

České vysoké učení technické v Praze

Fakulta elektrotechnická

katedra mikroelektroniky



Bakalářská práce

Invertorová svářecí stanice řízená mikrokontrolérem

Autor: Jan Pokorný

Vedoucí práce: Ing. Vladimír Janíček, Ph.D.

2018

I. OSOBNÍ A STUDIJNÍ ÚDAJE

Příjmení: **Pokorný** Jméno: **Jan** Osobní číslo: **434945**
Fakulta/ústav: **Fakulta elektrotechnická**
Zadávací katedra/ústav: **Katedra mikroelektroniky**
Studijní program: **Komunikace, multimédia a elektronika**
Studijní obor: **Aplikovaná elektronika**

II. ÚDAJE K BAKALÁŘSKÉ PRÁCI

Název bakalářské práce:

Invertorová svářečská stanice řízená mikrokontrolérem

Název bakalářské práce anglicky:

Microcontroller Based Welding Machine

Pokyny pro vypracování:

- 1) Prostudujte problematiku svářecích agregátů z pohledu jejich funkce.
- 2) Navrhněte koncept invertorové svářečské stanice řízené mikrokontrolérem. Implementujte módy Soft-Start, Hot-Start, Anti-Stick a provoz monitorujte na displeji.
- 3) Návrh realizujte ve formě prototypu a ověřte jeho funkčnost

Seznam doporučené literatury:

- 1) Technologie svařování a zařízení, kolektiv autorů, EAN: 8085771810, 2001
- 2) Svářečský invertor do 100A, <http://www.danyk.cz/svar.html>

Jméno a pracoviště vedoucí(ho) bakalářské práce:

Ing. Vladimír Janíček, Ph.D., katedra mikroelektroniky FEL

Jméno a pracoviště druhé(ho) vedoucí(ho) nebo konzultanta(ky) bakalářské práce:

Datum zadání bakalářské práce: **16.02.2017** Termín odevzdání bakalářské práce: **25.05.2018**

Platnost zadání bakalářské práce: **10.09.2018**

Ing. Vladimír Janíček, Ph.D.
podpis vedoucí(ho) práce

podpis vedoucí(ho) ústavu/katedry

prof. Ing. Pavel Řípka, CSc.
podpis děkana(ky)

III. PŘEVZETÍ ZADÁNÍ

Student bere na vědomí, že je povinen vypracovat bakalářskou práci samostatně, bez cizí pomoci, s výjimkou poskytnutých konzultací. Seznam použité literatury, jiných pramenů a jmen konzultantů je třeba uvést v bakalářské práci.

Datum převzetí zadání

Podpis studenta

AUTHOR STATEMENT FOR UNDERGRADUATE THESIS

I declare that the presented work was developed independently and that I have listed all sources of information used within it in accordance with the methodical instructions for observing the ethical principles in the preparation of university thesis.

PROHLÁŠENÍ AUTORA PRÁCE

Prohlašuji, že jsem předloženou práci vypracoval samostatně a že jsem uvedl veškeré použité informační zdroje v souladu s metodickým pokynem o dodržování etických principů při přípravě vysokoškolských závěrečných prací.

V Praze dne 20. 05. 2018

.....
Jan Pokorný

Poděkování

Rád bych poděkoval svému vedoucímu Ing. Vladimírovi Janíčkoví, Ph.D., za cenné rady, věcné připomínky a vstřícnost při konzultacích a dále mé rodině za úplnou podporu nejen při psaní práce.

Anotace

Cílem této práce je prozkoumat problematiku svářecích agregátů z pohledu jejich funkce, navrhnout koncept invertorové svářecí stanice řízené mikrokontrolérem a vyrobit funkční prototyp.

Klíčová slova:

Sváření, svářecí stanice, spínaný zdroj, mikrokontrolér

Abstract

The aim of this work is to investigate the problematic of welding aggregates in terms of their function, to design the concept of an inverter welding station controlled by a microcontroller and to produce a functional prototype.

Index Terms:

Welding, welding station, switched power supply, microcontroller

Obsah

1	Úvod.....	11
2	Princip svařování.....	11
3	Rozdělení svařování.....	12
3.1	Tlakové svařování.....	12
3.2	Tavné svařování.....	12
3.2.1	Svařování elektrickým obloukem.....	13
4	Svářecí zdroje pro svařování elektrickým obloukem.....	14
5	Návrh konceptu invertorové svářecí stanice.....	15
5.1	Vnitřní blokové zapojení invertorových svářecích stanic.....	15
5.1.1	Vstupní filtr.....	15
5.1.2	Primární usměřňovač.....	15
5.1.3	Soft-start.....	16
5.1.4	Spínací tranzistory.....	16
5.1.5	Sekundární usměřňovač.....	16
5.1.6	Řídící jednotka.....	17
5.2	Vlastní návrh.....	17
5.2.1	Návrh topologie spínaného zdroje.....	17
5.2.2	Návrh výkonových polovodičů.....	18
5.2.3	Návrh transformátoru a tlumivky.....	19
5.2.4	Návrh buzení tranzistorů.....	21
5.2.5	Návrh primárního usměřňovače a soft-startu.....	22
5.2.6	Návrh řídicí jednotky.....	23
5.3	Programování mikrokontroléru.....	25
5.3.1	Hlavní chod programu.....	26
5.3.2	Přerušení.....	26
5.3.3	Řízení svářecího proudu.....	27
5.3.4	Hot-start.....	27
5.3.5	Anti-stick.....	27
5.3.6	Vývojový diagram.....	28
6	Konstrukční část.....	29
6.1	Deska plošných spojů.....	29
6.2	Problémy při konstrukci.....	30
6.3	Ověření funkčnosti a měření.....	31
6.4	Prototyp invertorové svářecí stanice.....	33
7	Závěr.....	35

8	Použitá literatura	36
9	Seznam obrázků	37
10	Seznam příloh	38

Seznam použitých zkratk a symbolů

p	Pa	Tlak
T	°C	Teplota
T	K	Teplota
f	Hz	frekvence
U	V	Napětí
I	A	Proud
R	Ω	Odpor
P	W	Činný výkon
S	VA	Zdánlivý výkon
t	s	Čas
l	m	Vzdálenost
S	m ²	Plocha
B	T	Magnetická indukce
ϕ	Wb	Magnetický tok
L	H	Indukčnost
N	-	Počet závitů
UV		Ultrafialové záření
PWM		Pulzně-šířková modulace
BJT		Bipolární tranzistor
MOSFET		Unipolární tranzistor
IGBT		Bipolární tranzistor řízený polem
Uce		Napětí kolektor-emitor
Ic		Proud kolektorem
Vdd		Napájecí napětí
Vss		Zem
MCLR		Resetovací pin mikrokontroleru
PGD		Programovací pin dat
PGC		Programovací pin hodinového signálu
LCD		Display z tekutých krystalů
AD/ADC		Převodník analogové hodnoty na digitální
TMR2		Časovač 2
THT		Technologie součástek pájených z druhé strany desky
AC		Střídavý
DC		Stejnoseměrný

1 Úvod

V dnešním světě je svařování všudypřítomné a v mnohých oborech se nenajde lepší a spolehlivější způsob, jak jej nahradit. V automobilech se jím spojují jednotlivé díly kostry aut, menší kovové díly se jím spojují do větších celků, nebo možná židle na které sedíme je svařena z více částí. Jednodušší svářečky jsou pak velice oblíbeným pomocníkem domácích kutilů při práci a opravách okolo domu a na zahradě. Sám jsem si už dvě takové svářečky postavil. Mnohdy jsou ale takovéto svářecí stanice příliš primitivní, neposkytují nám moc informací ohledně chodu a nedisponují kromě samotného sváření dalšími funkcemi. To mě motivovalo k vytvoření svářecí stanice, která bude přes svou jednoduchost nabízet uživateli pohodlné ovládání, kontrolu funkce stanice a neustálý stav svářecích parametrů. Klíčovou roli zde hrají výkonné polovodiče jako spínací prvky, mikrokontrolér jako řídicí prvek a display pro komunikaci s uživatelem.

Cílem této práce je tedy navrhnout koncept invertorové svářecí stanice dle výše uvedených požadavků, realizovat tento návrh ve formě funkčního prototypu a ověřit jeho funkci.

V první části práce je stručně vysvětlena teorie sváření. Jsou zde krátce popsány typy sváření a jejich metody se zaměřením na svařování elektrickým obloukem a dále zde najdeme typy svářecích zdrojů pro svařování elektrickým obloukem a jejich popis. Jsou zde vyvozeny závěry pro výběr metody a zdroje použitého v prototypu.

V druhé části je proveden návrh konceptu svářecí stanice. Podrobně je popsána činnost obvodu, schéma vnitřního zapojení, návrhy dílčích hardwarových částí a chod programu.

Poslední část je věnována samotné konstrukci prototypu. Je zde uvedena výroba plošného spoje, vzniklé problémy při konstrukci a jejich řešení, ověření funkčnosti a výsledky měření.

2 Princip svařování

Svařování je proces, při kterém dochází k vzniku pevného a nerozebíratelného spojení dvou a více obvykle kovových materiálů. Ke spojení dochází za pomoci vzniku meziatomových vazeb na aktivovaných plochách. Aktivovanou plochou se rozumí část materiálu, které bylo dodáno takové množství energie, které je potřebné pro vznik meziatomových vazeb. Energie lze dodat ve formě tepla nebo tlaku. Podle toho se svařování dělí na tavné, kde je energie dodávána pouze ve formě tepla, a tlakové, kde je energie dodána pomocí tlaku a případně i tepla [1].

3 Rozdělení svařování

Jak již bylo výše zmíněno, svařování lze rozdělit na tavné a tlakové, a dále oba tyto typy mají své metody, které se liší podle toho, jakým konkrétním způsobem je teplo dodáváno. Každá z metod má svůj specifický svářecí agregát, nebo chcete-li svářecí stanici, a bavíme-li se o specifikaci dané metody, bavíme se zároveň i o specifikaci daného agregátu a obráceně.

3.1 Tlakové svařování

Tlakové svařování je tedy takové svařování, při kterém je energie potřebná pro svaření dodána ve formě tlaku a případně tepla. Obvykle zde dochází k natavení styčných ploch vlastních svařovaných materiálů a není tedy potřeba dalších přídavných materiálů. Rozlišujeme zde následující metody: [2]

- **Odporové svařování.** Jedná se o metodu, při které dochází ke svaření stlačením dvou materiálů mezi dvě elektrody a následným průchodem velkého elektrického proudu, řádově desítky až tisíce ampér, za krátkou dobu řádově desítky milisekund až jednotky sekund. Tímto způsobem vznikne svár pouze v bodě stlačení elektrod. Jedná se o jednu z nejpoužívanějších metod tlakového svařování a je většinou automatizována pomocí svářecích robotů.
- **Svařování třením.** Metoda, kde teplo potřebné pro svaření vzniká třením jednoho materiálu o druhý, obvykle rotací a tlakem jednoho na pevně uchycený druhý. Tato metoda je vhodná pro spojování dílů s velkými styčnými plochami, ke kterým by jinak nebyl přístup.
- **Svařování výbuchem.** Je to metoda využívající rázovou vlnu po výbuchu trhavin. Rázová vlna zde přitlačí dva k sobě přitisklé materiály silou 10 až 100 GPa, energie se přemění na deformační a dochází k plastizaci na styčných plochách a ke svaření. Používá se především na svaření dvou různých jinak nesvařitelných kovů ve formě plechů a desek. [3]
- **Svařování tlakem za studena.** Jedná se o soubor metod využívajících pouze tlak jako zdroj tepla
- **Další metody.** Existují ještě další metody tlakového svařování, nicméně účelem této kapitoly není popsat kompletně všechny metody, ale pouze nastínit ty základní a nejvíce používané a stručně je vysvětlit.

3.2 Tavné svařování

Při tavném svařování je energie potřebná na svaření dodávána pouze ve formě tepla. Na rozdíl od tlakového svařování je zde ve většině případů potřeba přídavného materiálu. Hlavní roli v mnoha metodách zde hraje elektrický oblouk jako zdroj tepla, o kterém je pojednááno níže. Dále jsou tu další metody, mezi něž patří: [2]

- **Svařování plamenem.** Metoda, kde je teplo dodáváno spalováním hořlavého plynu ve směsi s kyslíkem nebo vzduchem. Přídavný materiál je podáván manuálně do sváru v podobě drátu stejného materiálu jako svařované části.
- **Elektronové svařování.** Zde je zdrojem tepla svazek elektronů urychlených vysokým napětím. Elektrony dopadají na svařovanou oblast a předávají do sváru svou energii. Přídavný materiál se u této metody většinou nepoužívá.
- **Aluminotermické svařování.** Při této metodě se zapálí směs práškového hliníku a oxidu železitého, která hoří teplotou okolo 2450 °C. Při reakci vzniká

tekuté železo, které skapává na požadované místo a vytváří svár. Nejčastěji se používá při svařování železničních kolejnic.

- **Další metody.** I tavné svařování má ještě další metody, avšak výše zmíněné jsou ty hlavní a nejvíce používané a pro ilustraci tohoto typu svařování dostačující.

3.2.1 Svařování elektrickým obloukem

Tato metoda dodává energii potřebnou pro svařování ve formě tepla vznikajícího hořením elektrického oblouku. Nejprve je dobré si říci, co je elektrický oblouk.

Elektrický oblouk je nízkonapěťový elektrický výboj vznikající v ionizovaném prostředí mezi dvěma elektrodami. Je charakteristický nízkým napětím řádově desítky voltů, vysokým proudem řádově desítky až stovky ampér, vysokou teplotou až 16 000 K a je silným zdrojem světla s vysokým podílem UV složky. A právě vysoká teplota a teplo vznikající při hoření oblouku je využíváno při sváření. Teplota je dosti vysoká na to, aby spolehlivě roztavila železo, jehož teplota tání je mezi nejvyššími mezi materiály používanými při sváření. Světlo vznikající při hoření oblouku, a zvláště jeho UV složka je nebezpečná pro náš zrak; je tedy potřeba se před ním patřičně chránit ztmavenými skly. [4]

Při svařování elektrickým obloukem tvoří jednu elektrodu samotný svařovaný materiál a druhou elektrodu drží svářeč v kleštích nebo je podávána pistolí. Proud je stejnosměrný, přičemž kladný pól je na svařovaném materiálu a záporný na elektrodě. Do svaru je potřeba téměř vždy dodávat přídatný materiál. To je možné dvěma způsoby, a to buď tavící se elektrodou, kdy je elektroda ze stejného materiálu jako svařovaný materiál a vlivem tepla do svaru „ukapává“, nebo dodáváním přídatného materiálu ve formě drátu u netavící se elektrody.

Při svařování elektrickým obloukem je potřeba chránit roztavený kov – svarovou lázeň – před oxidací na okolním vzduchu. Toho se nejčastěji dosahuje následujícími způsoby, podle kterých jsou metody pojmenovány:

- **Svařování pod tavidlem.** Svarovou lázeň zde chrání nasypané tavidlo na svařovaném materiálu. V tavidle hoří oblouk, který svou teplotou tavidlo zkapalňuje a odpařuje, čímž je docíleno vytěsnění vzduchu. Tato metoda je strojová metoda používaná na robotizovaných pracovištích, pro mé účely tedy nepoužitelná.
- **Svařování v ochranné atmosféře.** Metoda, kde je svarová lázeň ofukována inertním nebo aktivním plynem, který vytěsní vzduch a zajistí ochranu. Jedná se o metodu ruční i strojovou, s kvalitními sváry, přesto kvůli složité manipulaci s plynem pro mé účely nepoužitelná.
- **Svařování obalovanou elektrodou.** Jedná se o pouze ruční metodu, kde je tavící se elektroda, mezi kterou a základním materiálem hoří oblouk, obalena směsí oxidů, které plní stejnou funkci jako tavidlo. Při utavení elektrody se zároveň nataví i obal elektrody, který částečně zkapalní a pokrývá svár a částečně se vypaří, čímž vytvoří ochrannou atmosféru a chrání roztavený kov. Tato metoda je díky její jednoduchosti pro mé účely vhodná – stačí zde zajistit zdroj proudu pro vytvoření elektrického oblouku, ochrannou atmosféru vytvoří obal elektrody.

4 Svářecí zdroje pro svařování elektrickým obloukem

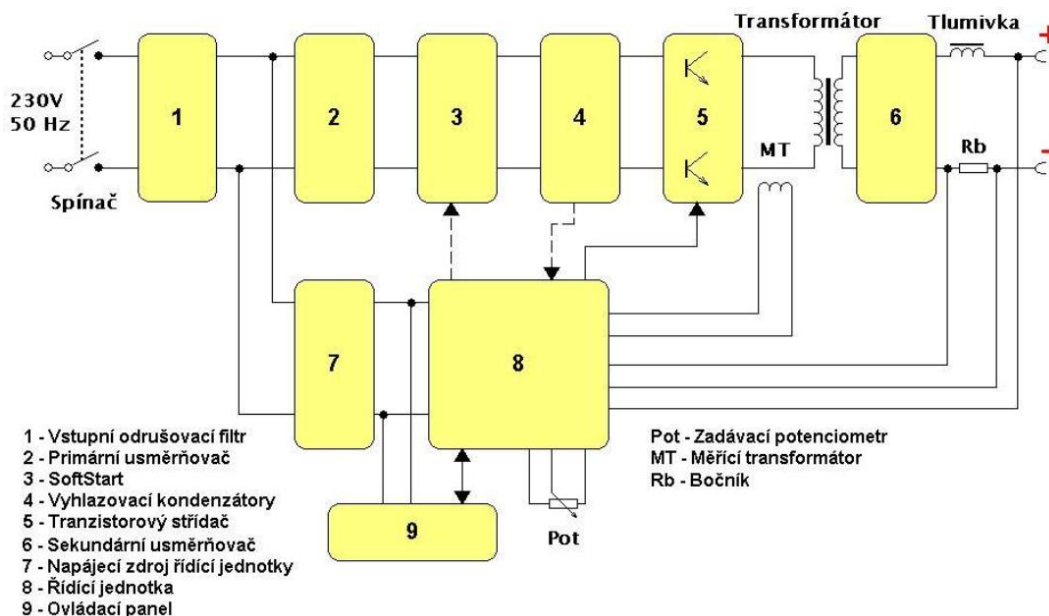
U zdrojů pro svaření elektrickým obloukem je důležité, aby dodávaly téměř konstantní proud při proměnném napětí. To se odvíjí od vlastností elektrického oblouku. Napětí na oblouku je součtem anodového a katodového úbytku napětí plus úbytek na samotném oblouku na jednotku délky. Pokud tedy oblouk „natáhneme“, napětí na něm vzroste a naopak. Oproti tomu proud obloukem je přímo úměrný energii, který oblouk dodá na svařované místo ve formě tepla. Potřebujeme-li svařit tenké materiály, například plechy, musíme dodat relativně málo energie, abychom si plechy nepropálili skrz; potřebujeme tedy nižší proud. Naopak při svaření mohutnějších konstrukcí je na důkladné prohřátí a roztavení materiálu potřeba více energie, a tedy i vyšší proud. Nicméně v obou případech potřebujeme, aby byl proud po celou dobu svařování neměnný. Jedná se tedy o zdroje proudu, který by mělo být možné nastavit na určitou hodnotu, kterou bude svářecí zdroj držet po dobu svařování, ať je napětí na oblouku jakékoliv. Mezi základní zdroje proudu pro svařování patří: [2]

- **Svařovací transformátor.** Jedná se o klasický transformátor s jádrem z ocelových plechů, s primární cívkou připojenou na síť a sekundární cívkou buď přímo na svařovací elektrody – střídavé svařování, nebo přes usměrňovač – stejnosměrné svařování. Pro velké svařovací proudy a výkony je však potřeba transformátor značně velký a těžký a regulace proudu je řešena mírně obtížně – buď odbočkami na vinutí, čímž se ale zároveň snižuje výstupní napětí, změnou rozptylu nebo tlumivkou v sekundárním obvodu.
- **Svařovací rotační dynamo.** Jedná se o stroj generující stejnosměrný proud z otáčející se kotvy v poli statoru. Kotvu může pohánět buď spalovací, nebo elektrický motor. Změnou budícího proudu statoru jednoduše ovládáme svařovací proud. Stroj je ale velký, těžký a jeho mechanické části jsou náchylné k poškození.
- **Svařovací invertor.** Jedná se o obvod, který usměrněné a vyhlazené síťové napětí nastřídá na signál obdélníkového průběhu o proměnné šířce a frekvenci jednotek až desítek kilohertz a transformuje skrz feritový transformátor. Jelikož je frekvence pulzů tak vysoká, můžou být rozměry transformátoru mnohem menší než u klasického síťového transformátoru, a váha je tedy také mnohem menší. Regulace proudu je pohodlná a jednoduchá – pouhou změnou šířky pulzů pomocí PWM (pulzně-šířková modulace). Z těchto dvou důvodů jsem si právě tento typ svařovacího zdroje vybral.

5 Návrh konceptu inverterové svářeční stanice

5.1 Vnitřní blokové zapojení inverterových svářečních stanic

Inverterová svářeční stanice je vlastně zdroj energie měnící elektrickou energii ze sítě na elektrickou energii vhodnou na svařování. Jedná se o spínaný zdroj pracující na frekvenci obvykle desítek kHz a s účinností pohybující se okolo 90 %. Nyní si popíšeme jeho jednotlivé části.



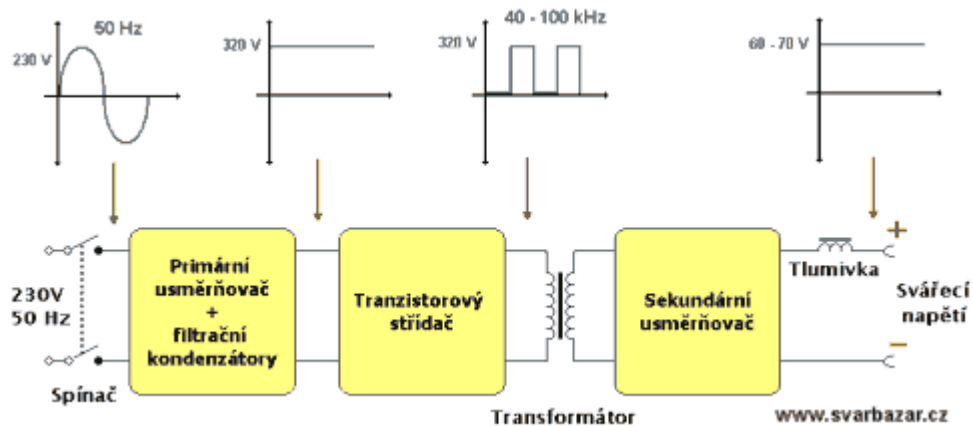
Obrázek 1 - Vnitřní blokové zapojení inverterové svářeční stanice [5]

5.1.1 Vstupní filtr

Ihned na vstupu síťového napětí do inverteru je potřeba zařadit odrušovací filtr. Na obrázku číslo 1 je to blok s číslem 1. Jeho funkce je jasná. Filtr má zabránit průniku rušivých signálů, které pocházejí od jiných přístrojů zapojených v síti nebo se na dráty dostaly různými parazitními vazbami do inverteru, kde by mohly narušit funkci zařízení a mohlo by dojít i k poškození. Zároveň však filtr funguje i opačným směrem, a to tak, že zabraňuje proniknutí rušivých signálů vzniklých uvnitř inverteru do elektrické sítě, kde by mohly negativně ovlivňovat zase další zařízení. Tyto rušivé signály vznikají hlavně vysokou frekvencí spínání, kombinovanou s vysokými proudy a velkou roli zároveň hrají rychlé náběžné a sestupné hrany signálů, které se ve výsledku jeví a ruší na frekvencích několikanásobně větších, než je samotná pracovní frekvence. Filtry se většinou skládají z kombinací indukčností a kapacit, které rušivý signál pohltnou díky jejich impedanci.

5.1.2 Primární usměrňovač

Po vyfiltrování síťového napětí následuje jeho usměrnění. Jedná se o dvoucestné usměrnění obvykle pomocí diodového můstku obsahující čtyři diody zapojené do Graetzova usměrňovače [6]. Na obrázku číslo 1 je to blok s číslem 2. Pomocí tohoto můstku napětí usměrníme do kladných půlvln. To nám ale nestačí, jelikož napětí skáče od nuly do cca. 325 V. Proto je za diodový můstek zapojena baterie kondenzátorů s velkou kapacitou, která usměrněné napětí vyhladí ideálně na stejnosměrné napětí bez zvlnění. Na obrázku číslo 1 se jedná o blok s číslem 4. Ukázky průběhů napětí jsou na obrázku číslo 2.



Obrázek 2 - Průběhy napětí po průchodu jednotlivými bloky [5]

5.1.3 Soft-start

Při zapojení invertoru do sítě jsou vyhlazovací kondenzátory primárního usměrňovače úplně vybité. Pokud bychom připojili usměrněné síťové napětí (325 V) přímo na vybité kondenzátory, vznikl by obrovský proudový ráz, který by byl omezen jen odporem vodičů a vnitřním odporem kondenzátorů, které jsou velmi malé. Tento velký proudový ráz by pak bezpečně vyhodil lokální jističe elektrické sítě případně spálil pojistky. Z toho důvodu je u takto velkých vyhlazovacích kondenzátorů potřeba zajistit jejich pozvolné přednabití menším proudem, než se připojí přímo za usměrňovač. Tuto funkci obstarává takzvaný soft-start obvod. Je realizován tak, že po zapnutí invertoru vloží do série s vyhlazovacími kondenzátory odpor řádu jednotek až desítek ohmů, který omezí nabíjecí proud kondenzátoru, a po chvíli, kdy je kondenzátor částečně nebo zcela nabitý, odpory z obvodu vyjme. V praxi je tvořen zmíněnými odpory, které jsou v obvodu nastálo a po prodlevě od zapnutí způsobené zpoždovacím prvkem je přemostí sepnutím relé. Na obrázku číslo 1 je blok soft-startu pod číslem 3.

5.1.4 Spínací tranzistory

Usměrněné napětí je potřeba nastřídat, aby mohlo být transformováno na sekundární stranu obvodu. Napětí se střídá do obdélníkového průběhu o frekvenci jednotek až desítek kHz. Slouží k tomu moderní výkonové polovodiče, v tomto případě tranzistory BJT, MOSFET nebo IGBT. Na obrázku číslo 1 je popisuje blok s číslem 5. Existuje více různých topologií a tedy i typů spínacích zdrojů, pro invertorové svářecí stanice je však nejběžnější jednočinný propustný měnič. Jeho činnost je rozdělena na dvě části. V první části, která může trvat maximálně necelou půlperiodu, je primární cívka transformátoru pomocí tranzistorů připojena na vyhlazené napětí. Začíná téci proud, který je transformován do sekundárního vinutí a dále pak teče do sekundární části obvodu. Zároveň však primárním vinutím teče magnetizační proud, který sytí jádro. Jedná se o nežádoucí jev, který však souvisí s fyzikálním principem transformátoru a nelze se ho zbavit. Z toho důvodu má měnič druhou část činnosti, která trvá po zbytek periody, kdy se nasycené jádro vybíjí demagnetizačním proudem, který většinou odteče zpátky do zdroje, resp. do vyhlazovacích kondenzátorů. V případě použití jen jednoho spínacího tranzistoru je potřeba použití přídavného demagnetizačního vinutí. Pokud použijeme dva tranzistory jako spínače, demagnetizace se provádí přímo primárním vinutím. [7][8]

5.1.5 Sekundární usměrňovač

Poté, co se napětí transformuje na sekundární stranu na nižší hodnotu, je třeba ho znovu usměrnit. Jelikož je zde napětí ve formě kladných obdélníkových pulzů, vystačíme si s jednosměrným usměrněním. Problém však nastává v druhé části činnosti měniče. V tuto

dobu do sekundární strany obvodu neteče žádný proud, přesto potřebujeme, aby i v tuto dobu tekla proud, který zásobuje elektrický oblouk energií. Řešením je zařazení tlumivky do sekundárního obvodu. V první části činnosti měniče se v tlumivce akumuluje energie ve formě magnetického pole a proud tlumivkou lineárně roste, aby ve druhé části, kdy nám transformátor žádnou energii nedodává, mohla tlumivka převzít roli zdroje a svoje akumulované magnetické pole přeměnit na proud tekoucí do elektrického oblouku. Tímto způsobem tedy docílíme nepřerušovaného zdroje proudu s vyhlazením. Čím vyšší bude indukčnost tlumivky, tím lépe vyhlazený proud bude.

5.1.6 Řídící jednotka

Celý proces činnosti obvodu zajišťuje řídicí jednotka, která ovládá spínání výkonových tranzistorů na základě měřených veličin a údajů zadaných uživatelem. Na obrázku 1 se jedná o blok s číslem 8. Jednotka má vlastní napájení, obvykle 12-20 V, které je vhodné pro buzení gateů výkonových tranzistorů. Na obrázku 1 ho můžeme najít pod číslem bloku 7. Řídící jednotka tak porovnává uživatelem nastavený požadovaný proud a měřený proud na bočníku ze sekundární strany obvodu a podle potřeby upravuje střidu obdélníkového signálu. Pokud je proud menší než nastavený, zvýší se střída signálu a tím i jeho integrál, což je přenášený výkon a proud vzroste.

5.2 Vlastní návrh

Návrh inverterové svářečské stanice je rozdělen do dílčích návrhů jednotlivých funkčních bloků, které zastávají v hotovém celku odlišné vlastnosti. Sloučením těchto celků dohromady pak dostaneme celkový návrh konceptu svářečské stanice. Cílem není dopodrobna popsat funkci každé jediné součástky v obvodu, ale seznámit čtenáře se základními aspekty návrhu a nejdůležitějšími body, které musejí být při návrhu brány na zřetel. Podrobněji jsou popsány návrhy základních částí, stručněji pak ty méně důležité. Jako výchozí požadované parametry svářečské stanice byly zvoleny: výstupní stejnosměrný proud 100 A, výstupní napětí na prázdko alespoň 50 V a pracovní frekvence 42 kHz.

5.2.1 Návrh topologie spínaného zdroje

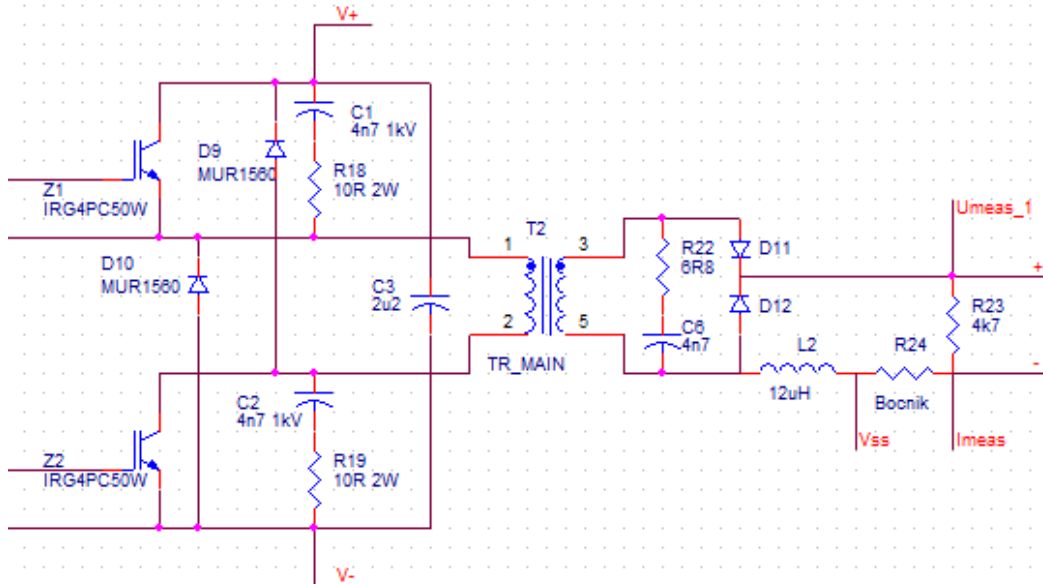
První věc, kterou uděláme, když chceme navrhnout inverterovou svářečskou stanici je výběr topologie spínaného zdroje, kterou použijeme. Je důležité to udělat jako první, protože se od toho odvíjí značná část dalších částí výsledného funkčního celku.

V mém případě jsem si vybral topologii, která je pro inverterové svářečské stanice nejběžnější, a tou jest jednočinný propustný měnič se dvěma spínači, jehož funkce je blíže popsána v kapitole 5.1.4. Důvody, proč byla vybrána tato topologie jsou následující:

- Není potřeba u transformátoru řešit rekuperační vinutí ani dělit primární vinutí na části. Jednoduše je jen jedno primární a jedno sekundární vinutí
- Lze s ním přenášet velké výkony oproti blokujícímu měniči, ale zároveň jeho řízení i zapojení je jednodušší než u dvojčinného propustného měniče [11].

Schéma zapojení výkonové části je na obrázku číslo 3. Uprostřed je výkonový transformátor transformující usměrněné síťové napětí na svařovací. Na levé, primární části jsou spínací tranzistory Z1 a Z2, které připojují usměrněné a vyhlazené síťové napětí přivedené mezi V+ a V- k primárnímu vinutí transformátoru a dále diody D9 a D10, které slouží pro odvedení demagnetizačního proudu z transformátoru zpátky do vyhlazovacích kondenzátorů. Na pravé, sekundární části je dioda D11, kterou teče proud v první fázi činnosti měniče ze sekundární strany transformátoru na svářečské elektrodo „+“, následně se vrací elektrodou „-“ přes bočník, na kterém je měřeno napětí úměrné výstupnímu proudu, dále přes tlumivku, do které se v této části ukládá energie a zpátky do transformátoru. Dále se zde nachází dioda D12, která přebírá proud tlumivky v druhé části činnosti měniče, kdy

transformátor žádný proud do sekundárního obvodu nedodává. Odpor R23 pak složí pro spálení energie uložené v tlumivce v případě, že zhasne oblouk. Odporů R18, R19, R22 spolu s kondenzátory C1, C2, C3 a C6 jsou ochrannými prvky tranzistorů, které je chrání především před napěťovými špičkami a před příliš strmým nárůstem napětí na přechodech C-E tranzistorů při jejich zavírání [12].



Obrázek 3 - Schéma výkonové části invertoru

5.2.2 Návrh výkonových polovodičů

Jako první bylo tedy vhodné navrhnout spínací tranzistory. Jak již bylo výše zmíněno, k dispozici jsou tranzistory typu BJT, MOSFET a IGBT. Požadovanými parametry jsou:

- Napětí U_{CE} alespoň 400 V
- Proud I_C alespoň 20 A
- Dimenzování na ztráty alespoň 100 W
- Schopnost spínat frekvence alespoň 50 kHz

Tranzistory BJT se běžně s těmito parametry nevyrábí, nebo jsou příliš drahé. Zbývají tedy MOSFET a IGBT. A jelikož IGBT tranzistory jsou primárně určeny pro spínání velkých výkonů, jsou ideální volbou pro tuto aplikaci. Uvedené parametry splňuje tranzistor IRG4PC50W, který má ve všech ohledech rezervy.

Dále bylo potřeba vybrat diody D9 a D10, které odvádějí demagnetizační proud. Požadavkem bylo zvládnutí proudu alespoň 5 A, závěrné napětí alespoň 400 V a aby byla dioda „rychlá“. Požadavkům vyhovovala cenově dostupná dioda MUR1560.

Posledními výkonovými polovodiči jsou výstupní usměrňovací diody. Ty trpí největším zatížením, jelikož přes ně může téci proud až 100 A! Ten ale přes ně nepoteče po celou dobu periody, ale je její část. Dioda D11 je tedy zatěžována maximálně středním proudem 50 A, jelikož jí proud teče v první části cyklu, což je maximálně necelá polovina periody. Dioda D12 je teoreticky maximálně zatěžována proudem 100 A, to by ale nastalo při šířce pulzu blížící se nule a svářecím proudem 100 A. Takovýto proud je ale prakticky nemožné dosáhnout při této konfiguraci s tak malou šířkou pulzů. Reálně tedy může být zatěžována maximálně středním proudem někde mezi 50-100 A, například 70 A. Potřebujeme tedy diody, které tento proud snesou. Jsou dvě možnosti: buď jedna výkonná

dioda zvládající tento proud, nebo paralelní spojení více diod na slabší proud. Z důvodu dostupnosti a ceny a koncentrace ztrátového tepla byla zvolena varianta paralelní kombinace více diod. Jako nejvhodnější se jevílo použití dvojice diod DSEI60-06A pro D11 i D12. Každá dioda zvládne až 60 A, dohromady v páru tedy až 120 A. [9]

5.2.3 Návrh transformátoru a tlumivky

Při návrhu se vycházelo z [9] a [10]. Požadavky na transformátor byly následující: Primární napětí 325 V, primární proud 10 A, sekundární napětí až 100 V na prázdno (kvůli dimenzování izolace, 25-35 V v provozu), sekundární proud 100 A.

Nejdřív je potřeba spočítat poměr závitů primárního a sekundárního vinutí. To souvisí s poměrem primárního a sekundárního napětí. Na primární vinutí přivádíme napětí 325 V, které ale může spadnout až k 275 V, počítejme proto s napětím 300 V. Na sekundárním vinutí potřebujeme napětí alespoň 50 V, aby šlo oblouk spolehlivě zapálit. To by znamenalo poměr napětí a i vinutí 6:1. Energie se však transformátorem přenáší pouze maximálně půl periody, musíme tedy ještě poměr snížit na 3:1.

Nyní je potřeba vypočítat počet primárních a sekundárních závitů. Na to jsou potřeba znát parametry jádra, které budeme používat. Po konzultaci s výrobcem bylo vybráno jádro E70/32 z materiálu CF139 jako adepto na vhodné jádro. Toto jádro má průřez středního sloupku 7,04 cm² neboli 0,000704 m² a střední délku siločáry 16,95 cm neboli 0,1695 m. Jádro je možné sytit indukci maximálně 0,39 T. Pro snížení ztrát však budeme držet indukci pod 0,25 T. Nyní zjistíme, jaký maximální magnetický tok v jádře může být pomocí vztahu (1):

$$B = \frac{\Phi}{S} \Rightarrow \Phi = B * S = 0,25 * 0,000704 \text{ Wb} = 0,00027456 \text{ Wb} \quad (1)$$

Nyní dosadíme do vztahu (2) a zjistíme počet primárních závitů. Za čas dosadíme polovinu periody při frekvenci 42 kHz, tedy 11,9 μs:

$$\Phi = U * t \div N \Rightarrow N = \frac{U * t}{\Phi} = \frac{300 * 11,9 * 10^{-6}}{0,00027456} = 20,3 = 20 \text{ závitů} \quad (2)$$

Sekundární počet závitů pak vypočítáme přes poměr závitů, tedy jako třetinu počtu primárních závitů, což jest 6 závitů.

Na primární vinutí bylo použito z důvodu skin efektu vysokofrekvenční lanko s průměrem 2,7 mm², které je pro daný proud 10 A dostatečné. Sekundární vinutí bylo z důvodu vysokého proudu 100 A a skin efektu realizováno měděným páskem 40*0,5 mm.

Požadavky na tlumivku byly následující: Schopná vést proud 100 A bez nasycení po průměrnou dobu půl až celé periody při výkyvu proudu max. 20 A. Nyní musíme spočítat požadovanou indukčnost tlumivky, pokud má její proud poklesnout o 20 A při dodávaném napětí potřebném pro hoření oblouku 25 V a po dobu 18 μs. Dosazením do vztahu (3) dostaneme:

$$L = \frac{U * t}{I} = \frac{25 * 18 * 10^{-6}}{20} = 22,5 \mu\text{H} \quad (3)$$

Nyní je potřeba spočítat počet závitů, aby jádro nebylo přesyceno. Jako jádro bylo vybráno E55/21 z materiálu 3C90 s vložením celkové mezery v magnetickém obvodu 10 mm. Efektivní permeabilita celku je pak 37. Střední délka siločáry je 13,875 cm neboli 0,13875 m a průřez středního sloupku je 3,61 cm² neboli 0,000361 m². Jádro je možné sytit indukci maximálně 0,38 T. My však budeme počítat s rezervou a sytit pouze do 0,2 T. Použitím stejného vztahu, jako v případě (1) zjistíme povolený magnetický tok (4):

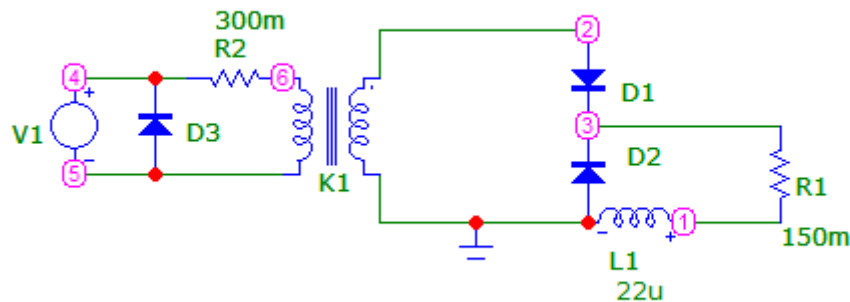
$$B = \frac{\Phi}{S} \Rightarrow \Phi = B * S = 0,2 * 0,000361 \text{ Wb} = 0,0000722 \text{ Wb} \quad (4)$$

A opět použitím stejného vztahu jako v (2) dopočítáme počet závitů (5):

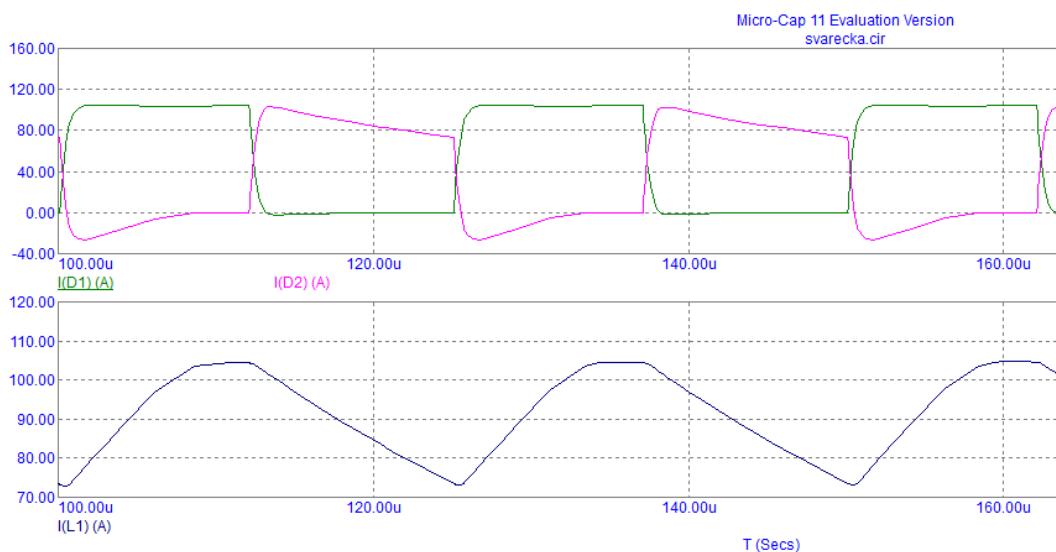
$$\Phi = U * t \div N \Rightarrow N = \frac{U * t}{\Phi} = \frac{30 * 24 * 10^{-6}}{0,0000722} = 9,97 = 10 \text{ závitů} \quad (5)$$

Z důvodu skin efektu a proudu 100 A je na vinutí tlumivky zvolen stejný měděný pásek, jako na sekundární vinutí transformátoru.

Pro potvrzení parametrů návrhu byla udělána simulace zjednodušené výkonové části v programu Micro Cap. Schéma simulovaného obvodu je na obrázku číslo 4 a výsledek simulace na obrázku číslo 5. V prvním grafu jsou proudy diodami D1 a D2, ve druhém pak svařovací proud procházející tlumivkou.



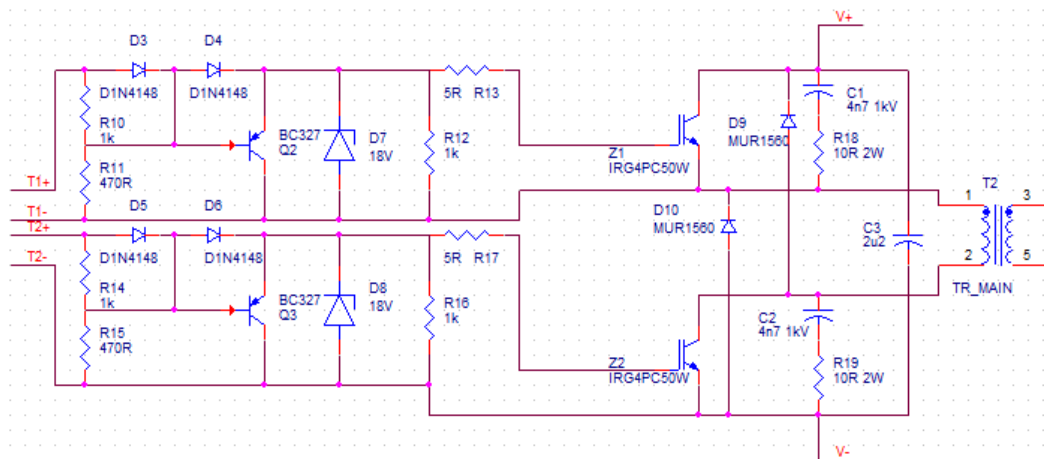
Obrázek 4 - Schéma simulovaného obvodu



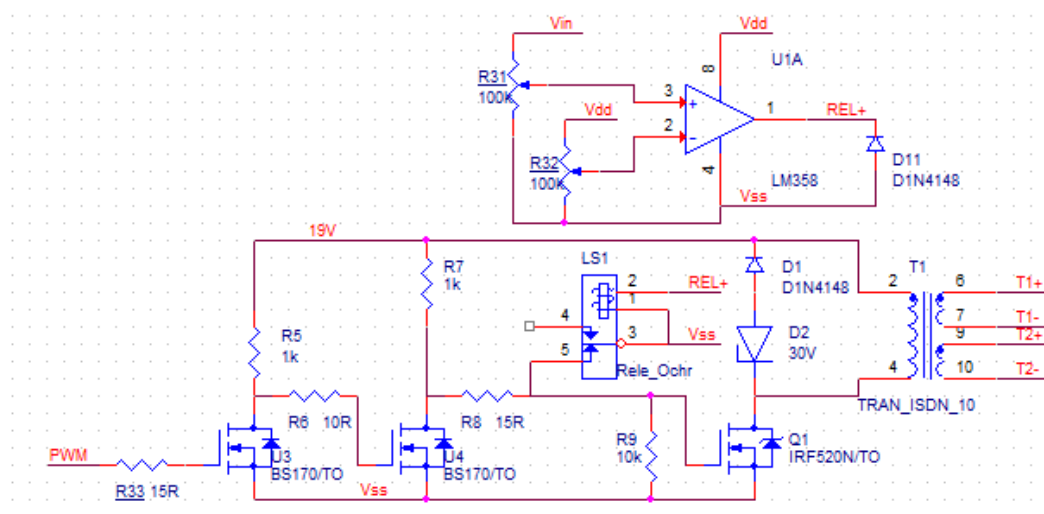
Obrázek 5 - Simulace obvodu

5.2.4 Návrh buzení tranzistorů

Jak již bylo uvedeno v části 5.2.1, spínací tranzistory jsou velice choulostivou záležitostí a musí se s nimi nakládat opatrně a potřebují množství ochran před jejich zničením. S touto ochranou je potřeba počítat i při návrhu budící části tranzistorů, která napájí jejich gaty a tím řídí celý jejich chod. Tranzistory se budí signálem obdélníkového průběhu o proměnné šířce pulzu. Tento typ modulace se nazývá PWM neboli pulzně-šířková modulace. Důležité je, aby se tranzistory co nejrychleji „otevíraly a zavíraly“. To v důsledku znamená, že požadujeme co nejstrmější náběžné a sestupné hrany. Gate tranzistoru tvoří vlastně kapacita, kterou je potřeba nabít na požadované napětí. Pro to je potřeba dostatečně „tvrdý“ zdroj, který dokáže během krátké chvíle dodat velké množství proudu a kapacitu rychle nabít. Pro vybití je zde tranzistor, který se v době skončení pulzu otevře a proud přes něj oteče do země. Schéma budiče je na obrázku číslo 6. Nedílnou součástí je zde výše zmiňovaná ochrana gatu před vysokým napětím, které by jej prorazilo. Gatey našich tranzistorů snesou maximální napětí 20 V, buzené jsou přibližně 16 volty a chrání je zenerova dioda na 18 V. Jelikož jsou oba tranzistory buzené kladným napětím vztaženým k jejich emitorům, je bezpodmínečně nutné je budit plovoucím napětím. To získáme transformací přes signálový transformátor. Ten je navinu trifilárně, třemi svinutými izolovanými vodiči 0,3mm a všechna vinutí mají 14z. Jádru je feritové hrníčkové, materiál H22, střední sloupek má průměr 16 mm, bez mezery. Transformátor je na obrázku číslo 7.



Obrázek 6 - Buzení tranzistorů



Obrázek 7 - Primární část budícího obvodu

PWM signál přicházející z mikrokontroléru je nejdříve nutné zesílit z 5-ti voltové úrovně na 19-ti voltovou úroveň pomocí tranzistoru U3. Tím ale otočíme fázi signálu, což napravíme tranzistorem U4. Výstupem z něj je pak řízen výkonnější tranzistor Q1, který spíná napětí 19 V do signálového transformátoru, který vytváří plovoucí buzení. Stejně jako u hlavního výkonového transformátoru je zde potřeba odvést demagnetizační proud, ale z důvodu malé uložené energie je možné ho nechat převést na teplo na zenerové diodě D2. Funkce relé a operačního zesilovače bude popsána níže.

5.2.5 Návrh primárního usměrňovače a soft-startu

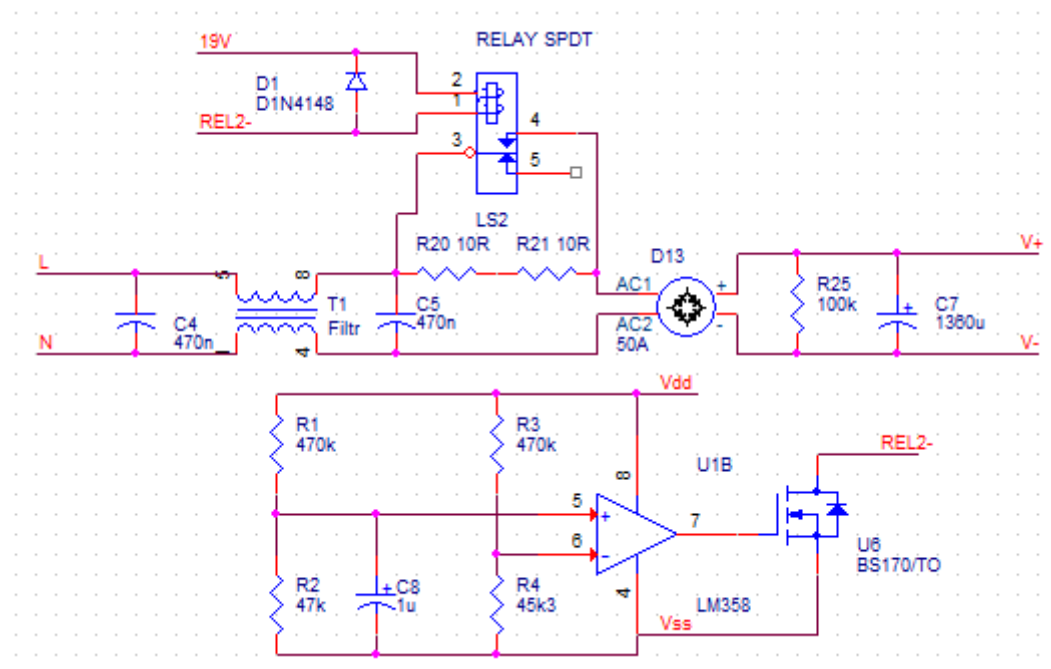
Primární usměrňovač se skládá ze dvou základních částí, a to usměrňovacího diodového můstku a vyhlazovacích kondenzátorů.

Můstek je potřeba zvolit takový, který zvládne proud alespoň 10 A a závěrné napětí alespoň 400 V na každou diodu. Byl zvolen můstek 25 A 1000 V.

Nyní musíme vypočítat kapacitu vyhlazovacích kondenzátorů, aby dokázaly udržet napětí na přijatelné úrovni, i když síťové napětí bude zrovna procházet nulou. Je tedy potřeba aby napětí udržely po dobu přibližně necelé půl periody, což je u 50 Hz 0,01 s, počítejme tedy 0,009 s. Odebíraný proud po tuto dobu počítejme 10 A a povolený úbytek napětí stanovme na 75 V. Výpočet provedeme podle vztahu (6):

$$C * U = I * t \Rightarrow C = \frac{I * t}{U} = \frac{10 * 0,009}{75} = 1,2 \text{ mF} \quad (6)$$

Výsledná kapacita byla docílena složením osmi cenově nejvýhodnějších kondenzátorů 680 μF 200 V do sérioparalelní kombinace s výslednou kapacitou 1360 μF na napětí 400 V.



Obrázek 8 - Schéma zapojení primárního usměrňovače a obvodu soft-start

Návrh obvodu soft-start je potřeba začít návrhem odporů, které jsou zařazené v obvodu nabíjení vyhlazovacích kondenzátorů a následně je relé přemostí. Zde použijeme jednoduše Ohmův zákon (7) a pro požadovaný maximální proud 16 A při špičkové hodnotě napětí 325 V dostaneme hodnotu odporů 20 Ω . Ta byla složena ze dvou rezistorů 10 Ω 10 W.

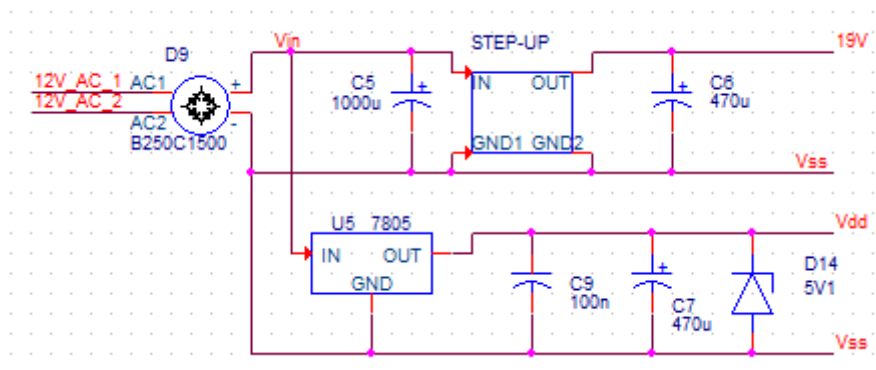
$$R = \frac{U}{I} = \frac{325}{16} = 20,3 \Omega \quad (7)$$

Relé je potřeba zvolit podle napětí, kterým ho budeme řídit, v našem případě 18 VDC z pomocného zdroje, a proud kontaktem, v našem případě 16 A s rezervou. Dále je potřeba zajistit, aby se relé sepnulo až po nějaké době od startu, kdy se již kondenzátory částečně nabijí přes rezistory a je možné už je připojit přímo. Toto by šlo udělat přímým připojením relé na ovládací napětí s využitím mechanických vlastností, kdy obvykle u takovýchto relé trvá 10-20 ms, než se kontakty sepnou. Tato doba je však příliš malá a kondenzátory by se nabily jen na 30-50 V, což je nedostačující. Proto je sepnutí řízeno operačním zesilovačem ve funkci komparátoru, viz schéma na obrázku číslo 8. Do jeho záporného vstupu je přivedena napěťová reference tvořená R3 a R4. Jeho kladný vstup sleduje napětí na kondenzátoru C8, který se nabíjí přes odpor R1 až do hodnoty napětí dané děličem R1 R2. Hodnoty součástek jsou vybrány tak, aby tento proces trval přibližně 300 ms, což nám zaručí nabití vyhlazovacích kondenzátorů na dostatečnou úroveň (kolem 90%), abychom mohli bez obav sepnout relé a nabíjecí odpory přemostit zkratem. Napěťovou referenci bylo nutné zvolit dosti nízko, aby se při krátkodobém výpadku proudu ze sítě kondenzátor C8 rychle vybil přes „relativně malý“ odpor R2 a byl hned připravený na další soft-start při obnově dodávky proudu.

5.2.6 Návrh řídicí jednotky

Invertorové svářečské stanice bývají obvykle řízeny integrovanými obvody, které jsou přímo určeny pro tuto aplikaci a obsahují vše v jednom pouzdře. Jejich nevýhodou však je, že jejich funkce je předem daná a žádné změny v chodu programu případně přidávání nových funkcí nelze dělat. Z tohoto důvodu byl v mém návrhu zvolen jako srdce řídicí jednotky mikrokontrolér, jehož program můžeme měnit dle libosti.

Řídicí jednotka potřebuje samostatný zdroj napájení. Je vyžadována jednak napěťová úroveň 19 V pro buzení gateů spínacích tranzistorů a chod budících obvodů a dále 5 V pro mikrokontrolér a ostatní obvody. Pomocný zdroj je realizován z 12-ti voltového výstupu síťového transformátoru o výkonu 18 VA. Schéma pomocného zdroje je na obrázku číslo 9. Napětí je usměrněno můstkem a vyhlazeno kondenzátorem. Z něj je pak pomocí lineárního stabilizátoru vytvářena napěťová úroveň 5 V a pomocí step-up měniče ve formě modulu úroveň 19 V. Pro úroveň 5 V je použita ochranná zenerova dioda, která ochrání citlivou elektroniku před neočekávaným vyšším napětím.



Obrázek 9 - Pomocný zdroj napětí

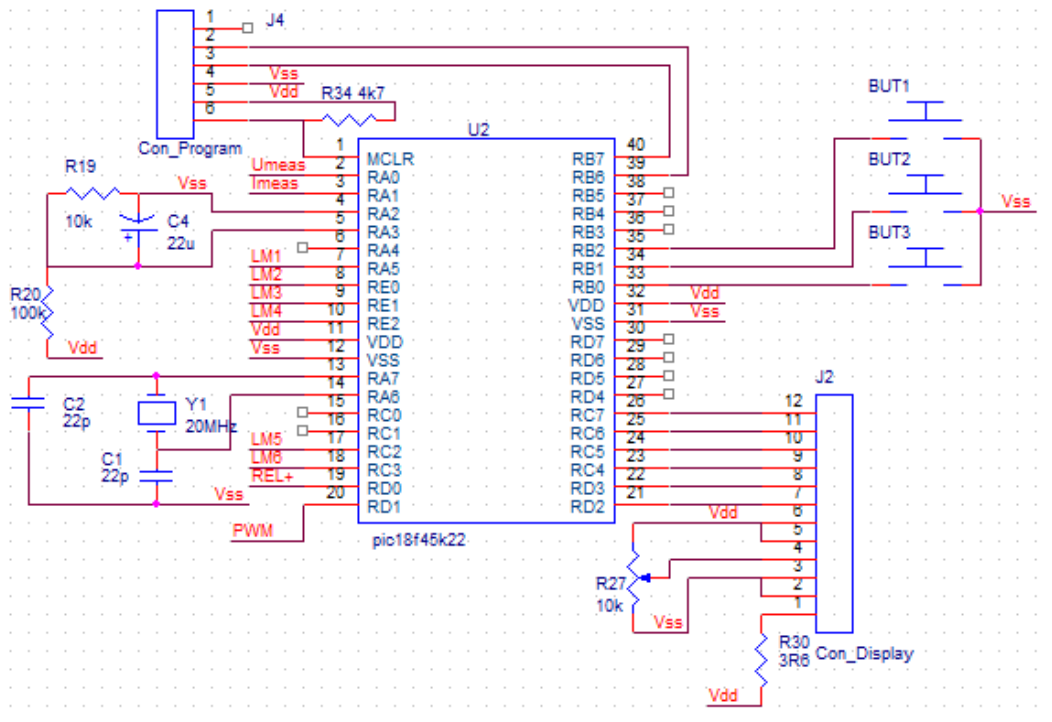
Na obrázcích číslo 10 a číslo 11 jsou obvody řídicí jednotky. Srdcem řídicí jednotky byl vybrán mikrokontrolér PIC18F45K22 od společnosti Microchip. Byl vybrán z důvodu dostatečného počtu pinů a potřebného hardwarového vybavení. O jeho programování je pojednáváno v následující kapitole.

Pro chod mikroprocesoru je potřeba přivést napájení 5 V mezi piny V_{dd} a V_{ss} , a dále připojit krystal udávající frekvenci, na které bude mikroprocesor pracovat. Z důvodu požadavku rychlého vyhodnocení měřených dat byla zvolena frekvence 20 MHz. Krystal je připojen mezi piny RA6 a RA7.

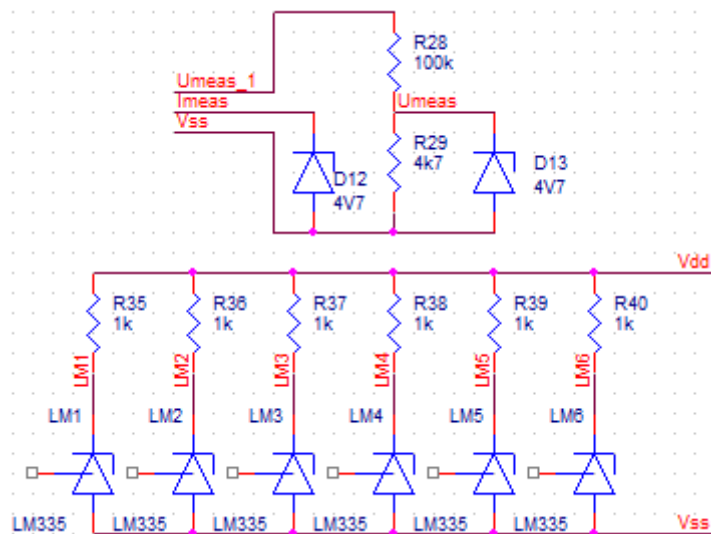
Pro programování procesoru je zde vyveden konektor J4, který nabízí propojení napájecího napětí, země, MCLR, PGD a PGC.

Pro interakci s uživatelem je přes konektor J2 zapojen display. Jedná se o 16-ti znakový dvouřádkový LCD display s řadičem HD44780. Je připojen sedmi datovými piny a pěti napájecími. Dále jsou připojena tři mechanická tlačítka menu, „+“ a „-“, pomocí nichž uživatel zadává vstupní parametry. Nastavit může hlavně požadovaný proud, který má invertor držet a dále má na výběr samostatné zapnutí nebo vypnutí metod hot-start a anti-stick. V další módu můžeme sledovat aktuální svářecí parametry, tedy proud a napětí na oblouku a také střidu, na které invertor zrovna běží. Poslední menu rozdělené na dvě obrazovky nám ukazuje aktuální teplotu výkonových polovodičů – tedy spínacích tranzistorů a výstupních usměrňovacích diod.

Na obrázku číslo 11 vidíme 6x LM335. Jedná se o teplotní senzory, která měří teplotu na výkonových polovodičích, viz výše. Senzory se chovají jako zenerovy diody s proměnným zenerovým napětím podle jejich teploty. Jejich koeficient je 10 mV/K s počátečním napětím 2,73 V při teplotě 0 °C. Ke každému senzoru je připojen rezistor jako primitivní zdroj proudu. To si můžeme dovolit, protože se teplotní koeficient se změnou proudu zásadně nemění. Dále zde máme část obvodu pro měření napětí a proudu obloukem. Ten je zapojen na výstup invertoru dle obrázku číslo 3. Jelikož úbytek napětí na bočníku je pouze 0,75 mV/A, bylo potřeba pro převod této hodnoty definovat novou referenční hodnotu, ke které AD převodník převod provádí. Ta je definována odpory R19 a R20 jako přibližně 1/10 V_{dd} , tedy 0,5 V. Naopak měřené napětí se může pohybovat až do 100 V, pro jeho měření je tedy naopak potřeba napětí snížit na odporovém děliči z odporů R28 a R29 na přibližně 1/20 své hodnoty, aby nepřesáhlo úroveň 5 V. Oba dva měřené vstupy jsou chráněné zenerovými diodami proti většímu napětí.



Obrázek 10 - Mikrokontrolér a jeho periferie



Obrázek 11 - Periferie mikrokontroléru

5.3 Programování mikrokontroléru

Při programování byl kladen důraz na jednoduchost a přehlednost kódu, aby se v něm šlo dobře orientovat a případně v budoucnu upravovat a doplňovat o nové části. K tvorbě programu jsem použil programovací jazyk C a programoval jsem v prostředí mikroC PRO for PIC. Jelikož je celý kód dlouhý asi 400 řádků a zabíral by zde hodně místa, tak ho dávám do přílohy práce a odsud se na něj budu odkazovat. Běh programu je rozdělen na tři části:

- První část nastává po startu mikrokontroléru. Jsou v ní hlavně inicializační části kódu, které inicializují součásti mikrokontroléru jako jsou ad převodníky, časovače, vstupní a výstupní porty, ale také proměnné, funkce a další. Jedná se o počátek funkce main.
- Druhá část je while cyklus na konci funkce main. Zde jsou umístěny části kódu, které se opakovaně provádějí po celý zbytek běhu programu.
- Třetí část je přerušení normálního běhu programu neboli části dvě. To nastane za předem definovaných podmínek. Vykoná se kód zapsaný v bloku přerušení a program se vrátí zpět do jeho normální činnosti, tedy do while cyklu funkce main.

5.3.1 Hlavní chod programu

V hlavní části programu, která začíná na řádce 237, je nejprve inicializovány všechny vstupní a výstupní porty. U vstupu tlačítek jsou zapnuty pull-up rezistory. Dále je postupně inicializován AD převodník, PWM, přerušení a timer 2. Nakonec je na display vypsáno „Invertorova svarecí stanice“.

Následuje druhá část hlavního programu, tedy while cyklus na konci funkce main. V této části je prováděn stále dokola výpis na displej, podle toho, v jakém menu se uživatel zrovna nachází, viz popis níže u přerušení.

5.3.2 Přerušení

V části přerušení se odehrává většina programu. Kód části přerušení začíná na řádce 50. Do přerušení se lze dostat vícero způsoby, v našem případě to jsou dva:

- Přerušení od TMR2. Přerušení nastane po přetečení postscaleru od TMR2.
- Přerušení od ADC. Přerušení nastane po dokončení konverze ADC.

Při přerušení od TMR2 (řádek 52) se nejprve spustí konverze ADC, pokud už neběží. Dále následuje vyhodnocení, zda-li je stisknuto nějaké tlačítko, nebo ne. Pokud je stisknuto menu tlačítko, posune se menu o jedno dopředu a následně po skončení přerušení se v cyklu while main funkce menu vypíše. Dále mohou být stisknutá tlačítka „+“ nebo „-“. Pokud je jedno z nich stisknuté a uživatel se nachází v příslušném menu, provede se inkrementace nebo dekrementace daného parametru. V prvním menu lze nastavit požadovaný svářecí proud. V druhém menu lze zapnout nebo vypnout metody anit-stick a hot-start. Zbývající menu jsou pouze zobrazovací. Jsou to menu měření, kde se nám zobrazuje aktuální proud a napětí na oblouku, střída PWM signálu a pak menu, kde se nám zobrazuje teplota na výkonových polovodičích. Poslední menu je navíc a je určené pro testování. V tomto menu přejde invertor do módu, kdy můžeme nastavit pevnou střidu a sledovat měřený proud.

Při přerušení od ADC (řádek 98) se musí rozlišit, co je zdrojem pro ADC, respektive jaká hodnota z jakého vstupu se převáděla. Převádíme totiž jednak hodnotu úměrnou svařovacímu proudu, úměrnou svařovacímu napětí a pak 6x hodnotu úměrnou teplotě na výkonových polovodičích. Rozlišení je však jednoduché. Tyto převody mají dané pořadí, ve kterém se převádí, a to je řízeno proměnnou s názvem adcsorce. Výjimka je pak pro případ, že jsme v posledním, testovacím menu. Zde nechceme, aby střída byla řízena automaticky. V případě hodnoty adcsorce=1 byla převedena hodnota příslušící svářecímu proudu. Více o ní níže v kapitole 5.3.3. V případě adcsorce=2 byla převedena hodnota příslušící svářecímu napětí. Hodnota se převede přes referenční napětí a přes převod daný děličem napětí R28 a R29 z obrázku číslo 11, a výsledné napětí se uloží do proměnné voltage, aby mohlo být následně vypsáno nebo použito pro módy hot-start a anti-

stick, viz dále. Následně jsou převáděny hodnoty příslušící teplotním sensorům pro hodnoty `adcsourc=3` až `adcsourc=8`. Výsledky převodů se konvertují na teploty a uloží proměnných začínající na „t_“.

5.3.3 Řízení svářecího proudu

Pro řízení svářecího proudu byl mnou vymyšlen důmyslný systém, který dokáže pohotově a adaptivně reagovat na změny proudu, ale zároveň dokáže být stabilní a při malých výkyvech proudu udržovat stabilní střidu.

Vše začíná po převodu hodnoty ADC na svářecí proud při `adcsourc=1` (řádek 105). Změřený proud se porovná s tím nastaveným a podle toho, jestli je větší nebo menší se větví dál. Pokud je proud menší, musí se střída (0-100, kde 100 odpovídá střídě 40%) (a s ní související proud) přidat. Otázka ale je, s jakým krokem. V případě, že v předchozím cyklu (předchozím měření) se střída také zvětšovala, tak se krok nyní zdvojnásobí a o jeho velikost se střída zvýší. Děje se tak proto, že minulé navýšení střidy nestačilo, proto se musí navyšovat rychleji. V případě, že je proud menší, ale v předchozím cyklu se střída zmenšovala, znamená to, že v předchozím cyklu byl proud větší a teď je menší. Nastává tedy čas na snižování kroku a postupné ustálení okolo vhodné střidy s minimálními kroky. V ideálním případě pak bude střída oscilovat okolo požadované střidy s krokem 1. Stejný postup je analogicky aplikován pro případ, že je naměřený proud větší než nastavený.

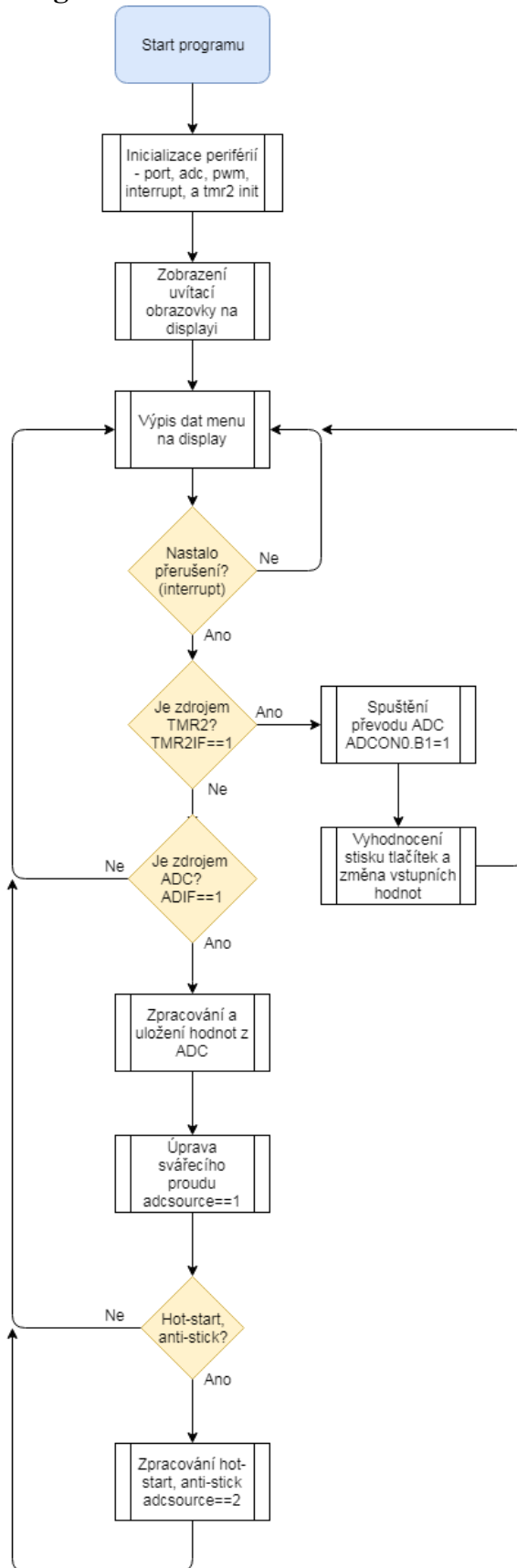
5.3.4 Hot-start

Funkce hot-start má při sváření za úkol usnadnit zapálení oblouku. Je tomu docíleno navýšením proudu při zapalování oblouku oproti nastavenému. Aby k aktivaci této funkce nedocházelo jindy, než potřebujeme, je potřeba sledovat několik parametrů, jimiž jsou: svářecí napětí, svářecí proud a střída signálu. Hot-start se musí aktivovat ve chvíli, kdy se dotkneme elektrodou svařovaného materiálu a zapalujeme oblouk. To je signalizováno poklesem napětí alespoň pod 15 V a vzrůstem proudu z původně nulové hodnoty. Toto ale musí nastat po nějaké době, kdy se elektroda nedotýkala, a platily následující parametry, které po tu dobu měříme a počítáme, jak dlouho platí: napětí je větší než 25 V (obvykle maximální napětí), střída je větší než 50 (obvykle maximální střída 100) a proud je nulový. Splněním těchto podmínek pak víme, že máme provést hot-start. V tom případě se pak střída na 500 ms navýší na maximální střidu.

5.3.5 Anti-stick

Funkce anti-stick má při sváření za úkol zabránit přilepení elektrody při jejím dotyku ke svařovanému materiálu. Aby k aktivaci této funkce nedocházelo jindy, než potřebujeme, je potřeba sledovat několik parametrů, jimiž jsou: svářecí napětí, svářecí proud a střída signálu. Anti stick se musí aktivovat ve chvíli, kdy se nám elektroda přilepí a zůstane po danou dobu přilepená. To je signalizováno poklesem napětí alespoň pod 15 V při střídě alespoň 10 a procházejícím proudem nenulové hodnoty po danou dobu. Splněním těchto podmínek pak víme, že máme provést anti stick. V tom případě se střída sníží na nulu po dobu dvou sekund, kdy elektroda zchladne a svářeč má čas jí odlepit, než se dodávka energie obnoví.

5.3.6 Vývojový diagram



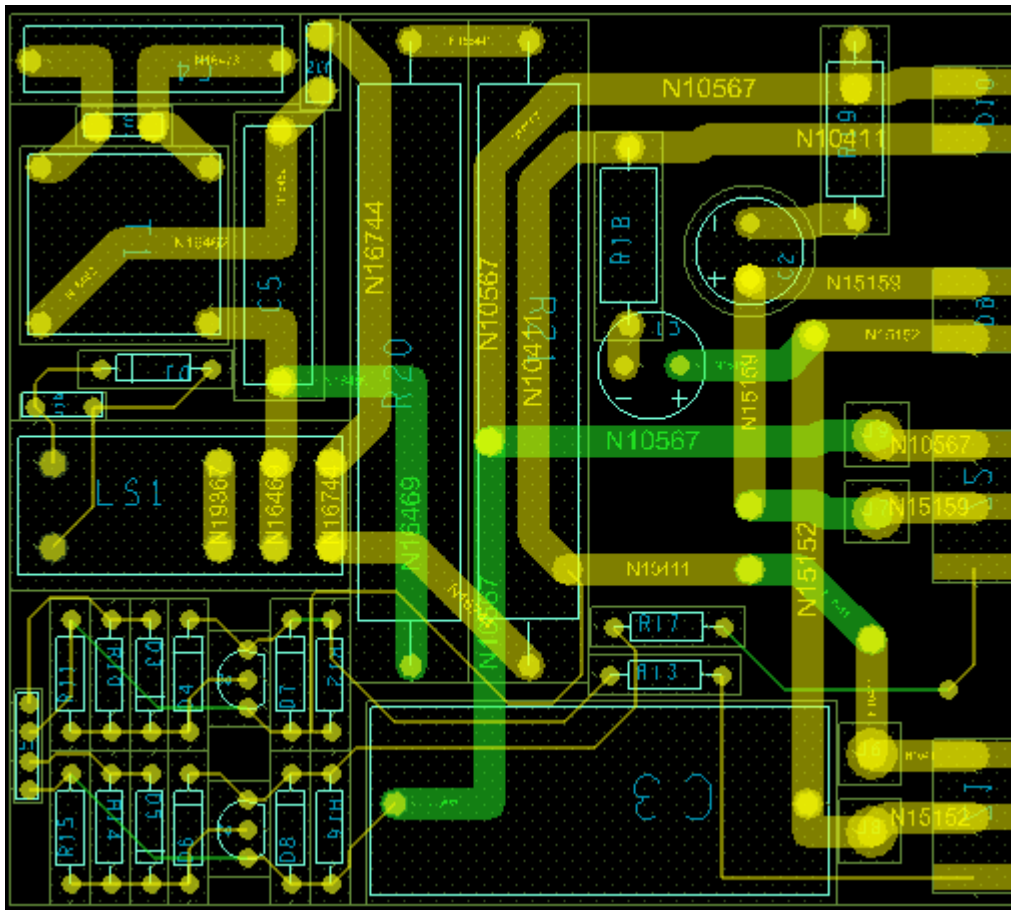
Obrázek 12 - Vývojový diagram

6 Konstrukční část

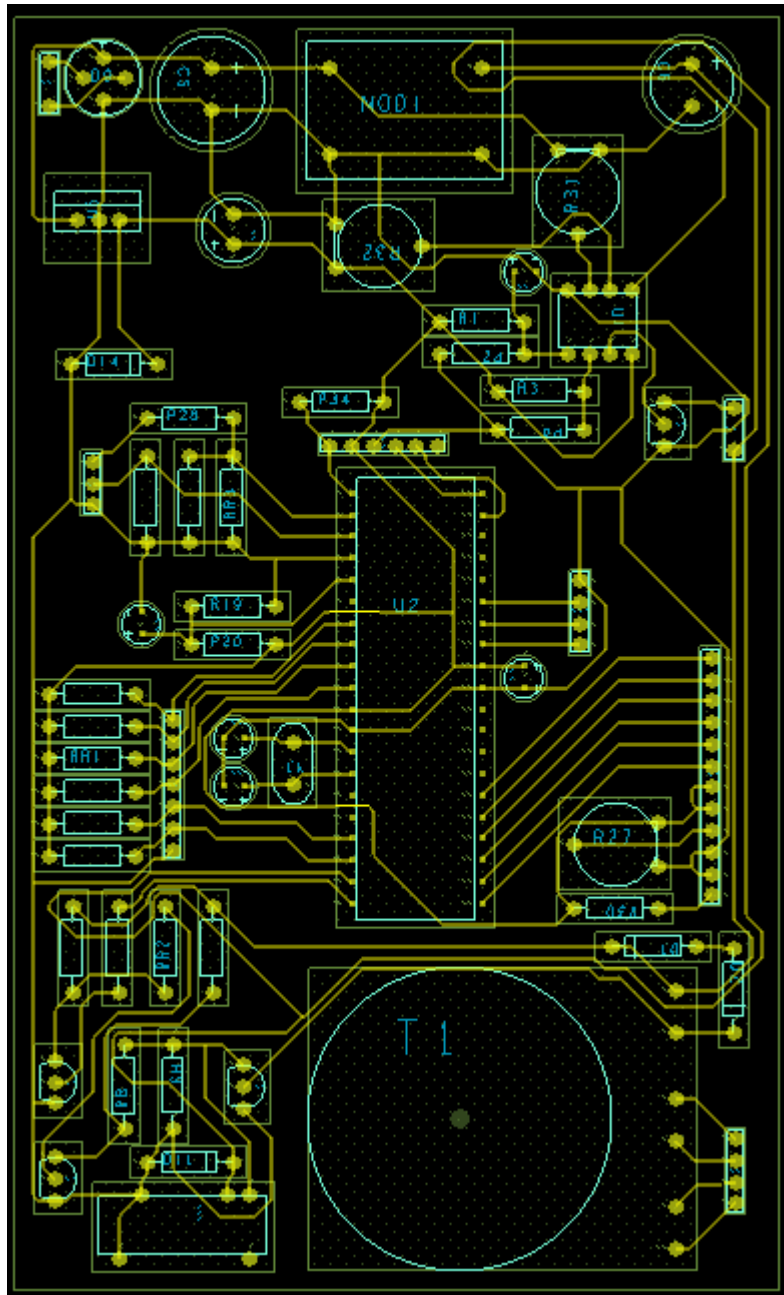
6.1 Deska plošných spojů

Deska plošných spojů byla navržena v programu OrCad PCB editor. Nejdříve bylo potřeba navrhnout schéma v programu OrCad Capture CIS, kde bylo potřeba vytvořit schématické značky pro netypické součástky jako byl například mikrokontrolér. Dále se schéma přeneslo pomocí netlistu do PCB editoru, kde naopak bylo potřeba pro všechny součástky vytvořit nejdříve jejich „footprint“ jak v reálu vypadají, jaké a kde mají vývody a dále. Z důvodu předešlého zkoušení funkčnosti obvodu v nepájivém poli byly použité THT součástky, které byly již dostupné.

Návrh byl nakonec rozdělen na dvě desky, kdy jedna deska obsahuje mikrokontrolér a jeho periferie, a druhá deska obsahuje obvody primární strany napájení a buzení spínacích tranzistorů. V případě desky s mikrokontrolérem se jedná o jednostrannou desku, v druhém případě pak o oboustrannou desku. Ukázka návrhu desek je na obrázcích číslo 13 a číslo 14.



Obrázek 13 - Návrh dvourstvé desky



Obrázek 14 - Návrh jednovrstvé desky

6.2 Problémy při konstrukci

První problém se vyskytl v buzení tranzistorů. Jelikož v prvotním návrhu nebyl tranzistor U4 z obrázku číslo 7, musel být tranzistor U3 buzen invertovanou PWM, což nebyl takový problém softwarově přehodit. Problém nastal při spuštění, kdy mikroprocesor po startu na krátkou dobu, vzhledem k periodě signálu však na dobu dlouhou, připojí veškeré piny na zem. Jenže při invertovaném buzení to vyústilo v sepnutí tranzistorů na mnohem delší dobu, než by měly být sepnuty a jejich destrukci. Tento problém byl vyřešen přidáním onoho zmíněného tranzistoru U4 pro otočení fáze zpátky na neinvertovanou tak, aby když mikroprocesor posílá log. 0, tak aby nebyly tranzistory sepnuté.

Po dalším uvažování o první chybě byla odhalena situace, která by mohla nastat a vést taktéž k destrukci tranzistorů, a to při výpadku proudu z elektrické sítě. V případě, že by se vstupní vyhlazovací kondenzátory vybíjely pomaleji než vyhlazovací kondenzátory

pomocného zdroje, klesalo by budící napětí tranzistorů a ty by se rázem vlivem nedostatečného budícího napětí dostaly do své lineární oblasti místo saturace, začal by se na nich ztrácet velký výkon a hrozilo by rizik průrazu. Z tohoto důvodu bylo přidáno před gate tranzistoru Q1 z obrázku číslo 7 relé, které je řízené operačním zesilovačem v režimu komparátoru. Toto relé ve vypnutém stavu spojuje gate tohoto tranzistoru se zemí a nedovolí tedy buzení tohoto tranzistoru. Komparátor relé sepne v případě, že napětí V_{IN} , které napájí pomocný zdroj, je větší než nastavená reference na záporném vstupu komparátoru, což je asi při 15 V. Tímto způsobem, pokud klesne budící napětí z 19 V na 15 V (které je stále bezpečně vysoké na buzení), dojde k připojení gate tranzistoru Q1 na zem a tranzistory jsou chráněné.

6.3 Ověření funkčnosti a měření

Ověření funkčnosti probíhalo nejprve při napájení z laboratorního zdroje při nízkém napětí z důvodu ochrany obvodu před skrytou chybou. Napětí 30 V DC bylo přivedeno na vstupní vyhlazovací kondenzátory, které posloužilo jako testovací napětí místo 325 V zde obvykle přítomných. Dále bylo potřeba napájet řídicí elektroniku zde již standardními 19 V. Při tomto testu se samozřejmě hodnoty na výstupu invertoru ani nepřiblížily těm svařovacím, při chodu nakrátko zkratováním svářecích elektrod však byl dosažen maximální proud 19 A. Tímto byl tedy nízkonapěťový test úspěšný a potvrdil správnou funkci obvodu. Ten byl nyní připraven na připojení síťového napětí.

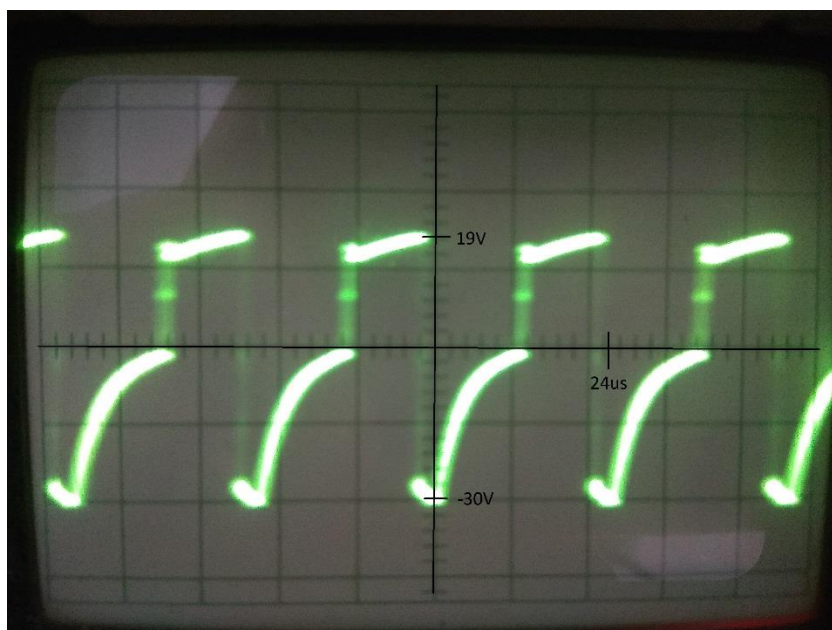
Při připojení do sítě naběhlo vše bez problému, po krátké prodlevě bylo slyšet sepnutí relé obvodu soft-start a na displayi se po uvítací obrazovce objevilo standardně první menu. Tlačítka a display fungoval bez chyby.

Při testování samotného sváření šlo vše, jak mělo, oblouk byl stabilní a z displaye bylo vidět kolísání proudu těsně okolo nastavené hodnoty. Byly vyzkoušeny módy hot-start a anti-stick, které pracovaly bez chyby. Jediným nedostatkem bylo, že invertor nedokáže stabilně držet oblouk při proudech nižších než 30 A. Nicméně těmito proudy se téměř nikdy nesváří při použití obalované elektrody, je to tedy pro chod svářečky irrelevantní. Obvyklé svářecí proudy jsou podle tloušťky elektrody mezi 40–100 A.

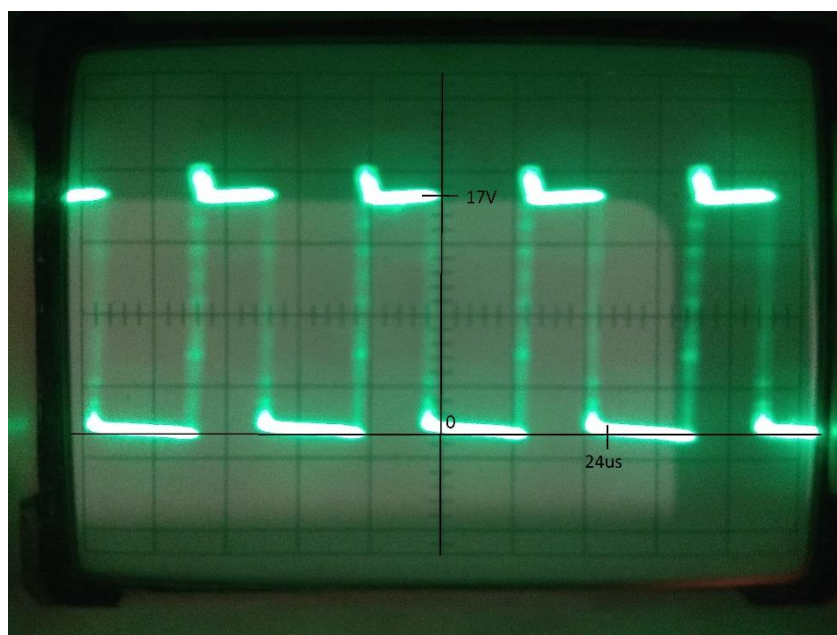
Při měření se používal voltmetr a ampérmetr pro měření svářecích parametrů a jejich následným porovnáním s hodnotami na displayi v měřicím menu změřenými přímo svářecí stanicí, a ty se ve většině případů shodovaly.

V případě měření průběhů na osciloskopu to bylo složitější. Jednak je nepraktické měřit a odečítat data z osciloskopu vedle člověka, který zrovna sváří, a taky se průběhy během sváření mění. Z těchto důvodů bylo žádoucí použít místo sváření umělou zátěž. Bohužel však zátěž, která by se vlastnostmi podobala elektrickému oblouku a snesla tento výkon nebyla k dispozici. Proto bylo zvoleno měření při napájení z laboratorního zdroje, viz výše. Z měření byly zaznamenány tři průběhy. První průběh na obrázku číslo 15 zobrazuje průběh budícího napětí před tvarovacím obvodem neboli na výstupu signálového transformátoru. Druhý průběh na obrázku číslo 16 zobrazuje průběh budícího napětí za tvarovacím obvodem neboli na gate výkonového tranzistoru. Poslední průběh na obrázku číslo 17 zobrazuje přiblížený detail zvlnění výstupního proudu.

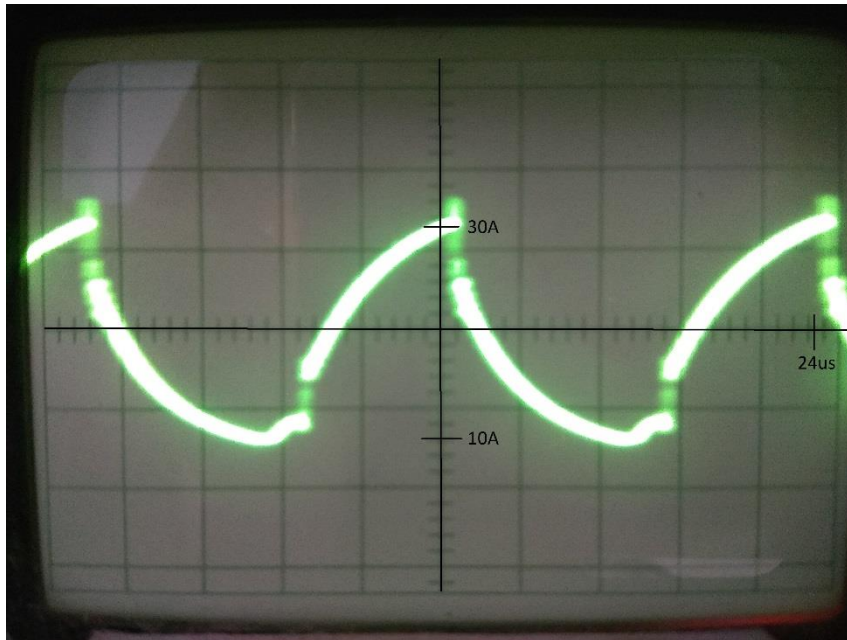
Při měření bylo dále zjištěno, že maximální výstupní napětí naprázdno je 55 V, což je oproti návrhu nižší.



Obrázek 15 - Průběh budícího napětí před tvarovacím obvodem



Obrázek 16 - Průběh budícího napětí za tvarovacím obvodem



Obrázek 17 - Detail zvlnění výstupního proudu

6.4 Prototyp invertorové svářeční stanice

Postavený prototyp invertorové svářeční stanice je svářečním zdrojem schopným dodávat svářeční proud až 100 A. Požadovaný proud si uživatel nastaví pomocí displaye s tlačítky, s jejichž pomocí může nastavit funkce hot-start a anti-stick. Na displayi je uživatel zároveň informován o chodu stanice, jsou zde zobrazeny aktuální svařovací parametry – tedy napětí a proud, dále střída budicího signálu PWM a teplota výkonových polovodičů.

Invertorová svářeční stanice je navržena s mikrokontrolérem jakožto srdcem řídicí jednotky, který umožňuje použití displaye a funkcí popsaných výše.

Parametry prototypu invertorové svářeční stanice:

- Svářeční proud až 100 A
- Svářeční napětí naprázdno 55 V
- Napájecí napětí 230 V AC
- Maximální příkon 2300 W
- Omezení střídavy 40%



Obrázek 18 - Vnitřní uspořádání prototypu svářečské stanice



Obrázek 19 - Celkový pohled na prototyp svářečské stanice

7 Závěr

Podle zadání jsem popsal problematiku svářecích agregátů dle jejich funkce a vybral vhodný typ pro mou práci. Nejdříve jsem popsal princip svařování s rozdělil jej podle typů a metod. Navázal jsem popisem samotných agregátů, jejich funkce a použitelností pro mojí aplikaci. Z těchto poznatků jsem vyvodil závěr pro výběr typu svářecího agregátu.

Dále jsem navrhnul koncept invertorové svářecí řízené mikrokontrolérem. Návrh jsem rozdělil na dílčí návrhy jednotlivých částí, které jsem podrobněji popsal a dohromady tvořily funkční celek.

Pomocí tohoto konceptu jsem zkonstruoval funkční prototyp invertorové svářecí stanice. Popsal jsem tvorbu plošného spoje, vzniklé problémy při konstrukci a jejich řešení.

Na závěr jsem otestoval funkčnost svářecí stanice a jejich metod a změnil její parametry a signálové průběhy a zaznamenal je.

Oproti původnímu plánu jsem přidal další možnost chodu stanice, a to v takzvaném testovacím menu, kde stanice běží v manuálním módu pevně nastavené střídavy buzení. Toho lze využít i pro jiné účely než sváření, např. jako napájecí zdroj.

V neposlední řadě pokládám za velkou výhodu možnost následné úpravy softwaru, pomocí které je možno přidávat další funkce anebo vylepšovat chod stávajícího programu.

8 Použitá literatura

- [1] Lipták, J., Sedláček, J.: Materiály pro elektrotechniku, skripta ČVUT, 2008
- [2] AMBROŽ, Oldřich; KANDUS, Bohumil; KUBÍČEK, Jaroslav. Technologie svařování a zařízení. 1. vyd. Ostrava: Česká svářečská společnost ANB, ZEROSS - svářečské nakladatelství, 2001. 395 s. ISBN 80-85771-81-0.
- [3] JOSHI, Amit. Introduction to Explosive Welding. Indian Institute of Technology - Bombay, Dept. of Metallurgical Engineering & Material Science, rev. 2000-02-10.
- [4] Jan Moravec, Elektrický oblouk – Jak vzniká a jak se zháší? [Online] <http://oenergetice.cz/elektrina/elektricky-oblouk/> [cit. 20.5.2018]
- [5] Svarinfo.cz Magazín praktického svařování., Svářecí inventory – pohled pod pokličku. [Online] <http://svarbazar.cz/phprs/view.php?cislocianku=2006092101> [Cit. 20.5.2018]
- [6] Jaromír Kekule. Elektřina a magnetizmus – Graetzovo zapojení. [Online] http://elektross.gjn.cz/soucastky/jeden_prechod/graetz.html [cit. 20.5.2018]
- [7] Zápeca, Jan. Spínaný zdroj s digitální řídicí smyčkou, VUT v Brně, 2012
- [8] Švejda, Martin. Síťový spínaný zdroj s regulovatelným výstupem 0-70V 15A, Západočeská univerzita v Plzni, 2013
- [9] Svářecí invertor do 100 A, [Online] <http://danyk.cz/svar.html> [cit. 20.5.2018]
- [10] <https://www.zirafoviny.cz/modules/news/article.php?storyid=107&page=1>
- [11] Impulzní zdroje a měniče I. - Přehled topologií impulzních zdrojů (s galvanickým oddělením) [Online] <http://danyk.cz/zdroje.html> [cit. 20.5.2018]
- [12] Impulzní zdroje a měniče III. - Ochrana tranzistorů a MOSFETů [Online] <http://danyk.cz/mosfety.html> [cit. 20.5.2018]

9 Seznam obrázků

Obrázek 1 - Vnitřní blokové zapojení invertorové svářečské stanice [5].....	15
Obrázek 2 - Průběhy napětí po průchodu jednotlivými bloky [5].....	16
Obrázek 3 - Schéma výkonové části invertoru.....	18
Obrázek 4 - Schéma simulovaného obvodu.....	20
Obrázek 5 - Simulace obvodu	20
Obrázek 6 - Buzení tranzistorů	21
Obrázek 7 - Primární část budicího obvodu.....	21
Obrázek 8 - Schéma zapojení primárního usměrňovače a obvodu soft-start	22
Obrázek 9 - Pomocný zdroj napětí.....	23
Obrázek 10 - Mikrokontrolér a jeho periferie	25
Obrázek 11 - Periferie mikrokontroléru	25
Obrázek 12 - Vývojový diagram.....	28
Obrázek 13 - Návrh dvouvrstvé desky.....	29
Obrázek 14 - Návrh jednovrstvé desky.....	30
Obrázek 15 - Průběh budicího napětí před tvarovacím obvodem.....	32
Obrázek 16 - Průběh budicího napětí za tvarovacím obvodem	32
Obrázek 17 - Detail zvlnění výstupního proudu	33
Obrázek 18 - Vnitřní uspořádání prototypu svářečské stanice.....	34
Obrázek 19 - Celkový pohled na prototyp svářečské stanice.....	34

10 Seznam příloh

A Celkové schéma zapojení

B Datový nosič

- Kompletní program v jazyce C `program.c`
- Schéma zapojení řídicí jednotky `design1.dsn`
- Schéma zapojení obvodu měření teploty `design2.dsn`
- Schéma zapojení primárního obvodu `design3.dsn`
- Návrh plošného spoje řídicí jednotky `board1.brd`
- Návrh plošného spoje primárního obvodu `board2.brd`

Příloha A

