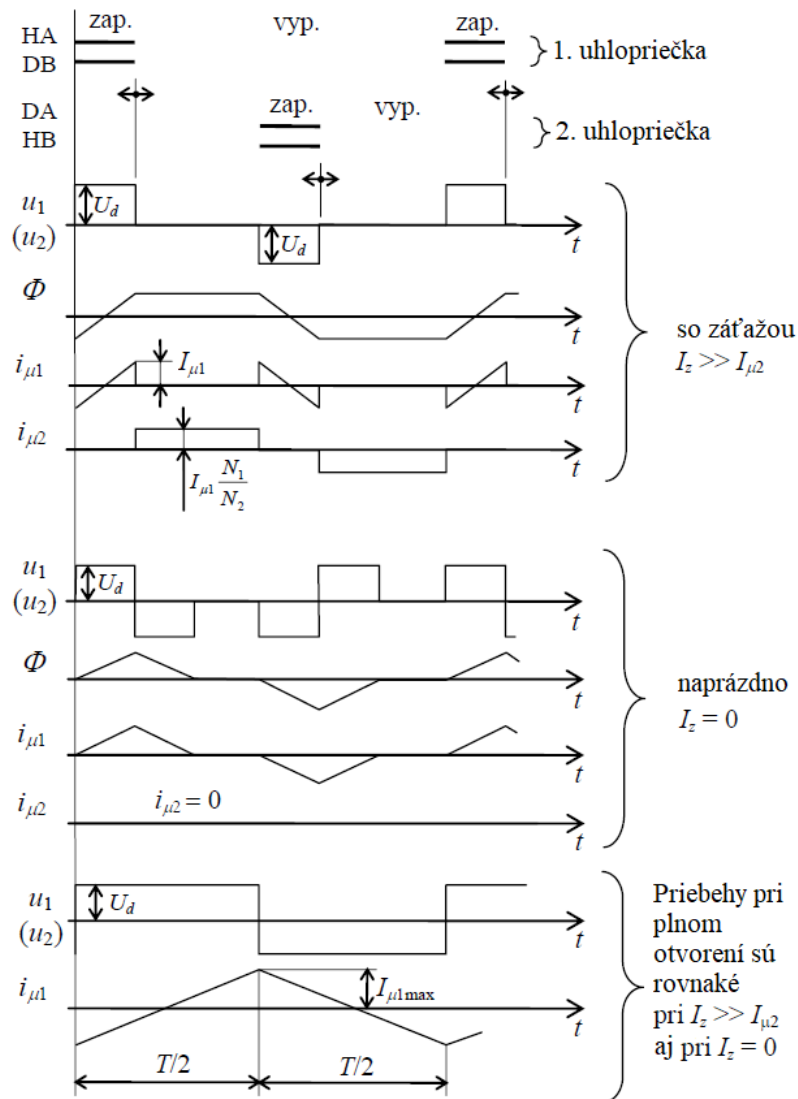


Obr. 6.3: Dvojčinný priepustný menič [8]

Menič pracuje na princípe, že tranzistory, ktoré sú voči sebe v uhlopriečke, teda  $T_{HA}, T_{DB}$  a  $T_{DA}, T_{HB}$  sú spínané súčasne. Pri zopnutí tranzistorov  $T_{HA}, T_{DB}$

sa napätie  $U_d$  objaví na primárnom vinutí transformátora čiže  $u_1 = U_d$ . V tomto momente obvodom začne tiecť prúd  $i_1$  a zvyšuje sa magnetizačný prúd transformátora. Na sekundárnej strane transformátora sa objaví transformované napätie z primárnej strany podľa rovnice 6.1. Pre túto polaritu napätia sú v mostíku vždy dve diódy v priepustnom smere, čiže napätie sa objaví aj na vstupe LC filtra a obvodom môže tiecť prúd. Po vypnutí tranzistorov  $T_{HA}, T_{DB}$  sa podľa danej striedy za určitý čas opäť zopnú tranzistory  $T_{DA}, T_{HB}$ , a na primárnom vinutí sa objaví napätie  $u_1 = -U_d$ . Magnetizačný prúd transformátora klesá do zápornej hodnoty a na sekundárnej strane sa objaví napätie  $-u_2$ . Napätie prejde cez diódy v mostíku, a opäť sa objaví na vstupe LC filtra a obvodom môže tiecť prúd. [7]

Pri tomto zapojení je potrebné analyzovať samostatne stav naprázdno a pri záťaži. Charakteristické priebehy napätí a prúdov v tomto zapojení pri stave naprázdno a pri záťaži sú zobrazené na obrázku 6.4.



Obr. 6.4: Charakteristické priebehy veličín v dvojčinnom meniči [8]

Pri stave naprázdno, kedy platí  $I_z = 0$ , sa po vypnutí jednej uhlopriečnej vetvy tranzistorov snaží indukčnosť  $L_1$  udržať konštantný prúd. Napätie na primárnom vinutí transformátora sa obráti, demagnetizačný prúd pretečie cez diódy  $D_0$  a transformátor sa demagnetizuje.

Po pripojení záťaže sa priebehy menia, pretože začne platiť  $I_z \gg I_{\mu 2}$ . Pri vypnutí tranzistorov  $T_{HA}, T_{DB}$  sa indukčnosť  $L$  snaží udržať konštantný prúd, obráti sa na nej orientácia napätia a sekundárne diódy slúžia ako nulová dióda. Keďže sekundárnymi diódami tečie rovnomerne rozdelený prúd  $I_z$ , pri zachovaní rovnakých úbytkov na diódach sa na sekundárnom vinutí objaví nulové napätie. To je transformované na primárnu stranu a nemôže dôjsť ku demagnetizácii transformátora, pretože sa nemôžu otvoriť diódy  $D_0$  a magnetický tok  $\phi$  zostáva konštantný.

Ku demagnetizácií dochádza až pri zopnutí tranzistorov  $T_{DA}, T_{HB}$ , kedy sa na primárnom vinutí objaví napätie  $u_1 = -U_d$ . Magnetizačný prúd klesá do záporných hodnôt a na sekundárnej strane sa objaví napätie  $-u_2$ . Keďže magnetický tok je integrálom napätia, so zmenou polaroty napätia  $u_1$  na primárnej strane sa mení. Transformátor sa vtedy demagnetizuje a opäť magnetizuje do opačnej strany. Pri tomto zapojení môže byť veľkosť striedy zopnutia uhlopriečných tranzistorov maximálne  $s_{max} = 0.5$ . Pri vyššej hodnote striedy by tranzistory začali spínať cez seba a začali by sa jednotlivé vetvy skratovať, čo by spôsobilo ich zničenie. Zároveň by spínanie vyššie ako táto strieda nedávalo zmysel, pretože na sekundárnej strane je strieda zdvojená, čiže pri  $s_{max} = 0.5$  na primárnej strane je na sekundárnej strane strieda  $s = 1$ .

V zapojení meniča podľa obrázku 6.3 je vynechaný kondenzátor, ktorý sa zapája sériovo s primárnym vinutím transformátora. V prípade nerovnosti v časoch zopnutia tranzistorov  $T_{HA}, T_{DB}$  a  $T_{DA}, T_{HB}$  sa transformátor úplne nedemagnetizuje, čo po niekoľkých cykloch spôsobí veľký nárast magnetizačného prúdu a zničenie meniča. Sériový kondenzátor napomáha v udržaní nulovej jednosmernej zložky primárneho napätia transformátora, čiže magnetizácia transformátora bude regulovaná na nulovú hodnotu. Tento jav sa dá eliminovať taktiež zmenou typu riadenia meniča. Riadenie sa rovnako, ako pri jednočinnom meniči, realizuje pomocou PWM. [7]

Výhody tohoto zapojenia spočívajú v lepšom využití transformátora oproti zapojeniu jednočinného priepustného meniča, pretože výkon je prenášaný v obidvoch polvlnách. Z tejto skutočnosti plynie aj ďalšia výhoda tohoto zapojenia. Keďže sa výkon prenáša v obidvoch polvlnách, tak na sekundárnej strane má napätie a prúd dodávaný do obvodu z transformátora dvojnásobnú frekvenciu. Pri zachovaní rovnakej filtračnej indukčnosti, ako pri jednočinnom meniči, by na výstupe bolo menšie zvlnenie napätia  $U_z$  a prúdu  $I_z$ .

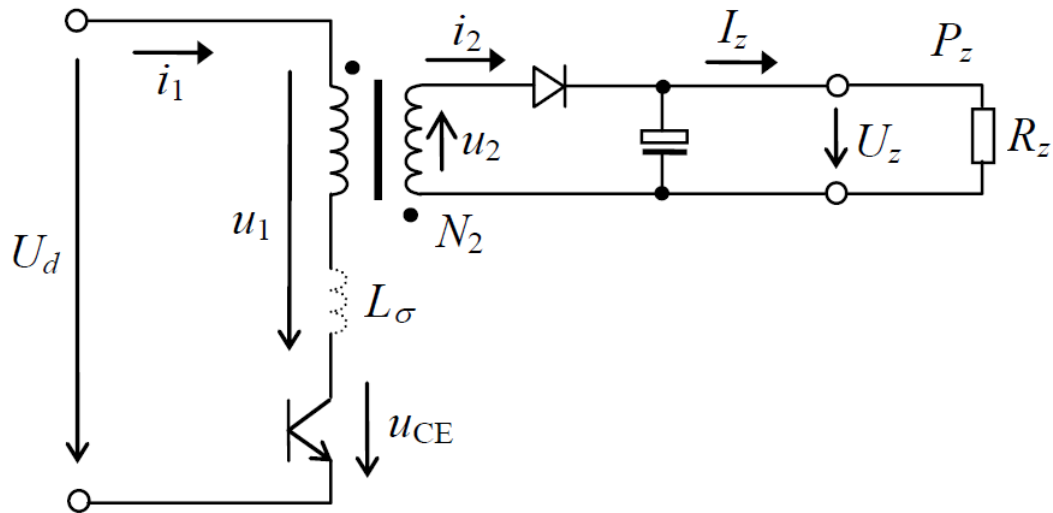
Nevýhody tohoto zapojenia sú podobné ako pri jednočinnom priepustnom meniči. V zapojení je použitý väčší počet spínacích prvkov, čo vedie ku zvýšeniu počtu budičov a väčšej zložitosti zapojenia. Tieto nevýhody vedú aj ku vyššej cene celého zariadenia. Všetky tranzistory spínajú v tvrdom spínacom režime, čiže na tranzistoroch sú vyššie spínacie a vypínacie straty.

Ako posledná nevýhoda je problém s parazitnou jednosmernou magnetizáciou jadra, kde má výhodu jednočinný menič, pri ktorom sa tento problém nevyskytuje. Ak by uhlopriečne spínané tranzistory nemali rovnakú hodnotu striedy, transformátor by sa plne nedemagnetizoval, ale indukcia by začala jednostranne rásť. Tento jav by viedol ku saturácií jadra transformátora a zničeniu tranzistorov v meniči. Pri jednočinnom meniči sa tento jav vyskytovať nemôže, pretože po vypnutí tranzistorov sa transformátor plne demagnetizuje, teda každý pulz zopnutia môže byť ľubovoľne dlhý.



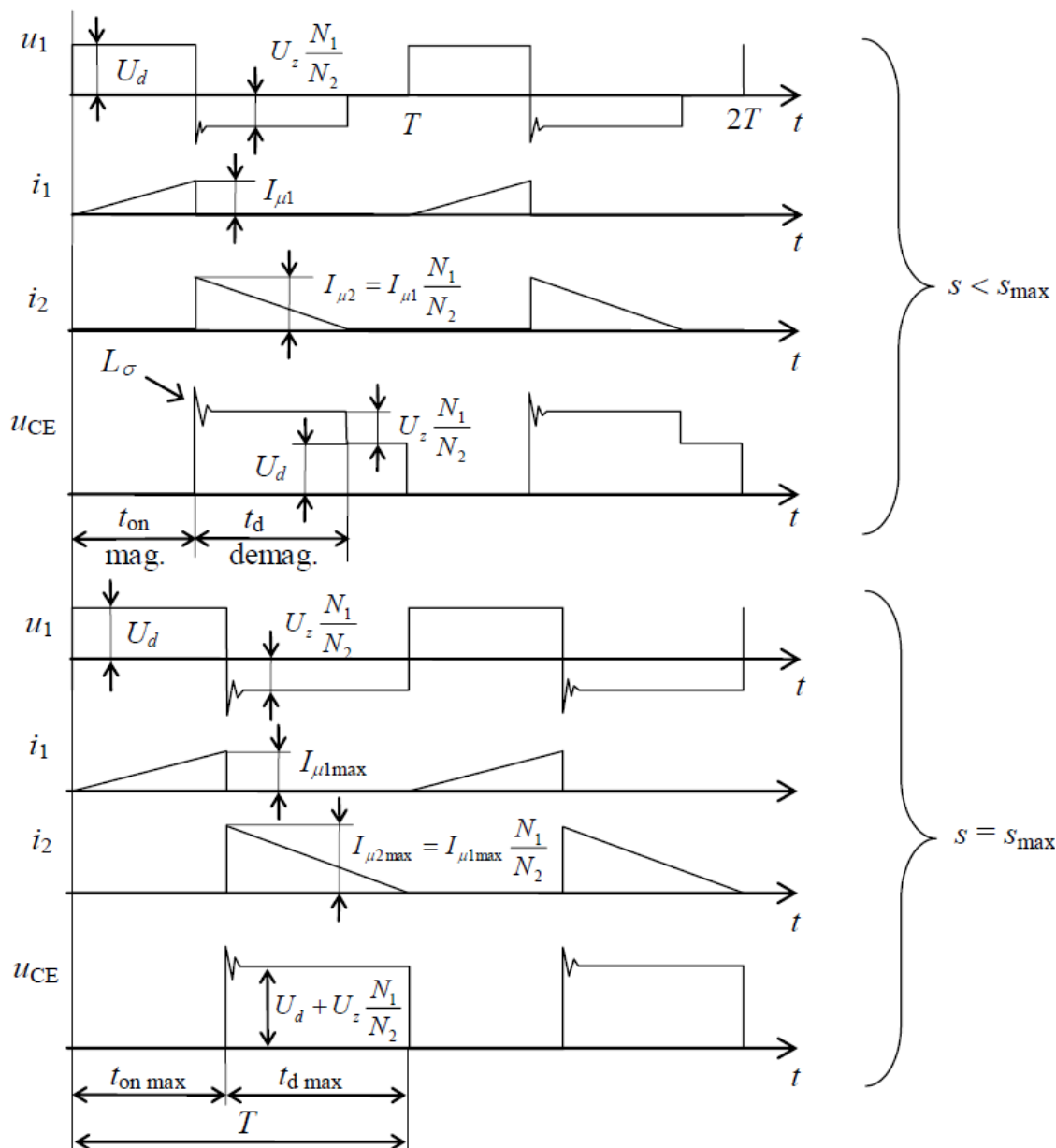
## 6.3 Blokujúci menič

Tento druh meniča, na rozdiel od priepustného meniča, funguje na inom princípe, pretože energiu prenáša v stave, keď sa tranzistory zatvoria. Základné zapojenie tohoto typu meniča je zobrazené na obrázku 6.5



Obr. 6.5: Jednočinný blokujúci menič [8]

Oproti priepustnému meniču je v tomto zapojení zásadná zmena v podobe obrátenej polarite sekundárneho vinutia transformátora a taktiež zmena vo výstupnom filtri, kde figuruje iba kondenzátor. Menič funguje nasledovne. Pri zopnutí tranzistora je na primárne vinutie privedené napätie  $u_1 = U_d$ . Vtedy primárnym vinutím začne tiecť magnetizačný prúd, ktorý sa zvyšuje. Na sekundárnom vinutí sa objaví transformované napätie  $u_2$ , ktoré ale neotvorí diódu. Čiže transformátor sa pri zopnutom tranzistore iba nabije ako tlmivka. Po vypnutí tranzistora sa snaží indukčnosť transformátora udržať konštantný prúd a napätie zmení svoju polaritu. V tomto momente je napätie na sekundárnom vinutí voči dióde v priepustnej polarite a sekundárnym vinutím začne tiecť prúd  $i_2$ , ktorý nabíja kondenzátor a zároveň tečie aj do záťaže. V dobe, keď je tranzistor zapnutý, je prúd do záťaže dodávaný z kondenzátora, ktorý zároveň udržiava výstupné napätie. Sekundárny obvod sa teda chová pri vypnutom tranzistore ako LC filter v priepustnom meniči a transformátor v tomto zapojení funguje ako akumulátor energie. Priebiehy napätí a prúdov v tomto zapojení sú zobrazené na obrázku 6.6.



Obr. 6.6: Charakteristické priebehy veličín v blokujúcom meniči [8]

Ďalšie rozdiely tohoto typu meniča voči priepustnému spočívajú v odlišnom návrhu transformátora, ktorý musí obsahovať vzduchovú medzeru, keďže funguje ako akumulčná tlmivka na prenos energie z primárnej na sekundárnu stranu. Bez vzduchovej medzery by totiž došlo veľmi rýchlo ku saturácii jadra transformátora, čo by malo za následok veľký nárast magnetizačného prúdu a menič by sa zničil.

Pri vhodnom návrhu je možné tento menič prevádzkovať s maximálnou striedou vyššou ako  $s_{max} > 0.5$ , čo je u týchto typov meničov bežné. V takomto prípade je nutné zabezpečiť, aby bola zachovaná rovnosť  $t_{on} \cdot U_d = t_d \cdot U_x$ , kde  $U_x$  je maximálne napätie

na primárnej strane transformátora, transformované zo sekundáru pri demagnetizácii jadra. Regulácia zdroja sa rovnako ako pri predchádzajúcich typoch realizuje PWM.

Výhody tohoto zapojenia spočívajú v tom, že zapojenie na svojej sekundárnej strane nepotrebuje tlmivku, keďže jej funkciu preberá samotný transformátor. To prispieva ku rozmerom meniča, keďže pri vyšších prúdoch sú rozmery indukčností značné. Ďalšou výhodou je možnosť ísť s maximálnou striedou vyššie ako na hodnotu  $s_{max} = 0.5$ , čím zapojenie ponúka pri návrhu viac možností. Z pohľadu strát sa v tomto meniči vyskytujú na tranzistore iba vypínacie straty a straty vedením prúdu, keďže tranzistor sa vždy zapne v nulovej hodnote magnetizačného prúdu.

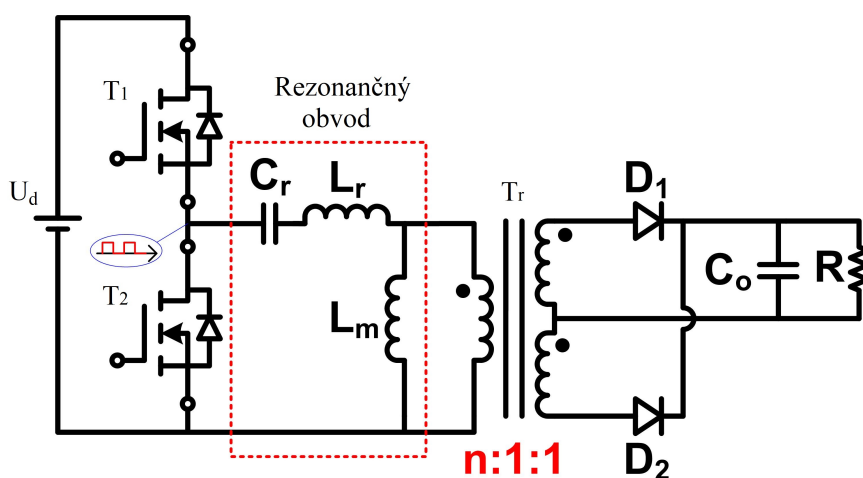
Nevýhod tohoto zapojenia je viacero. Ako prvú nevýhodu je nutné zmieniť to, že kvôli rozptylovej indukčnosti transformátora je tranzistor namáhaný po vypnutí oveľa vyšším napätím ako  $U_d$ . Z toho dôvodu ho treba dimenzovať na vyššie napätie, čím sa zvyšuje jeho cena a zhoršujú sa jeho parametre. Nasledujúca nevýhoda vyplýva z konštrukcie transformátora.

Keďže je potrebné, aby transformátor fungoval v režime ako akumulčná tlmivka, potrebuje vzduchovú medzeru. V okolí vzduchovej medzery sú vyduté siločiarly magnetického pola, ktoré spôsobujú vo vodičoch proximity efekt. Tento efekt znižuje efektívny prierez vodiča, ktorým je schopný viesť prúd, a tak sa v týchto miestach vinutia zahrieva. Tento efekt je pri zdrojoch s nízkym výkonom zanedbateľný, no pri vysokých výkonoch obmedzuje maximálny prevádzkový čas zdroja. Pri jeho prekročení by došlo ku zničeniu vinutia transformátora, a teda ku zničeniu celého meniča.

Pri tomto type meniča je nutné na sekundárnej strane použiť kondenzátor, čo má pri niektorých typoch zväracích metód nevýhodu, pretože môže spôsobovať problémy pri zapálení oblúku.

## 6.4 Rezonančný menič LLC

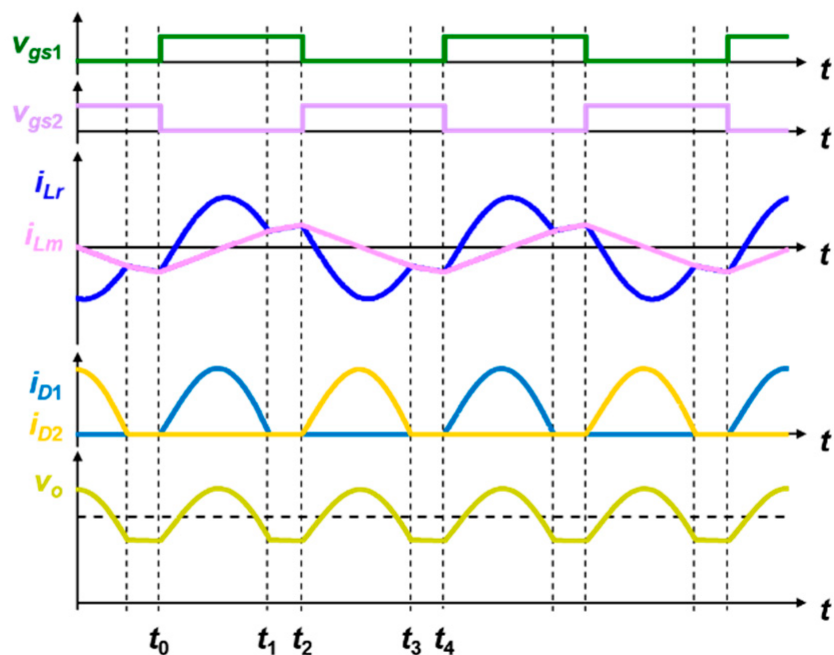
Rezonančný menič sa svojim zapojením líši od dvojčinného priepustného meniča v tom, že v sérii s primárnym vinutím obvodu je okrem kondenzátora  $C_r$  aj cievka  $L_r$ . Táto zmena spôsobí rozdielny priebeh napätí a prúdov v zdroji, čím sa eliminujú niektoré problémy, ktoré vznikali v priepustnom meniči. Schéma tohoto zapojenia je zobrazená na obrázku 6.7.



Obr. 6.7: Rezonančný menič [10]

Tento menič pracuje tak, že frekvencia spínania tranzistorov sa voči rezonančnej frekvencii LLC obvodu mení v širokom rozsahu, čím je možné menič regulovať. Rezonančný LLC obvod tvorí kapacita  $C_r$ , indukčnosť  $L_r$  a indukčnosť transformátora  $L_m$ . Keď sa tento menič naladí na správnu frekvenciu, tak dôjde ku rezonancii LLC obvodu, kedy je prenos rovný prevodu transformátora.

Tranzistory v tomto meniči nie sú v tvrdom spínacom režime, kedy sa tranzistor zapína a vypína v určitej hodnote prúdu, ale vypínajú sa pred priechodom prúdu nulou a spínajú sa v nule napätia. Charakteristické priebehy napätí a prúdov sú zobrazené na obrázku 6.8.



Obr. 6.8: Charakteristické priebehy veličín v rezonančnom meniči [11]

Týmto spôsobom spínania sa dá efektívne obmedziť elektromagnetické žiarenie a rušenie do okolitých obvodov. Taktiež sa minimalizujú spínacie a vypínacie straty na tranzistoroch. Problém tohoto meniča spočíva v regulácii. Menič sa nemôže regulovať pomocou zmeny striedy PWM, pretože pri skracovaní pulzov tranzistory začnú spínať v tvrdom spínacom režime, zvýši sa rušenie, zvýšia sa straty a menič stratí svoje výhody. Regulácia sa realizuje pomocou zmeny frekvencie meniča a je oproti všetkým predchádzajúcim typom meničov značne zložitejšia.

Ďalšia nevýhoda, ktorá sa pri rezonančných meničoch objavuje je rovnaká, ako pri blokujúcom meniči a to, že musí mať na výstupe zaradený kondenzátor, čo pri určitých typoch zväracích metód zhoršuje schopnosť zapáliť oblúk.



## 7 Návrh zväracieho zdroja

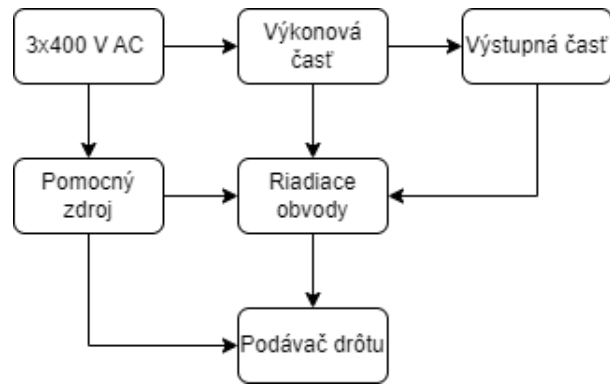
V tejto kapitole bude popísaný kompletný návrh zväracieho zdroja od samého začiatku, teda od výberu topológie až po výsledný návrh zapojenia meniča.

### 7.1 Voľba parametrov a topológie zväracieho zdroja

Na základe poznatkov získaných rozborom charakteristík zväracích zdrojov a rôznych topológií meničov v predchádzajúcich kapitolách práce, je možné určiť parametre a vybrať topológiu zväracieho zdroja. Keďže sa nebude jednať o zvärací zdroj určený na zväranie hrubých materiálov, je maximálny prúd pri prúdovom móde zvolený na  $200\text{ A}$  a maximálne napätie pri napäťovom móde  $30\text{ V}$ . Toto napätie bolo vypočítané na základe rovnice 1.1. Po vyjadrení napätia na oblúku, pri prúde  $200\text{ A}$ , je výsledné napätie  $U_{ob} = 28\text{ V}$ . S rezervou je napätie zvýšené o  $2\text{ V}$ .

Ohľadom topológie zdroja je s prihliadnutím na všetky výhody a nevýhody diskutovaných meničov vybraný dvojčinný priepustný menič. Tento výber bol urobený na základe jednoduchosti konštrukcie meniča a dobrého využitia transformátoru. Menič prenáša výkon v oboch polaritách napätia na transformátore a využíva teda celú hysteréznú slučku. Ďalším dôvodom voľby tejto topológie je možnosť používať zdroj bez filtračných kondenzátorov na výstupe, čiže iba s filtračnou tlmivkou. Tento stav je vhodné využiť pri prúdovom móde.

Vzhľadom na vysoký výstupný výkon bude menič napájaný z trojfázovej siete. Na zlepšenie účinníku bude použitá jednoduchá metóda pasívneho PFC s tlmivkou v medziobvode. Regulácia a ovládanie celého meniča bude zabezpečená mikrokontrolérom s jadrom ARM. Ten bude zároveň zabezpečovať meranie teplôt, ochranu proti nadprúdu, softstart a reguláciu podávania drôtu pri zväraní metódou MIG/MAG. Uživatelské rozhranie bude realizované pomocou displaya a enkódera, ktorým sa budú dať nastaviť jednotlivé parametre zdroja. Celý návrh bol prekreslený do blokovej schémy, ktorá je zobrazená v prílohe A.1. Zjednodušená bloková schéma je zobrazená na obrázku 7.1.



Obr. 7.1: Zjednodušená bloková schéma zvaracieho meniča

## 7.2 Návrh meniča

### 7.2.1 Návrh transformátora

V prvej časti návrhu meniča je potrebné vypočítať transformátor. Keďže sa jedná o priepustný dvojčinný menič, transformátor bude koncipovaný na feritovom jadre bez vzduchovej medzery. Pre výpočet transformátora je potrebné uviesť vstupné veličiny, podľa ktorých bude transformátor navrhovaný.

Ako prvé bude vypočítané napätie medziobvodu po usmernení trojfázovej siete, ktorým bude menič napájaný. Keďže pri záťaži napätie medziobvodu poklesne z maximálnej hodnoty, bude pri návrhu uvažovaná stredná hodnota šesťpulzne usmerneného napätia. To je vypočítané podľa rovníc 7.1 a 7.2

$$U_m = U_f \cdot \sqrt{3} \cdot \sqrt{2} = 230 \text{ V} \cdot \sqrt{3} \cdot \sqrt{2} = 565 \text{ V} \quad (7.1)$$

$$U_d = U_m \cdot \frac{3}{\pi} = 565 \text{ V} \cdot \frac{3}{\pi} = 540 \text{ V} \quad (7.2)$$

Spínacia frekvencia zdroja je zvolená na  $f_s = 60 \text{ kHz}$ , výstupné napätie naprázdno aspoň  $U_{z,n} > 50 \text{ V}$ , maximálny výstupný prúd  $I_z = 200 \text{ A}$  pri napätí na záťaži  $U_z = 30 \text{ V}$ .

Keďže sa jedná o dvojčinný priepustný menič, je využívaná celá hysterézná slučka feritového jadra v kladnom aj zápornom smere. Teda transformátor sa vyžíva na prenos výkonu v oboch polaritách a teoreticky je možné využiť celú lineárnu oblasť hysteréznej slučky  $\pm B_{max}$  a ísť do maximálneho prípustného sýtenia jadra  $\Delta B = 2 \cdot B_{max}$ . Z praktického hľadiska je však takto vysoké sýtenie nevhodné a



dochádzalo by ku vysokým hysteréznym stratám, čo by spôsobovalo prehrievanie jadra. Z tohoto dôvodu je zvolené sýtenie  $\Delta B = 0,35 T$ .

Zvolené jadro, na ktorom bude transformátor navinutý, má označenie EC9030-CF297. Parametre tohoto jadra boli zistené z katalógového listu. [12]

- $A_{min} = 611 \text{ mm}^2$
- $A_e = 626 \text{ mm}^2$
- $A_L = 6350 \text{ nH}$
- $B_{sat} = 0,518 T (25^\circ C)$
- $B_{sat} = 0,41 T (100^\circ C)$
- priemer stĺpika  $d = 30 \text{ mm}$
- šírka okna  $W = 19,25 \text{ mm}$
- výška okna  $H = 71 \text{ mm}$

Pri návrhu bude uvažovaná hodnota prierezu stredového stĺpiku jadra niekde približne medzi maximálnym a minimálnym prierezom a to  $S_{Fe} = 620 \text{ mm}^2$ . Maximálna strieda je s rezervou zvolená na  $s_{max} = 0,46 [-]$ . Výpočet transformátora vychádza z rovnice pre výpočet indukovaného napätia. V prvom kroku návrhu transformátora bude vypočítaný počet závitov na primárnom vinutí.

$$U_i = \frac{d\Psi}{dt} = \frac{N \cdot \Delta B \cdot S_{Fe}}{\frac{s}{f}} [V, Wb, s, -, T, m^2, -, Hz] \quad (7.3)$$

Po úprave vyjde rovnica pre výpočet závitov primárneho vinutia 7.4.

$$N_1 = \frac{U_d \cdot s}{\Delta B \cdot f \cdot S_{Fe}} = \frac{540 V \cdot 0,46}{0,35 T \cdot 60000 Hz \cdot 620 \cdot 10^{-6} m^2} = 19 z \quad (7.4)$$

Pre výpočet závitov na sekundárnej strane bude použitá rovnica pre výstupné napätie dvojčinného meniča 7.5.

$$U_z = U_d \cdot \frac{N_2}{N_1} \cdot 2 \cdot s [V, V, -, -, -] \quad (7.5)$$

Po úprave vznikne rovnica pre výpočet závitov sekundárneho vinutia.

$$N_2 = \frac{U_{z,m} \cdot N_1}{U_d \cdot 2 \cdot s} = \frac{50 V \cdot 19}{540 V \cdot 2 \cdot 0,46} = 1,91 \approx 2 z \quad (7.6)$$

Vďaka zaokrúhleniu počtu sekundárnych závitov na najbližšiu vyššiu celočíselnú hodnotu, bude napätie naprázdno vyššie a bude splnená podmienka  $U_{z,m} > 50 V$ .

Pri maximálnom zaťažení zdroja je z dôvodu regulácie a ďalších výpočtov potrebné overiť striedu. Ak by bola jej hodnota príliš nízka, regulácia zdroja by mohla byť z

dôvodu riadenia mikrokontrolérom problematická, kvôli možnému nízkemu rozlíšeniu kroku striedy. Pri nízkej striede a vysokom prúde by bolo taktiež nutné predimenzovať tranzistory, čo je neekonomické. Vo výpočte bude uvažované aj s prahovým napätím diód usmerňovača  $U_f = 1 V$ .

$$s = \frac{(U_z + (2 \cdot U_f)) \cdot N_1}{U_d \cdot N_2 \cdot 2} = \frac{(30 V + (2 V)) \cdot 19}{540 V \cdot 2 \cdot 2} \approx 0,28 [-] \quad (7.7)$$

Ďalej bude vypočítaná indukčnosť primárneho vinutia, z čoho bude možné určiť magnetizačný prúd.

$$L_{prim} = N_1^2 \cdot A_L = 6350 \cdot 10^{-9} H \cdot 19^2 \approx 2,29 mH \quad (7.8)$$

$$\Delta I_{\mu 1max} = \frac{U_d \cdot s_{max}}{f \cdot L_1} = \frac{540 V \cdot 0,46}{60000 Hz \cdot 2,29 \cdot 10^{-3} H} = 1,8 A \quad (7.9)$$

$$I_{\mu 1max} = \frac{\Delta I_{\mu 1max}}{2} = \frac{1,8 A}{2} = 0,9 A \quad (7.10)$$

Ako posledný krok pri návrhu transformátora je potrebné vypočítať prierezy vodičov, ktorými bude transformátor navinutý a overiť zaplnenie okna na jadre. Na to je potrebné vypočítať efektívne hodnoty prúdov tečúcich primárnym a sekundárnym vinutím pri maximálnom zaťažení.

$$I_{1,max} = I_{\mu 1max} + I_z \cdot \frac{N_2}{N_1} = 0,9 A + 200 A \cdot \frac{2}{19} = 21,95 A \quad (7.11)$$

$$I_{1,ef} = I_{1,max} \cdot \sqrt{2 \cdot s} = 21,95 A \cdot \sqrt{2 \cdot 0,28} = 16,43 A \quad (7.12)$$

$$I_{2,ef} = I_z \cdot \sqrt{s} = 200 A \cdot \sqrt{0,28} \approx 106 A \quad (7.13)$$

Pre výpočet zaplnenia okna na transformátore je potrebné stanoviť prúdovú hustotu, pomocou ktorej sa vypočítajú prierezy vodičov. Tá bude uvažovaná ako  $\sigma = 3 A \cdot mm^{-2}$ . Vzhľadom na použitie uzlového usmerňovača je počítané s dvojnásobným počtom sekundárnych závitov.

$$S_{Cu1} = \frac{I_{1,ef}}{\sigma} = \frac{16,43 \text{ A}}{3 \text{ A} \cdot \text{mm}^{-2}} = 5,48 \text{ mm}^2 \quad (7.14)$$

$$S_{Cu2} = \frac{I_{2,ef}}{\sigma} = \frac{106 \text{ A}}{3 \text{ A} \cdot \text{mm}^{-2}} = 35,34 \text{ mm}^2 \quad (7.15)$$

$$S_{Cu,tot} = N_1 \cdot S_{Cu1} + N_2 \cdot S_{Cu2} = 19 \cdot 5,48 \text{ mm}^2 + 4 \cdot 35,34 \text{ mm}^2 = 245,48 \text{ mm}^2 \quad (7.16)$$

$$S_o = W \cdot H = 19,25 \text{ mm} \cdot 71 \text{ mm} = 1366,75 \text{ mm}^2 \quad (7.17)$$

$$k_{p,Cu} = \frac{S_{Cu,tot}}{S_o} = \frac{245,48 \text{ mm}^2}{1366,75 \text{ mm}^2} \approx 0,18 [-] \quad (7.18)$$

Transformátor je na základe výpočtu realizovateľný. Keďže bude transformátor pracovať na relatívne vysokej frekvencii, bude nutné navinúť primárne aj sekundárne vinutie lankovým vodičom, ktorý má izolované jednotlivé žily, čím sa minimalizuje skin efekt. Ako posledný výpočet ohľadom transformátora budú vypočítané straty na základe katalógového listu feritového jadra EC9030 a jeho materiálu s označením CF297.

Z grafu pre materiál CF297 boli odčítané merné straty pre indukciu v jadre  $\Delta B = 0,35 \text{ T}$  a frekvenciu  $= 60 \text{ kHz}$  ako približne  $P_{mer} = 200 \text{ kW} \cdot \text{m}^{-3}$ . Objem materiálu jadra je  $V_{Fe} = 138346 \text{ mm}^3$ . [12] [13]

Hysterézne straty jadra sa určia teda nasledovne:

$$P_{hyst} = P_{merFe} = 200000 \text{ W} \cdot \text{m}^{-3} \cdot 138346 \cdot 10^{-9} \text{ m}^3 = 27,6 \text{ W} \quad (7.19)$$

Vzhľadom na veľkosť jadra a použitie aktívneho chladenia sú tieto straty akceptovateľné a jadro sa bude dať uchladiť. V reálnej prevádzke meniča sa jadro bude najviac ohrievať, keď bude menič naprázdno. Pri záťaži klesne strieda spínania a teda aj maximálna indukcia v jadre, čo spôsobí menšie hysterézne straty.

## 7.2.2 Vstupný usmerňovač a medziobvod

Vstupný usmerňovač bude riešený z dôvodu jednoduchosti ako šesťpulzný diódový usmerňovač. Účinník zapojenia s týmto usmerňovačom bez použitia aktívneho PFC sa pohybuje približne okolo  $\lambda = 0,7$  [–]. Na zvýšenie účinníka bude použité pasívne PFC, ktoré bude tvoriť tlmivka a kondenzátory, teda LC filter v medziobvode za šesťpulzným usmerňovačom. S tlmivkou v medziobvode je prakticky dosiahnuteľná hodnota účinníka  $\lambda > 0,9$  [–]. Usmerňovač bude realizovaný ako šesť samostatných diód vo výkonovom púzdre, aby bolo zabezpečené dobré chladenie.

Pre návrh vstupného usmerňovača a dimenzovanie diód je nutné vypočítať hodnotu prúdu, ktorý bude tiecť jednou diódou. Ak bude použité pasívne PFC, prúdový odber vďaka prítomnosti tlmivky zmení priebeh prúdu na obdĺžnikový tvar a eliminujú sa prúdové špičky, ktoré spôsobujú kondenzátory v medziobvode.

$$I_{d,str} = I_{1,max} \cdot 2 \cdot s = 21,95 \text{ A} \cdot 2 \cdot 0,28 = 12,29 \text{ A} \quad (7.20)$$

$$I_{D,max} = I_{d,str} = 12,29 \text{ A} \quad (7.21)$$

$$I_{D,ef} = \frac{I_{d,str}}{\sqrt{3}} = \frac{12,29 \text{ A}}{\sqrt{3}} = 7,1 \text{ A} \quad (7.22)$$

$$I_{D,str} = \frac{I_{d,str}}{3} = \frac{12,29 \text{ A}}{3} = 4,1 \text{ A} \quad (7.23)$$

Pre bezpečnú funkciu je potrebné dimenzovať diódu tak, aby ani jeden z týchto prúdov nebol prekročený. S rezervou boli vďaka dobrej dostupnosti zvolené diódy SD4516, ktoré majú maximálne záverné napätie  $U_{RRM} = 1600 \text{ V}$ , prahové napätie  $U_F \approx 1,1 \text{ V}$  a stredný prúd v priepustnom smere maximálne  $I_F = 45 \text{ A}$ . Sú realizované v púzdre TO-247, vďaka čomu sa budú dať dobre umiestniť na chladič. [14]

Výkonová strata na diódach v trojfázovom usmerňovači sa vypočíta podľa rovnice 7.24.

$$P_{D,3f} = 6 \cdot U_f \cdot I_{D,str} = 6 \cdot 1,1 \text{ V} \cdot 4,1 \text{ A} = 27,06 \text{ W} \quad (7.24)$$

V nasledujúcom kroku bude navrhnutý LC filter umiestnený za šesťpulzným usmerňovačom. Hodnoty indukčnosti tlmivky a kapacity kondenzátorov v tomto

prípade nie sú kritické, ale je potrebné zaistiť, aby sa LC filter nedostal do rezonancie s frekvenciou šesťpulzného usmerňovača  $6 \cdot 50 \text{ Hz} = 300 \text{ Hz}$ . Pre rezonančný kmitočet LC filtra teda platí rovnica 7.25.[8]

$$f_o \ll \frac{1}{2 \cdot \pi \cdot \sqrt{L \cdot C}} \text{ [Hz, H, F]} \quad (7.25)$$

Kondenzátory v medziobvode budú kvôli vysokému napätiu medziobvodu radené sériovo - paralelne. Boli zvolené kondenzátory od firmy EPCOS, typ B43540-S9447-M1, ktoré majú kapacitu  $C = 440 \mu\text{F}$  a sú dimenzované na napätie  $U_C = 400 \text{ V}$ . Maximálne prípustné zvlnenie prúdu jedného kondenzátora je  $I_{AC,max} = 6,2 \text{ A}(60^\circ\text{C})$ .

V medziobvode bude použitých 12 ks sériovo - paralelne zapojených kondenzátorov, čo udáva výslednú kapacitu filtra  $C_f = 1320 \mu\text{F}$  a maximálne zvlnenie prúdu  $I_{AC,max} = 6 \cdot 6,2 \text{ A} = 37,2 \text{ A}$ . Keďže stredná hodnota prúdu kondenzátora musí byť rovná nule, priebeh prúdu na kondenzátoroch bude teoreticky pri nekonečnej hodnote indukčnosti filtračnej tlmivky rovnaký ako primárny prúd, posunutý na prúdovej osi na stred. To rozdelí priebeh prúdu na 2 časti teda kladné a záporné pulzy, pre ktoré sa dá vypočítať efektívna hodnota podľa rovnice 7.26.

$$I_{C,ef} = \sqrt{I_{+,ef}^2 + I_{-,ef}^2} \text{ [A, A, A]} \quad (7.26)$$

$$I_{+-ef} = \pm \frac{I_{1,max} \cdot \sqrt{2 \cdot s}}{2} = \frac{21,95 \text{ A} \cdot \sqrt{2 \cdot 0,28}}{2} = \pm 8,21 \text{ A} \quad (7.27)$$

$$I_{C,ef} = \sqrt{8,21^2 + 8,21^2} = 11,61 \text{ A} \quad (7.28)$$

Reálna hodnota bude o niečo vyššia kvôli zvlneniu prúdu medzi tlmivkou a kondenzátormi medziobvodu na frekvencii  $300 \text{ Hz}$ . To však nie je problém, keďže filtračné kondenzátory majú v maximálnom zvlnení prúdu dostatočnú rezervu. Na filtračnej tlmivke medziobvodu je zvolené zvlnenie prúdu  $\Delta I_{L,max} = 10 \text{ A}$ , z čoho je možné vypočítať jej indukčnosť podľa rovnice 7.29 [9]

$$L = \frac{U_a}{2 \cdot \Delta I_{max} \cdot 2 \cdot \pi \cdot f} \cdot \left(1 - \cos \frac{\pi}{q}\right) \text{ [H, V, A, Hz, -]} \quad (7.29)$$

pre 6 pulzný usmerňovač sa dá rovnica 7.29 upraviť na 7.30

$$L = 0,00904 \cdot \frac{U_a}{\Delta I \cdot 2 \cdot \pi \cdot f} \text{ [H, V, A, Hz]} \quad (7.30)$$

$$L = 0,00904 \cdot \frac{325 \text{ V}}{5 \text{ A} \cdot 2 \cdot \pi \cdot 50 \text{ Hz}} = 1,87 \text{ mH} \quad (7.31)$$

Z hodnôt indukčnosti tlmivky a kapacity kondenzátorov je možné vypočítať medznú frekvenciu LC filtra podľa 7.25.

$$f_o \ll \frac{1}{2 \cdot \pi \cdot \sqrt{1,87 \cdot 10^{-3} \cdot 1320 \cdot 10^{-6}}} \approx 101 \text{ Hz} \quad (7.32)$$

Táto frekvencia je s dostatočnou rezervou nižšia voči rezonančnej frekvencii. Z dôvodu nízkej frekvencie musí byť tlmivka realizovaná na železnom jadre.

Jadro, ktoré bolo dostupné pre realizáciu tejto tlmivky, má nasledujúce parametre:

- $S_{Fe} = 1064 \text{ mm}^2$
- $B_{sat} \approx 1,2 \text{ T}$
- rozmer stĺpika  $d = 38 \times 28 \text{ mm}$
- šírka okna  $W = 14 \text{ mm}$
- výška okna  $H = 42 \text{ mm}$

Na základe vyššie vypočítaných parametrov je možné stanoviť parametre tlmivky, podľa ktorých sa bude navrhovať. Z dôvodu rezervy bol zvolený maximálny prúd tlmivkou  $I_{L,max} = 17 \text{ A}$  a maximálne sýtenie jadra  $B_{max} = 1,2 \text{ T}$ .

$$N = \frac{L \cdot I_{L,max}}{B_{max} \cdot S_{Fe}} = \frac{1,87 \cdot 10^{-3} \text{ H} \cdot 17 \text{ A}}{1,2 \text{ T} \cdot 1064 \cdot 10^{-6} \text{ m}^2} \approx 25 \text{ z} \quad (7.33)$$

$$l_{vz} = \frac{N \cdot I_{L,max} \cdot \mu_0}{B_{max}} = \frac{25 \cdot 17 \text{ A} \cdot \mu_0}{1,2 \text{ T}} \approx 0,45 \text{ mm} \quad (7.34)$$

Efektívny prúd tlmivky je pri zanedbaní zvlnenia prúdu možné určiť približne ako strednú hodnotu primárneho prúdu. Prúdová hustota je zvolená rovnako ako pri návrhu transformátora  $\sigma = 3 \text{ A} \cdot \text{mm}^{-2}$ .

$$I_{L,ef} \approx I_{d,str} \approx 12,29 \text{ A} \quad (7.35)$$

$$S_{Cu1} = \frac{I_{1,ef}}{\sigma} = \frac{12,29 \text{ A}}{3 \text{ A} \cdot \text{mm}^{-2}} \approx 4 \text{ mm}^2 \quad (7.36)$$

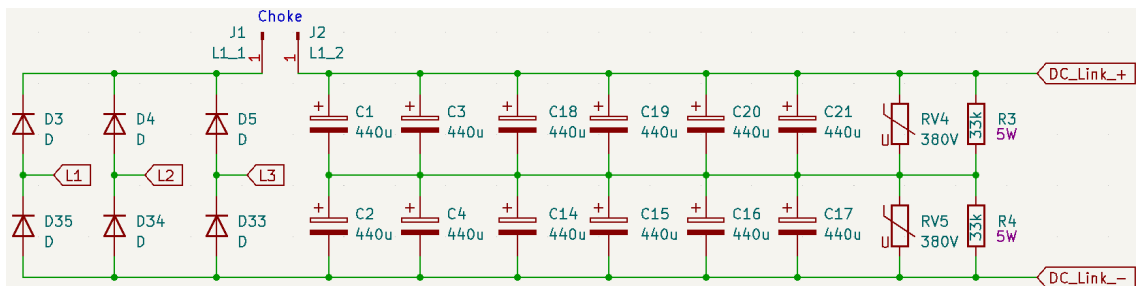
$$S_{Cu,tot} = N \cdot S_{Cu1} = 25 \cdot 4 \text{ mm}^2 \approx 100 \text{ mm}^2 \quad (7.37)$$

$$S_o = W \cdot H = 14 \text{ mm} \cdot 42 \text{ mm} = 588 \text{ mm}^2 \quad (7.38)$$

$$k_{p,Cu} = \frac{S_{Cu,tot}}{S_o} = \frac{100 \text{ mm}^2}{588 \text{ mm}^2} \approx 0,17 [-] \quad (7.39)$$

Na základe predchádzajúceho výpočtu je tlmivka realizovateľná. Keďže tlmivka bude pracovať na frekvencii  $f = 300 \text{ Hz}$ , nebude potrebné ju vinúť tenkými izolovanými lankovými vodičmi ako transformátor a môže byť navinutá lakovaným medeným vodičom, prípadne viacerými paralelne.

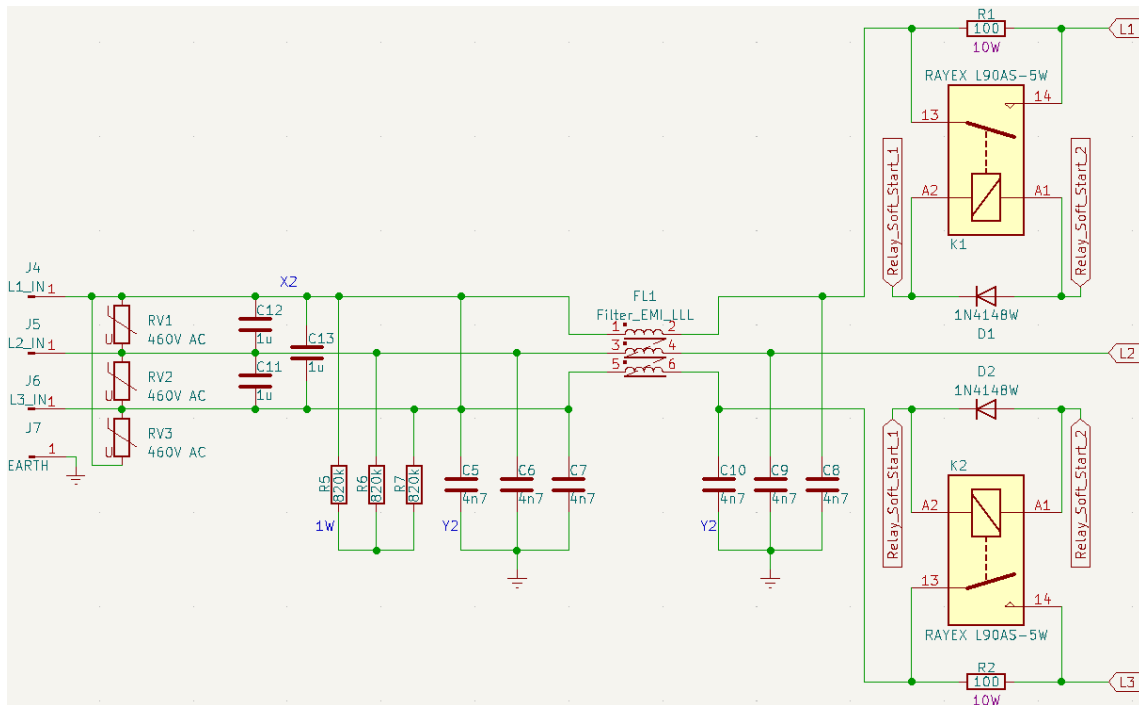
Výsledná schéma usmerňovača a medziobvodu je zobrazená na obrázku 7.2. Paralelne ku kondenzátorom sú pripojené varistory, ktoré ochraňujú kondenzátory medziobvodu voči prepätiu a rezistory, ktoré tvoria delič zabezpečujúci rovnomerné rozdelenie napätia na kondenzátoroch medziobvodu.



Obr. 7.2: Schéma medziobvodu s LC filtrom

### 7.2.3 Vstupný filter a softstart

Menič pri svojej funkcii generuje značné vysokofrekvenčné rušenie, ktoré je potrebné limitovať, aby sa nedostalo ďalej do siete. Rovnako sa rušenie môže objaviť zo strany siete a môže nepriaznivo vplyvať na funkciu meniča. Z tohoto dôvodu je na vstupe pred trojfázovým usmerňovačom zaradený EMI filter, ktorý toto rušenie potláča. Filter je dizajnovaný tak, aby potlačil súfázové, ale zároveň aj diferenciálne rušenie. Schéma filtra je uvedená na obrázku 7.3. Za filtrom sú zapojené dva výkonové rezistory premostené pomocou relé, tvoriace obvod Soft-Start. Tento obvod slúži na obmedzenie vstupného prúdu pri zapnutí meniča do siete a zároveň tlmia prekmit napätia na medziobvode, ktorý spôsobuje LC filter. Po ustálení prúdovej špičky sú rezistory premostené a menič je tak pripojený priamo na všetky tri fázy.



Obr. 7.3: Schéma vstupného EMI filtra so softstartom

## 7.2.4 Výstupný usmerňovač a filter

Na sekundárnej strane výkonového transformátora bude použitý uzlový usmerňovač. Vzhľadom na fakt, že transformátor má sekundárne vinutie navinuté s vyvedeným stredom, bude použitý uzlový usmerňovač s dvoma diódami a vyvedeným stredom. Oproti klasickému mostíkovému usmerňovaču má výhodu v nižších stratách na diódach. Pre dimenzovanie diód je potrebné vypočítať stredný prúd. Výpočet je uvedený v rovnici 7.40.

$$I_{D, str} = \frac{I_z}{2} = \frac{200 \text{ A}}{2} = 100 \text{ A} \quad (7.40)$$

Napätovo je diódy vhodné dimenzovať vzhľadom na možné prekmity a špičky aspoň na dvojnásobné napätie, ktoré sa na dióde objaví. Toto napätie sa vypočíta rovnicou 7.41.

$$U_{D, max} = 2 \cdot U_{d, max} \cdot \frac{N_2}{N_1} = 565 \text{ V} \cdot \frac{2}{19} \approx 120 \text{ V} \quad (7.41)$$

Diódy budú teda dimenzované na prúd  $I_{F, AV} = 100 \text{ A}$  a napätie  $U_{RRM, min} = 240 \text{ V}$ . Na základe týchto parametrov bol vybratý modul od firmy Sirectifer, model MF200K06F2.



Jedná sa o diódový modul ktorý obsahuje dve usmerňovacie diódy, so spoločnou katódou, čo je výhodné pre uzlový usmerňovač. Parametre diódového modulu sú nasledovné: [15]

- $I_{F,AV} = 2 \times 200 \text{ A}$
- $U_{RRM} = 600 \text{ V}$
- $P_D = 690 \text{ W}$
- $U_F = 0,9 \text{ V}$

Na základe vyššie uvedených parametrov je možné určiť stratový výkon modulu podľa rovnice 7.43.

$$P_{D,rect} = 2 \cdot U_F \cdot I_{D,str} = 2 \cdot 0,9 \text{ V} \cdot 100 \text{ A} = 180 \text{ W} \quad (7.42)$$

Vypočítaný stratový výkon  $P_{D,rect}$  je menší ako maximálna výkonová strata, ktorú diódový modul znesie, z čoho vyplýva, že sa môže bezpečne použiť.

Výstupný filter je v zväracích zdrojoch často riešený iba filtračnou tlmivkou. Dôvod použitia samostatnej tlmivky bez kondenzátorov je ten, že výrobcovia sa snažia často ušetriť na výkonových komponentoch, používajú malé hodnoty indukčnosti tlmiviek, a teda kondenzátory by museli byť dimenzované na vysoké zvlhnenie prúdu. Pre napäťový mód je vhodné mať v zdroji kondenzátory. Pri návrhu výstupného filtru je potrebné určiť maximálne prípustné zvlhnenie prúdu špička - špička. To je zvolené na 10% z maximálnej hodnoty výstupného prúdu.

$$\Delta I = 0.1 \cdot 200 \text{ A} = 20 \text{ A} \quad (7.43)$$

$$L_{filt} = U_L \cdot \frac{dt}{dI} \approx (U_2 - U_z) \cdot \frac{s}{f \cdot \Delta I} [V, s, A, V, V, -.Hz, A] \quad (7.44)$$

$$U_2 = U_d \cdot \frac{N_2}{N_1} = 540 \text{ V} \cdot \frac{2}{19} \approx 57V \quad (7.45)$$

$$L_{filt} = (57 \text{ V} - 30 \text{ V}) \cdot \frac{0,28}{60000 \text{ Hz} \cdot 20 \text{ A}} = 6,3 \mu H \quad (7.46)$$

Tlmivkou bude tiecť DC prúd na výstup meniča, čiže pri jej výpočte bude uvažovaný efektívny prúd vodičom  $I_{ef} = 200 \text{ A}$ . Tlmivka bude navrhnutá s rezervou a jej maximálny prúd je zvolený na  $I_{L,max} = 220 \text{ A}$ . Jadro, na ktorom bude navinutá, bude rovnaké, na akom je navinutý transformátor - EC9030-CF297. Parametre tohoto

jadra boli zistené z katalógového listu. [12] Maximálna indukcia v jadre je zvolená na  $B_{max} = 0,35 T$ . Vo výpočte bude použitý prierez  $S_{Fe} = 620 mm^2$ .

$$N = \frac{L \cdot I_{L,max}}{\Delta B \cdot S_{Fe}} = \frac{6,3 \cdot 10^{-6} H \cdot 220 A}{0,35 T \cdot 620 \cdot 10^{-6} m^2} \approx 7 z \quad (7.47)$$

$$l_{vz} = \frac{N \cdot I_{L,max} \cdot \mu_0}{B_{max}} = \frac{7 \cdot 220 A \cdot \mu_0}{0,35 T} \approx 5,53 mm \quad (7.48)$$

Prúdová hustota je zvolená rovnako ako pri návrhu transformátora  $\sigma = 3 A \cdot mm^{-2}$ .

$$S_{Cu} = \frac{I_{1,ef}}{\sigma} = \frac{200 A}{3 A \cdot mm^{-2}} \approx 66,67 mm^2 \quad (7.49)$$

$$S_{Cu,tot} = N \cdot S_{Cu} = 7 \cdot 66,67 mm^2 = 466,69 mm^2 \quad (7.50)$$

$$S_o = W \cdot H = 19,25 mm \cdot 79 mm = 1366,75 mm^2 \quad (7.51)$$

$$k_{p,Cu} = \frac{S_{Cu,tot}}{S_o} = \frac{466,69 mm^2}{1366,75 mm^2} = 0,34 [-] \quad (7.52)$$

Činitel plnenia vinutia sa dá v praxi u tlmiviek dosiahnuť  $k_{p,Cu} = 0,5 - 0,75$ . Tlmivka teda bude na tomto jadre realizovateľná. [7]

Pri výpočte kapacity kondenzátora LC filtra je potrebné stanoviť maximálne zvlnenie napätia. To je zvolené na 1 V. Kapacita kondenzátora bude vypočítaná pomocou rovnice 7.54.

$$\Delta I_C = \frac{\Delta I_L}{2} = \frac{20 A}{2} = 10 A \quad (7.53)$$

$$C_{filt} = \frac{\Delta I_C}{16 \cdot f \cdot \Delta U} = \frac{5 A}{16 \cdot 60000 Hz \cdot 1 V} = 10,42 \mu F \quad (7.54)$$

Z dôvodu vysokého zvlnenia prúdu bude použitých viac kondenzátorov paralelne, rovnaako ako v medziobvode. V praxi sa používa vyššia kapacita, čo spôsobí veľmi malé zvlnenie výstupného napätia a zaistí veľmi dobrú stabilitu oblúku.

## 7.2.5 Tranzistorový menič

Keďže topológia meniča bola zvolená ako dvojčinný priepustný, výkonová časť bude obsahovať plný mostík, ktorý sa skladá zo štyroch tranzistorov. Na základe parametrov meniča boli do mostíka zvolené tranzistory využívajúce technológiu SiC, ktorá sa vyznačuje nízkymi spínacími stratami a nízkym odporom vodivého kanálu. Tranzistory je potrebné dimenzovať na efektívny prúd, ktorý sa vypočíta podľa rovnice

$$I_{c,ef} = I_{1,max} \cdot \sqrt{s} = 21,95 \text{ A} \cdot \sqrt{0,28} \approx 11,62 \text{ A} \quad (7.55)$$

Napätové dimenzovanie tranzistorov je potrebné previesť vzhľadom na napätie v medziobvode, kde sa objaví napätie  $U_{d,max} = 565 \text{ V}$ . Kvôli možným prekmitom je potrebné tranzistory dimenzovať aspoň na dvojnásobok, čomu vyhovuje  $U_{ds} = 1200 \text{ V}$ . Z dostupných boli vybrané tranzistory od firmy GeneSiC, model G3R75MT12K. Parametre tranzistoru sú nasledovné: [16]

- $U_{DS} = 1200 \text{ V}$
- $U_{GS,max} = -10 \text{ V} / 20 \text{ V}$
- $U_{GS,op} = -5 \text{ V} / 15 \text{ V}$
- $I_D = 22 \text{ A} (100^\circ\text{C})$
- $R_{DS,max} = 106 \text{ m}\Omega$
- $E_{On} = 151 \mu\text{J}$
- $E_{OFF} = 37 \mu\text{J}$
- $P_{D,max} = 137 \text{ W}$

Pre návrh chladenia je potrebné vypočítať straty na tranzistoroch.

$$P_{D,Q} = 4 \cdot (P_C + P_{SW}) [W, W, W] \quad (7.56)$$

$$P_{D,Q} = 4 \cdot ((R_{DS} \cdot I_{c,ef}^2) + ((E_{On} + E_{Off}) \cdot f_s)) [W, \Omega, A, J, J, Hz] \quad (7.57)$$

$$P_{D,Q} = 4 \cdot ((106 \cdot 10^{-3} \Omega \cdot (11,62 \text{ A})^2) + ((188 \cdot 10^{-6} \text{ J}) \cdot 60000 \text{ Hz})) = 102,37 \text{ W} \quad (7.58)$$

Kvôli eliminácii možných prekmitov je ku každému tranzistoru umiestnený RC snubber, ktorý slúži na ich tlmenie. Ku každej dvojici tranzistorov tvoriacej polomost je taktiež čo najbližšie umiestnený blokujúci kondenzátor, ktorý pohlcuje špičky a vytvára cestu pre uzatváranie vysokofrekvenčného prúdu.



## 7.2.6 Budič tranzistorov

Vzhľadom na to, že v mostíku sú použité 4 tranzistory a je nutné zabezpečiť dostatočné galvanické oddelenie riadiacich signálov, budú použité budiče s transformátormi. Podľa doporučenía v katalógovom liste tranzistorov je budiace napätie  $U_{GS} = 15 V / - 5 V$ . Kvôli rušeniu je tranzistory vhodné zatvárať záporným napätím, čo zabezpečí vyššiu odolnosť voči rušeniu. Ak by sa tranzistory zatvárali nulovým napätím, mohlo by sa cez millerovu kapacitu pri vysokej strmosti napätia  $du/dt$  na hradlo tranzistoru dostať malé napätie. Tranzistor by sa tak otvoril do aktívneho režimu a začal viesť prúd, pričom v tomto režime by na ňom vznikala značná výkonová strata a tranzistor by sa takto mohol zničiť. V horšom prípade by tranzistor mohol zopnúť, čo by mohlo viesť ku otvoreniu obidvoch tranzistorov pod sebou naraz. Pri tomto stave by sa skratoval medziobvod a vysoký skratový prúd by zničil tranzistory.

Maximálna strieda zopnutia tranzistorov v meniči je  $s = 0,46$ , pričom transformátor bude navrhnutý na maximálnu striedu  $s = 0,5$ . Jadro transformátora bude z feritového materiálu s vysokou permeabilitou, aby malo primárne vinutie dostatočú indukčnosť a magnetizačný prúd nebol vysoký. Na základe týchto požiadaviek bolo zvolené jadro hrnčekového tvaru  $P30 \times 19$  z materiálu TP4A. Parametre transformátora boli zistené z katalógového listu. [18]

- $A_{min} = 114,3 \text{ mm}^2$
- $A_e = 127,9 \text{ mm}^2$
- $A_L = 6400 \text{ nH}$
- $B_{sat} = 0,51 \text{ T (} 25^\circ\text{C)}$
- $B_{sat} = 0,39 \text{ T (} 100^\circ\text{C)}$
- $B_r = 0,11 \text{ T (} 25^\circ\text{C)}$

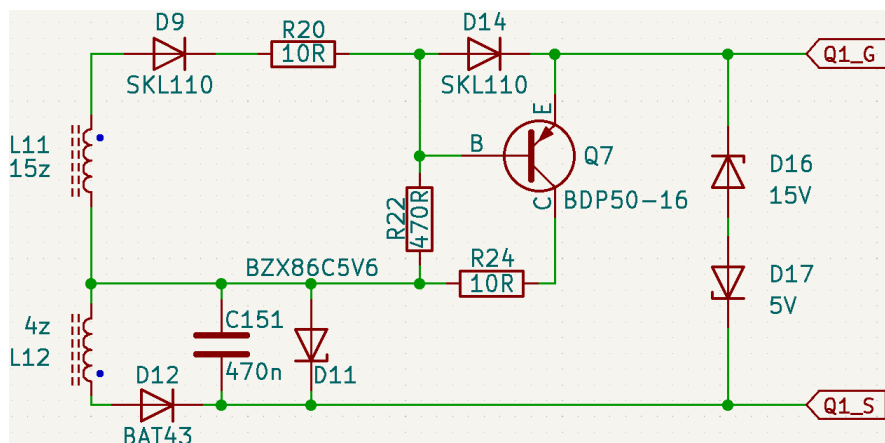
Pri výpočte budiaceho transformátora bude uvažovaná maximálna indukcia v jadre  $\Delta B = 0,1 \text{ T}$ . Táto hodnota bola zvolená na základe vysokej remanentnej indukcie jadra. Prierez jadra bude uvažovaný  $S_{Fe} = 127,9 \text{ mm}^2$ . Napájacie napätie na primárnej časti je  $U_1 = 12 \text{ V}$ . Vzhľadom na úbytky napätia na diódach a tranzistoroch v budiči, je sekundárne napätie zvolené  $U_2 = 21 \text{ V}$  a  $U_3 = 6 \text{ V}$ .

$$N_1 = \frac{U_{cc} \cdot s}{\Delta B \cdot f \cdot S_{Fe}} = \frac{12 \text{ V} \cdot 0,5}{0,1 \text{ T} \cdot 60000 \text{ Hz} \cdot 127,9 \cdot 10^{-6} \text{ m}^2} \approx 8 \text{ z} \quad (7.61)$$

$$N_2 = \frac{U_{GS+} \cdot N_1}{U_{cc}} = \frac{21 \text{ V} \cdot 8}{12 \text{ V}} \approx 14 \text{ z} \quad (7.62)$$

$$N_3 = \frac{U_{GS-} \cdot N_1}{U_{cc}} = \frac{6 \text{ V} \cdot 8}{12 \text{ V}} = 4 \text{ z} \quad (7.63)$$

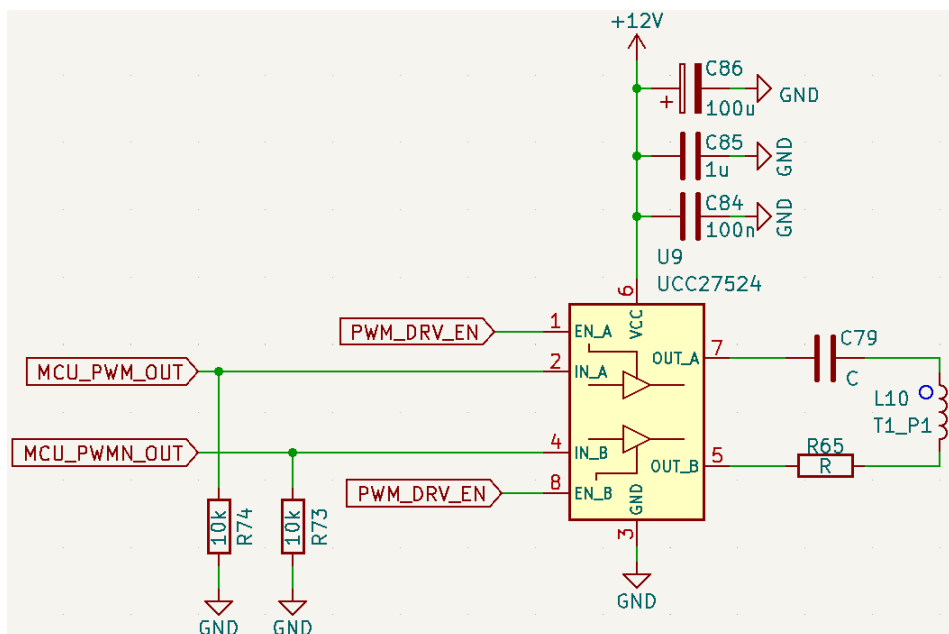
Budič je navrhnutý tak, aby pri zapnutí aj vypnutí dodal napätie podľa doporučených hodnôt v katalógovom liste  $U_{GS} = 15\text{ V} / -5\text{ V}$ . [16] Jeho schéma je zobrazená na obrázku 7.5



Obr. 7.5: Seknudárna časť budiča tranzistorov

Pri kladnom napätí na primárnom vinutí sa kladné napätie objaví aj na vinutiach L11 a L12. Z vinutia L11 prejde prúd cez D9, R20, D14 a cez zenerovu diódu D11. Napätie z vinutia L11 je teda zmenšené o úbytky prahového napätia na diódach D9, D14 a o úbytok 5,6 V na zenerovej dióde. Výsledné napätie sa teda objaví medzi G-S výkonového tranzistora a ten sa otvorí. Zároveň napätie z vinutia L12 nabije cez diódu D12 kondenzátor C151. Tranzistor Q7 zostane zatvorený. Pri zápornom pulze alebo nulovom napätí na primárnom vinutí sú všetky diódy zatvorené a otvorí sa tranzistor Q7, čím sa hradlo výkonového tranzistoru vybije cez rezistor R24. Keďže kondenzátor zostal nabitý, tak udrží v dobe vypnutia medzi G-S záporné napätie, čo zaisťuje bezpečne vypnutý tranzistor. Zenerove diódy na výstupe slúžia na ochranu tranzistora proti prepätiu.

Primárna strana budiča je realizovaná pomocou obvodu UCC27524. Ide o dvojité low side gate driver, ktorý je možné použiť na budenie transformátorov. Tento obvod je schopný dodať špičkový prúd až 5 A, má vstupy pre logickú úroveň 3,3 V a taktiež Enable vstupy, pomocou ktorých je možné vypnúť výstup obvodu. Schéma primárnej časti budiča je na obrázku 7.6.



Obr. 7.6: Primárna časť budiča tranzistorov

Kondenzátor C79 v sérii s primárnym vinutím chráni transformátor pred jednosmernou magnetizáciou rovnako ako vo výkonovej časti. Rezistor R65 je odporúčané osadiť, ak by dochádzalo ku vysokým prúdovým špičkám, ktoré by mohli poškodiť budiaci obvod. Jeho hodnota sa pohybuje v jednotkách Ohm. Enable vstup budiča transformátora bol využitý v časti s logickými obvodmi, ktorá zabezpečuje ochranu pred nadprúdom. Ochranu bude zabezpečovať aj mikrokontrolér, ale z dôvodu zvýšenia bezpečnosti bola časť ochrany integrovaná aj ako samostatný obvod, ktorý pracuje nezávisle od mikrokontroléru. Schéma je zobrazená na obrázku 7.7.





- Prúd motora podávača drôtu

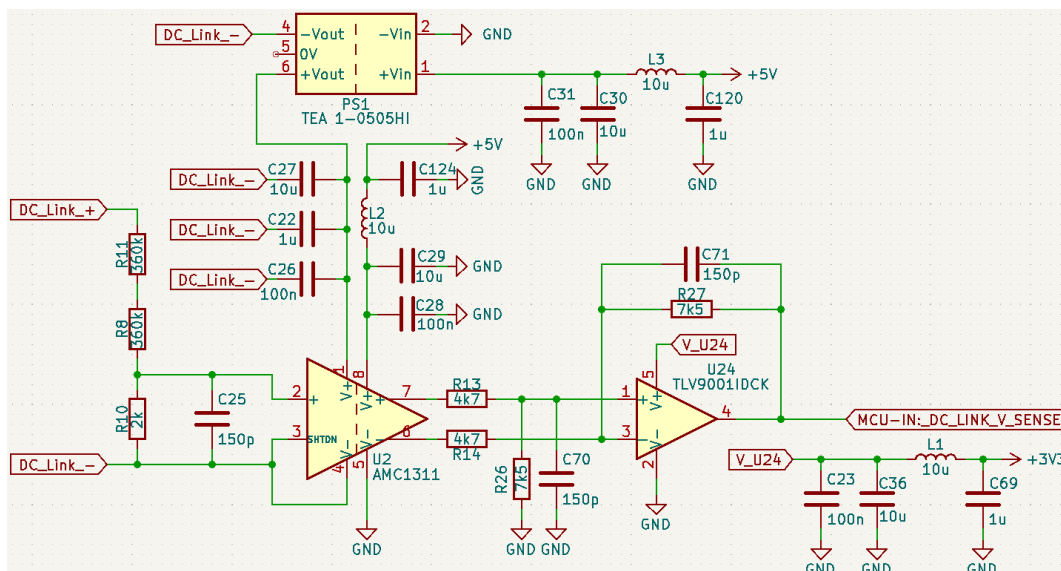
Pri realizácii meniča je z dôvodu bezpečnosti a rušenia vhodné galvanicky odizolovať celú riadiacu časť s mikrokontrolérom od okolitých obvodov. Z tohoto dôvodu sú merania všetkých veličín riešené cez izolované obvody a senzory.

### 7.3.1 Meranie napätia medziobvodu $U_d$

Meranie napätia medziobvodu a výstupného napätia je realizované pomocou izolovaných operačných zosilňovačov AMC1311 od firmy Texas Instruments. Tento obvod je priamo určený na izolované meranie napätia vo výkonových zdrojoch. Jeho parametre sú nasledovné: [19]

- $U_{dd} = 5 V$
- $U_{oz,in} = -0,1 - 2 V$
- $U_{oz,out} = 2 V$
- $Gain = 1 V/V$

Pri návrhu obvodu merania napätia je potrebné určiť maximálnu hodnotu napätia na medziobvode, ktorá bude môcť byť meraná bez saturácie operačného zosilňovača. Vzhľadom na toleranciu napätia v napájacej sústave a prekmity v medziobvode je zvolená hodnota maximálneho napätia  $U_{max} \approx 700 V$ . Prúd tečúci deličom napätia vďaka vysokoimpedančnému vstupu meracieho zosilňovača nemusí byť obzvlášť vysoký. Jeho hodnota je pri maximálnom vstupnom napätí  $I_R = 1 mA$ . Na základe týchto údajov bola vypočítaná hodnota rezistorov v deliči. Schéma obvodu merania napätia medziobvodu je na obrázku 7.8.



Obr. 7.8: Obvod merania napätia medziobvodu

Keďže hodnoty rezistorov boli zvolené z normalizovanej rady, ich hodnota je o niečo vyššia a maximálne merateľné napätie je vypočítané rovnicou 7.64

$$U_{d,max} = \frac{U_{in,max} \cdot R_{celk}}{R_{in}} = \frac{2 \text{ V} \cdot (360 \text{ k}\Omega + 360 \text{ k}\Omega + 2 \text{ k}\Omega)}{2 \text{ k}\Omega} = 722 \text{ V} \quad (7.64)$$

Kondenzátor C25 zaradený na vstupe izolovaného zosilňovača slúži spolu s rezistormi ako dolná priepuť a filtruje vysokofrekvenčné rušenie. Na výstupe izolovaného zosilňovača je zaradený operačný zosilňovač, ktorý slúži ako ďalšia dolná priepuť a prevádza výstupný diferenciálny signál na single-ended signál. Medzná frekvencia filtra je približne  $f_c \approx 141 \text{ kHz}$  a zosilnenie je dané pomerom rezistorov  $A \approx 1,6$ . Zosilnenie umožňuje využiť celý potenciál vstupu A/D prevodníka, ktorého maximálne napätie na vstupe je na mikrokontroléri bežne  $3,3 \text{ V}$ . Výstupné napätie zo zosilňovača pri plnom vstupnom napätí bude teda

$$U_{out} = U_{oz,out} \cdot \frac{R_{27}}{R_{14}} = 2 \text{ V} \cdot \frac{4,7 \text{ k}\Omega}{7,5 \text{ k}\Omega} = 3,2 \text{ V} \quad (7.65)$$

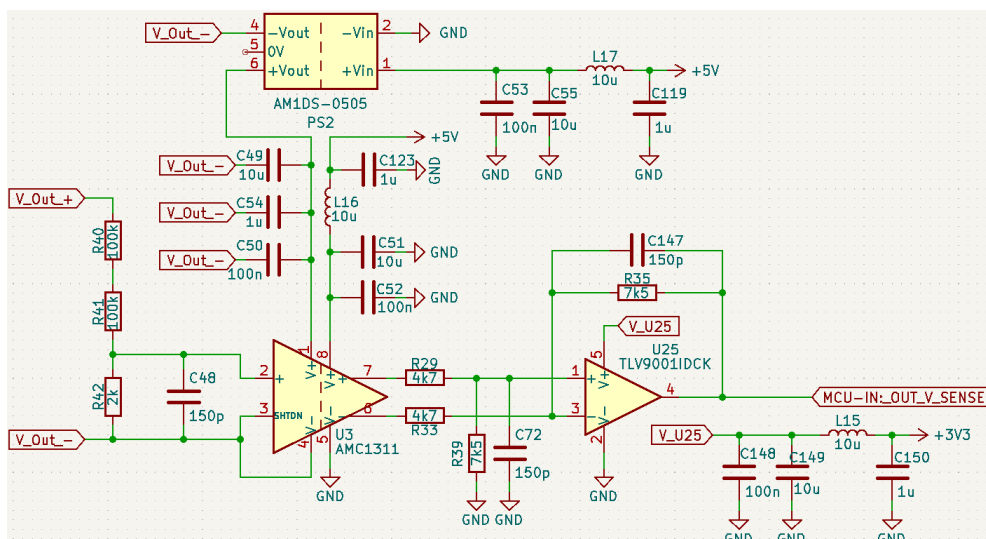
Zvýšený rozsah výstupného napätia má zároveň pozitívny efekt v rozlíšení napätia meraného AD prevodníkom. Napájanie izolovaného zosilňovača je riešené pomocou modulu izolovaného DC/DC meniča, ktorý zabezpečuje galvanické oddelenie napájania zosilňovača.

### 7.3.2 Meranie výstupného napätia $U_z$

Obvod merania výstupného napätia je takmer identický s obvodom merania napätia medziobvodu. Jediná zmena je v rezistoroch, ktoré tvoria delič na vstupe izolovaného zosilňovača. Maximálne vstupné napätie je zvolené kvôli možným prekmitom na  $U_{max} \approx 200 \text{ V}$ . Rovnako ako pri medziobvode je prúd rezistormi pri maximálnom vstupnom napätí zvolený na  $I_R = 1 \text{ mA}$ . Na základe hodnôt súčastok z normalizovanej rady je maximálne vstupné napätie vypočítané podľa rovnice 7.66.

$$U_{z,max} = \frac{U_{in,max} \cdot R_{celk}}{R_{in}} = \frac{2 \text{ V} \cdot (100 \text{ k}\Omega + 100 \text{ k}\Omega + 2 \text{ k}\Omega)}{2 \text{ k}\Omega} = 202 \text{ V} \quad (7.66)$$

Schéma obvodu na meranie výstupného napätia je zobrazená na obrázku 7.9.



Obr. 7.9: Obvod merania výstupného napätia

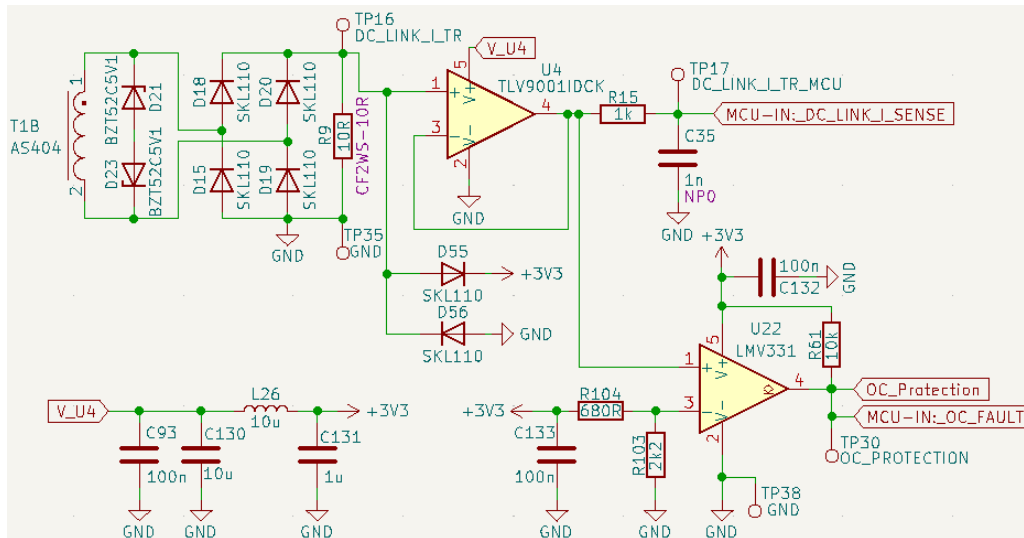
### 7.3.3 Meranie primárneho prúdu $I_1$

Obvod merania primárneho prúdu  $I_1$  tečúceho primárnym vinutím výkonového transformátora, slúži predovšetkým na ochranu meniča proti nadprúdu. Tento stav by mohol nastať napríklad saturáciou jadra transformátora. Meranie prúdu je realizované pomocou prúdového transformátora. Na tento účel bol vybraný transformátor AS404 od firmy Talema. Ide o prúdový transformátor, ktorý je vhodný pre použitie vo vysokofrekvenčných spínacích aplikáciách. Vďaka použitiu kondenzátorov sériovo s primárnym vinutím výkonového transformátora bude aj prúdový transformátor fungovať korektne a nebude dochádzať ku jeho jednosmernej magnetizácii a saturácii.

Parametre prúdového transformátora sú nasledovné a boli odčítané z katalógového listu. [20]

- $I_P = 50 \text{ A}$
- $f_{min} = 20 \text{ kHz}$
- $f_{max} = 200 \text{ kHz}$
- $Ratio_{prim/sec} = 1 : 100$

Schéma zapojenia merania prúdu je zobrazená na obrázku 7.10.



Obr. 7.10: Obvod merania primárneho prúdu

Výstup z prúdového transformátora je privedený cez usmerňovač na záťažový rezistor  $R_z$ , ktorý má hodnotu  $R_z = 10 \Omega$ . Maximálne napätie na rezistore je diódami D55 a D56 obmedzené približne na  $U_{R_z, \min} = 0 V$  a  $U_{R_z, \max} = 3,3 V$ , čo je vstupná úroveň AD prevodníka. Toto napätie sa objaví na rezistore pri prúde  $I_{prim} = 33 A$ . Napätie z rezistora  $R_z$  je privedené na vstup operačného zosilňovača U4, ktorý je zapojený ako sledovač. Na jeho výstupe je zaradená dolná priepust, ktorá filtruje vysokofrekvenčné prekmity. Z výstupu filtra je signál vedený do ADC prevodníka v mikrokontroléri.

Komparátor U22 v obvode slúži ako detektor nadprúdu. V prípade že bude výstupné napätie senzoru odpovedať prúdu vyššiemu ako napätie nastavené na invertujúcom pine komparátora, výstup sa preklolí do logickej 1. Výstup je privedený do logickej časti budičov tranzistorov. Funkcia obvodu je vysvetlená v kapitole o budičoch tranzistorov.

Referenčné napätie komparátora bolo určené na základe nadprúdu, ktorý bol zvolený na  $25 A$ . Tomuto prúdu odpovedá napätie  $U_{comp} = 2,5 V$ , ktoré zaisťuje pri napájaní napätím  $3,3 V$  kombinácia rezistorov s hodnotou  $680 \Omega$  a  $2,2 k\Omega$ .

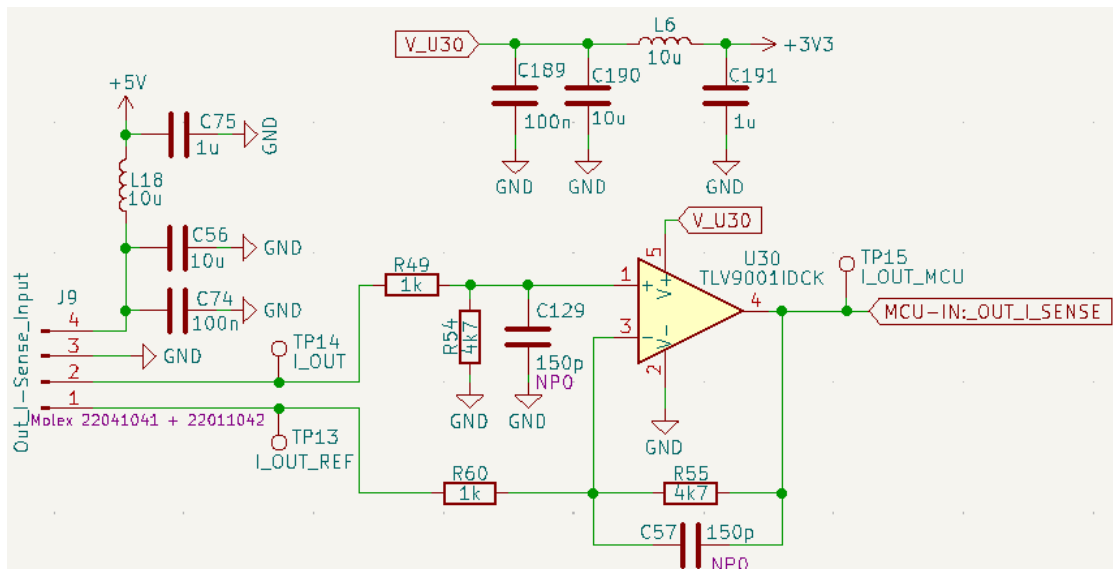
### 7.3.4 Meranie výstupného prúdu $I_z$

Obvod merania výstupného prúdu  $I_z$  tečúceho do záťaže je realizovaný pomocou senzoru pracujúceho na základe Hallovoho javu od firmy Tamura. Vybraný senzor

má označenie LA37S200S05KM a funguje systémom open-loop, čiže nemá zavedenú spätnú väzbu. Jeho parametre sú nasledovné: [21]

- $I_f = \pm 200 \text{ A}$
- $I_{f,max} = \pm 600 \text{ A}$
- $U_{cc} = 5 \text{ V}$
- $U_{ref} = 2,5 \text{ V}$
- $U_{out,I_f} = U_{ref} + 0,625 \text{ V}$
- $G = 3,125 \text{ mV/A}$

Schéma zapojenia merania prúdu je zobrazená na obrázku 7.11.



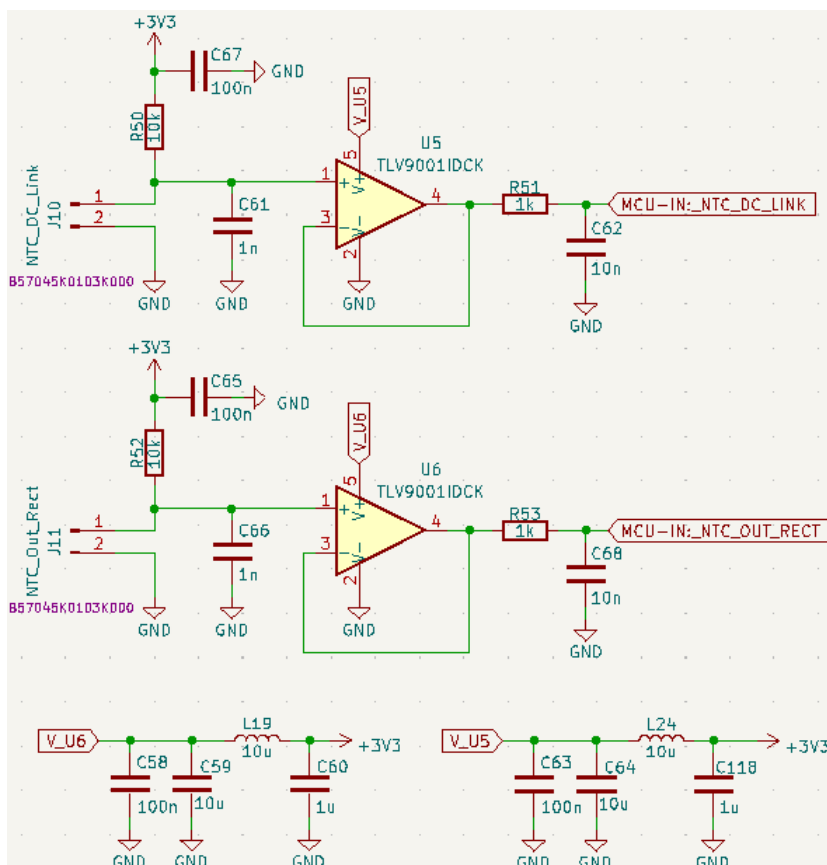
Obr. 7.11: Obvod merania výstupného prúdu

Na výstupe z prúdového senzora je zapojený operačný zosilňovač U30 ako diferenciálny zosilňovač. Ten odčíta referenčné napätie senzora od výstupného napätia a zároveň zosilňuje signál na úroveň pre meranie AD prevodníkom. Výstupné napätie pri maximálnom prúde  $I_z = 200 \text{ A}$  je vypočítané pomocou rovnice 7.67.

$$U_{CS,out} = (U_{out,I_f} - U_{ref}) \cdot \frac{R_f}{R_i} = (3,125 \text{ V} - 2,5 \text{ V}) \cdot \frac{4,7 \text{ k}\Omega}{1 \text{ k}\Omega} = 2,9375 \text{ V} \quad (7.67)$$

### 7.3.5 Meranie teploty chladičov

V rámci tepelnej ochrany a monitorovania stavu celého meniča je do riadiacej časti vhodné implementovať meranie teploty. To je realizované NTC termistormi, ktoré sú zapojené v obvode spolu s rezistorom. Schéma merania teploty je zobrazená na obrázku 7.12.



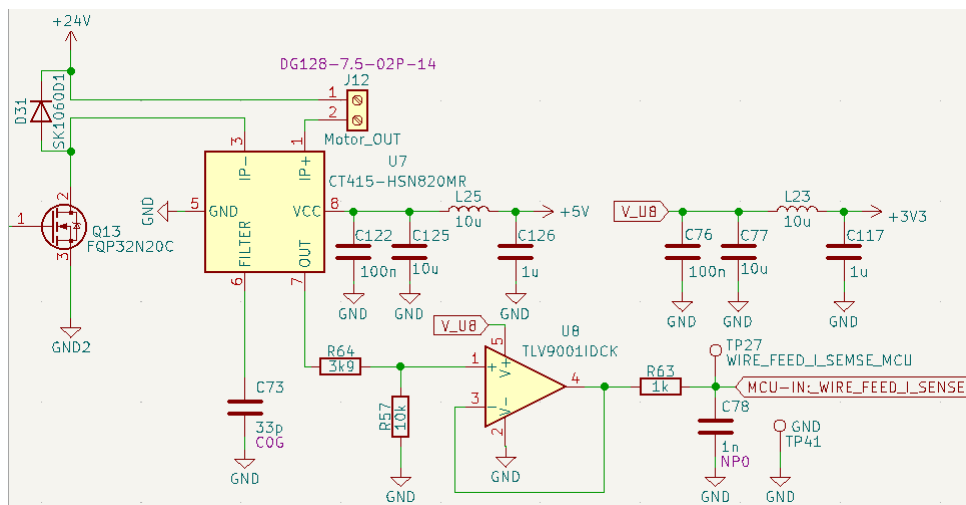
Obr. 7.12: Obvod merania teploty

Obvod funguje na princípe teplotne závislého termistora, ktorý v sériovom zapojení s rezistorom tvoria napäťový delič. Výstup z neho ide následne do vysokoimpedančného vstupu operačného zosilňovača čo zabezpečí, že delič nebude zaťažovaný nízkou impedanciou. Kondenzátor na vstupe spolu s rezistorovým deličom tvorí dolnú priepusť a filtruje rušenie, ktoré sa na vstupe môže objaviť. Za operačným zosilňovačom je zaradená ešte jedna dolná priepusť pre dodatočné filtrovanie rušenia, z ktorého je výstup privedený na AD prevodník. Obvod je v schéme nakreslený dvakrát z dôvodu monitorovania teploty chladiča s tranzistormi spolu so vstupným usmerňovačom a druhého chladiča s výstupnými usmerňovacími diódami.

Termistor, ktorý bude použitý, je od firmy EPCOS a má označenie B57045K0103K000. Vďaka jeho tvaru a montáži pomocou priskrutkovania na chladič, bude medzi chladičom a termistorom malý tepelný odpor, čím sa predídne skresleniu pri meraní teploty.

### 7.3.6 Meranie prúdu motora podávača drôtu

Na podávač drôtu bude použitý DC motor, ktorého zistené parametre sú  $U_m = 24 V$  a  $P = 100 W$ . Z týchto parametrov je možné približne určiť odoberaný prúd pri tomto výkone, ktorý bude  $I_m \approx 4,2 A$ . Prúdový senzor je v obvode zaradený z dôvodu ochrany motoru voči možnému preťaženiu. Pri možnom zaseknutí drôtu v podávači vzrastie prúd a motor bude vypnutý. Schéma zapojenia je zobrazená na obrázku 7.13. Motory v podávačoch bývajú často regulované na konštantnú rýchlosť avšak motor s podávacím mechanizmom, ktorý je k dispozícii, nemá senzor rýchlosti, pomocou ktorého by sa dala táto regulácia realizovať.



Obr. 7.13: Obvod merania prúdu motora

Snímanie prúdu je riešené pomocou obvodu ACS724. Ide o low-side snímač prúdu, ktorý využíva Hallov jav. Jeho výstup je izolovaný a obvod má v sebe integrovaný filter, ktorého medzná frekvencia sa nastavuje externým kondenzátorom. Tá je nastavená kondenzátorom C73 na  $f_c = 320 kHz$ . Výstup obvodu je zapojený cez rezistorový delič do napätového sledovača, za ktorým je dodatočná dolná priepust'. [22]

Kedže napätový výstup snímača prúdu má pri napájaní  $U_{cc} = 5 V$  výstup  $V_{out} = 2,5 V + (0,1 V / 1 A)$ , pri maximálnom prúde senzora sa na výstupe objaví napätie  $V_{out} = 4,5 V$ . Napätový delič znižuje maximálne napätie na približne  $3,23 V$ . [22]

## 7.4 Dimenzovanie chladenia

Chladenie zvracieho meniča bude realizované pomocou dvoch chladičov, na ktorých budú umiestnené výkonové komponenty. Na prvom chladiči budú umiestnené diódy

trojfázového usmerňovača spolu s výkonovými tranzistormi meniča. Ich celkový stratový výkon je vypočítaný rovnicou 7.68.

$$P_{D,celk} = P_{D,3f} + P_{D,Q} = 27,06 \text{ W} + 102,37 \text{ W} = 129,43 \text{ W} \quad (7.68)$$

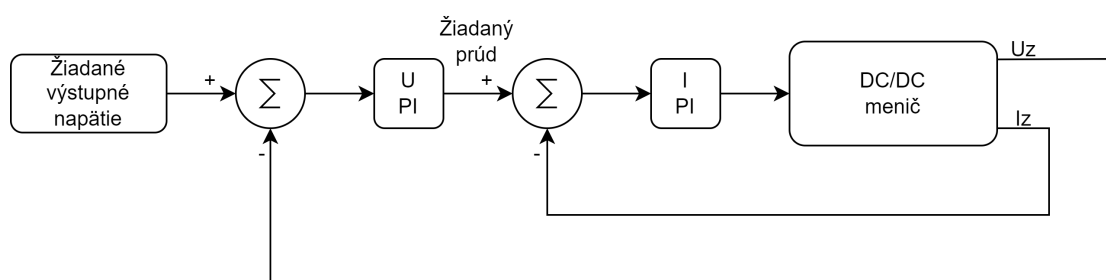
Druhý chladič bude obsahovať diódy výstupného usmerňovača. Stratový výkon tejto časti je vypočítaný pomocou rovnice 7.43 a jeho hodnota je  $P_{D,rect} = 180 \text{ W}$ .

Chladiče budú veľkostne podobné a z dôvodu použitia aktívneho chladenia bude ich veľkosť opäť zmenšená. Chladič, na ktorom budú umiestnené tranzistory a diódy, bude použitý aj ako podstava pre plošný spoj, čo uľahčí jeho montáž. Na každom chladiči bude umiestnené teplotné čidlo, ktoré bude monitorovať teploty a posluží taktiež na teplotnú ochranu realizovanú v mikrokontroléri.

## 7.5 Riadiaca časť

Riadenie meniča je zabezpečené pomocou mikrokontroléra s ARM jadrom, ktorý bude okrem samotného zdroja obsluhovať aj ostatné časti ktoré sú zobrazené v blokovej schéme v prílohe A.1.

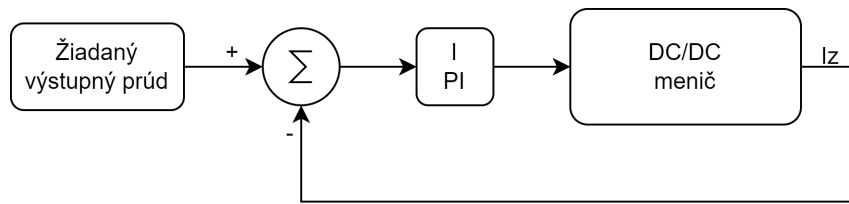
Celé riadenie je realizované pomocou dvoch kaskádne zapojených PI regulátorov. Prvý z nich je podradený napätový regulátor a druhý nadradený prúdový regulátor. Schéma zapojenia týchto regulátorov je zobrazená na obrázku 7.14.



Obr. 7.14: Schéma radenia meniča pomocou PI regulátorov v napätovom móde

V prípade použitia meniča v prúdovom móde sa regulačná štruktúra jednoduší a napätový regulátor je neaktívny. Žiadaný prúd je priamo zadávaný do do sumačného člena nadradeného prúdového regulátoru. Schéma je zobrazená na obrázku 7.15.





Obr. 7.15: Schéma radenia meniča v prúdovom móde

Výstup prúdoového regulátora bude v programe prepočítaný na potrebnú striedu PWM signálu, čím bude prebiehať regulácia meniča. Kvôli bezpečnosti bude každý regulátor ošetrený hysteréziou, aby nedošlo ku zadaniu žiadanej hodnoty mimo povolený rozsah čím by sa mohol menič preťažiť.

### 7.5.1 Mikrokontrolér

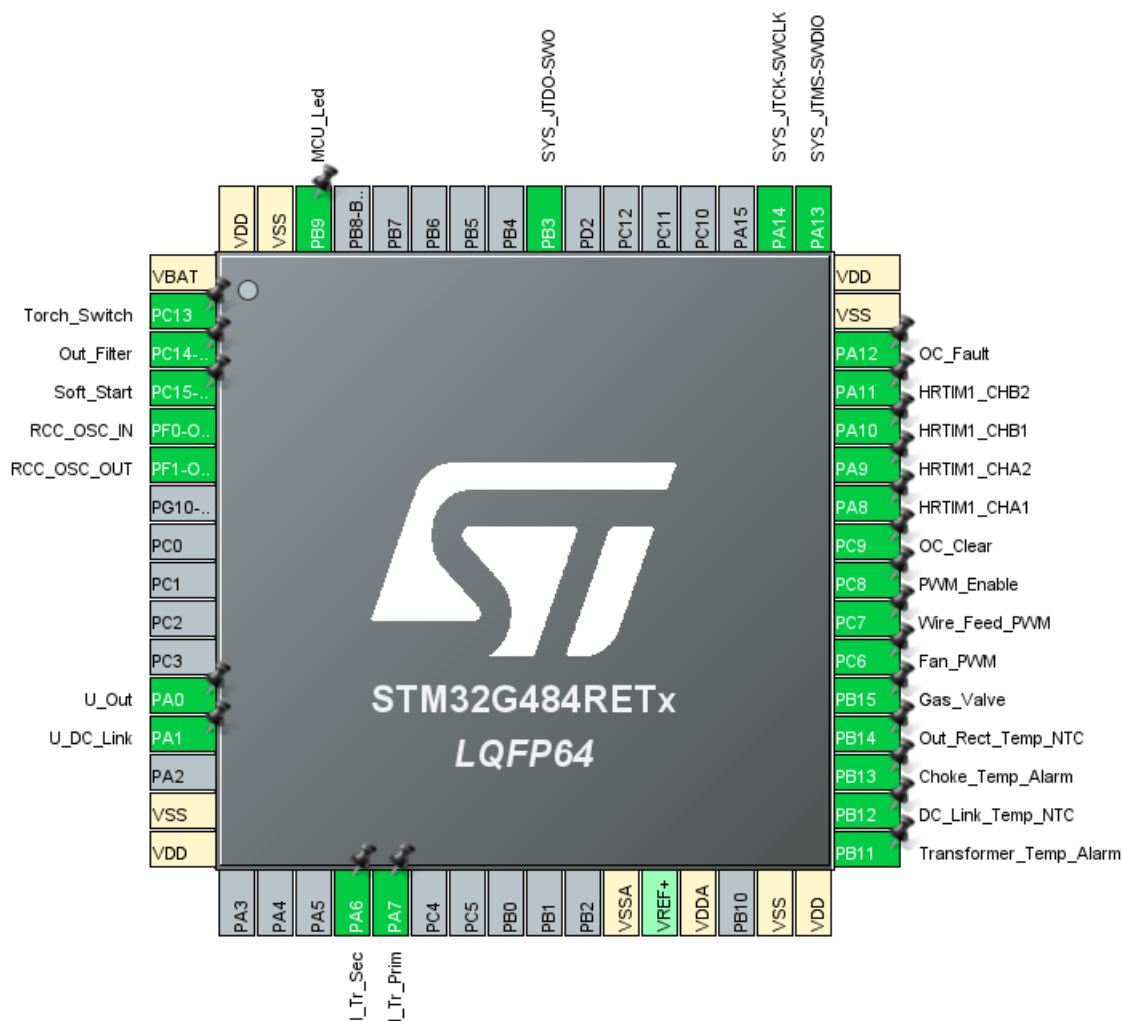
Mikrokontrolér vhodný na riadenie meniča musí splniť všetky požiadavky na to, aby bol schopný okrem riadenia meniča ovládať aj okolité periférie. Vzhľadom na všetky tieto potreby bol zvolený mikrokontrolér STM32G484 od firmy ST Microelectronics.

Rada a typ mikrokontroléru boli vybrané na základe odporúčania výrobcu, ktorý dizajnoval radu STM32G4 pre použitie do priemyselných aplikácií v oblasti výkonovej elektroniky. Jeho základné parametre sú nasledovné:

- *ARM Cortex M4 CPU*
- *170 MHz*
- *128 KB SRAM*
- *512 KB FLASH*
- *CORDIC, FMAC*
- *5 × 12 – bit ADC*
- *7 × 12 – bit DAC*
- *16 kanálov DMA*
- *17 časovačov*
- *SPI, I2C, USART, FDCAN*

Z rady bol vybraný 64 pinový mikrokontrolér STM32G484RE, ktorý obsahuje dostatok vstupno - výstupných pinov pre aplikáciu v zväracom zdroji. [23]

Namapovanie pinov mikrokontroléru je zobrazené na obrázku 7.16, ktorý bol vytvorený pomocou softvéru STM32CubeMX.



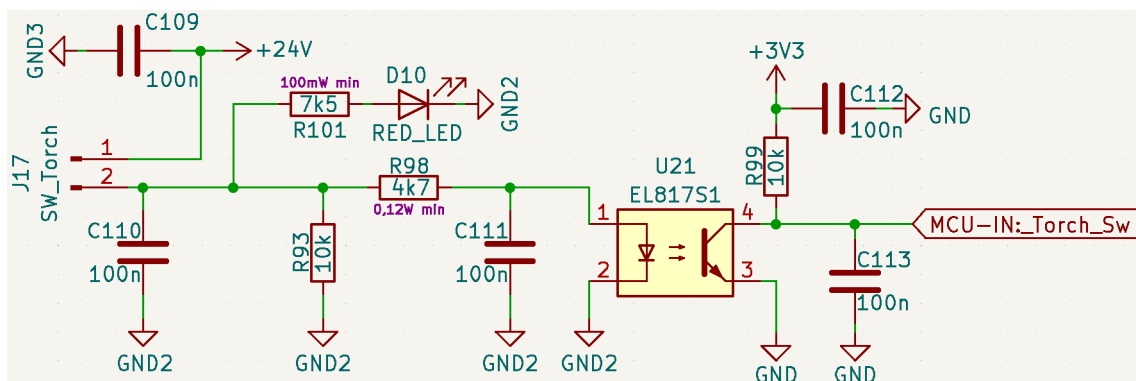
Obr. 7.16: Namapovanie pinov mikrokontroléra

Riadenie meniča bude realizované pomocou periférie HRTIMER. Ide o časovač s vysokým rozlíšením, ktorý má pomocou fázového závesu zvýšenú taktováciu frekvenciu oproti frekvencii ARM jadra až 32 krát. Tým je možné dosiahnuť vysoké rozlíšenie medzi jednotlivými krokmi nastavenia šírky pulzov PWM. Je však nutné ošetriť stav pri veľmi malých striedach, kedy by mohlo dôjsť ku tomu, že tranzistor by sa neotvoril úplne ale dostal by sa do aktívneho režimu.

Periféria HRTIM bude okrem ovládania striedy PWM signálu ovládať aj spúšťanie periférie AD prevodníkov.

Schéma zapojenia mikrokontroléra je uvedená na obrázku 7.17.



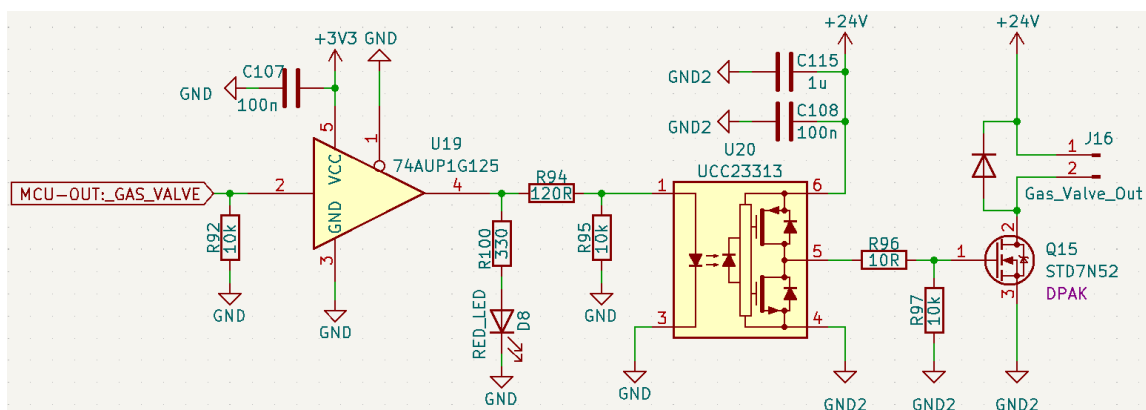


Obr. 7.18: Obvod spínača horáka

Pri zopnutí tlačidla sa objaví napätie 24 V na kondenzátore C110, ktorý čiastočne eliminuje prekmity vznikajúce pri stlačení tlačidla. Prúd sa následne dostane na vstup optočlenu U21 a otvorí sa tranzistor na výstupe. Kondenzátor C111 slúži na dodatočnú filtráciu prekmity pri stlačení tlačidla. Na signalizáciu stlačenia tlačidla je v obvode zaradená červená LED.

### 7.5.3 Plynový ventil

Plynový elektromagnetický ventil ovláda prítok plynu do zvaracieho horáka pri metódach MIG/MAG a TIG. Rovnako ako motor, aj plynový ventil je dimenzovaný na napájanie napätím 24 V. Je ovládaný výstupom z mikrokontroléra, z čoho vyplýva, že riadiaci obvod musí byť izolovaný. Schéma zapojenia je na obrázku 7.19.



Obr. 7.19: Obvod spínania ventilu

Výstup z mikrokontroléra je vedený do buffera, ktorý prúdovo posilňuje signál. Z neho je signál vedený cez rezistor R100 do signalizačnej LED diódy D8 a optočlenu

U20 s výstupom prispôsobeným na riadenie tranzistora. Výstupná časť optočlena je napájaná napätím 24 V a ovláda tranzistor Q15, na ktorý je pripojený plynový ventil. Paralelne k cievke elektromagnetu je pripojená dióda, ktorá ochraňuje obvod proti napätovej špičke a umožňuje uzatvorenie prúdu elektromagnetu po vypnutí.

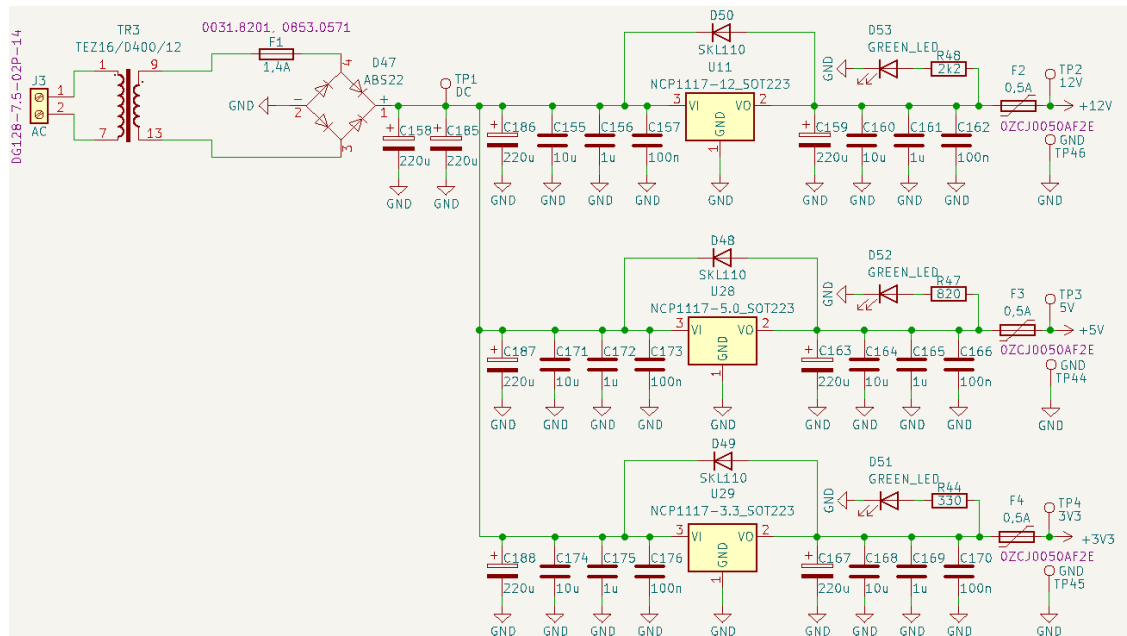
## 7.6 Pomocné zdroje

Na napájanie celého zvracieho meniča sú použité dva pomocné zdroje. Jeden z nich na napájanie riadiacej časti s budičmi a druhý na napájanie externých obvodov motora, ventilu plynu a spínača na zváracom horáku.

### 7.6.1 Napájací zdroj riadiacej časti a budičov

Keďže riadiaca časť a budiče tranzistorov nie sú obzvlášť výkonovo náročné, je pre túto časť zvolené napájanie pomocou sieťového transformátora. Vzhľadom na použitie trojfázového napájania meniča je primárne napätie transformátora zvolené na medzifázové  $U_{prim,ef} = 400 V$ . Vzhľadom na potrebné výstupné úrovne napätí  $U_1 = 12 V$ ,  $U_2 = 5 V$  a  $U_3 = 3,3 V$  je zvolené napätie sekundárneho vinutia transformátora  $U_{sec,ef} = 12 V$ . Týmto požiadavkám vyhovuje transformátor TEZ16/D400/12V s výkonom 16 VA. [24]

Schéma napájacieho zdroja riadiacej časti a budičov je zobrazená na obrázku 7.20.



Obr. 7.20: Napájací zdroj riadiacej časti a budičov

Napájací zdroj sa skladá zo sieťového transformátora, ktorého napätie sekundárneho vinutia je usmernené mostíkovým usmerňovačom a následne vyfiltrované kondenzátormi C158 a C185. Za nimi sú umiestnené tri identicky zapojené vetvy s lineárnymi stabilizátormi napätia NCP1117, ktoré zabezpečujú stabilizáciu na požadované napätové úrovne. Vstup a výstup každého stabilizátora je prepojený diódou, ktorá zabezpečuje ochranu proti prepätiu na výstupe. Paralelne s elektrolytickými kondenzátormi sú umiestnené keramické kondenzátory, ktoré slúžia na filtráciu možného vysokofrekvenčného rušenia. Na výstupe každej napätovej vetvy je umiestnená led dióda slúžiaca na indikáciu funkčnosti a PTC poistka, ktorá chráni stabilizátor voči nadprúdu.

## 7.6.2 Napájací zdroj externých obvodov

Pre napájanie externých obvodov je potrebné napätie  $U_z = 24 V$ . S rezervou je maximálny výstupný prúd zvolený na  $I_z = 8 A$ . Celkový výstupný výkon bude teda  $192 W$ .

Na základe vstupných parametrov bola zvolená topológia blokujúceho meniča. Táto topológia má výhodu v absencii výstupnej tlmivky, čo znižuje celkové rozmery a náklady na výrobu zdroja. Ovládací obvod zdroja bude UC3844. Spínacia frekvencia bola zvolená na  $80 kHz$ . Zdroj má vlastný medziobvod, ktorý je napájaný zo siete medzifázovým napätím  $400 V$ . Napätie na medziobvode je vypočítané rovnicou 7.69.

$$U_m = U_f \cdot \sqrt{2} = 400 V \cdot \sqrt{2} \approx 565 V \quad (7.69)$$

## 7.6.3 Transformátor

Pri záťaži napätie medziobvodu klesne, preto bude zdroj navrhnutý s napätím medziobvodu  $U_d = 540 V$ . Jadro, na ktorom bude navinutý transformátor, je zvolené na ETD3411-CF297. Parametre tohoto jadra boli zistené z katalógového listu. [25] [26]

- $A_e = 84,3 mm^2$
- $A_m in = 71,9 mm^2$
- $A_L = 2300 nH$
- $B_{sat} = 0,49 T (25^\circ C)$
- $B_{sat} = 0,39 T (100^\circ C)$
- priemer stĺpika  $d = 9,8 mm$
- šírka okna  $W = 6,475 mm$
- výška okna  $H = 23,8 mm$

V prvom kroku je zvolená maximálna strieda, pri ktorej bude zdroj pracovať. Tá sa vypočíta rovnicou 7.70. Maximálne napätie na tranzistore  $U_{CE,max}$  pri demagnetizácii transformátora bolo zvolené na  $U_{CE,max} = 800 \text{ V}$ ;

$$s_{max} = 1 - \frac{U_d}{U_{CE,max}} = 1 - \frac{U_d}{U_{CE,max}} = 1 - \frac{800 \text{ V}}{540 \text{ V}} = 0,325 [-] \quad (7.70)$$

Následne boli vypočítané potrebné počty závitov primárneho a sekundárneho vinutia. Maximálny zdvih sýtenia transformátora bol zvolený na  $\Delta B = 0,25 \text{ T}$ . Na transformátore bude navinuté taktiež pomocné vinutie, slúžiace na napájanie riadiacej elektroniky zdroja. Výstupné napätie tohoto vinutia bude  $19 \text{ V}$  a z dôvodu minimálneho odberu bude navinutý tenkým vodičom, čiže nebude počítaný do koeficientu zaplnenia okna.

$$N_1 = \frac{U_d \cdot s}{\Delta B \cdot f \cdot S_{Fe}} = \frac{540 \text{ V} \cdot 0,325}{0,25 \text{ T} \cdot 80000 \text{ Hz} \cdot 84,3 \cdot 10^{-6} \text{ m}^2} \approx 104 \text{ z} \quad (7.71)$$

$$N_2 = \frac{U_z + U_f}{U_{CE,max} - U_d} \cdot N_1 = \frac{24 \text{ V} + 1 \text{ V}}{800 \text{ V} - 540 \text{ V}} \cdot 104 \approx 10 \text{ z} \quad (7.72)$$

$$N_3 = \frac{U_z + U_f}{U_{CE,max} - U_d} \cdot N_1 = \frac{24 \text{ V} + 1 \text{ V}}{800 \text{ V} - 540 \text{ V}} \cdot 104 \approx 8 \text{ z} \quad (7.73)$$

Indukčnosť primárneho vinutia a magnetizačný prúd je vypočítaný podľa rovníc 7.75 a 7.76. Uvažovaná efektívnosť meniča je 85 %.

$$I_{d,str} = \frac{P_1}{\Phi \cdot U_d} = \frac{192 \text{ W}}{0,85 \cdot 540 \text{ V}} \approx 0,42 \text{ A} \quad (7.74)$$

$$I_{1,\dot{s}p} = \frac{2 \cdot I_{d,str}}{s_{max}} = \frac{2 \cdot 0,42 \text{ A}}{0,325} \approx 2,59 \text{ A} \quad (7.75)$$

$$L_{prim} = U_d \cdot \frac{\Delta t}{\Delta I} = U_d \cdot \frac{s}{f \cdot \Delta I} = 540 \text{ V} \cdot \frac{0,325}{80000 \text{ Hz} \cdot 2,59 \text{ A}} \approx 847 \text{ } \mu\text{H} \quad (7.76)$$

Ďalej bude vypočítaná potrebná vzduchová medzera transformátora podľa rovnice 7.77

$$lvz = \frac{N_1 \cdot I_{1,\dot{s}p} \cdot \mu_0}{B_{max}} = \frac{104 \cdot 2,59 \text{ A} \cdot \mu_0}{0,25 \text{ T}} \approx 1,35 \text{ mm} \quad (7.77)$$

V nasledujúcom kroku bude vypočítaný efektívny prúd primárneho a sekundárneho vinutia pre dimenzovanie prierezu vodičov.

$$I_{1,ef} = I_{1,\check{s}p} \cdot \frac{\sqrt{s}}{\sqrt{3}} = 2,59 \text{ A} \cdot \frac{\sqrt{0,325}}{\sqrt{3}} \approx 0,85 \text{ A} \quad (7.78)$$

$$I_{2,\check{s}p} = I_{1,\check{s}p} \cdot \frac{N_1}{N_2} = 2,59 \text{ A} \cdot \frac{104}{10} \approx 26,94 \text{ A} \quad (7.79)$$

$$I_{2,ef} = \frac{I_{2,\check{s}p}}{\sqrt{3}} \cdot \sqrt{1-s} = \frac{26,94 \text{ A}}{\sqrt{3}} \cdot \sqrt{1-0,325} \approx 12,78 \text{ A} \quad (7.80)$$

Posledným krokom je výpočet zaplnenia okna transformátora. Prúdová hustota uvažovaná pri výpočte prierezu vinutia bude  $\sigma = 4 \text{ A} \cdot \text{mm}^{-2}$ . Hodnota prúdovej hustoty je oproti predchádzajúcim výpočtom vyššia, pretože zdroj nebude za maximálny prúd nikdy dlhodobo zaťažovaný.

$$S_{Cu1} = \frac{I_{1,ef}}{\sigma} = \frac{0,85 \text{ A}}{4 \text{ A} \cdot \text{mm}^{-2}} \approx 0,22 \text{ mm}^2 \quad (7.81)$$

$$S_{Cu2} = \frac{I_{2,ef}}{\sigma} = \frac{12,78 \text{ A}}{4 \text{ A} \cdot \text{mm}^{-2}} \approx 3,2 \text{ mm}^2 \quad (7.82)$$

$$S_{Cu,tot} = N_1 \cdot S_{Cu1} + N_2 \cdot S_{Cu2} = 104 \cdot 0,22 \text{ mm}^2 + 10 \cdot 3,2 \text{ mm}^2 = 54,88 \text{ mm}^2 \quad (7.83)$$

$$S_o = W \cdot H = 6,475 \text{ mm} \cdot 23,8 \text{ mm} \approx 154,1 \text{ mm}^2 \quad (7.84)$$

$$k_{p,Cu} = \frac{S_{Cu,tot}}{S_o} = \frac{54,88 \text{ mm}^2}{154,1 \text{ mm}^2} \approx 0,36 [-] \quad (7.85)$$

Transformátor na tomto jadre bude pri tomto koeficiente plnenia podľa [7] realizovateľný, keďže  $k_{p,Cu} \leq 0,4$ .



## 7.6.4 Výstupný usmerňovač a filter

Na vhodné dimenzovanie výstupnej diódy je potrebné opäť vypočítať stredný prúd a maximálne napätie, ktoré sa na dióde objaví.

$$I_{D1, str} = I_z = 8 \text{ A} \quad (7.86)$$

$$U_{D1, max} = U_z + U_{d, max} \cdot \frac{N_2}{N_1} = 24 \text{ V} + 565 \text{ V} \cdot \frac{10}{104} \approx 76,4 \text{ V} \quad (7.87)$$

Diódy budú dimenzované na stredný prúd a dvojnásobok maximálneho napätia, čo je približne 160 V. Dióda pre túto vetvu je zvolená na typ SDUR1530-SMC. Ide o diódu v púzdre TO-220, ktorá zvládne maximálne záverné napätie 300 V a prúd 15 A. Prahové napätie je 0,93 V [27]

$$P_{D1} = U_f \cdot I_{D, str} = 0,93 \text{ V} \cdot 8 \text{ A} \approx 7,44 \text{ W} \quad (7.88)$$

Po dimenzovaní výstupnej diódy je nutné vypočítať kapacitu filtračných kondenzátorov. Zvolené zvlnenie napätia je 1 V.

$$C = \frac{I_{2, šp} \cdot s}{\Delta U \cdot f} = \frac{26,94 \text{ A} \cdot (1 - 0,325)}{1 \text{ V} \cdot 80000 \text{ Hz}} \approx 227 \text{ } \mu\text{F} \quad (7.89)$$

$$\Delta I_{C2, ef} = \sqrt{I_{2, ef}^2 \cdot I_z^2} = \sqrt{(12,78 \text{ A})^2 \cdot (8 \text{ A})^2} = 10 \text{ A} \quad (7.90)$$

Kvôli relatívne vysokému zvlneniu prúdu je potrebné dostatočne dimenzovať výstupné kondenzátory. Tie boli zvolené na typ ED1V152MNN1235 od firmy Elite. Ich kapacita je 1500  $\mu\text{F}$ , maximálne napätie 35 V a maximálne zvlnenie prúdu 2,88 A. Budú použité štyri kusy paralelne. Takto zapojené budú mať voči výpočtu oveľa vyššiu kapacitu, čím sa zmenší výstupné zvlnenie napätia. [28]

## 7.6.5 Vstupný filter, medziobvod a výkonová časť

Vstup pomocného zdroja je filtrovaný rovnako ako vstup zvracieho meniča proti rušeniu. Filter pozostáva z kondenzátorov a cievky, ktorá eliminuje súhlasné rušenie. Zároveň svojou rozptylovou indukčnosťou napomáha filtrovať aj diferenciálne rušenie. Za filtrom je zaradený NTC termistor, ktorý slúži na obmedzenie prúdu pri zapnutí

zdroja. Následne je zapojený mostíkový usmerňovač a medziobvod s výkonovou časťou.

Pre vhodné dimenzovanie kondenzátorov v medziobvode je potrebné vypočítať ich kapacitu. Tá bola vypočítaná podľa [8]. Pokles napätia bol zvolený na 5 %.

$$t_n = \frac{\arccos(1 - \delta)}{2 \cdot \pi \cdot f} = \frac{\arccos(1 - 0,05)}{2 \cdot \pi \cdot 50} = 1,01 \text{ ms} \quad (7.91)$$

$$\delta = \frac{\Delta U}{U_m} \rightarrow \Delta U = U_m \cdot \delta = 565 \text{ V} \cdot 0,05 = 28,25 \text{ V} \quad (7.92)$$

$$\Delta t = \frac{T}{2} - t_n = \frac{1}{2 \cdot 50 \text{ Hz}} - 1,01 \text{ ms} = 8,99 \text{ ms} \quad (7.93)$$

Stredná hodnota primárneho prúdu je vypočítaná s rezervou 15 % .

$$I_d = \frac{1,15 \cdot P_z}{U_d} = \frac{1,15 \cdot 192 \text{ W}}{540 \text{ V}} \approx 0,41 \text{ A} \quad (7.94)$$

$$C_{filt} = I_d \cdot \frac{\Delta t}{\Delta U} = 0,41 \text{ A} \cdot \frac{8,99 \text{ ms}}{28,25 \text{ V}} \approx 130 \mu\text{F} \quad (7.95)$$

Kvôli vysokému napätiu v medziobvode budú zapojené dva kondenzátory sériovo. Kapacita jedného kondenzátora je  $330 \mu\text{F}$ , čiže výsledná kapacita bude  $165 \mu\text{F}$ . Oproti výpočtu je hodnota kapacity vyššia, následkom čoho bude zvlnenie napätia v medziobvode nižšie.

Tranzistor je dimenzovaný kvôli možným prekmitom napätia na  $1200 \text{ V}$ . Prúdovo je tranzistor potrebné dimenzovať na efektívny prúd, čiže  $0,85 \text{ A}$ . Bol zvolený tranzistor využívajúci SIC technológiu od firmy GeneSiC, model G3R350MT12D.[29] Jeho straty sú vypočítané nižšie.

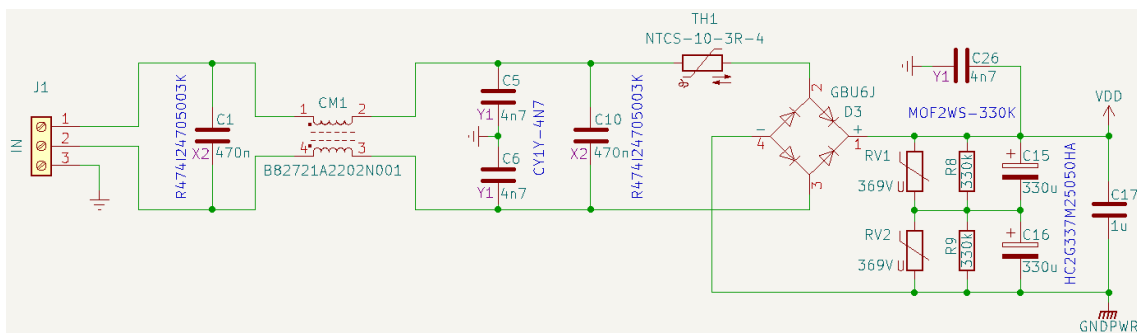
- $U_{DS} = 1200 \text{ V}$
- $U_{GS,max} = -10 \text{ V} / 20 \text{ V}$
- $I_D = 5 \text{ A} (135^\circ\text{C})$
- $R_{DS,max} = 0,35 \Omega$
- $t_{On} = 14 \text{ nS}$
- $t_{Off} = 10 \text{ nS}$
- $E_{tot} = 39 \mu\text{J}$

$$P_{D,Q} = (P_C + P_{SW}) [W, W, W] \quad (7.96)$$

$$P_{D,Q} = (R_{DS} \cdot I_{c,ef}^2) + (E_{tot}) \cdot f_s [W, \Omega, Hz] \quad (7.97)$$

$$P_{D,Q} = 0,35 \Omega \cdot (0,85 A)^2 + 39 \mu J \cdot 80000 Hz \approx 3,4 W \quad (7.98)$$

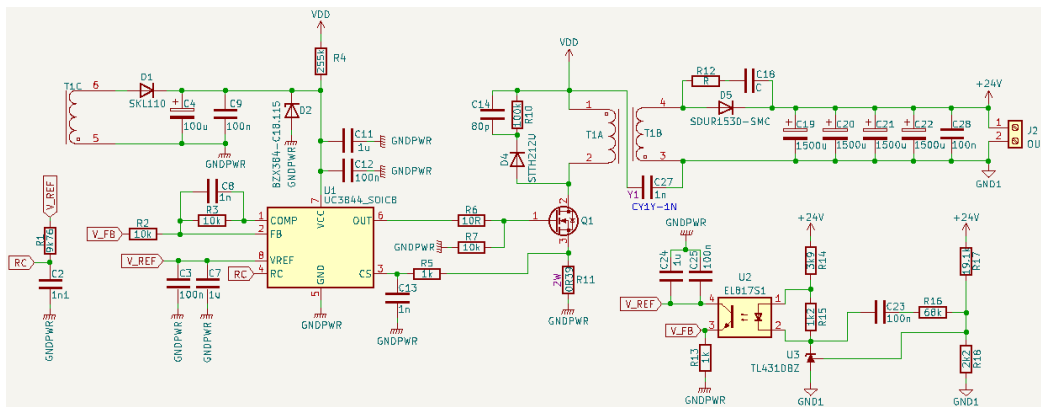
Schéma vstupnej časti a medziobvodu pomocného zdroja je zobrazená na obrázku 7.21.



Obr. 7.21: Vstupný filter a medziobvod

## 7.6.6 Riadiace obvody

Riadiaca časť pomocného zdroja pozostáva z obvodu UC3844, ktorý generuje PWM signál a zároveň na základe spätnej väzby riadi ich striedu. Spínacia frekvencia zdroja je nastavená pomocou RC článku približne na 80 kHz. Výstup PWM signálu vedie cez rezistor priamo na hradlo výkonového tranzistora. Napätová spätná väzba je realizovaná na výstupe pomocou PI regulátora, ktorého základom je napätová referencia TL431. Signál regulátora riadi optočlen EL817, ktorý pracuje v aktívnom režime. Na kolektore optočlena je privedené referenčné napätie obvodu UC3844 a výstup z emitora je zapojený do vstupu napätovej spätnej väzby. Obvod obsahuje taktiež vstup na snímanie prúdu, ktorý chráni zdroj pred nadprúdom. Snímanie prúdu je realizované pomocou rezistorového bočníka R11, na ktorom vzniká úbytok napätia. Jeho výstup je privedený cez RC filter do obvodu. Schéma riadiacich obvodov a sekundárnej strany je na obrázku 7.22.



Obr. 7.22: Riadiaca a výstupná časť pomocného zdroja

## 8 Konštrukcia zdroja

Táto kapitola sa zaoberá samotnou konštrukciou, od návrhu plošných spojov až po celkové oživenie zdroja a jeho súčastí.

### 8.1 Návrh plošných spojov

Celý menič bol navrhnutý na jednom plošnom spoji s oddelenou výkonovou a radiacou časťou. Kvôli zložitosti jednotlivých častí, bol zvolený štvorvrstvový plošný spoj. Všetky výkonové polovodiče sú namontované na plošnom spoji zo spodnej strany, aby bolo možné ich jednoduché umiestnenie na chladič. Plošné spoje boli navrhnuté v programe KiCad.

Jednotlivé časti meniča boli rozdelené na niekoľko častí a pre každú bol navrhnutý samostatný plošný spoj. Prvou časťou je vstupný usmerňovač s medziobvodom, tranzistorovým mostíkom a radiacou časťou. Navrhnutý plošný spoj a 3D model je zobrazený v prílohe B.1 a C.1

Nad výkonovými tranzistormi je umiestnený jednovrstvový plošný spoj s budičmi, ktorý je zobrazený s 3D modelom v prílohe D.1 a E.1. Prepojenie budičov a výkonových tranzistorov bude realizované pomocou spleteného dvojlinkového vodiča.

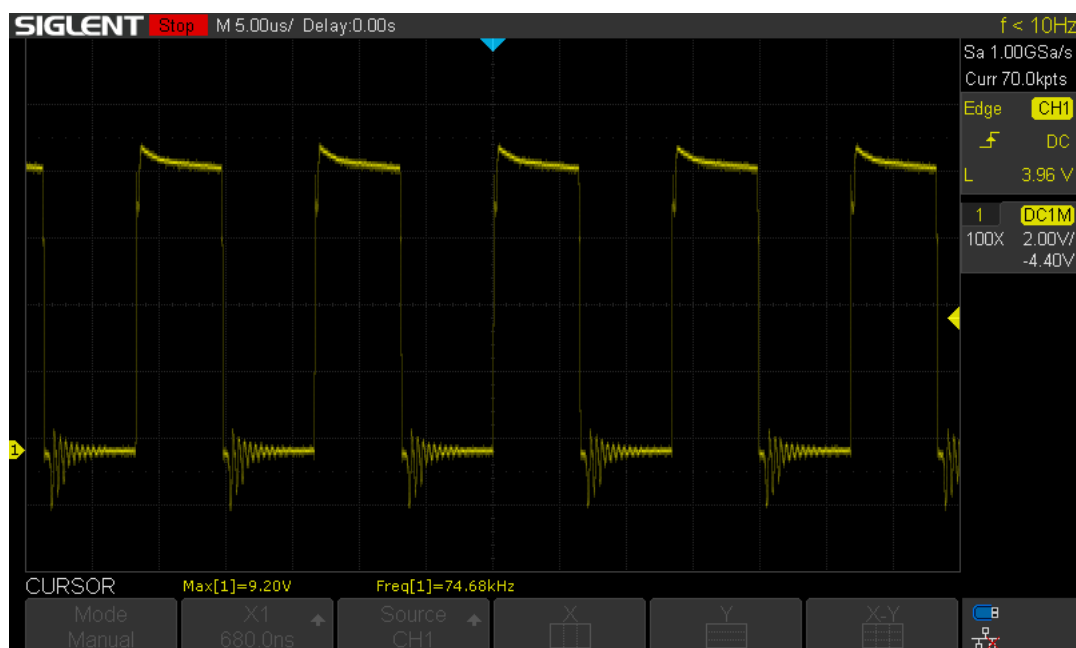
Na vstupe do meniča je umiestnený trojfázový filter, ktorý je realizovaný na dvojvrstvom plošnom spoji. Je zobrazený aj s 3D modelom v prílohe F.1 a G.1.

Ďalšou súčasťou meniča je plošný spoj, na ktorom sú umiestnené kondenzátory, ktoré zabezpečujú ochranu proti jednosmernej magnetizácii. Ide o dvojvrstvový plošný spoj s kondenzátormi a napájacími svorkami. Je zobrazený spolu s 3D modelom v prílohe H.1 a I.1.

Posledným plošným spojom je pomocný 24 V zdroj, ktorý napája externé súčasti zväracieho invertora. Je navrhnutý na dvojvrstvom plošnom spoji a je zobrazený spolu s 3D modelom v prílohe J.1 a K.1.

## 8.2 Zloženie a oživenie pomocného zdroja

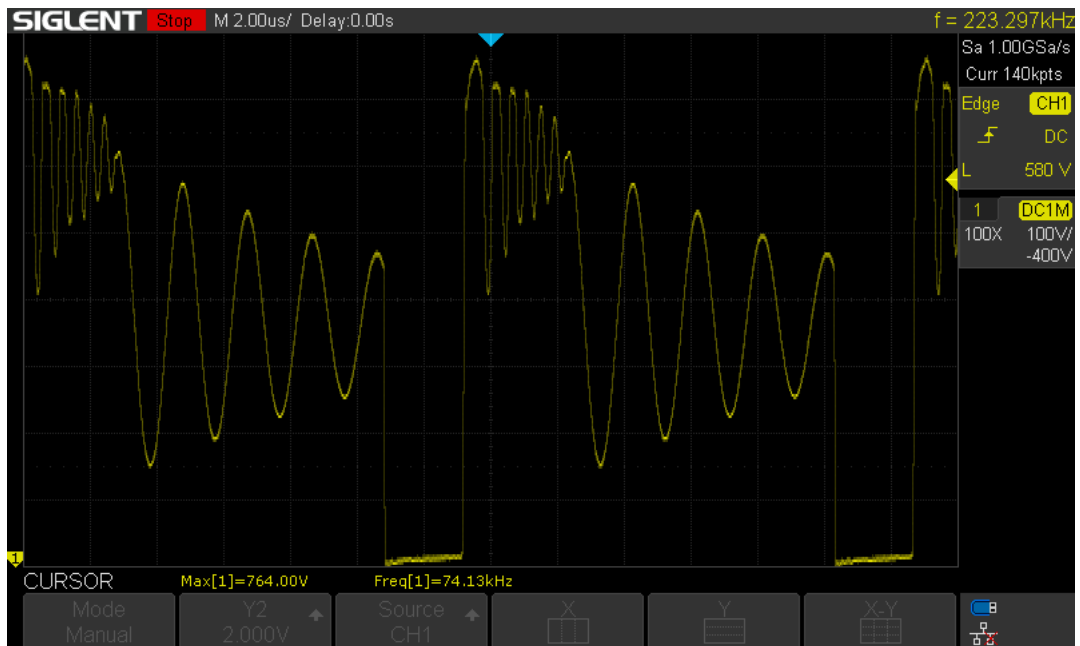
Po výrobe plošných spojov bol ako prvý oživený modul pomocného zdroja na napájanie externých súčastí. Jeho oživenie spočívalo v postupnom zvyšovaní napätia na vstupe a priebežnom meraní priebehov na primárnej a sekundárnej časti. Priebeh napätia budiaceho signálu na hradle tranzistora je zobrazený na obrázku 8.1.



Obr. 8.1: Priebeh budiaceho signálu tranzistora

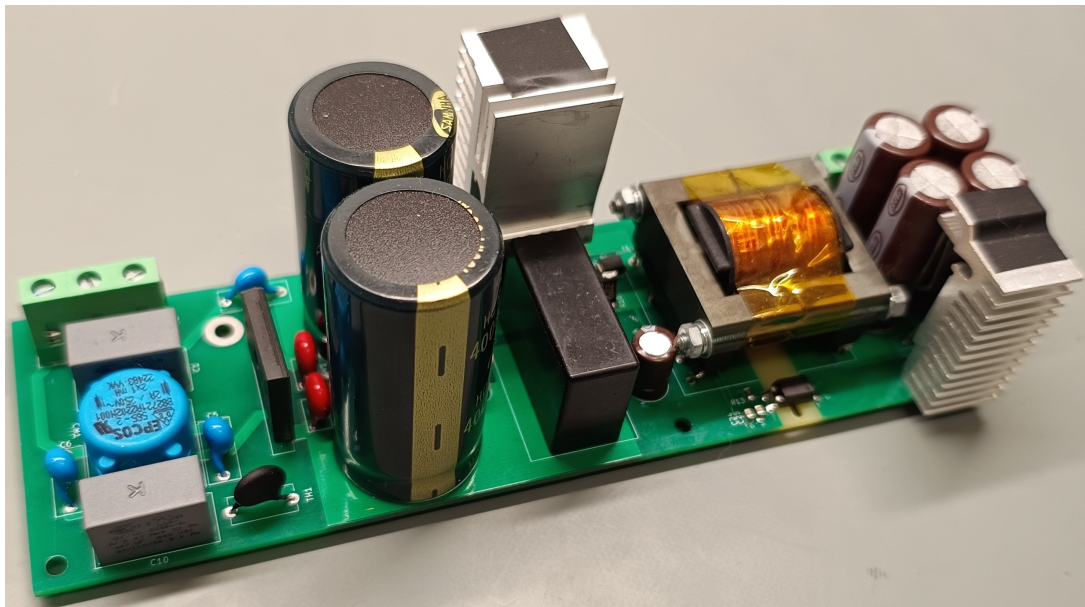
Keďže bol v konštrukcii použitý tranzistor využívajúci technológiu SiC, bolo nutné odmerať priebeh budiaceho napätia kvôli možným prekritom, ktoré by mohli tranzistor dostať do aktívneho režimu. Z priebehu je vidieť, že na hradle je pri zatváraní rezonancia, ale tá môže byť spôsobená prítomnosťou osciloskopickej sondy a jej parazitnými prvkami. Na hradle sa teda nenachádza žiadny nebezpečný prekrit, ktorý by mohol tranzistor nechcane otvoriť a spôsobiť jeho zničenie.

Nakoniec bol zdroj pri plnom napätí na medziobvode zaťažovaný, pričom boli merané teploty na chladičoch výkonových súčastí. Priebeh napätia  $U_{DS}$  na výkonovom tranzistore je zobrazený na obrázku 8.2. Pri demagnetizácii transformátora je vidieť ako RC snubber orezáva napäťové špičky spôsobené rezonanciou parazitných prvkov obvodu.



Obr. 8.2: Priebeh napätia  $U_{DS}$  na výkonovom tranzistore

Oživenie zdroja prebehlo bez väčších komplikácií a zostavený zdroj je zobrazený na obrázku 8.3

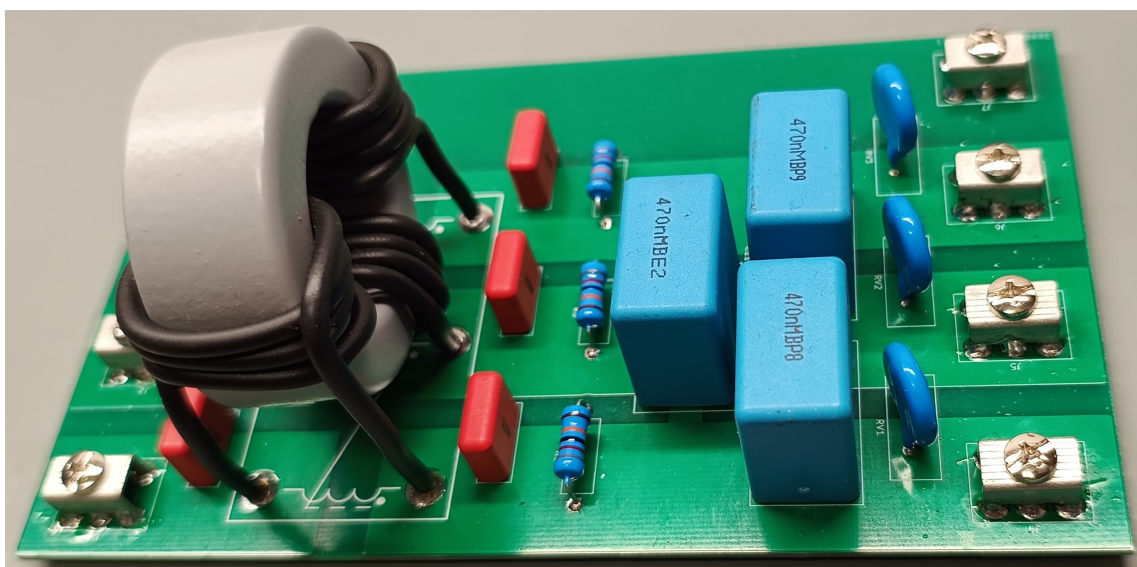


Obr. 8.3: Zostavený pomocný zdroj

## 8.3 Zloženie a oživenie zväracieho meniča

### 8.3.1 Osadenie plošných spojov a oživenie periférií

Keďže výkonový zvärací zdroj sa skladá z viacerých plošných spojov, v prvom kroku boli všetky osadené. Následne prebehol test na prípadné skraty alebo chyby v osadení. Na obrázku 8.4 je zobrazený zhotovený vstupný trojfázový filter.



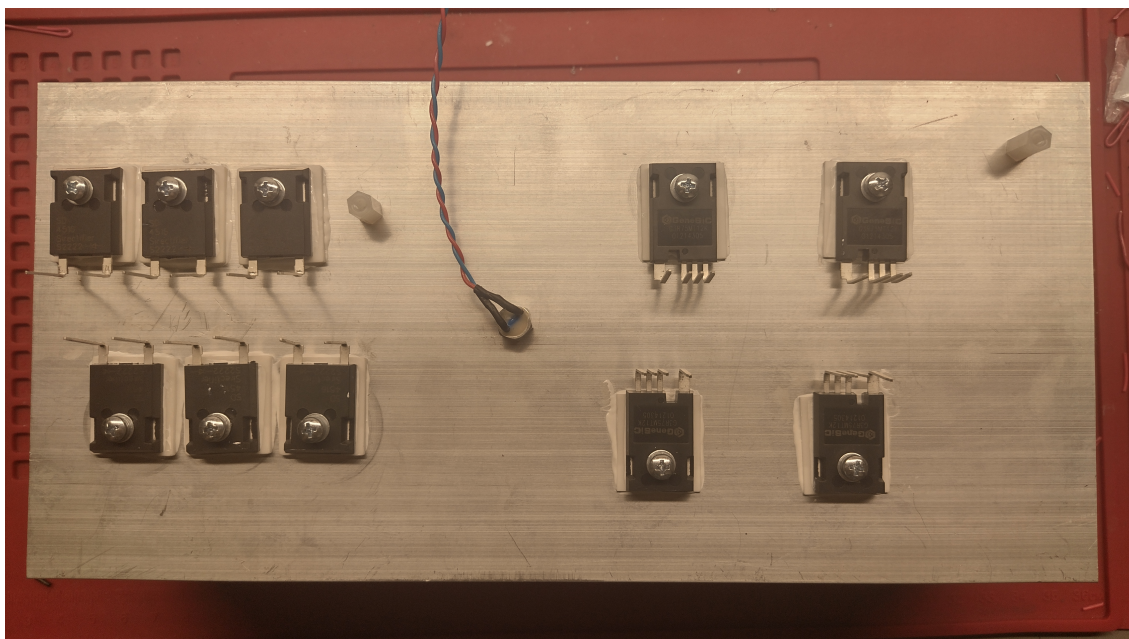
Obr. 8.4: Trojfázový vstupný filter

Po osadení plošného spoja s výkonovou a riadiacou časťou prebehlo postupné oživenie zdrojovej časti a následne všetkých periférií vrátane mikrokontroléra, ktorým boli otestované vstupné aj výstupné periférie. Na testovanie bol využitý priamy prístup do registrov procesoru cez debugger. Na oživovanie častí s časovačmi a AD prevodníkmi bol vytvorený jednoduchý testovací program, pomocou ktorého boli zapnuté potrebné periférie.

Pri oživovaní sa neobjavili žiadne závažnejšie problémy a riadiaca časť bola úspešne otestovaná. Súčasťou testovania bola aj výroba potrebnej kabeláže na pripojenie externých senzorov teploty, prúdu a montáž výkonových prvkov na chladič cez keramické teplovodivé podložky.

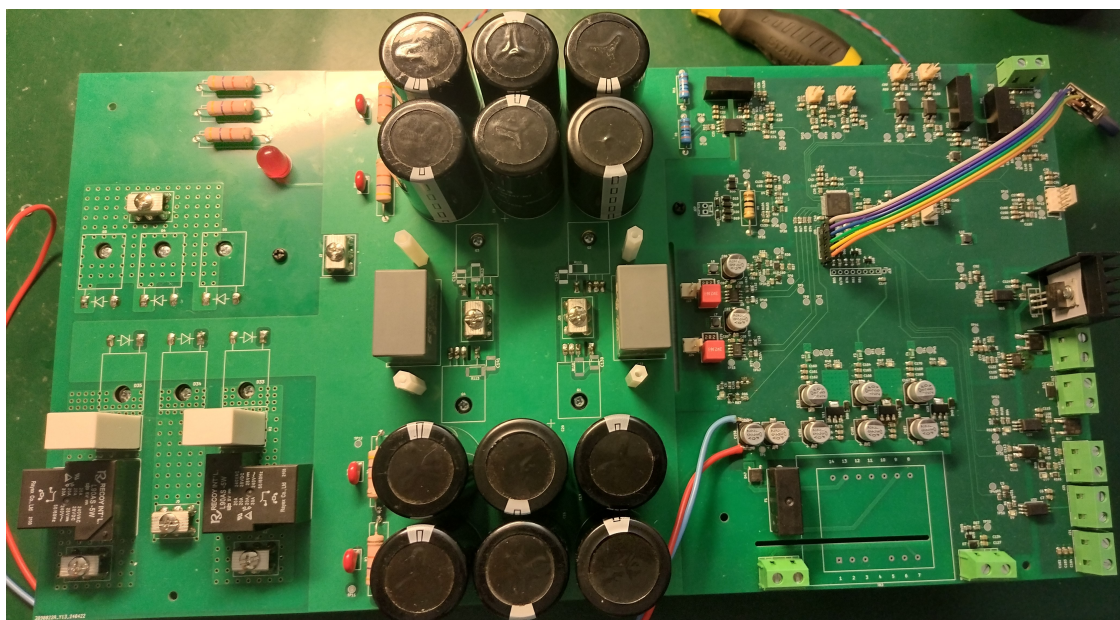
Príprava chladiča s výkonovými prvkami a teplotným senzorom je zobrazená na obrázku 8.5.





Obr. 8.5: Chladič s pripravenými výkonovými prvkami na teplovodivých podložkách

Osadený plošný spoj pri testovaní periférií je zobrazený na obrázku 8.6.

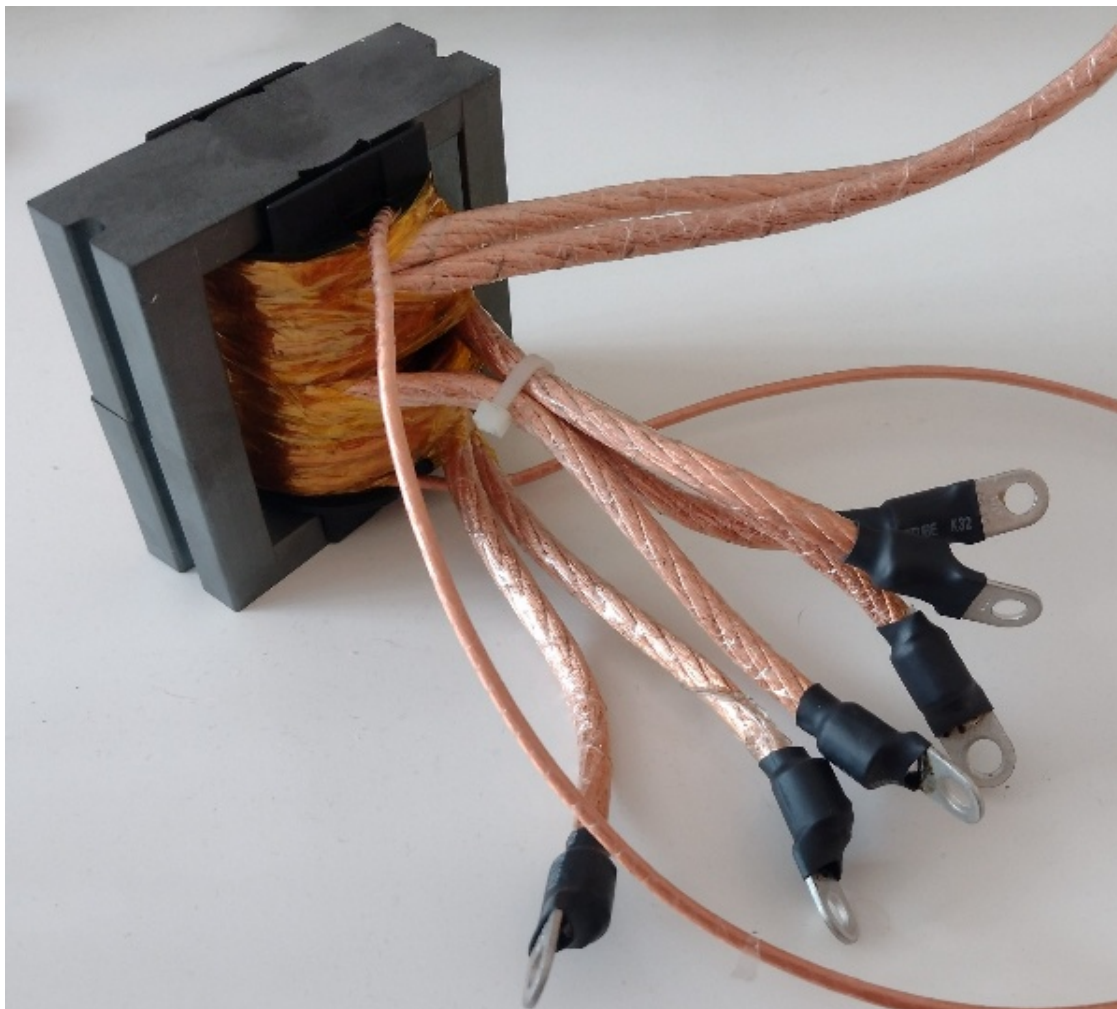


Obr. 8.6: Oživovanie a testovanie periférií riadiacej časti

### 8.3.2 Výroba transformátora a tlmivky

Po úspešnom oživení riadiacej elektroniky bolo pristúpené ku ďalšiemu kroku, kedy bol navinutý výkonový transformátor a filtračná tlmivka. Komponenty boli navinuté vysokofrekvenčným lankovým vodičom. Kvôli potrebnému veľkému prierezu sekundárneho vinutia transformátora a vinutia tlmivky, bolo použitých viacero vodičov paralelne. Pri takejto realizácii môže dochádzať ku nerovnomernému rozdeľovaniu prúdov a preťažovaniu niektorých vinutí, čo sa dá čiastočne eliminovať rovnakou dĺžkou paralelných vinutí. Tým sa zabezpečí rovnaký odpor každého vinutia, čím sa prúd rovnomerne rozdelí.

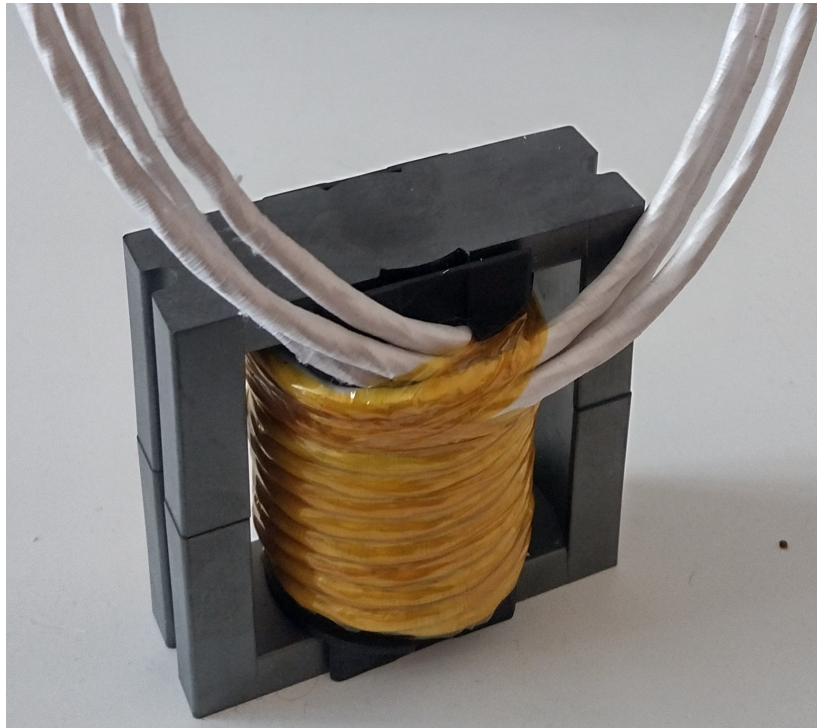
Konce primárneho aj sekundárneho vinutia transformátora a vývody tlmivky sú zakončené pomocou káblových očiek, ktoré boli ku lankovým vodičom prispájkované. Vďaka nim je možné vinutie jednoducho pripevniť na výstupné terminály a ďalšie výkonové komponenty. Transformátor je zobrazený na obrázku 8.7.



Obr. 8.7: Výkonový transformátor

Vzduchová medzera na tlmivke bola vymedzená prípravkom namodelovaným v 3D CAD softvéri a vytlačená na 3D tlačiarňi z materiálu PET-G, ktorý je tepelne odolný do približne 90 °C. Táto teplota je dostatočná na to, aby si materiál zachoval tvar aj pri oteplení feritového jadra.

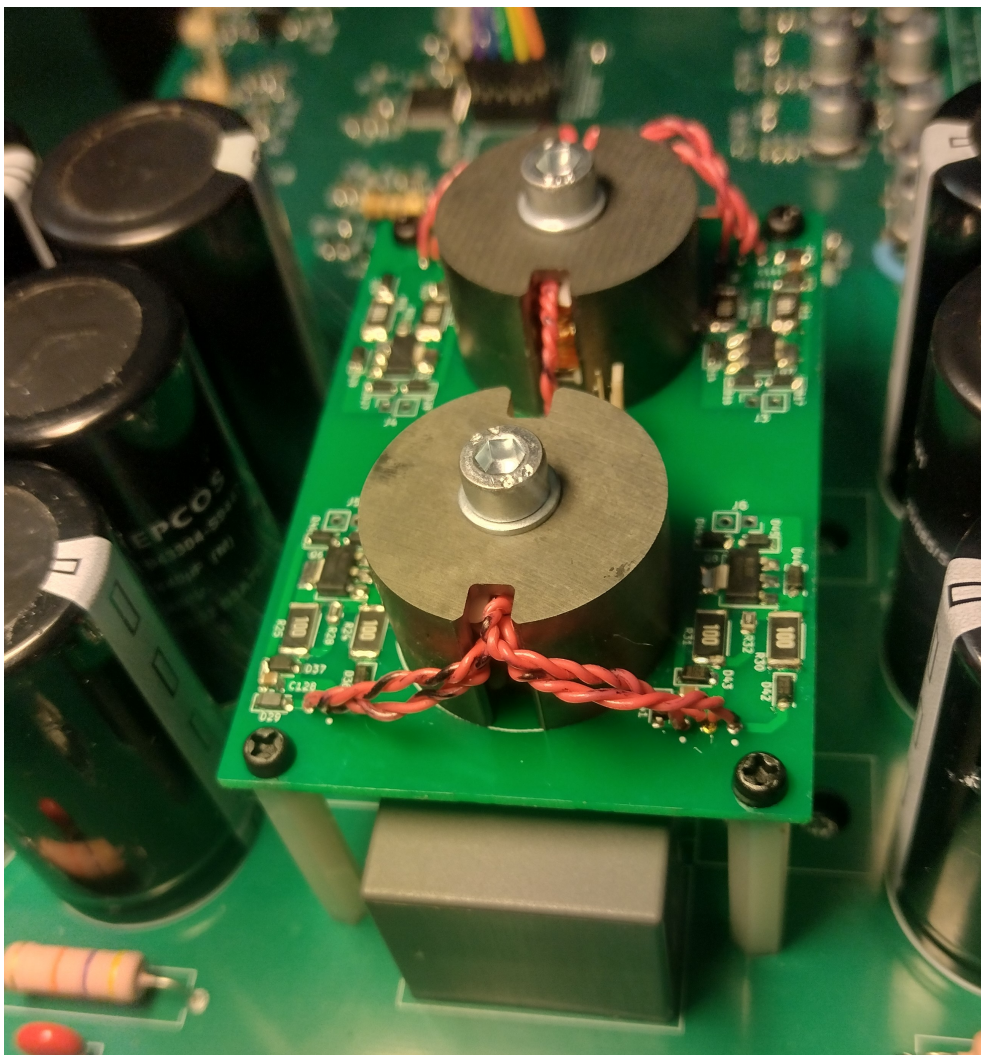
Tlmivka je zobrazená na obrázku 8.8.



Obr. 8.8: Výkonová filtračná tlmivka

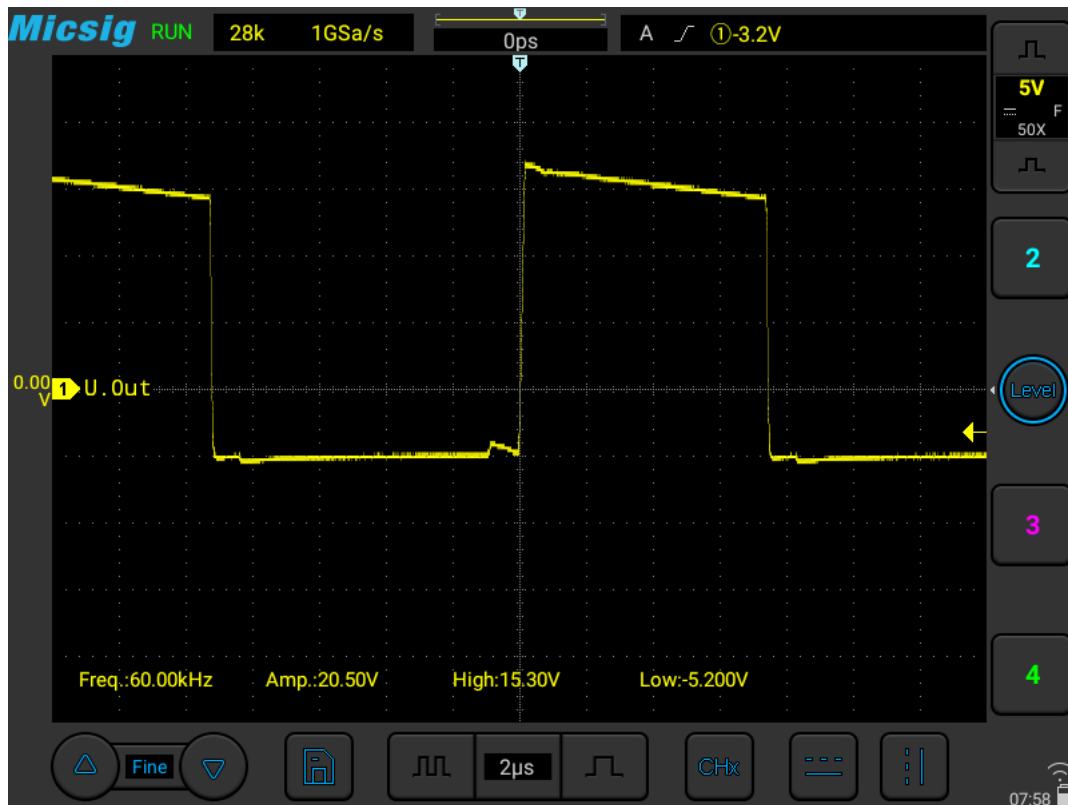
### 8.3.3 Osadenie a test budiča tranzistorov

Po výrobe a zapojení transformátora a tlmivky nasledovalo osadenie a test budiča tranzistorov. Keďže plošný spoj bol navrhnutý tak, aby boli minimalizované parazitné členy v obvode, boli tranzistory spolu s kondenzátormi umiestnené blízko seba. Z tohoto dôvodu nebolo možné ku nim na rovnaký plošný spoj možné umiestniť budiče tranzistorov. Pre tie bol vyrobený samostatný plošný spoj, ktorý je umiestnený tesne nad výkonovými tranzistorami. Riadiace signály sú ku tranzistorom z budičov privedené pomocou krátkeho krúteného dvojlinkového vodiča. Osadený budič je zobrazený na obrázku 8.9



Obr. 8.9: Osadený budič tranzistorov

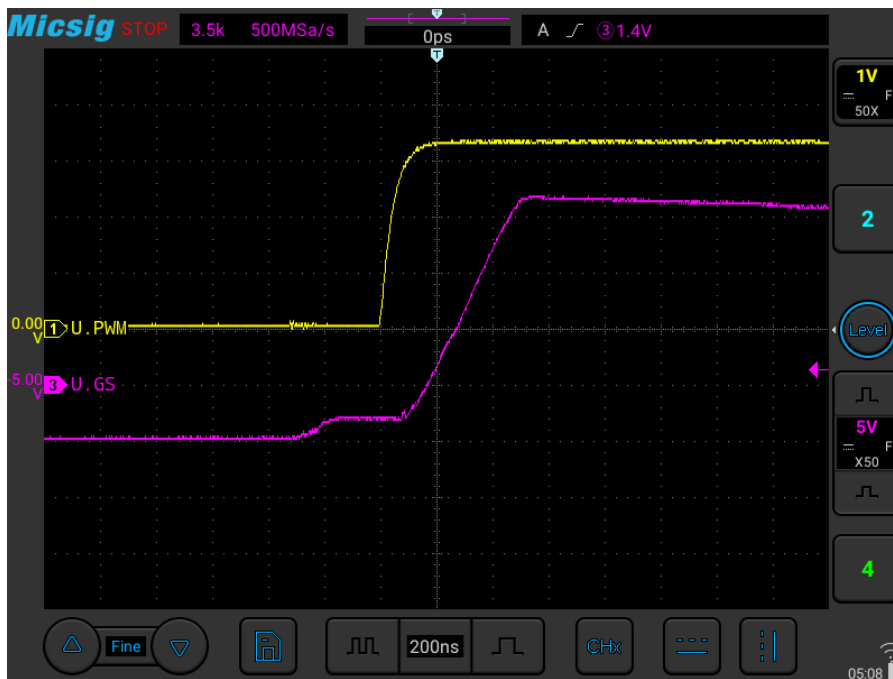
Pre správnu funkciu meniča bolo potrebné overiť priebehy budiacich signálov, ktoré sú zobrazené na obrázku 8.10.



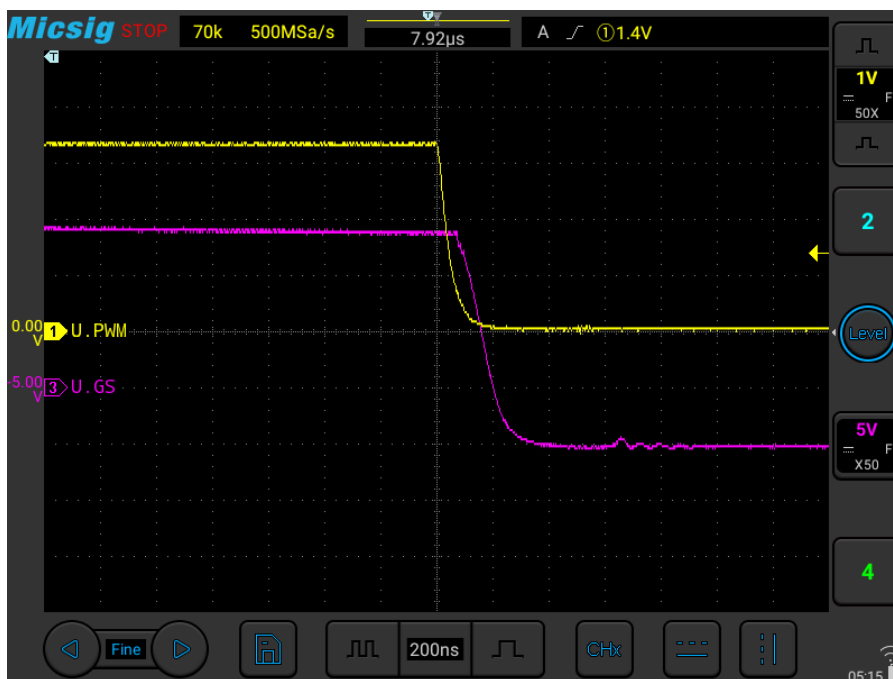
Obr. 8.10: Priebeh budiaceho signálu hradla výkonového tranzistora

Z priebehu je zrejmé, že budiče fungujú korektne. Napätové úrovne sedia podľa návrhu, teda pri zapnutí sa na hradle objaví napätie  $U_{GS} = 15,3 V$  a pri vypnutí je na hradle napätie  $U_{GS} = -5,2 V$ . Ďalšie meranie bolo zamerané na oneskorenie riadiaceho signálu na hradle tranzistora voči riadiacemu signálu z mikrokontroléra. Meraním boli získané dva priebehy.

Prvý je zobrazený na obrázku 8.11 a je tu možné vidieť oneskorenie nábežnej hrany na hradle výkonového tranzistora voči riadiacemu signálu z mikrokontroléra. Druhý priebeh je na obrázku 8.12 a zobrazuje oneskorenie dobežnej hrany na hradle výkonového tranzistora voči signálu z mikrokontroléra.



Obr. 8.11: Priebek nábežnej hrany riadiaceho signálu voči signálu hradla tranzistora

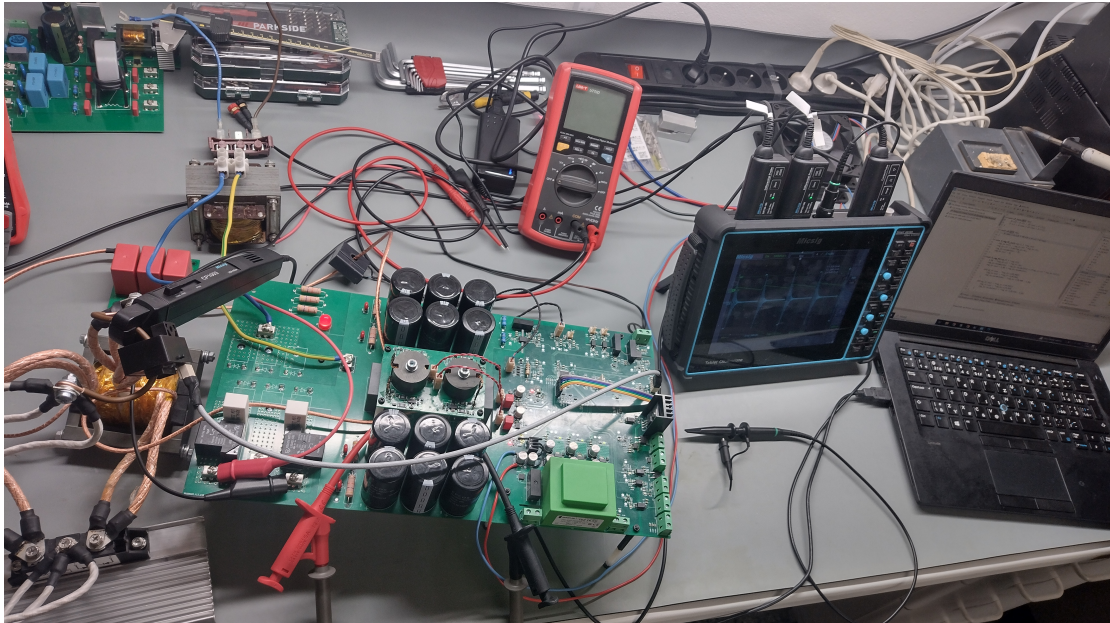


Obr. 8.12: Priebek dobežnej hrany riadiaceho signálu voči signálu hradla tranzistora

Po overení spínania tranzistorov bolo možné pristúpiť ku postupnému zvyšovaniu napätia na medziobvode a testom so záťažou.

### 8.3.4 Test meniča pri plnom napätí medziobvodu

Posledným krokom oživovania meniča bolo nastavenie konštant regulátorov, test na plnom napätí medziobvodu a nameranie potrebných priebehov, čím sa potvrdí správne dimenzovanie polovodičov. Fotografia meniča pri oživovaní je zobrazená na obrázku 8.13.



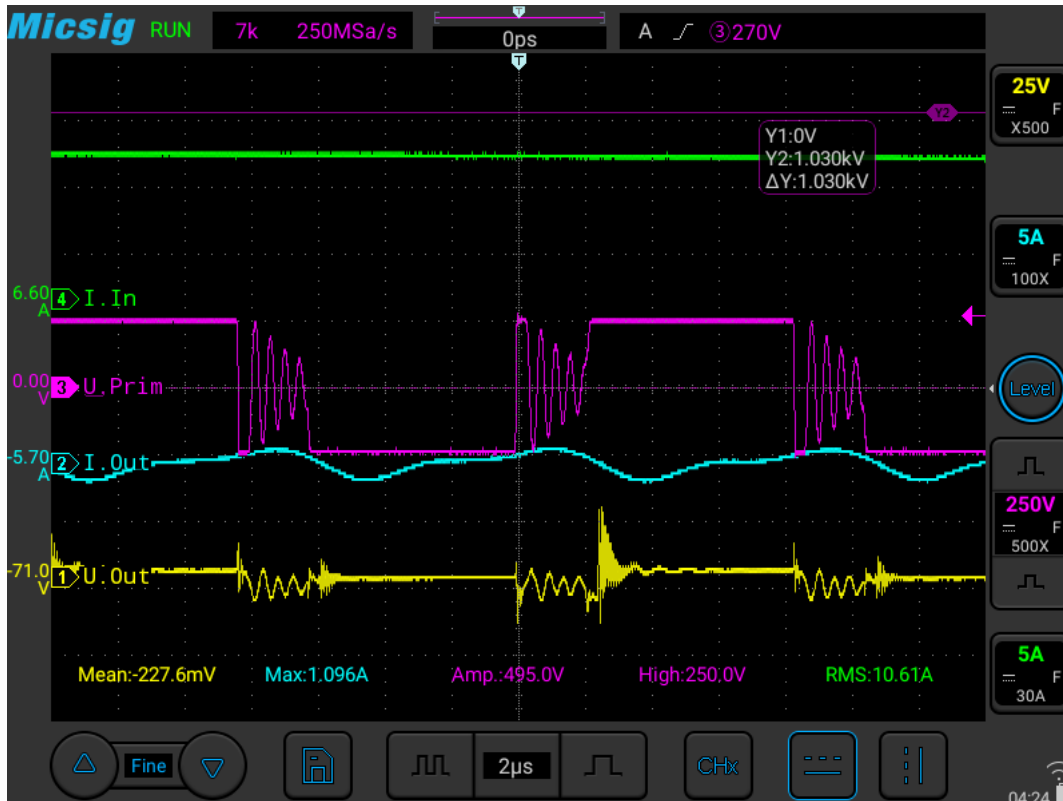
Obr. 8.13: Menič pri oživovaní

Pri oživovaní boli okrem klasickej napätovej sondy použité izolované diferenciálne napätové sondy na snímanie vysokého napätia na transformátore a na izolované meranie výstupu meniča, closed-loop prúdová sonda na meranie menších výstupných prúdov do 30 A a prúdová sonda na základe rogowskeho cievky, ktorá bola použitá na meranie výstupného zvlnenia prúdu na tlmivke.

Meranie výstupného prúdu aj so zvlnením bolo možné prúdovým senzorom Tamura, ktorý je pripojený k mikrokontroléru.

Menič bol postupne testovaný od malého napätia medziobvodu, kedy sa overili všetky potrebné priebehy, správnosť merania AD prevodníkov a boli približne nastavené konštanty regulátorov tak, aby nekmitali. Namerané priebehy napätia na transformátore, zvlhnenia prúdu na výstupnej tlmivke, primárneho prúdu a napätia na výstupe meniča pri napätí medziobvodu  $U_d = 250\text{ V}$  sú zobrazené na obrázku 8.14. Vstupný prúd meniča je vysoký z dôvodu použitia jednofázového napájania cez regulačný autotransfómator.

Výstup meniča bol pripojený na umelú záťaž, chladenú v nádobe s vodou.



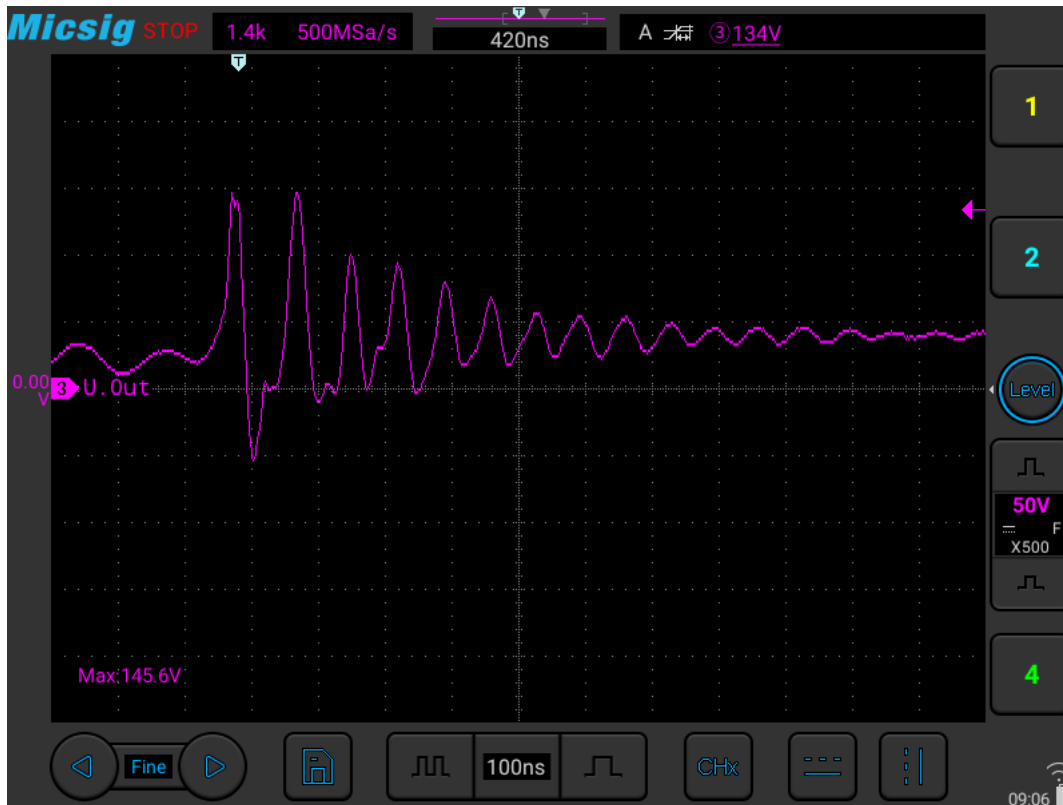
Obr. 8.14: Priebehy napätí a prúdov v meniči pri napätí medziobvodu  $U_d = 250\text{ V}$

Pri vypnutí tranzistorov ktoré riadia transformátor sa objavuje kmitanie (fialový priebeh). Toto kmitanie je spôsobené parazitnou indukčnosťou a kapacitou v obvode.





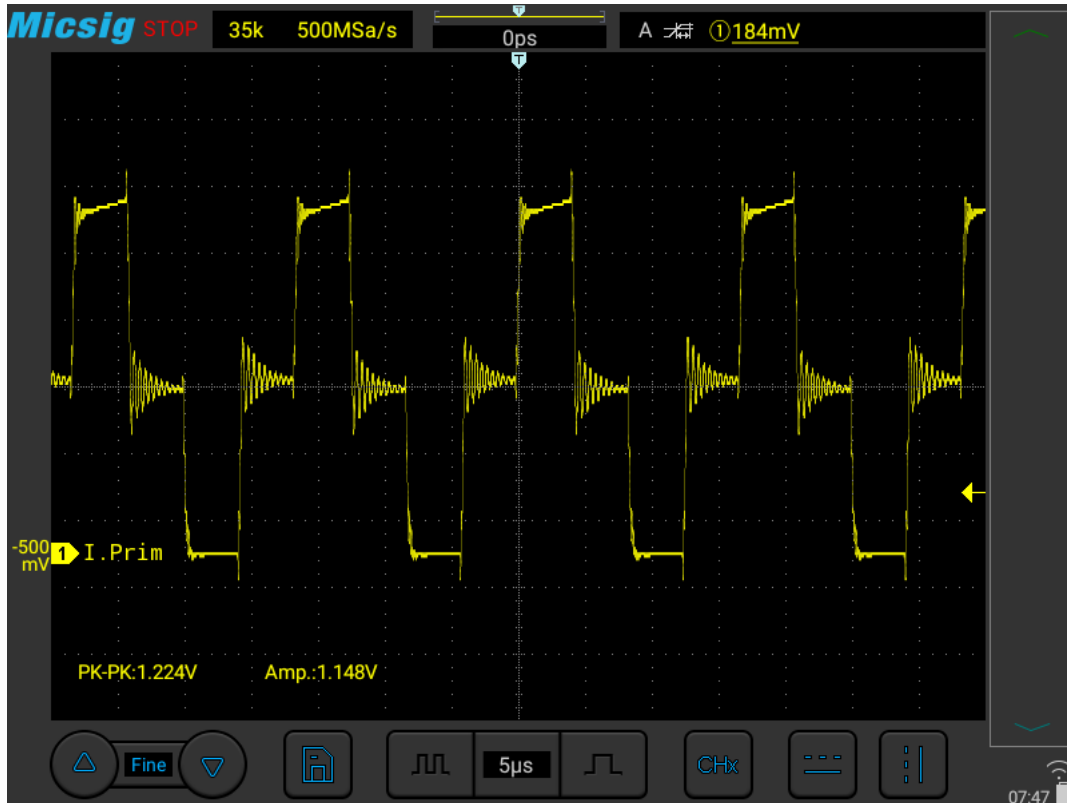
Po zatažení meniča na menovitý výkon 6 kW bol zmeraný priebeh napätia na sekundárnych diódach, kedy bude dochádzať ku najväčším prekmitom. Týmto meraním sa overí správne napäťové dimenzovanie diód. Priebeh bol nameraný pri výstupnom prúde 200 A a je zobrazený na obrázku 8.16.



Obr. 8.16: Prekmit napätia na sekundárnej dióde pri menovitom výkone

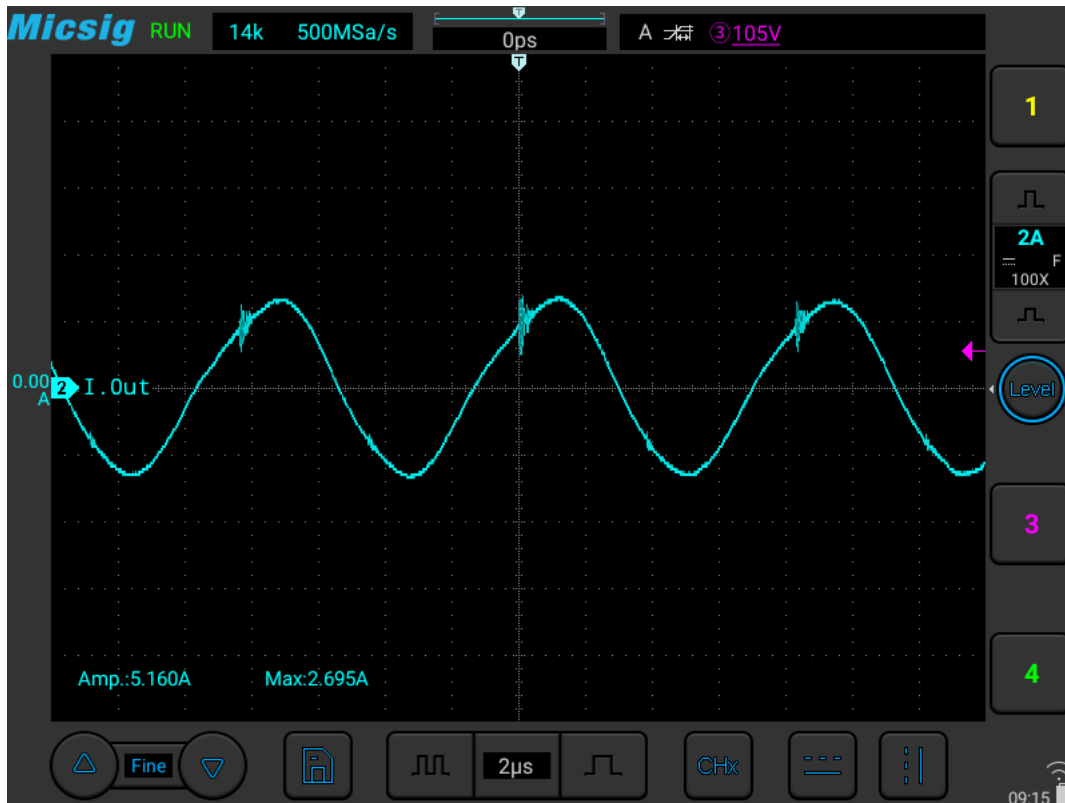
Z priebehu je možné odčítať špičkovú hodnotu napätia pri prekmitoch až 145,6 V. Keďže dióda je dizajnovaná na dostatočne vysoké napätie 600 V a v priebehu funkcie meniča nedôjde ku jej poškodeniu napäťovými prekmitmi.

Ďalším dôležitým meraním je priebeh napätia na bočníku prúdového transformátora. Týmto meraním je možné overiť správnosť merania prúdového transformátora a vidieť priebehy prúdu na primárnom vinutí výkonového transformátora. Priebeh je uvedený na obrázku 8.17.



Obr. 8.17: Priebeh napätia na záťažovom rezistore prúdového transformátora

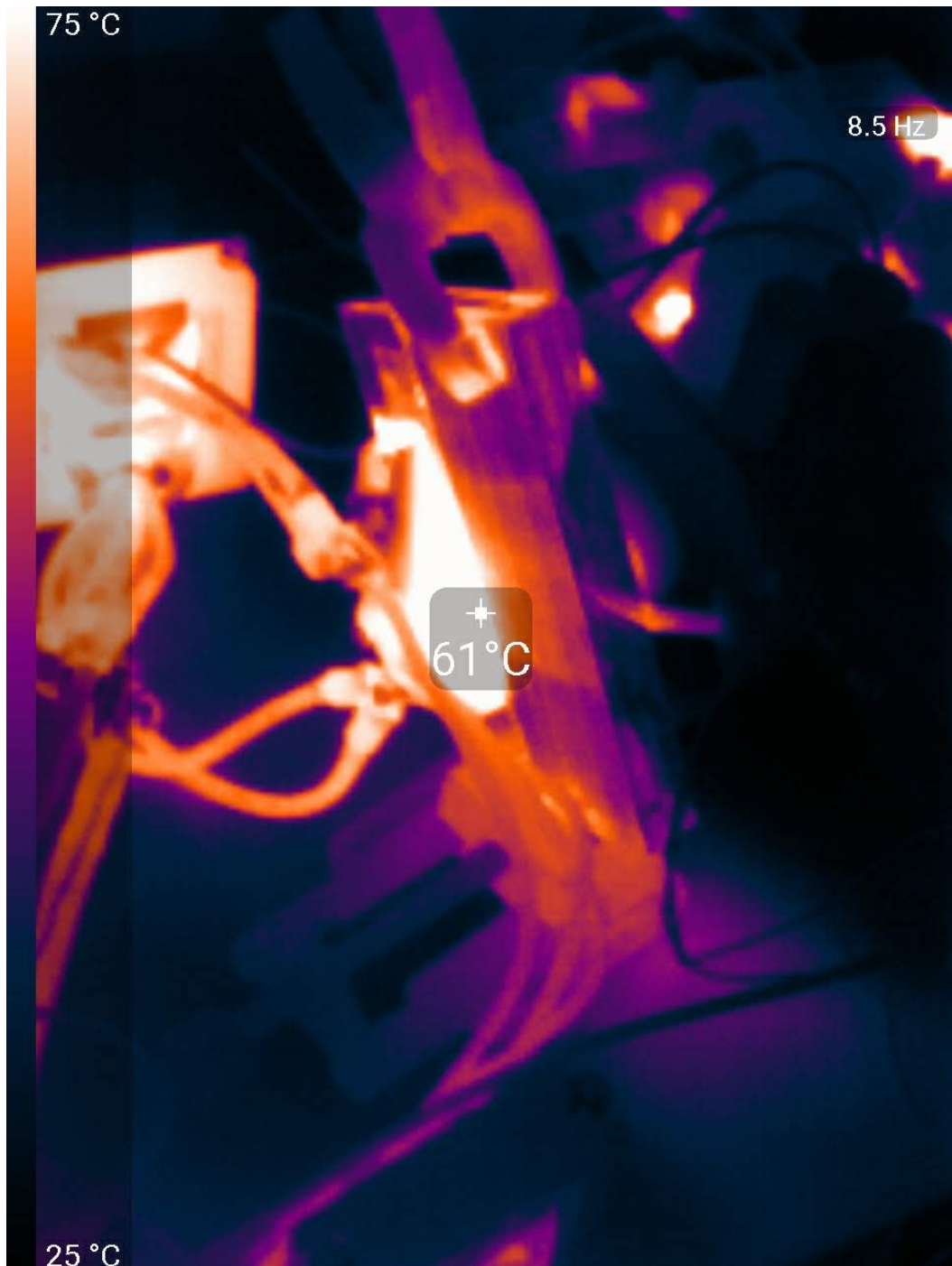
Posledným meraním bolo overené zvlnenie prúdu na sekundárnej strane. Priebeh zvlnenia prúdu je zobrazený na obrázku 8.18 a bol nameraný pri výstupnom prúde 120 A.



Obr. 8.18: Zvlnenie prúdu na tlmivke pri výstupnom prúde 120 A

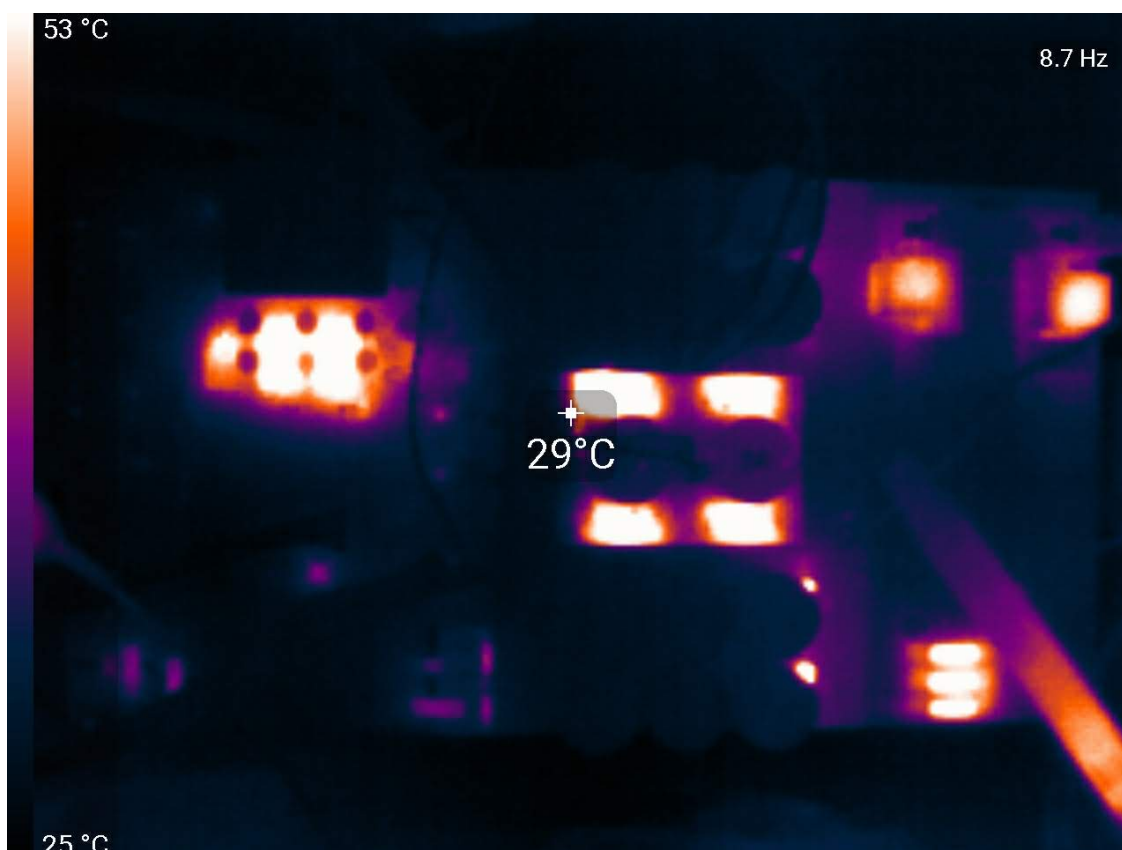
### 8.3.5 Teplotné merania

Pri zatažení meniča na menovitý výkon boli overované aj teplotné pomery a oteplenie výkonových súčastí. Na obrázku 8.19 je uvedené meranie výstupného diódového bloku spolu s transformátorom.



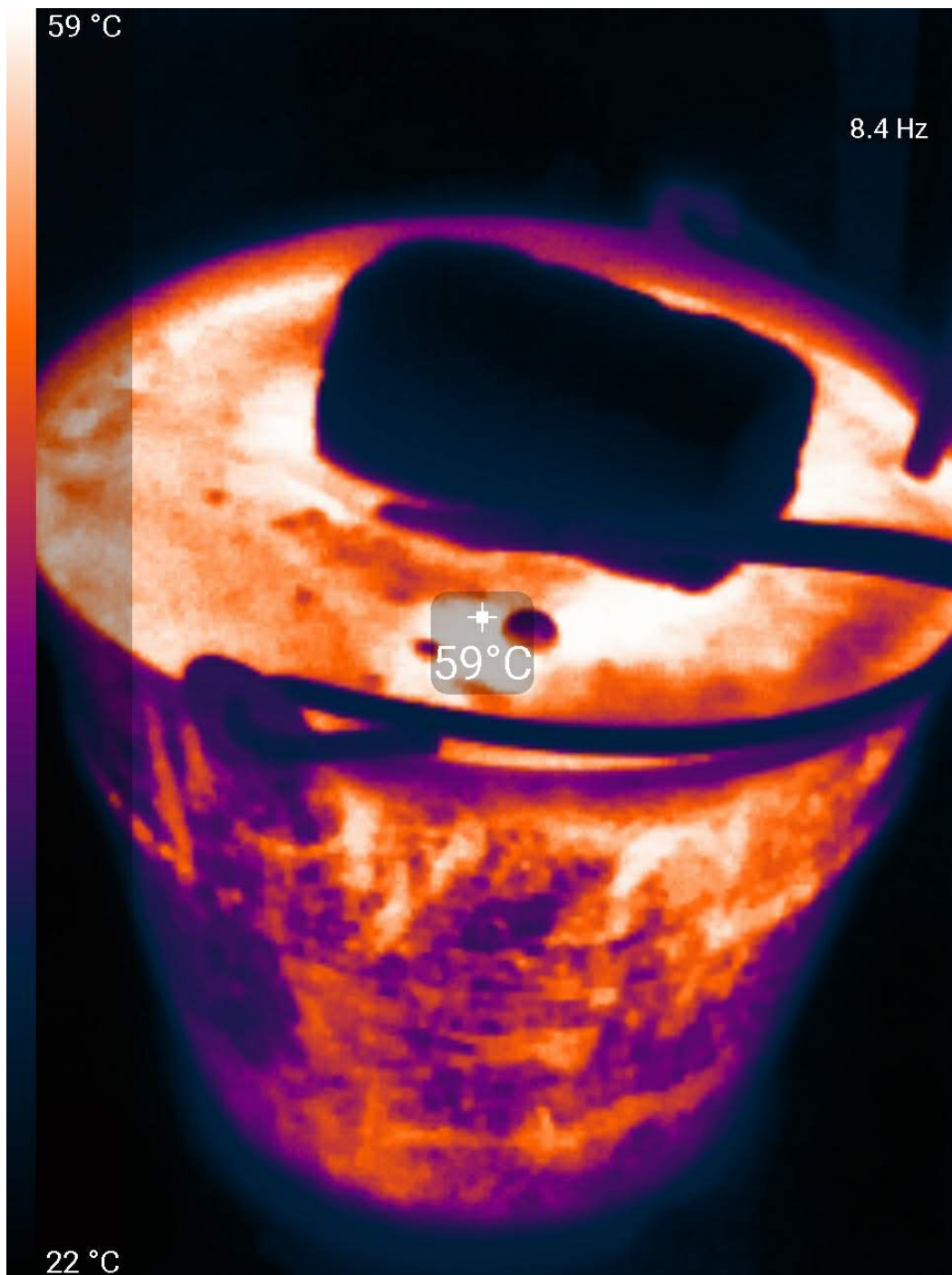
Obr. 8.19: Teplotné meranie výkonového transformátora a diódového bloku

Ďalej boli zmerané teplotné pomery na plošnom spoji riadenia spolu s výkonovou časťou, ktoré sú zobrazené na obrázku 8.20. Na fotografii je možné vidieť, že najteplejšími časťami na doske sú chladiace plochy lineárnych stabilizátorov napätia, rezistorové deliče na kondenzátoroch obvodu, budiče tranzistorov a relé softstartu. Výkonové tranzistory a usmerňovacie diódy trojfázového mostíka sa počas ťažového testu meniča obzvlášť nehriali, pretože boli umiestnené na masívnom chladiči, pred ktorým bol umiestnený ventilátor zabezpečujúci aktívne chladenie.



Obr. 8.20: Teplotné meranie plošného spoja s výkonovou a riadiacou časťou

Na poslednej fotografii 8.21 je zobrazená umelá záťaž v chladiacej nádobe s vodou pri teste meniča na menovitom výkone.



Obr. 8.21: Teplotné meranie umelej záťaže pri menovitom výkone





## Záver

V tejto práci boli teoreticky popísané základné oblúkové parametre a charakteristiky zväracích metód. Následne boli popísané jednotlivé zväracie metódy, ich princípy a technologické parametre, ktoré je potrebné brať do úvahy pri výbere zväracej metódy.

V práci boli popísané rôzne druhy zväracích zdrojov, ktoré sa používali alebo sú dodnes používané. Pri každom type je uvedený základný princíp činnosti, regulácie a taktiež výhody a nevýhody jednotlivých typov. Z tejto kapitoly je nadviazané na spínané zdroje, ktoré sú dnes v zväracej technike využívané najčastejšie.

V časti o spínaných zdrojoch sú uvedené základné zapojenia, princíp ich činnosti, výhody a nevýhody jednotlivých topológií. Pri každej topológii je uvedené základné zapojenie a charakteristické priebehy veličín v zapojení.

Na základe teoretických znalostí získaných v týchto kapitolách bola určená topológia a parametre zdroja, ktorý sa bude realizovať.

Jeho návrhom a obvodovým riešením sa zaoberá praktická časť práce. V tejto časti sú uvedené jednotlivé postupy a rovnice použité pri návrhu, spolu so schémami jednotlivých obvodových zapojení.

Na základe výpočtov boli určené straty, vďaka čomu bolo možné dimenzovať chladenie zdroja.

Práca pokračuje návrhom plošných spojov, osadením súčiastok a oživením jednotlivých častí meniča spolu s pomocným zdrojom.

V poslednej časti sa práca zaoberá oživením celého meniča, meraním priebehov a overením funkčnosti meniča pri plnej záťaži. Na konci poslednej kapitoly sú uvedené fotografie z termokamery pri záťažovom teste zväracieho meniča.

Zvärací menič bol úspešne navrhnutý, skonštruovaný a oživený. Jeho záťažový test prebehol pri napätí  $30\text{ V}$  a prúde  $200\text{ A}$ , na ktoré bol menič dizajnovaný. Namerané priebehy spolu so záťažovým testom potvrdili správny dizajn. Všetky ciele práce boli teda úspešne splnené.



# Literatúra

- [1] BARTOŠ, J., BERNAS, J., VEINBERG, J.: *Obloukové svařování*. 1. vyd. Ostrava: ZEROSS, 1994. 216 s. ISBN 80-85771-21-7
- [2] UNIMIG: *V-I characteristic of arc (fixed arc length)* [online]. 2017, [cit. 25.2.2023]. Dostupné z URL: <[https://www.researchgate.net/figure/V-I-characteristic-of-arc-fixed-arc-length\\_fig2\\_323067293](https://www.researchgate.net/figure/V-I-characteristic-of-arc-fixed-arc-length_fig2_323067293)>
- [3] FRACTORY: *Shielded Metal Arc Welding (SMAW)* [online]. 2023, [cit. 3.3.2023]. Dostupné z URL: <<https://fractory.com/shielded-metal-arc-welding/>>
- [4] TECHNOX: *MIG vs TIG Welding* [online]. 2023, [cit. 5.3.2023]. Dostupné z URL: <<https://www.technoxmachine.com/blog/mig-vs-tig-welding/>>
- [5] CWBGROUP: *WHAT IS SUBMERGED ARC WELDING (SAW)?* [online]. 2023, [cit. 10.3.2023]. Dostupné z URL: <<https://www.cwbgroup.org/association/how-it-works/what-submerged-arc-welding-saw>>
- [6] UNIMIG: *MIG vs TIG vs Stick welding* [online]. 2023, [cit. 14.3.2023]. Dostupné z URL: <<https://unimig.com.au/mig-vs-tig-vs-stick/>>
- [7] PATOČKA, M.: *Magnetické jevy a obvody ve výkonové elektronice, měřicí technice a silnoproudé elektrotechnice*. 1. vyd. Brno: VUTIUM, 2011. 564 s. ISBN 978-80-214-4003-6.
- [8] PATOČKA, M.: *Vybrané stati z výkonové elektroniky, svazek 2*. Vysoké učení technické v Brně, FEKT, UVEE, 2005. 172 s.
- [9] PATOČKA, M.: *Výkonová elektronika BVEL, 1.část*. Vysoké učení technické v Brně, FEKT, UVEE, 2005. 172 s.
- [10] Texas Instruments: *Power Tips: Get to know LLC series resonant converter design* [online]. 2014, [cit. 10.4.2023]. Dostupné z URL: <[https://e2e.ti.com/blogs\\_/b/powerhouse/posts/powerlab-notes-get-to-know-llc-series-resonant-converter-design](https://e2e.ti.com/blogs_/b/powerhouse/posts/powerlab-notes-get-to-know-llc-series-resonant-converter-design)>
- [11] MDPI: *Flux-Balance Control for LLC Resonant Converters with Center-Tapped Transformers* [online]. 2019, [cit. 18.4.2023]. Dostupné z URL: <<https://www.mdpi.com/1996-1073/12/17/3211#>>
- [12] Cosmo Ferrites: *Core - EC9030* [online]. 1 strana. 06/12/2014, 2014. [cit. 20.10.2023]. Dostupné z URL: <[https://semic.cz/!old/files/pdf\\_www/Lj\\_292\\_7EC9030\\_CF.pdf](https://semic.cz/!old/files/pdf_www/Lj_292_7EC9030_CF.pdf)>

- [13] Cosmo Ferrites: *Material Specificaton : CF297* [online]. 4 strany. 17/06/2017, 2017. [cit. 20.10.2023]. Dostupné z URL: <[https://semic.cz/!old/files/pdf\\_www/CF297.pdf](https://semic.cz/!old/files/pdf_www/CF297.pdf)>
- [14] Sirectifier: *SD4502 thru SD4516 Discrete Diodes* [online]. 2 strany. [cit. 21.10.2023]. Dostupné z URL: <[https://semic.cz/!old/files/pdf\\_www/SD4502\\_SF.pdf](https://semic.cz/!old/files/pdf_www/SD4502_SF.pdf)>
- [15] YANGJIE TECHNOLOGY: *MF200K06F2* [online]. 3 strany. S-M095, Rev 2.0 - 21/05/2017, 2017. [cit. 21.10.2023]. Dostupné z URL: <[https://semic.cz/!old/files/pdf\\_www/SD4502\\_SF.pdf](https://semic.cz/!old/files/pdf_www/SD4502_SF.pdf)>
- [16] GeneSic: *G3R75MT12K* [online]. 14 strán. 5/2021. [cit. 22.10.2023]. Dostupné z URL: <<https://cz.mouser.com/datasheet/2/169/G3R75MT12K-2449503.pdf>>
- [17] P22x13-TP4A: *P22x13-TP4A* [online]. 2 strany. [cit. 22.10.2023]. Dostupné z URL: <[https://semic.cz/!old/files/pdf\\_www/Lj\\_P22x13-TP4A\\_TG.pdf](https://semic.cz/!old/files/pdf_www/Lj_P22x13-TP4A_TG.pdf)>
- [18] P30x19-TP4A: *P30x19-TP4A* [online]. 2 strany. [cit. 22.10.2023]. Dostupné z URL: <[https://semic.cz/!old/files/pdf\\_www/Lj\\_P3019-TP4A.pdf](https://semic.cz/!old/files/pdf_www/Lj_P3019-TP4A.pdf)>
- [19] Texas Instruments: *AMC1311* [online]. 38 strán. SBAS786C, Rev - 06/2022, 2022. [cit. 24.10.2023]. Dostupné z URL: <<https://datasheets.maximintegrated.com/en/ds/MAX6675.pdf>>
- [20] Tamura: *L01Z\*\*\*S05* [online]. 2 strany. L01ZXXXS05, RevD - 03/2012, 2012. [cit. 24.10.2023]. Dostupné z URL: <<https://www.tamuracorp.com/clientuploads/pdfs/engineeringdocs/L01ZXXXS05.pdf>>
- [21] Tamura: *LA37S S05K* [online]. 8 strán. LA37S S05K, 03/2022, 2022. [cit. 25.10.2023]. Dostupné z URL: <<https://www.tamuracorp.com/electronics/jp/pdf/datasheet/LA37SxxxS05K.pdf>>
- [22] ALLEGRO Microsystems: *CT415* [online]. 34 strán. CT415-HSN280MR, Rev - 2, 12/2023, 2001. [cit. 1.11.2023]. Dostupné z URL: <[https://www.allegromicro.com/-/media/files/datasheets/ct415-datasheet.pdf?sc\\_lang=en](https://www.allegromicro.com/-/media/files/datasheets/ct415-datasheet.pdf?sc_lang=en)>
- [23] ST Microelectronics: *STM32G484xE* [online]. 235 strán. DS12983, Rev 5, 03/2023, 2023. [cit. 9.11.2023]. Dostupné z URL: <<https://www.st.com/resource/en/datasheet/stm32g484re.pdf>>

- [24] TEZ: *Transformers for PCB* [online]. 2 strany. TEZ Transformers for PCB. [cit. 9. 11. 2023]. Dostupné z URL: <[https://www.tme.eu/Document/a08f2110fead2799a45fc93821220db5/TEZ\\_2020\\_TME\\_EN.PDF](https://www.tme.eu/Document/a08f2110fead2799a45fc93821220db5/TEZ_2020_TME_EN.PDF)>
- [25] Cosmo Ferrites: *Core - ETD3510* [online]. 1 strana. Rev 02, 03/10/2020, 2020. [cit. 20. 11. 2023]. Dostupné z URL: <[https://semic.cz/!old/files/pdf\\_www/Lj\\_139EC3510AL\\_CF.pdf](https://semic.cz/!old/files/pdf_www/Lj_139EC3510AL_CF.pdf)>
- [26] Cosmo Ferrites: *Material Specifcaton : CF139* [online]. 4 strany. 14/06/2017, 2017. [cit. 20. 10. 2023]. Dostupné z URL: <[https://semic.cz/!old/files/pdf\\_www/CF139.pdf](https://semic.cz/!old/files/pdf_www/CF139.pdf)>
- [27] SMC Diode Solutions *SDUR1530* [online]. 7 strán. Rev. A [cit. 1. 12. 2023]. Dostupné z URL: <<https://www.tme.eu/Document/02da1c3b9b554ab981a111169a6d16ac/SDUR1530.pdf>>
- [28] Elite *Aluminium electrolytic capacitors* [online]. 3 strany. [cit. 2. 12. 2023]. Dostupné z URL: <<https://www.tme.eu/Document/b957a8d5279e179f3fcd11fc1b5432f9/ED.pdf>>
- [29] GeneSiC: *G3R350MT12D* [online]. 14 strán. 05/2021. [cit. 2. 12. 2023]. Dostupné z URL: <<https://cz.mouser.com/datasheet/2/169/G3R350MT12D-2449729.pdf>>



## Zoznam symbolov a skratiek

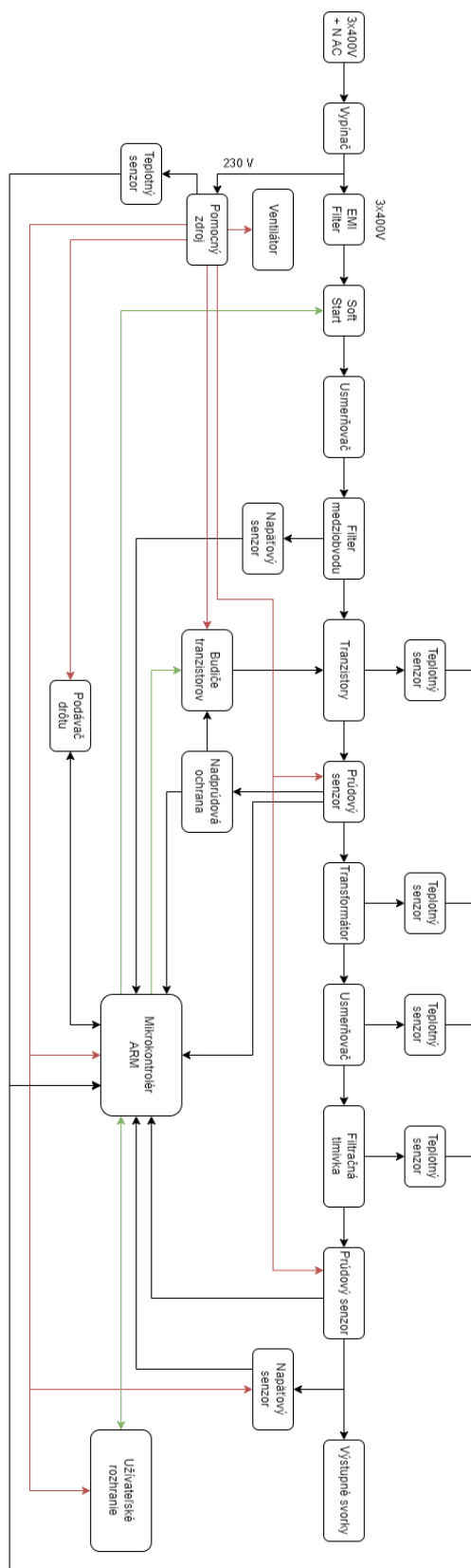
<b>MMA</b>	Manual Metal Arc
<b>TIG</b>	Tungsten Inert Gas
<b>MIG</b>	Metal Inert Gas
<b>MAG</b>	Metal Active Gas
<b>SAW</b>	Submerged Arc Welding
<b>PWM</b>	Pulse Width Modulation - Pulzná šírková modulácia
<b>PFC</b>	Power Factor Correction - Korekcia účinníku
<b>HF</b>	High Frequency - Vysoká frekvencia







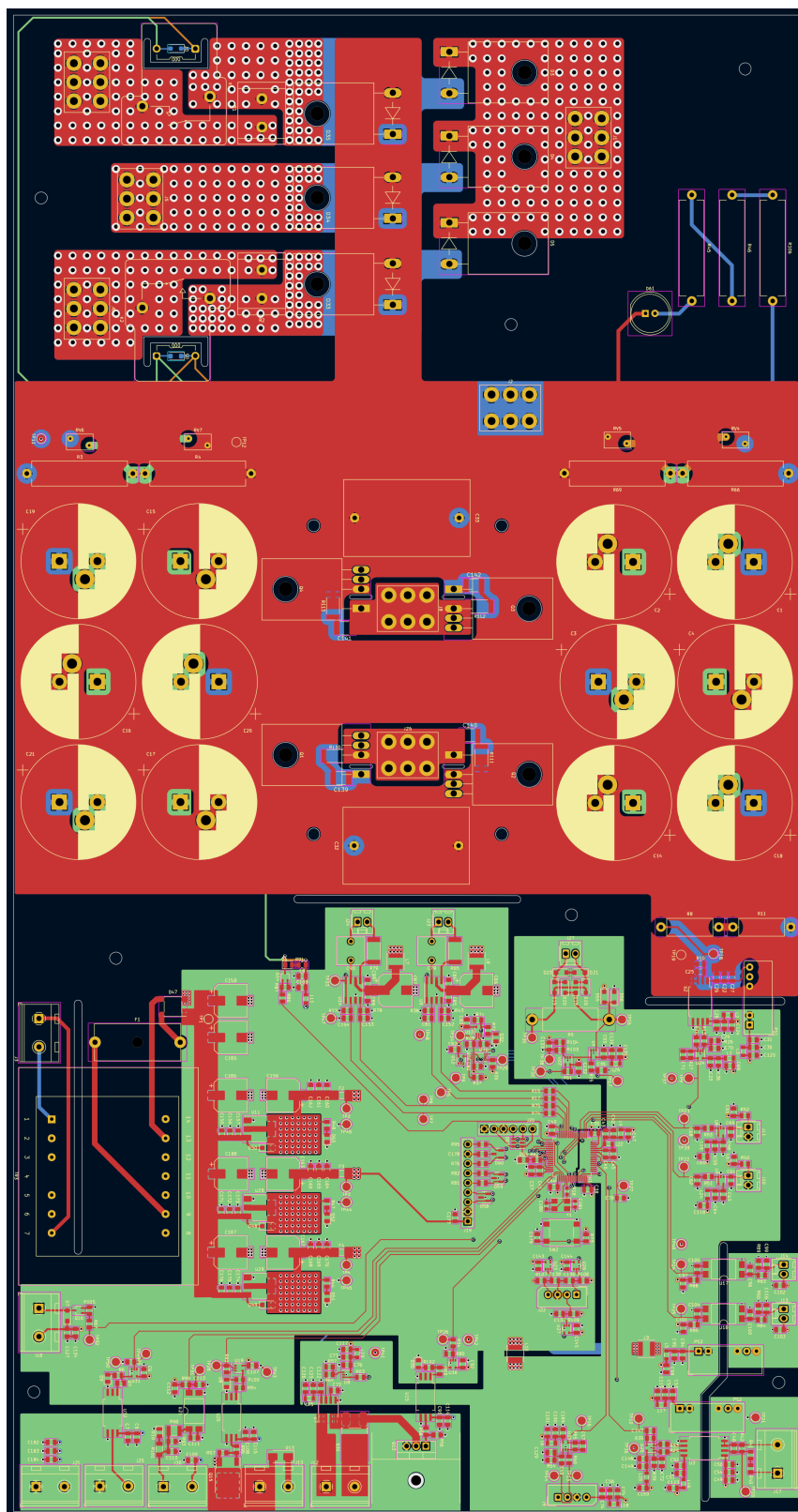
# A Bloková schéma zvracieho zdroja



Obr. A.1: Bloková schéma zvracieho zdroja



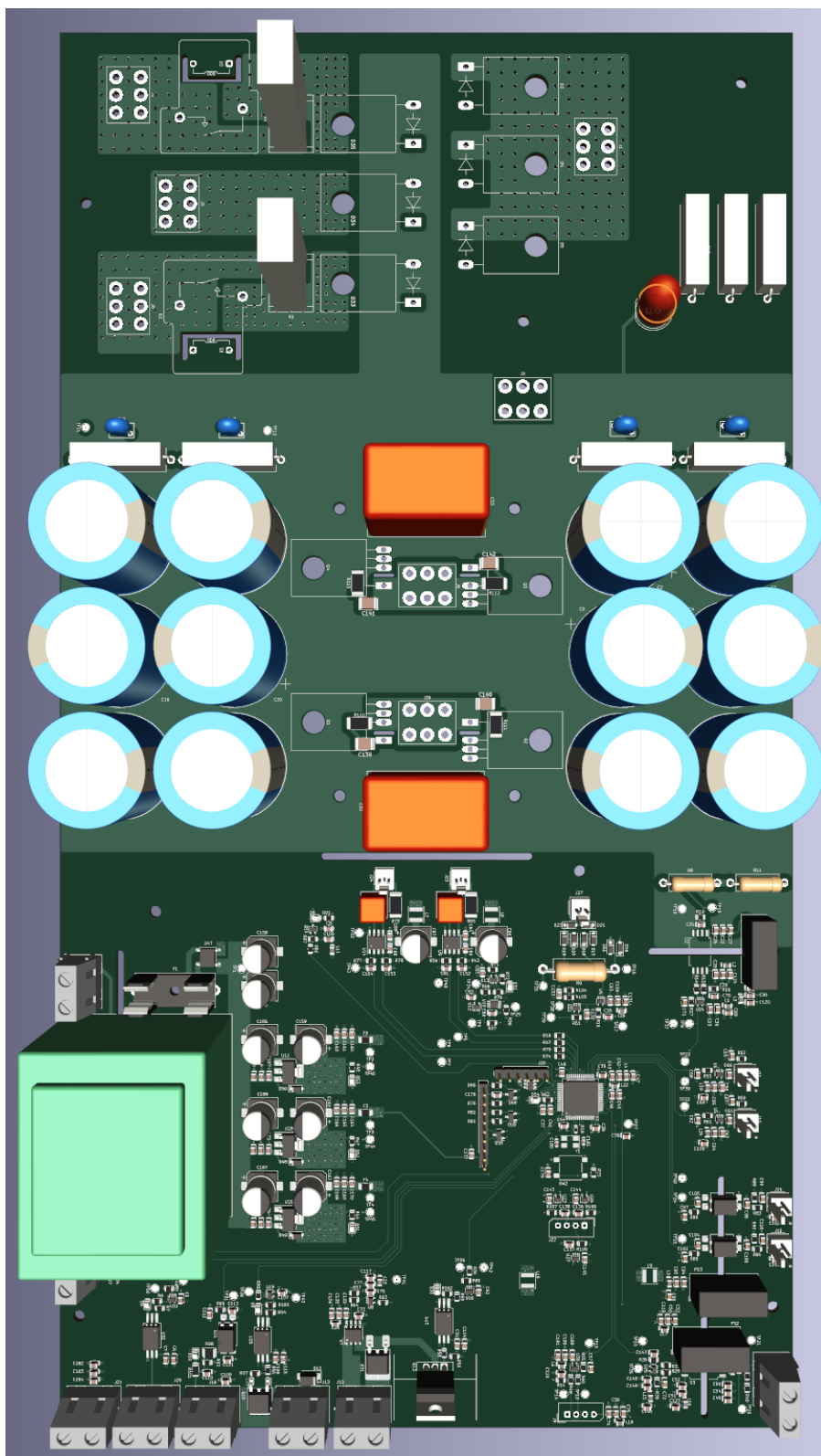
## B Plošný spoj výkonovej a riadiacej časti meniča



Obr. B.1: Plošný spoj výkonovej a riadiacej časti meniča

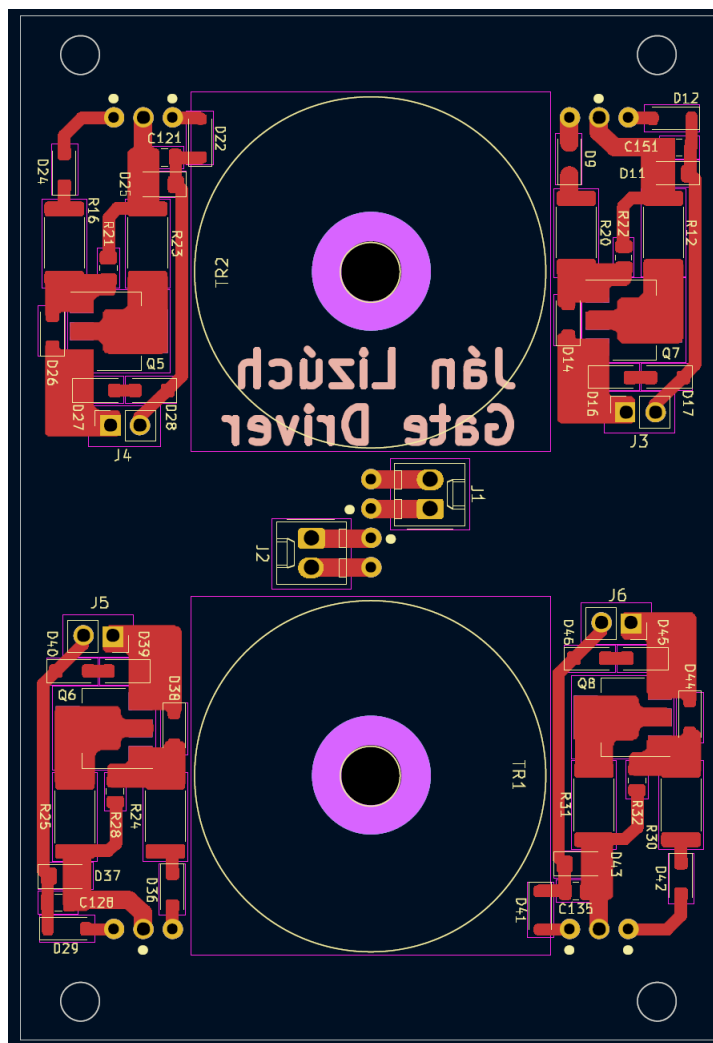


## C 3D model plošného spoja výkonovej a riadiacej časti meniča



Obr. C.1: 3D model plošného spoja výkonovej a riadiacej časti meniča

## D Plošný spoj budičů tranzistorů

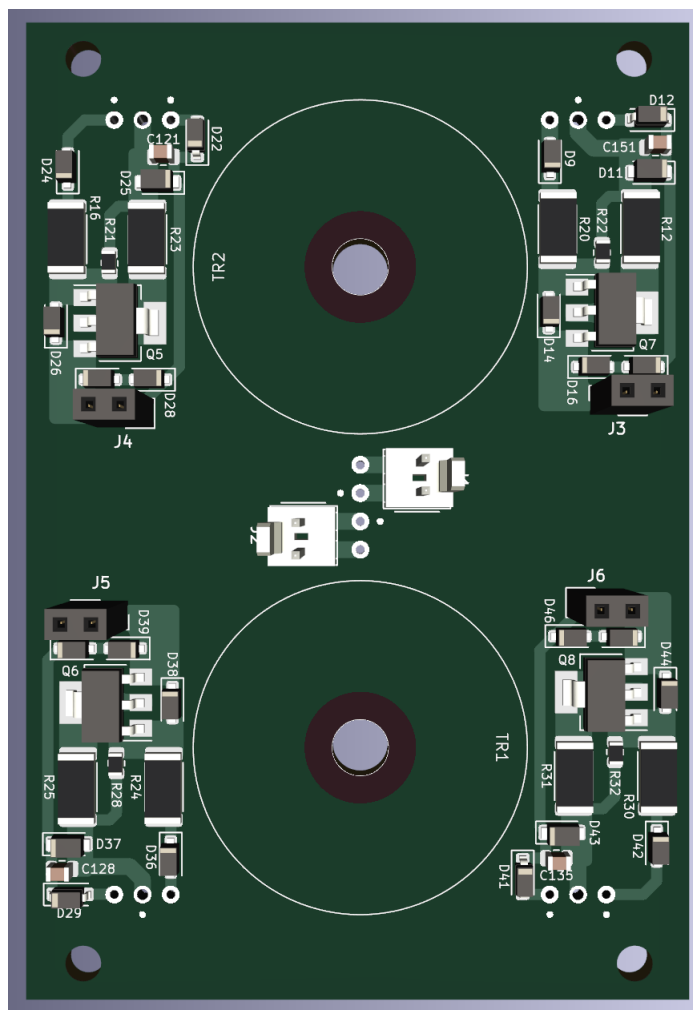


Obr. D.1: Plošný spoj budičů tranzistorů





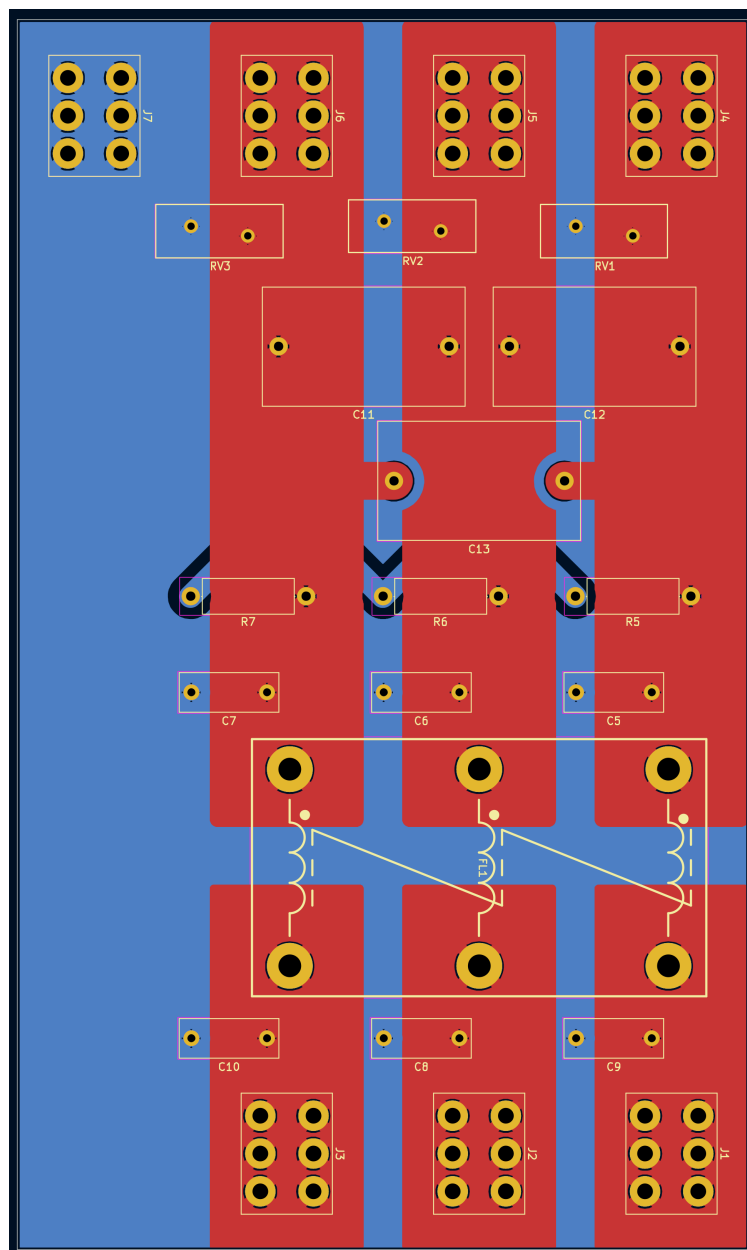
## E 3D model plošného spoja budičů tranzistorů



Obr. E.1: 3D model plošného spoja budičů tranzistorů



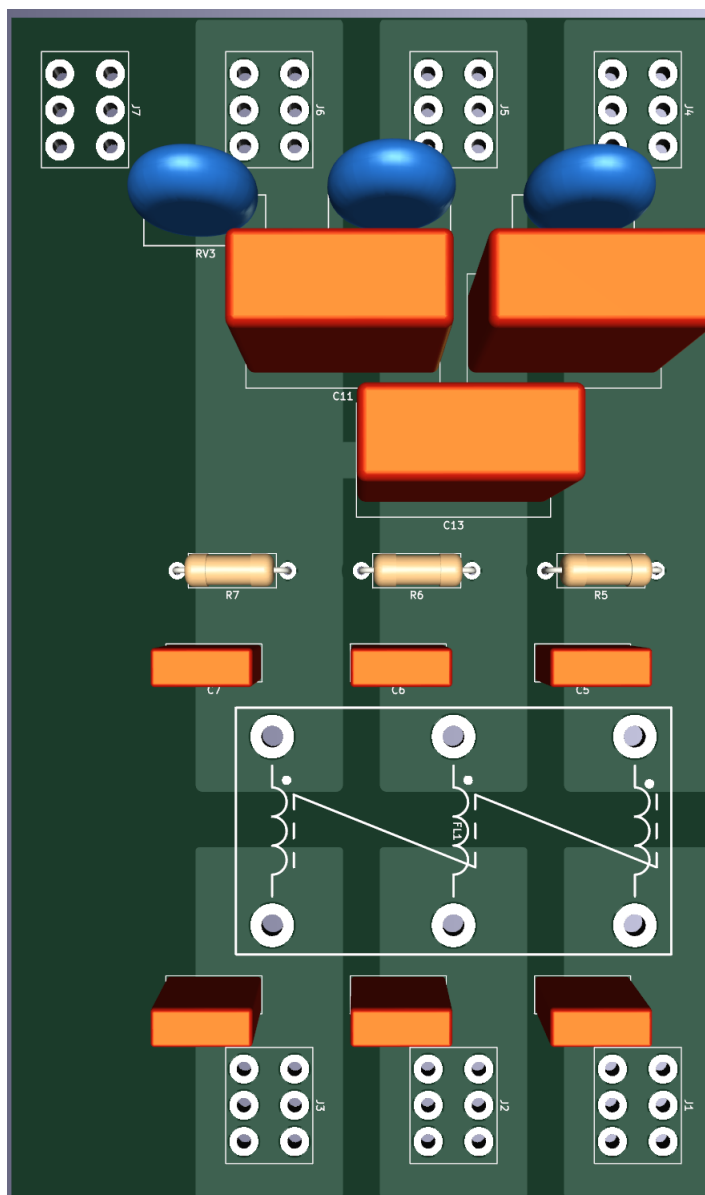
## F Plošný spoj vstupného filtra



Obr. F.1: Plošný spoj vstupného filtra



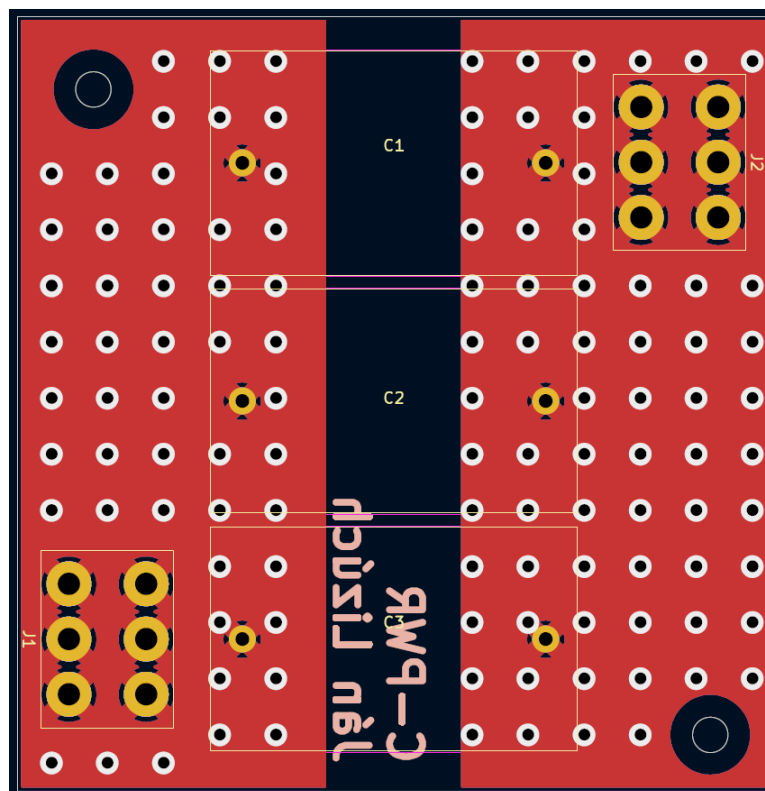
## G 3D model plošného spoja vstupného filtra



Obr. G.1: 3D model plošného spoja vstupného filtra



## H Plošný spoj kondenzátorov

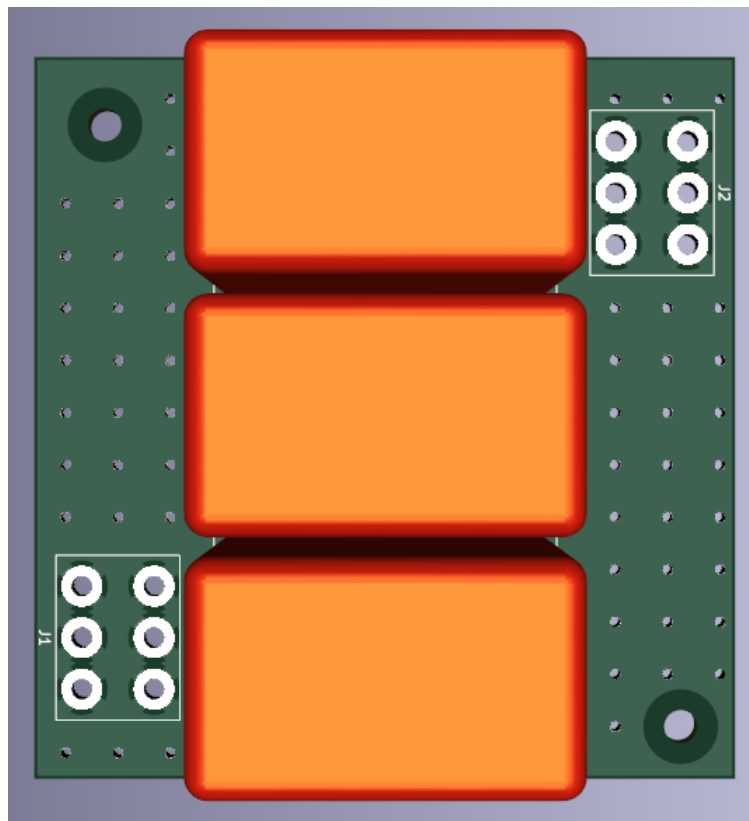


Obr. H.1: Plošný spoj kondenzátorov





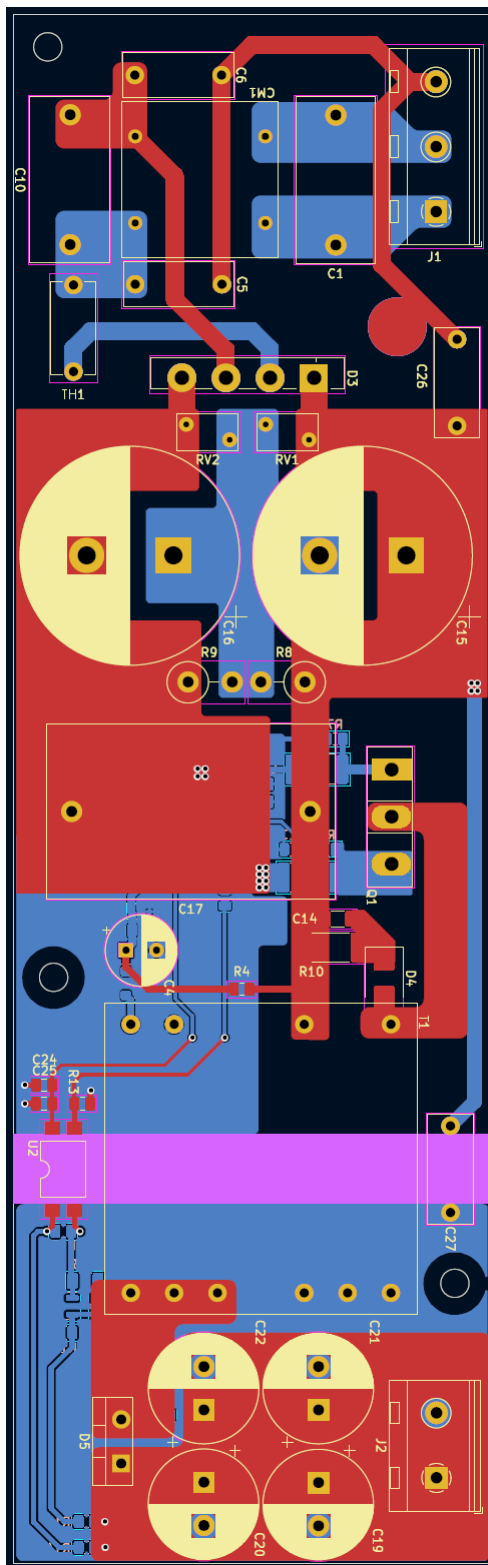
# I 3D model plošného spoja kondenzátorov



Obr. I.1: 3D model plošného spoja kondenzátorov



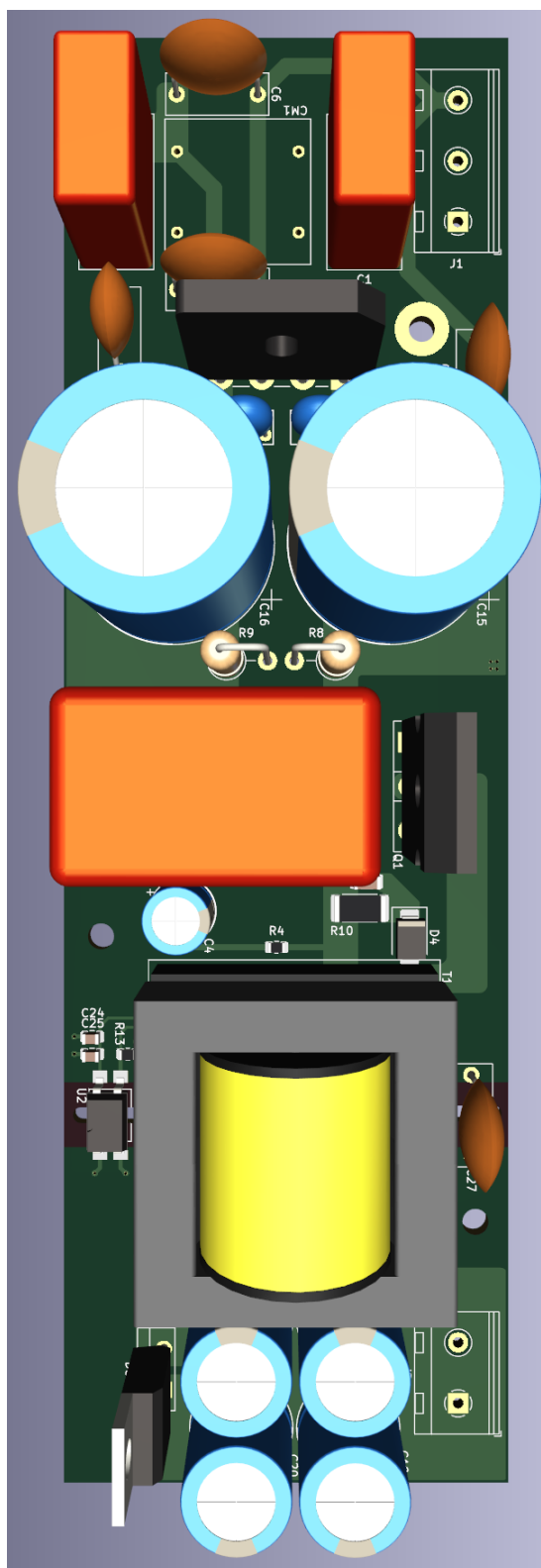
## J Plošný spoj pomocného zdroja



Obr. J.1: Plošný spoj pomocného zdroja



## K 3D model plošného spoja pomocného zdroja



Obr. K.1: 3D model plošného spoja pomocného zdroja