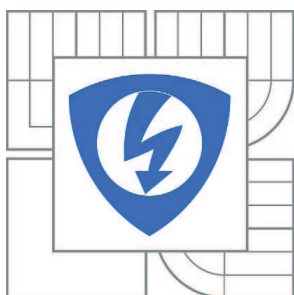


VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY



FAKULTA ELEKTROTECHNIKY A KOMUNIKAČNÍCH
TECHNOLOGIÍ

ÚSTAV VÝKONOVÉ ELEKTROTECHNIKY A
ELEKTRONIKY

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

SPÍNANÝ ZDROJ VELKÉHO VÝKONU

THE HIGH CURRENT PULSE INVERTER

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

BACHELOR'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

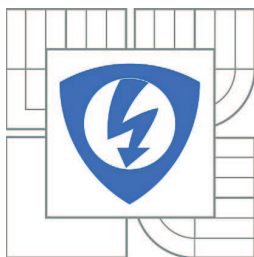
MIROSLAV CEJPEK

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

Ing. DALIBOR ČERVINKA, Ph.D.

BRNO 2011



VYSOKÉ UČENÍ
TECHNICKÉ V BRNĚ

Fakulta elektrotechniky
a komunikačních technologií

Ústav výkonové elektrotechniky a elektroniky

Bakalářská práce

bakalářský studijní obor

Silnoproudá elektrotechnika a elektroenergetika

Student: Miroslav Cejpek

ID: 106389

Ročník: 3

Akademický rok: 2010/2011

NÁZEV TÉMATU:

Spínaný zdroj velkého výkonu

POKYNY PRO VYPRACOVÁNÍ:

1. Sestavte silovou část spínaného zdroje navrženého v rámci semestrálního projektu.
2. Pokusně realizujte řídicí obvody.
3. Navrhněte desky plošných spojů.

DOPORUČENÁ LITERATURA:

Dle doporučení vedoucího

Termín zadání: 23.9.2010

Termín odevzdání: 30.5.2011

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

doc. Ing. Petr Toman, Ph.D.

Předseda oborové rady

UPOZORNĚNÍ:

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

Anotace:

Tato práce se věnuje problematice sváření, různým druhům svářeček, jejich principu, využitelnosti a sváření za pomoci invertoru.

Hlavní náplní práce je návrh svářečky se spínaným zdrojem. Díky realizaci svářečky jako spínaného zdroje pracujícího na frekvenci až 60kHz můžeme svářečku realizovat s velmi malými rozměry. Návrh počítá s těmito parametry:

Rozsah proudu 55A – 120A

Rozsah napětí 20V – 30V

Napětí naprázdno 80V

Proud při zkratu 25A

Klíčová slova:

- Sváření
- Měnič
- Invertor
- Spínaný zdroj
- Řídící obvod
- Transformátor
- Plošný spoj

Abstract:

This work is devoted to welding, different types of welders and their principle, efficiency and welding using an inverter.

The main responsibility of the bachelor project is design of switched welding source. Thanks to the welder as a switched power supply operating at a frequency up to 60kHz welding machine can be realized with very small footprint. The proposal involves the following parameters:

Current range	55A – 120A
Voltage range	20V – 30V
Out voltage	80V
Critical current	25A

Keywords:

- Welding
- Converter
- Inverter
- Switching power supply
- Control circuit
- Transformer
- Printed Circuit

Bibliografická citace

CEJPEK, M. *Spínaný zdroj velkého výkonu*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, 2011. 32 s.

Vedoucí bakalářské práce Ing. Dalibor Červinka, Ph.D.

Prohlášení

Prohlašuji, že semestrální projekt na téma *Spínaný zdroj velkého výkonu* vypracoval samostatně pod vedením mého vedoucího projektu, s použitím literatury, internetových odkazů a dokumentů, které sem všechny uvedl v seznamu literatury na konci práce. Jako autor uvedeného semestrálního projektu prohlašuji, že jsem neporušil autorská práva třetích osob, zvláště sem nezasáhl nepovoleným způsobem do cizích autorských práv. Dále jsem si plně vědom následků porušení ustanovení §11 a následujícího autorského zákona č. 121/2000 Sb. A možných trestněprávních důsledků vyplývajících z ustanovení §152 trestního zákona č. 140/1961 Sb.

V Brně dne 29.5. 2011

Podpis

Poděkování

Tímto děkuji vedoucímu semestrálního projektu panu Ing. Daliboru Červinkovi za objasňování problematiky spínaných zdrojů a měničů a za jeho cenné rady. Dále děkuji panu Doc. Dr. Ing. Miroslavu Patočkovi za poskytnutí odborné literatury k této problematice.

Miroslav Cejpek

Obsah

1	Úvod.....	9
2	Materiály – Spojování a svařování	10
2.1	Spojování kovových materiálů.....	10
2.2	Svařování	10
2.2.1	Obloukové svařování.....	12
2.2.2	Svařování elektrickým odporem.	13
2.3	Svařovací zdroje pro SMAW / MMA	14
2.3.1	Transformátorová svářečka.....	14
2.3.2	Svářečka se spínaným zdrojem.....	15
3	Výběr zapojení – popis činnosti	16
3.1	Výkonová část.....	16
3.1.1	Rozběhový obvod (Softstart).....	18
3.1.2	Výstupní usměrňovač a filtr.....	19
3.2	Řídící obvody	19
4	Dimenzování součástek.....	20
4.1	Vysokofrekvenční impulsní transformátor	20
4.2	Dimenzování usměrňovače.....	22
4.3	Tranzistory	23
4.4	Diody výstupního usměrňovače.....	24
4.5	Tlumivka.....	25
5	Měření:	26
6	Závěr:	30
7	Použité zdroje a literatura:	32
8	Příloha:	32

1 Úvod

V této bakalářské práci je mým úkolem navrhnout síťový spínaný zdroj vysokého výkonu. Po domluvě s mým vedoucím práce jsem se rozhodl pro aplikaci svářecího invertoru pro obloukové svařování s použitím obalovaných elektrod.

Druhá kapitola se zabývá principy a různými metodami spojování materiálů, svařovatelnými materiály a různými principy svařování, včetně svařování elektrickým obloukem.

Ve třetí kapitole se nachází výběr potřebného zapojení spínaného zdroje a návrh schématu svářečky. Dále je zde také uveden princip činnosti celého zapojení.

Čtvrtá kapitola se zabývá nadimenzováním součástek pro zvolené schéma svářecího invertoru.

2 Materiály – Spojování a svařování

Ve všech konstrukčních oblastech průmyslu se používá velké množství svařitelných materiálů. Tyto materiály se dělí nejen podle obtížnosti svařitelnosti, ale i podle technologického postupu potřebného pro jejich svaření.

Mezi svařitelné kovové materiály patří:

- Oceli - nízkouhlíkové, jemnozrnné, nelegované
- středně legované konstrukční
- uhlíkové, vysokolegované, feritické

Hliník a jeho slitiny - dural, superdural, siluminy

Měď a její slitiny - mosaz, bronz, dělovina, zvonovina

Nikl a jeho slitiny - monel, inconel, alpaka, nichrom

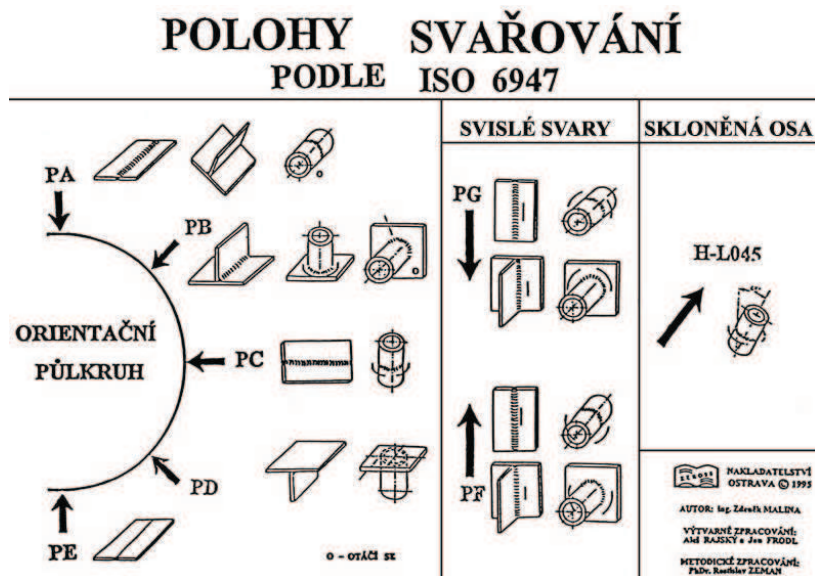
2.1 Spojování kovových materiálů

Už od dob kdy se poprvé začalo užívat kovu na výrobu nástrojů byla zde potřeba materiál nějakým způsobem spojovat. Jako jeden z prvních způsobů se osvědčilo kovářské svařování a spojování za pomoci nýtů. Se zdokonalováním výroby a zpracování kovů se začaly objevovat dokonalejší postupy, jako například spojování pomocí šroubů nebo pájení. Se stále větším rozvojem v technice se objevilo také první svařování, a to za pomoci plamene hořáku. S pokrokem v oblasti elektřiny se také objevily první typy elektrických svářeček.

2.2 Svařování

Svařování nebo **sváření** slouží k vytvoření trvalého, nerozebíratelného spoje dvou a více materiálů. Při obecném principu svařování je zapotřebí docílit takových termodynamických podmínek, při kterých je umožněn vznik meziatomárních vazeb ve spojovaných materiálech. Protože prakticky není možné dosáhnout spojení na úrovni meziatomových vazeb za normálních podmínek (běžná teplota, tlak), kdy je termodynamický stav materiálů stabilní resp. metastabilní, je nutné tento termodynamický stav změnit. Proto je při svařování nutné působit buď tlakem, teplem nebo oběma faktory najednou. Obecně při svařování platí závislost čím vyšší působí teplota tím menší je zapotřebí působení tlaku a naopak. Za tlakové svařování je považováno svařování za působení převážně tlaku, za tavné působení převážně tepla. Svařovat lze kovové i nekovové materiály, materiály podobných i různých vlastností. Ale pro každý typ spoje je vhodná i jiná metoda svařování. Při každém svařování dojde vždy ke změně mechanických nebo fyzikálních vlastností základního materiálu (spojovaného) v okolí spoje.

Pro vytvoření sváru mezi dvěma kusy materiálu může být použito mnoho různých zdrojů energie, například acetylenový plamen, elektrický oblouk, laser, elektronový paprsek nebo ultrazvuk. Sváření je často považováno za průmyslový proces, může však být prováděno téměř kdekoli, ať už ve výrobní hale podniku, venku na vzduchu, pod vodou, nebo v kosmu. Ale ať už je prováděno kdekoli stále je potřeba dodržovat bezpečnostní pravidla při sváření, např. ochrana před úrazem elektrickým proudem, před ultrafialovým zářením nebo před jedovatými výpary.



Obr.1: Příklad poloh svařování dle ISO 6947¹

Až do konce 19. století byl jediným svářecím postupem tzv. kovářské sváření, zřejmě nejstarší dodnes používaná metoda. Sváření kusů kovu se zahřívá v kovářské peci a údery kladiva (nebo za pomoci lisu) se spojí. Obloukové svařování a svařování plynovým hořákem byli mezi prvními procesy které byly vynalezeny na začátku 20. století, odporové svařování následovalo brzy poté. Technologie svařování postupovala rychle během 1. a 2. světové války, neboť zde byl požadavek na spolehlivé a levné spojovací metody. V důsledku války bylo vyvinuto několik moderních postupů svařování, a to hlavně ruční obloukové svařování obalovanou elektrodou též známé jako stíněné kovové obloukové svařování (Shield Metal Arc Welding - SMAW), dodnes jedna z nejpopulárnějších svářecích metod, stejně jako poloautomatické a automatické procesy jako svařování v ochranné atmosféře plynů, obloukové svařování plněnou (trubičkovou) elektrodou nebo sváření elektrickým odporem. Vývoj pokračoval s vynálezem svařování laserovým paprskem a svařování elektronovým paprskem ve druhé polovině století. Dnes věda pokračuje dál. Svařování roboty se stává samozřejmostí v průmyslových aplikacích a výzkumníci pokračují se zdokonalováním metod pro získání větší kvality a lepších vlastností spoje.

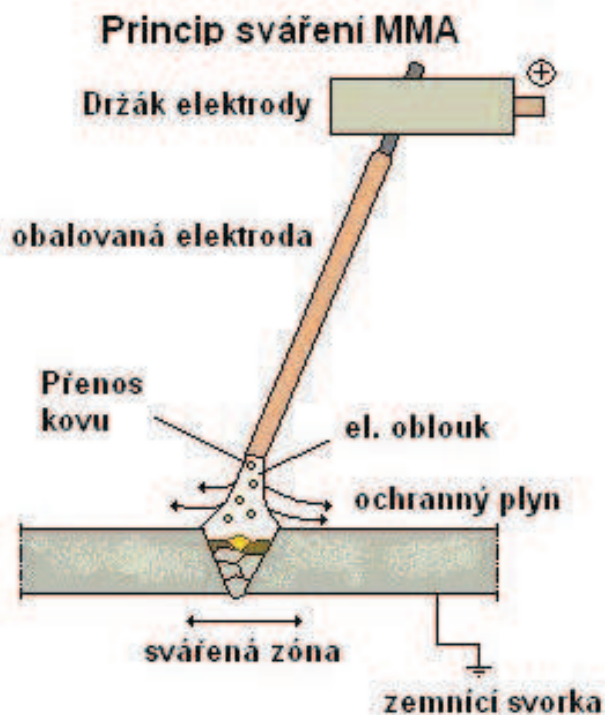
¹ Polohy svařování [online]. SVARINFO.CZ, c2006 - 2011. Obrázek dostupný z WWW: < <http://www.svarbazar.cz/phprs/view.php?cislocclanku=2006020403> >.

2.2.1 Obloukové svařování

Obloukové svařování je skupina procesů která využívá fyzikální jev zvaný elektrický oblouk. Ten vzniká mezi svářecí elektrodou a základním materiálem. Elektrický oblouk vzniká průchodem elektrického proudu v plynu (vzduchu), za vzniku vysoké teploty a je tvořen směsí elektronů a iontů. Vysoká teplota elektrického oblouku se právě používá při svařování. Teplem dojde k místnímu natavení a spojení svařovaných součástí. Obloukové svařování může využívat stejnosměrný (DC) nebo střídavý (AC) napájecí zdroj. A tavicí nebo netavicí (wolframové) elektrody. Oblast svařování také může být chráněna některým typem neinertního plynu, známého jako ochranný plyn. Proces obloukového svařování je široce využíván, protože jeho pořizovací a provozní náklady nejsou vysoké. Toto z něj činí ideální metodu spojování kovových materiálů nejen pro velké průmyslové podniky, ale i pro širokou veřejnost.

Jeden z nejvíce používaných druhů obloukového svařování je **svařování stíněným elektrickým obloukem (SMAW)**, který je také známý jako **ruční sváření elektrickým obloukem (MMA)**. Elektrický proud protéká el. obloukem mezi základním materiálem a prutem tavicí elektrody kterou odtavuje. Elektroda je vyrobena z oceli a je kryta obalem, který chrání svařovanou oblast od oxidace a znečištění tím, že produkuje CO_2 během procesu svařování. Samotné jádro elektrody se chová jako materiál výplně, tudíž není třeba žádný další materiál dodávat. Proces ručního sváření je velmi všestranný, vyžaduje malé svářečské školení a levné vybavení. Nicméně, svářecí časy jsou poněkud pomalé, protože tavicí elektrody musí být často měněny, a také proto, že po dovaření sváru z něj musí být před dalším svářením odstraněna struska, která svár chránila před stykem se vzduchem. Dále je proces obecně omezený na svařování železných materiálů, ačkoli elektrody speciálně vyrobené mohou svářet nikl, hliník, měď a jiné kovy. Všestrannost metody jí dělá populární v množství aplikací, včetně větší opravy a stavby nejrůznějších konstrukcí.

Obaly elektod zajišťují nejen ochranu svařovaného kovu před účinkem okolní atmosféry, ale i **stabilitu hoření** elektrického oblouku. Parametry ovlivňující jakost svarů jsou průměr elektrody, svařovací proud, délka elektr.oblouku a rychlost svařování



Obr. 2 : Princip SMAW / MMA

2.2.2 Svařování elektrickým odporem.

Při tomto způsobu svařování je zdrojem tepla elektrický odpor vzniklý v místě styku dvou svařovaných materiálů. Tento jev se nazývá přechodový odpor. Při průchodu elektrického proudu (vysoké hodnoty) svařovaným místem (odporem) dojde k místnímu ohřevu materiálů. Materiály se ve styčném bodě teplem nataví a k jejich svaření dojde při silném stlačení. Svářečky pro svařování elektrickým odporem tedy musí být konstrukčně řešeny tak, aby kromě výkonného zdroje elektrického proudu obsahovaly také mechanické prvky umožňující velmi silné stlačení svařovaných materiálů v místě svaru. Pro množství tepla, vznikajícím na přechodovém odporu v místě styku dvou materiálů platí vztah pro Jouleovo teplo:

$$Q = R \cdot I^2 \cdot t$$

Kde:

Q - množství tepla [J]

R - přechodový odpor [Ω]

I - elektrický proud [A]

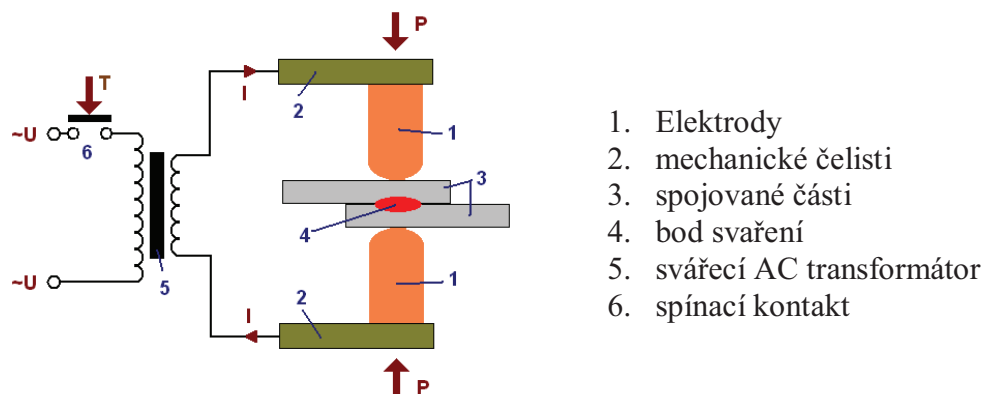
t - doba průchodu proudu odporem [s]

Podle vzájemné polohy svařovaných součástí dělíme svařování elektrickým odporem na dvě základní skupiny:

1) Svařování stykové („na tupo“), které se dále dělí na svařování stykové **stlačním** a svařování stykové **odtavením**. Toto sváření se používá například při svařování tyčí na tupo.

2) Svařování s přeplátováním, které se dále dělí na svařování **bodové**, **švové** a **výstupkové**. Toto svařování je velmi vhodné například pro svařování tenkých plechů.

Z uvedených typů odporového svařování se v praxi nejčastěji používá svařování bodové s přeplátováním, tzv. **bodování**. (např. automobilový průmysl)



Obr. 3: Schématické znázornění principu bodového svařování^{1.1}

^{1.1} Bodovky a bodování [online]. SVARINFO.CZ, c2006 - 2011. Obrázek dostupný z WWW: < <http://www.svarbazar.cz/phprs/view.php?cisloclanku=2008033102> >.

2.3 Svařovací zdroje pro SMAW / MMA

Svařovací zdroje se liší jak konstrukcí tak i velikostí, na jejich konstrukci závisí spousta faktorů jako způsob jejich použití a nebo nároky prostředí v kterém mají pracovat. Svařovací zdroje se v základu dělí na točivé (dynama) a statické (trafa, měniče).

Nejrozšířenější tři základní svařovací zdroje pro metodu ručního obloukového svařování jsou : Generátor – ten se používá tam kde není možnost použít svářecí systém pracující z sítě 230/400 V . Nejčastěji se jedná o kombinaci spalovacího motoru a dynama.

Transformátor - jedná se o donedávna nejrozšířenější zdroj pro obloukové sváření. Používá se hlavně pro ruční obloukové sváření a pro bodové svařování.

Invertor - moderní a čím dál víc se rozšiřující systém pro el. oblouk. svařování. Stále klesající ceny v kombinaci s rostoucí spolehlivostí z něj činí velice žádaný systém.

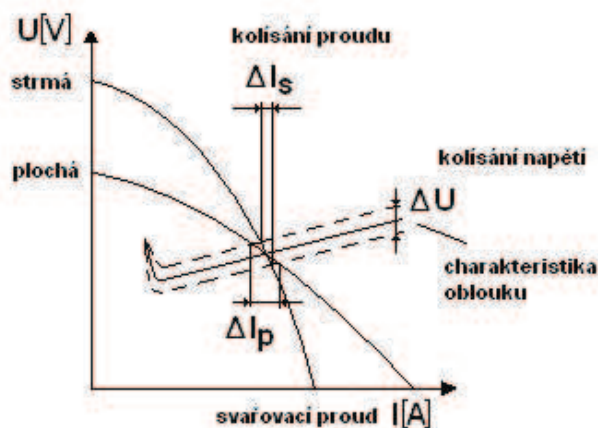
2.3.1 Transformátorová svářečka

Klasická svářečka pro svařování obalenými elektrodami MMA. Svařovacím transformátorem se mění vlastnosti elektrického proudu tak, aby byly vhodné pro ruční svařování elektrickým obloukem: - Malé napětí (několik desítek voltů)

Vysoký proud (běžně do 150 A)

Svářecí transformátory mají strmou voltampérovou charakteristiku. Je známo že u klasických transformátorových svářeček platí: „**čím těžší, tím lepší!**“ (toto vyplývá z velikosti transformátoru). Klasické „trafo-sváračky“ mívají obvykle sekundární vynutí transformátoru vyvedené přímo na svorky pro připojení svářecích kabelů, ale mohou také obsahovat usměrňovač pro stejnosměrné sváření.

Nevýhodou transformátorové svářečky jsou její **rozměry** a **hmotnost**, při frekvenci síťového napětí 50Hz vychází hmotnost transformátoru pro svářecí proud 140A na cca 15 kg a jeho **účinnost** bývá okolo **40%**. 60% energie se promění v odpadní teplo a transformátor je nutně intenzivně chladit.



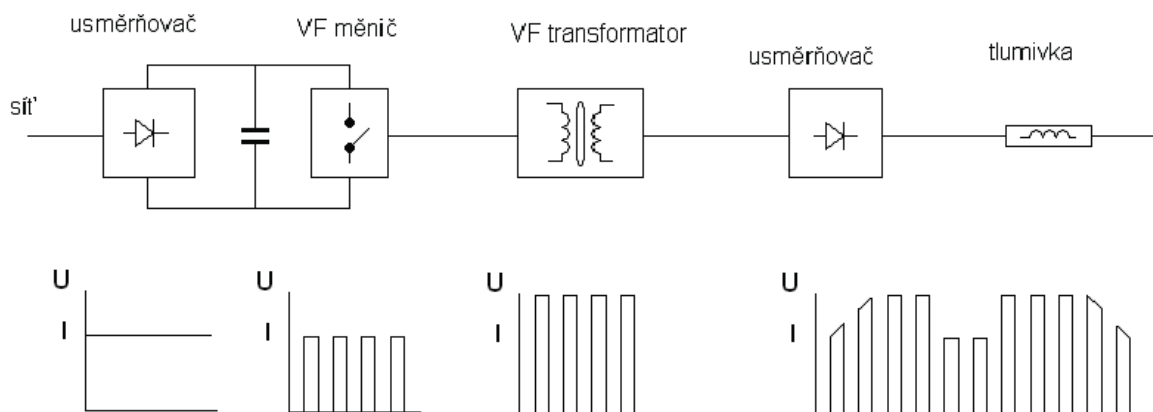
Obr.4: V-A charakteristiky zdrojů

2.3.2 Svářečka se spínaným zdrojem

Takzvané svářecí invertory jsou fenoménem současnosti a zcela jistě jim bude patřit i budoucnost. Co to vlastně je svářecí inverter? Název inverter pochází z angličtiny : **inverter** - měnič, střídač. Obecně se jedná o spínaný zdroj - měnič který funguje jako zdroj stejnosměrného svářecího proudu. Spínaný zdroj svářecího proudu využívá toho, že se **stoupající přenášenou frekvencí klesá hmotnost** (i tím i velikost) jádra transformátoru.

Podstatou funkce je transformace proudu při frekvencích podstatně vyšších než je síťová. Rozsah frekvence se pohybuje od 50 kHz do 200kHz, čímž se podstatně zmenší rozměry a hmotnost transformátoru a tím i zdroje. Hmotnost inverterů se pohybuje od pouhých 4 kg až do 35 kg pro největší výkony (400 – 500A). Ty nejlepší spínané zdroje umožňují i ze síťové zásuvky 230V svařovat proudem až 200A.

Moderní zdroje se vyznačují možností svařovat pulsním proudem s pulsy o frekvenci 300Hz a výš. Nebo dlouhými pulsy v řádu sekund. Také umožňují tzv. „horký“ start se zvýšením proudu nebo napětí při zapalování el. oblouku na elektrodě.



Obr. 5: Blokové schéma invertoru

Vstupní síťové střídavé napětí (jednofázové $U_{ef} = 230V$) o frekvenci 50Hz se nejprve usměrní primárním usměrňovačem a vyhladí filtračními kondenzátory. Získáme tak stejnosměrné napětí o velikosti $1.42 \times U_{ef}$ (tedy cca 325V). Toto stejnosměrné napětí je pomocí tranzistorového střídače "rozloženo" na obdélníkové impulsy. Impulsy mohou být střídavé nebo stejnosměrné (jako na obrázku) podle provedení střídače. Ovšem frekvence impulsů je již podstatně vyšší a v praxi bývá z rozsahu 20 - 150 kHz. Toto napětí je vedeno do primárního vinutí převodního transformátoru. Zde se uplatní to, že přenášená frekvence je cca 400x až 2000x vyšší než původní síťová 50Hz, proto mohou být rozměry a hmotnost transformátoru velice malé. Převodní transformátor zajišťuje jako v klasických transformátorových svářečkách nejen galvanické oddělení svářecího napětí od napětí sítě a jednak snížení výstupního svářecího napětí na bezpečnou hodnotu. Na sekundárním vinutí převodního transformátoru získáme střídavé napětí, které je opět nutné usměrnit sekundárním usměrňovačem. Za usměrňovač je nutné ještě zapojit výstupní tlumivku. Díky vyšší přenášené frekvenci je zde opět možnost zkonstruovat tlumivku s podstatně menšími rozměry a hmotností oproti klasickým svářecím usměrňovačům.

Tlumivka vyhlazuje napětí usměrněné sekundárním usměrňovačem a díky její indukčnosti je usnadněno zapálení elektrického oblouku. Výstupní napětí u svářecích invertorů je typicky 60 - 90 V naprázdno. Při svařování výstupní napětí poklesne na cca 22 - 28 V (při ideální délce oblouku). Také díky poměrně vysokému napětí naprázdno invertory mnohem lépe zapalují než konvenční svářecí usměrňovače jejichž napětí bývá maximálně 65 V. Svářecí transformátory pak tedy mají jen max. 50 V.

Svářecí invertory díky své koncepci spínaných zdrojů nabízejí tyto výhody:

- Malé rozměry a hmotnost
- Vysoká účinnost (80-90%) a s tím související úspornost při provozu.
- Rychlá odezva řízení umožňující komfortní svařování
- Snadná změna charakteristiky zdroje a tím možné přizpůsobení různým metodám svařování
- S možností změny charakteristiky také souvisí možnost konstrukce víceúčelových svářeček.

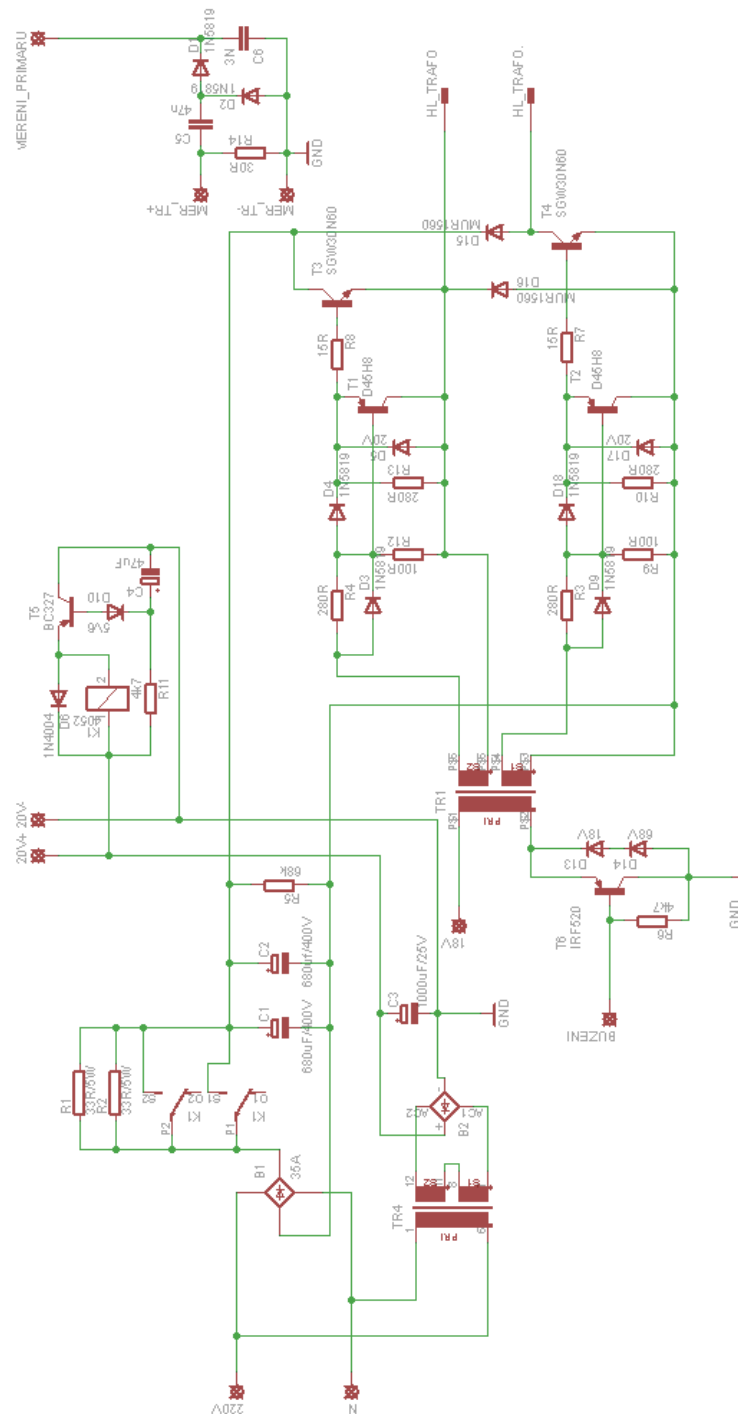
3 Výběr zapojení – popis činnosti

V této části se zabývám návrhem silnoproudé části invertoru. Pro inverter jsem zvolil zapojení jednočinného propustného měniče s impulsním transformátorem pro jeho jednoduchost a efektivnost v zadané aplikaci.

3.1 Výkonová část

Silová část se skládá ze čtyř částí: vstupní usměrňovač, rozběhový obvod (softstart), můstek IGBT a výstupní stejnosměrnou část. Napětí ze sítě je nejprve usměrněno můstkem B1 (KBPC3506W). Za ním je umístěno relé K1 které je součástí obvodu softstart. rezistory R1 a R2 slouží k nabíjení velkých kapacit C1 a C2, a jsou po uplynutí nastavené doby přemostěny obvodem softstart. Zde pokud by nedošlo k sepnutí kontaktů relé K1, by došlo k destruktivnímu poškození v případě, že by jsme zdroj zatížili právě přes tyto nabíjecí rezistory. Podobná situace by mohla teoreticky nastat i při zapnutí zdroje do plné zátěže. Rezistor R5 slouží k postupnému vybíjení kapacit C1 a C2 po odpojení od napájení. TR4 je napájecí transformátor 230V/2x10V pro budicí obvody, a zároveň napájí i desku řídicích obvodů. Napětí z něj je usměrněno můstkem B2 a vyfiltrováno pomocí kondenzátoru C3. TR1 je transformátor který slouží ke galvanickému oddělení řídicích impulsů. Tranzistor T6 společně s rezistorem R6 a zenerovými diodami D13 a D14 tvoří zapojení jednočinného propustného měniče s demagnetizací do zenerovy diody. Toto zapojení je zde jako zdroj galvanicky oddělených řídicích impulsů pro tranzistory IGBT T3 a T4. Rezistory R3, R9 a R10 společně s diodami D17, D18 společně s tranzistorem T2 tvoří budicí obvod pro tranzistor T4, a je součástí zmíněného měniče s demagnetizací do zenerovy diody. R7 je rezistor do báze tranzistoru T4. Zapojení rezistoru R14, diod D1 a D2 a kondenzátorů C5 a C6 slouží k měření proudu primárním vinutím impulzního transformátoru TR2. Rezistor R14 slouží jako zátěž měřicího transformátoru, na které se měří požadovaný úbytek napětí.

ÚSTAV VÝKONOVÉ ELEKTROTECHNIKY A ELEKTRONIKY
Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií
Vysoké učení technické v Brně

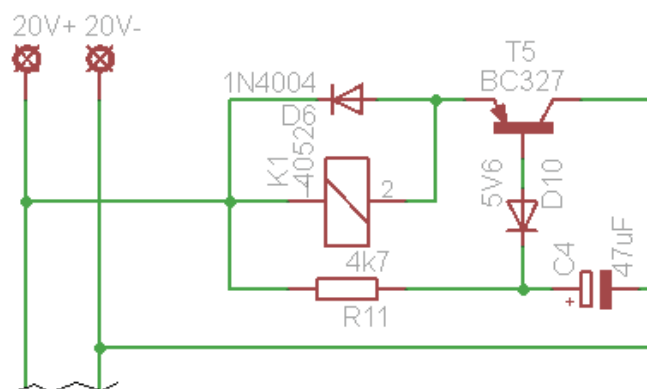


Obr. 6: Schéma zapojení silnoproudé části

3.1.1 Rozběhový obvod

Při zapínání spínaných zdrojů může dojít k velkému proudovému rázu, a to proto, že spínaný zdroj obsahuje velké množství kapacitorů, které se začnou po připojení nabíjet. Účelem tohoto obvodu je snížit tento počáteční proud na snesitelnou úroveň. Nejjednodušším způsob jak počáteční proud omezit, je zapojení omezovacího rezistoru, který sníží napájecí napětí a tím i hodnotu nabíjecího proudu. Po nabytí kapacit může být omezovací odpor vyřazen a obvod připojen na plné napětí.

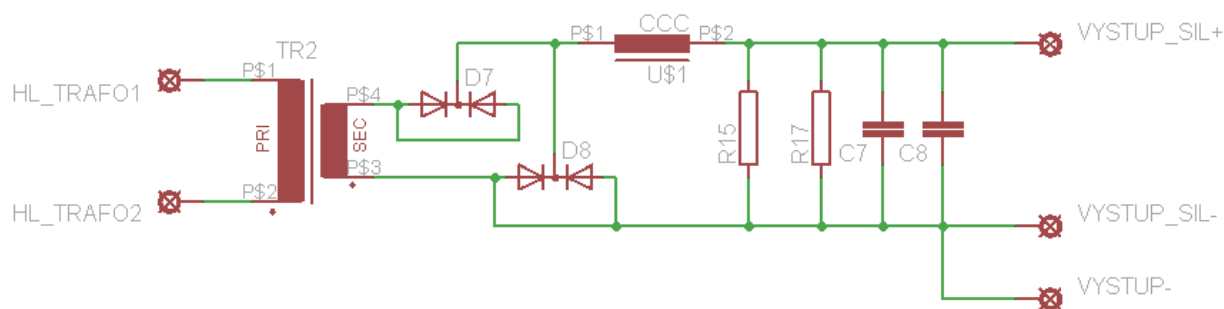
Velké filtrační kapacity C1 a C2 si zde vyžádaly použití jednoduchého rozběhového obvodu. Po zapnutí se velké elektrolytické kondenzátory nabíjí přes odpor R1 a R2, který je po určité chvíli přemostěn kontakty relé. Obvod je zapojen tak, aby i po krátkém vypnutí a zapnutí napájení vždy nechaly kondenzátory nabít. K tomu slouží tranzistor T5 který sepne po nabytí kondenzátoru C5 který se nabíjí přes odpor R11.



Obr. 7: Detail schématu zapojení rozběhového obvodu

3.1.2 Výstupní usměrňovač a filtr

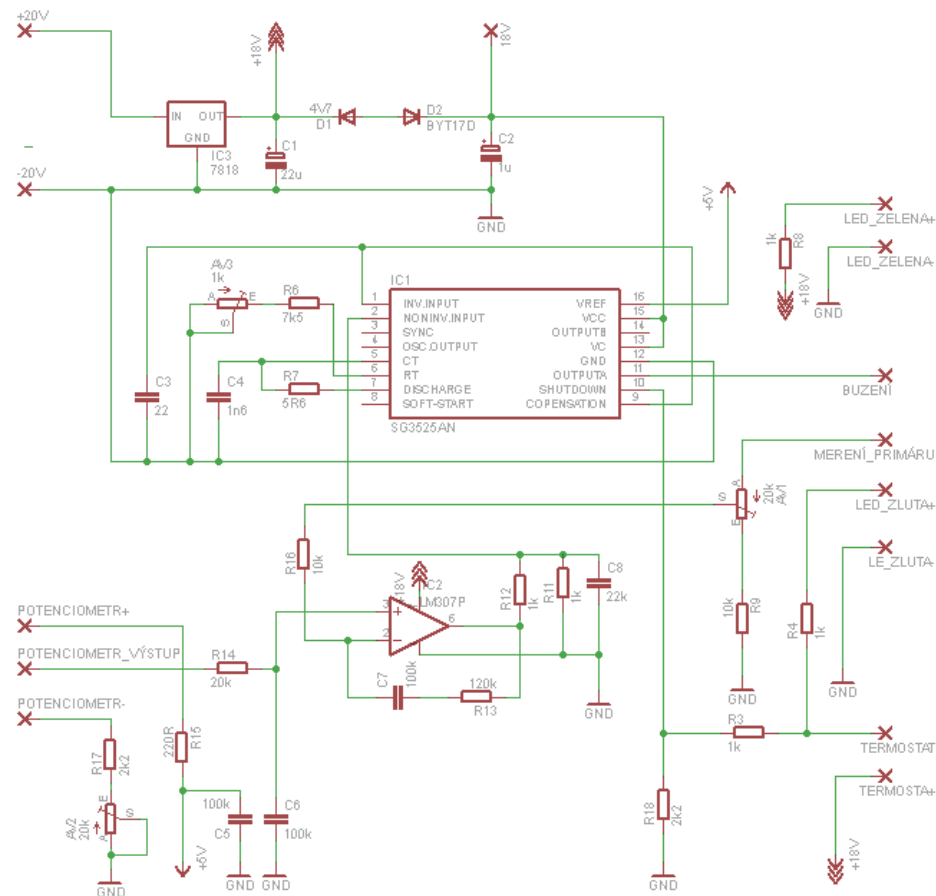
Součástí silových obvodů je také výstupní usměrňovač a filtr. Diody D7 a D8 usměrňují proud z výkonového transformátoru Tr2. Diody musí být značně robustní, neboť přes ně poteče veškerý svařovací proud. Za nimi je zapojena tlumivka L1, která má velký vliv na svařovací vlastnosti. Tato tlumivka může být vzduchová, nebo s kovovým jádrem. Pro měření výstupního napětí je v zapojení velice důležitý kondenzátor C7 a C8. R15 a R17 slouží jako předzátěž, aby zdroj neběžel úplně naprázdno.



Obr. 8: Schéma zapojení výstupního usměrňovače

3.2 Řídící obvody

Napětí pro řídicí obvody je přiváděno z transformátoru TR4 a za pomoci stabilizátoru IC3 stabilizováno na 18V, C1 zde slouží jako filtrační kondenzátor, a D1 taktéž k stabilizaci napětí. Pro řízení spínání výkonových tranzistorů je zde obvod IC1. Jedná se o obvod SG3525AN který se přímo vyrábí pro aplikace spínaných zdrojů, a funguje jako generátor požadovaných spínacích impulsů. Zapojení C3, C4, R6, R7 a AV3 slouží k nastavení požadované frekvence spínání a je udáváno přímo výrobcem obvodu. Pro přímé nastavení frekvence slouží trimr AV3. IC2 je komparátor pro řízení svářecího proudu. Jedná se o zapojení operačního zesilovače ve funkci rozdílového zesilovače se zavedenou zápornou zpětnou vazbou. Vstupní napětí se přivádí přes rezistor R16 a trimr AV2, který slouží k nastavení maxima svářecího proudu, na invertující vstup komparátoru. Referenční, porovnávací napětí se přivádí na jeho neinvertující vstup. Pro plynulou regulaci svářecího proudu, tj. pro plynulou regulaci referenčního napětí slouží potenciometr, a pro nastavení minima svářecího proudu zde slouží trimr AV2 v kombinaci s odporem R17. Jako zdroj referenčního napětí +5V zde slouží přímo obvod SG3525AN, který má vestavěný stabilizovaný zdroj referenčního napětí. Zelená led dioda slouží jako indikace zapnutého stavu, Oranžová led slouží jako informace o přehřátí přístroje. Pro tepelnou ochranu je zde použit spínací termostat 80°C, který po dosažení spínací teploty přivede přes rezistor R3 napájecí napětí na vstup shutdown, obvodu IC1, který slouží k odstavení obvodu. Zároveň přes R4 rozsvítí žlutou leddiodu.



Obr. 9: Schéma řídicích obvodů

4 Dimenzování součástí

4.1 Vysokofrekvenční impulsní transformátor

Známe hodnotu vstupního napětí což je $1.42 \times U_{ef}$ tedy cca 325V.

$$U_d = 325V$$

$$U_z = 30V$$

Po zvolení střídý $s = 0,35$ můžeme určit převod transformátoru :

$$\frac{N_2}{N_1} = \frac{\frac{U_z}{U_d}}{s} = \frac{\frac{30V}{325V}}{0,35} = 0,26$$

Napětí na sekundární straně transformátoru U_2 je tedy :

$$U_2 = U_d * (N_2/N_1) = 325 * 0,26 = 85V$$

Pracovní frekvence bude maximálně 60kHz, a z toho budeme vycházet.

Pro konstrukci jsem zvolil feritové EE jádro Lj E6527/ CF138 od firmy Semic Trade s.r.o. Feritové jádro jsem zvolil proto, že v něm nevznikají velké ztráty vířivými proudy, protože má velký měrný odpor (cca. $1010\Omega\cdot\text{m}$). U feritu je třeba počítat s malou maximální hodnotou sycení, Pro zvolené jádro udává výrobce hodnotu 480mT.

Pro počet primárních závitů platí vztah :

$$N_1 = \frac{U_d}{2 \cdot f \cdot (B_{\max} - B_r) \cdot S_{fe}} = \frac{325V}{2 \cdot 6 \cdot 10^4 \cdot (0,48T - 0,18T) \cdot 1,024 \cdot 10^{-3}} = 9_{zav}$$

Za předpokladu, že napětí na primární straně bude kolísat, je potřeba aby i při minimální hodnotě napětí 275V bylo na sekundární straně transformátoru v zátěži svářecí napětí. Z toho plyne:

$$N_2 = \frac{U_z \cdot N_1}{U_d \cdot s} = \frac{30V \cdot 9_{zav}}{275V \cdot 0,35} = 3_{zav}$$

Dále je potřeba znát demagnetizační proud, nejprve určíme indukčnost vinutí:

$$L_1 = N_1^2 \Lambda = 9^2 \cdot 6 \cdot 8,1 \cdot 10^{-6} = 3,937\text{mH}$$

$$L_2 = N_2^2 \Lambda = 3^2 \cdot 6 \cdot 8,1 \cdot 10^{-6} = 4,374\text{mH}$$

Z toho:

$$I\mu_{ef} = \frac{U_{d_{ef}}}{2 \cdot \pi \cdot f \cdot L_1} = \frac{162,5V}{2 \cdot \pi \cdot 6 \cdot 10^4 \cdot 3,973 \cdot 10^{-3}} = 0,109A$$

Po zvolení proudové hustoty $3A/\text{mm}^2$ (hodnota zvolena s ohledem na nižší zatěžování vodičů) platí:

$$S_{cu1} = \frac{16A}{3A/\text{mm}^2} = 5,33\text{mm}^2$$

$$S_{cu2} = \frac{120A}{3A/\text{mm}^2} = 40\text{mm}^2$$

Pro nezanedbatelný vliv skin efektu je vhodné použít svazkový izolovaný vodič.

Použil jsem lakovaný drát o průměru 0.45mm, ve svazku na primární straně je 23vodičů na sekundární straně je 50 vodičů, ke stažení jsem použil teflonovou pásku, pro sekundární vinutí jsou použity dva paralelní vodiče ve společné izolační bužírce. Toto provedení je na primárním vinutí cca. 1x naddimenzováno požadovaným parametrem, z toho důvodu aby bylo celé okénko kostry pro vinutí vyplněno.

4.2 Dimenzování usměrňovače

O usměrnění napětí ze sítě se stará diodový můstek. Ten lze realizovat buď samostatnými diodami, nebo už hotovým můstkem. Zvolil jsem můstek naddimenzovaný mým potřebám KBPC 3506W s parametry:

$$I_{\max} = 35A$$

$$U_R = 600V$$

$$T_{\text{pracovní}} = (-40^{\circ}\text{C až } +120^{\circ}\text{C})$$

Z počítaného výkonu $P = 2000W$ můžeme určit proud usměrňovače I_d

$$I_d = \frac{P}{U_d} = \frac{2000W}{325V} = 6,15A \quad I_{Dstr} = \frac{I_d}{2} = \frac{6,15A}{2} = 3,07A$$

Diody dimenzujeme na střední hodnotu proudu, který diodou protéká.

Pro můstek KBPC je proud 35A pro celý můstek, a ne jen pro jednu diodu, i tak je tento proud víc než dostačující, neboť i při překročení počítaného výkonu na maximální hodnotu 3760W, vzroste proud maximálně na 16A. Při napětí 230V se diody obvykle volí pro napětí 400V, zvolený můstek je do 600V, takže má velkou rezervu.

Filtrační kondenzátory C_7 a C_8 :

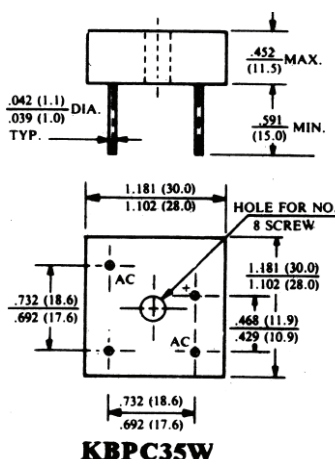
Jejich hodnotu určíme:

$$C_7 + C_8 = C$$

Kolísání napětí zvolíme $\Delta U = 50V$

$$C = \frac{T}{2} \cdot \frac{I_d}{\Delta U} \cdot \left(1 - \frac{1}{\pi} \cdot \arccos\left(1 - \frac{U_m}{\Delta U}\right)\right) = \frac{0,02}{2} \cdot \frac{6,14}{50} \cdot \left(1 - \frac{1}{\pi} \cdot \arccos\left(1 - \frac{325}{50}\right)\right) = 1,281mF$$

- Použijeme E680M/400V-HB s hodnotou 680 μ F a max. napětím 400V



Obr. 10: Můstek KBPC 3506W - specifikace²

² Single phase silicon bridge rectifier [online]. CHENYI ELECTRONICS co.,LTD, c2000. Obrázek dostupný z WWW: < <http://www.datasheetcatalog.org/datasheet/ChenyiElectronics/mXuytyr.pdf>>.

4.3 Tranzistory

Na tranzistorech je při uzavřeném stavu napětí U_d , kromě toho musíme brát v úvahu napěťové špičky při vypínání, které má na svědomí parazitní indukčnost napěťových odvodů. S přihlédnutím k tomuto se volí závěrné napětí na hodnotu alespoň $1,5U_d$.

Zvolený tranzistor zvládne napětí 600V, což vyhovuje. I_1 je maximální hodnota proudu na výstupu zdroje.

Proudy tranzistorem:

$$I_{Tmax} = I_1 = 120A$$

$$I_{Tef} = I_1 \cdot \sqrt{s} = 120A \cdot \sqrt{0,26} = 61,2A$$

$$I_{Tstr} = I_1 \cdot s = 120A \cdot 0,26 = 31,2A$$

Při volbě je dobré zvolit takový tranzistor, aby měl co nejmenší R_{DS} aby ztráty na tranzistoru byly co nejmenší. Spínací ztráta může mít sice vysokou hodnotu, ale tato hodnota je pouze ve velmi malém okamžiku. I přesto bude potřeba velmi efektivní aktivní chlazení.

Spínací tranzistory jsem zvolil IGBT typu **HGTG30N60A4**

$$BU_{ces} = 600V$$

$$R_{Don} = 0,045\Omega$$

$$I_{c25^\circ C} = 75A$$

$$I_{c110^\circ C} = 60A$$

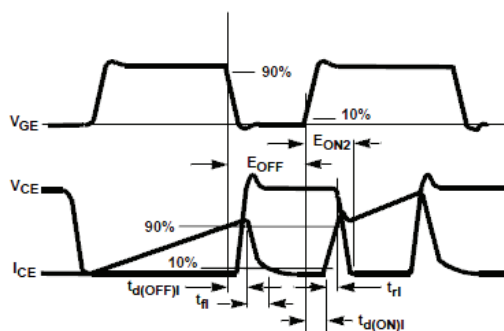
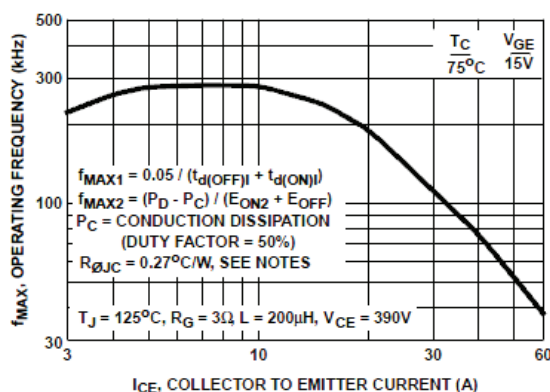
Ztráty na tranzistoru při sepnutém stavu (U_P a R_{Don} určíme z datasheetu výrobce):

$$\Delta P_{cu} = U_P \cdot I_{Tstr} + R_{Don} \cdot I_{Tef}^2 = 4,5V \cdot 31,2A + 0,045\Omega \cdot 61,2^2 = 309W$$

Spínací ztráty:

E_{off} a E_{on} také určíme z datasheetu výrobce.

$$P_{spin} = (E_{off} + E_{on}) \cdot f = (0,6 + 0,35) \cdot 60 = 57W$$



Obr. 11, 12 : Závislost I_{ce} na provozní frekvenci použitého tranzistoru, průběhy přepínání ³

³ N-Chanel IGBT with Anti-Parallel Hyperfast Diode [online]. Fairchild Semiconductor co., c2004. Obrázky dostupné z WWW: <<http://www.fairchildsemi.com/ds/HG/HGTG30N60A4D.pdf>>.

4.4 Diody výstupního usměrňovače

Musí být použity tzv. rychlé diody. Diody musí být dimenzovány na střední hodnotu proudu, který jimi protéká. Při výpočtu je brána v úvahu maximální možná střída.⁴
Diody D7 a D8

$$I_{\text{fav}} = I_{\text{výst}} \cdot s_{\text{max}} = 120\text{A} \cdot 0,5 = 60\text{A}$$

Maximální hodnota v závěrném směru:

$$U_{\text{rrm}} = U_{2\text{max}} = U_1 \cdot (N_2/N_1) = 325\text{V} \cdot 0,26 = 85\text{V}$$

V případě že by netekl proud do zátěže a na výstupu by byl kondenzátor:

$$U_{\text{rrm}} = 2 \cdot U_{2\text{max}} = 2 \cdot 85\text{V} = 170\text{V}$$

Ztráty na diodě:

$$P = I_{\text{fav}} \cdot U_f = 60\text{A} \cdot 0,75\text{V} = 45\text{W}$$

Zvolil jsem vysokonapěťové ultrarychlé diody **STTH6002CW**, Tato dioda je složena ze dvou 30A diod v jednom pouzdře. Při volbě diod je nejdůležitější zohlednit překmit na diodě, který může být až 3x vyšší než je maximální závěrné napětí.

$$U_{\text{rrm}} = 600\text{V}$$

$$I_{\text{fav}} = 2 \times 30\text{A}$$

$$T_j = 175^\circ\text{C}$$

Demagnetizační diody:

Přesto že demagnetizační proud $I_{\mu\text{ef}}$ (4.2) vyšel pouze 0,109A je třeba brát v úvahu, že díky rozptylové indukčnosti transformátoru přes ně bude po velmi krátkou dobu protékat velký špičkový proud. Vybral jsem diody MUR 1560

$$U_{\text{rrm}} = 600\text{V}$$

$$I_{\text{fav}} = 15\text{A}$$

$$I_{\text{frm}} = 30\text{A}$$

$$T_j = 175^\circ\text{C}$$

⁴ LANGER, Radim. *Rychlonabíječka pro trakční akumulátor elektromobilu Peugeot 106 electric*. Brno, 2009. 62s. Diplomová práce FEKT VUT v Brně

4.5 Tlumivka

Největší vliv na stabilitu hoření oblouku zvlnění proudu, z toho důvodu je nezbytnou součástí obvodu tlumivka L_1 , která toto zvlnění potlačuje.

Cílem návrhu tlumivky je nalezení těchto jejích tří konstrukčních parametrů:

- Optimální tvar a minimální celkový objem tlumivky.
- Počet závitů a průřez vodiče.
- Délka vzduchové mezery (bez vzduchové mezery je tlumivka nerealizovatelná).⁵

Zvolíme $\Delta I = 4A$, pro maximální střidu. pro výpočet indukčnosti platí vztah:

$$L = \frac{U_2}{2 \cdot f \cdot \Delta I} \cdot (1-s) \cdot s = \frac{81V}{2 \cdot 6 \cdot 10^4 \text{ Hz} \cdot 4A} = 42,1 \mu H$$

Pro konstrukci tlumivky jsem zvolil díky dostupnosti EI jádro(plech) se středním sloupkem o rozměru 25x25mm.

Počet závitů:

$$N = \frac{L \cdot I_{max}}{B_{max} \cdot S_j \cdot k_{pfe}} = \frac{4,21 \cdot 10^{-5} H \cdot 120A}{0,9T \cdot 6,25 \cdot 10^{-4} \cdot 0,9} = 10 \text{ záv}$$

$$S_{cu} = \frac{120A}{3A/mm^2} = 40mm^2$$

Při výrobě vinutí jsem také použil svazkový vodič (byl k dispozici) vyrobený z lakovaného drátu 0,45mm. Ve svazku je 90 vodičů stažených teflonovou páskou. Vinutí tlumivky ovšem nemusí být provedeno svazkovým vodičem, lze použít např i lakovaný Cu plech o obdelníkovém průřezu.

Výpočet vzduchové mezery:

$$l_v = \frac{N \mu_0 I_{max}}{B_{max}} - \frac{l_{Fe}}{\mu_{rFe}}$$

Při výrazném splnění nerovnosti $l_v \gg l_{Fe}/\mu_{rFe}$ lze zanedbat redukovanou délku železa ve jmenovateli zlomku na pravé straně rovnice. Pak je celková magnetická vodivost obvodu určena pouze vlastnostmi vzduchové mezery. Indukčnost podle rovnice proto přestane záviset na vlastnostech feromagnetika, tj. na změně jeho permeability s proudem. Indukčnost je pak téměř konstantní v celém rozsahu proudů od nuly do I_{max} . V tomto režimu plní železo pouze úlohu „soustředovače siločar“ do nepatrného objemu vzduchové mezery.⁶

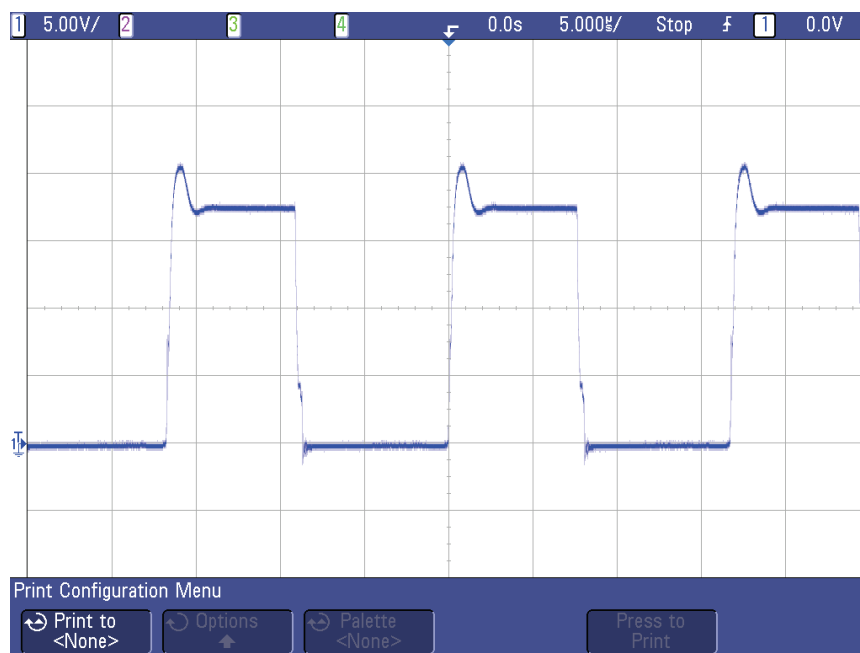
Lze tedy napsat:

$$l_v = \frac{N \mu_0 I_{max}}{B_{max}} = \frac{10 \cdot (4 \cdot \pi \cdot 10^{-7}) \cdot 120A}{0,9T} = 1,7mm$$

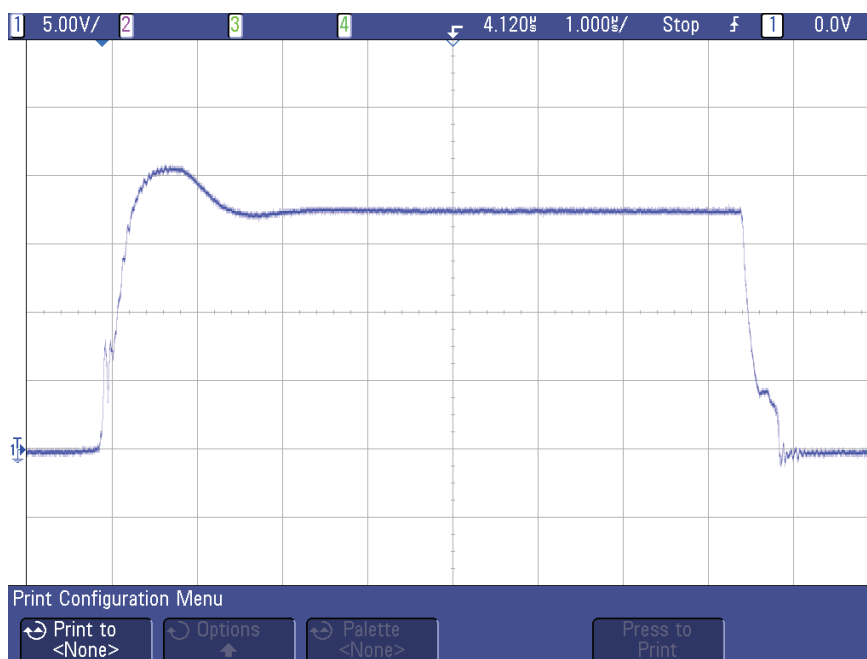
^{5, 6} PATOČKA, Miroslav. *Vybrané statě z výkonové elektroniky: Pulsní měnič s transformátorem*. Brno, 2005. 306 s. Elektronické skriptum FEKT VUT v Brně.

5 Měření:

Po sestavení a oživení celého zařízení bylo provedeno měření galvanicky odděleným osciloskopem. Změřeny byly průběhy U_{ce} a U_{be} na tranzistorech IGBT a překmit na usměrňovací diodě D7. Měření bylo provedeno jak na prázdko tak i do odporové zátěže. Změřené průběhy:



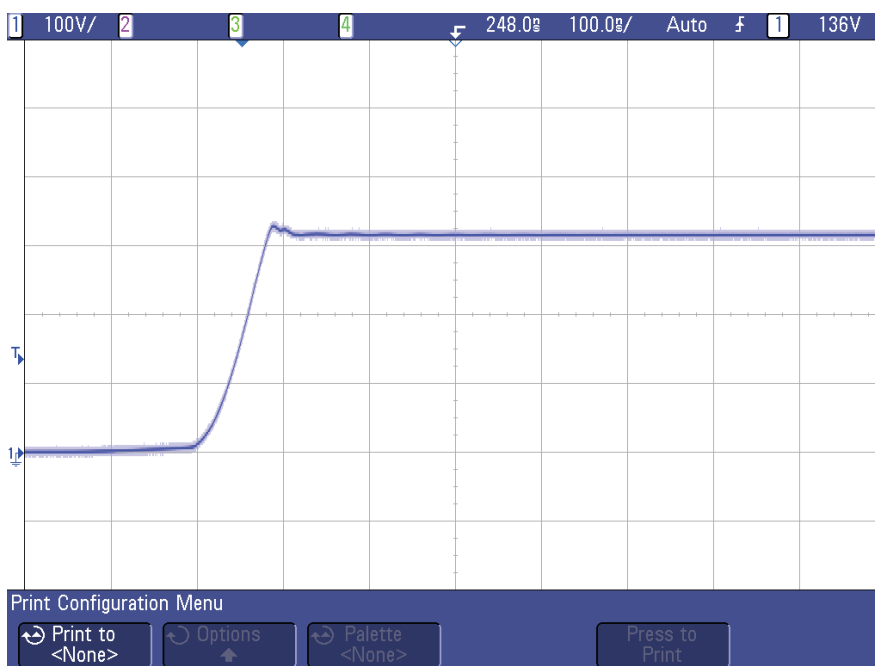
Obr. 13: U_{be} na tranzistoru T3, bez zátěže



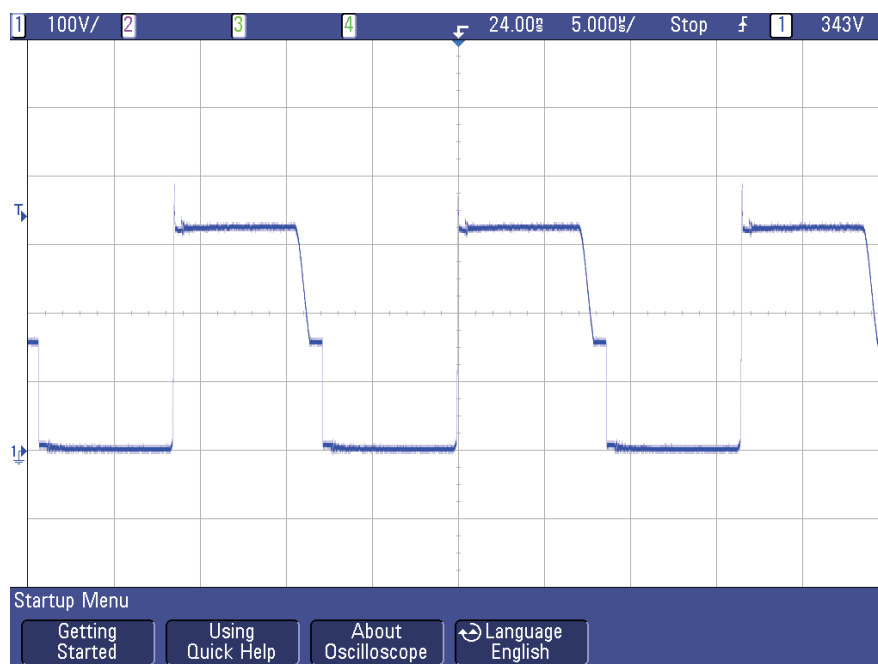
Obr. 14: Detail impulsu U_{be} na tranzistoru T3, bez zátěže



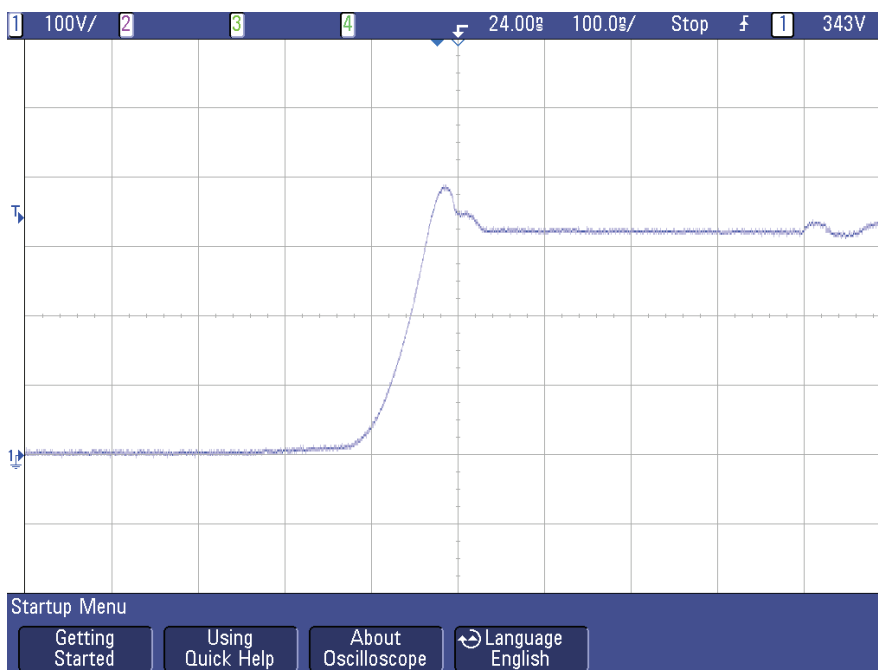
Obr. 15: U_{ce} na tranzistoru T_4 , bez zátěže



Obr. 16: Detail náběžné hrany U_{ce} na tranzistoru T_4 , bez zátěže

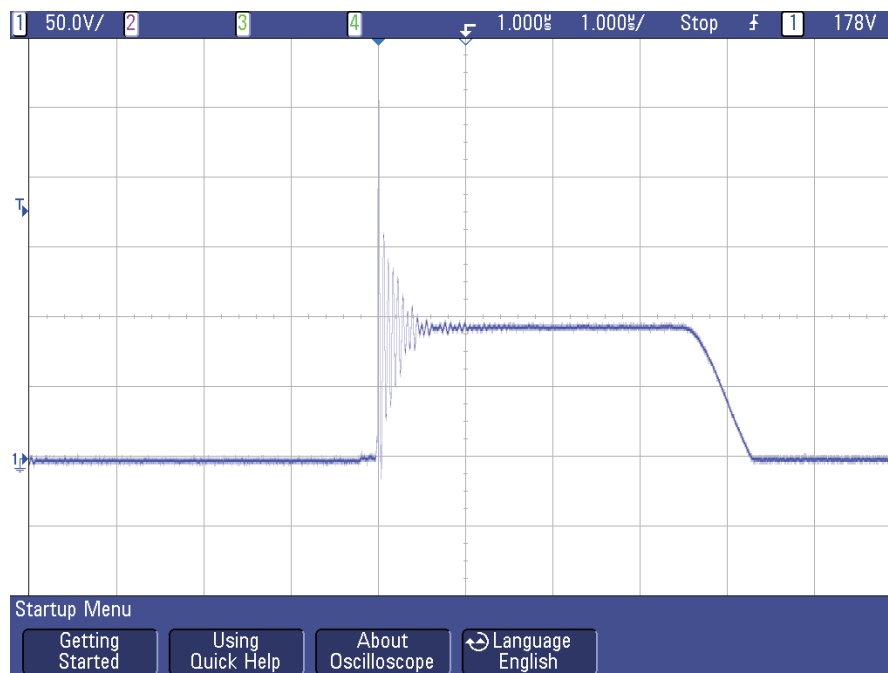


Obr. 17: U_{ce} na tranzistoru T_4 , při plné zátěži

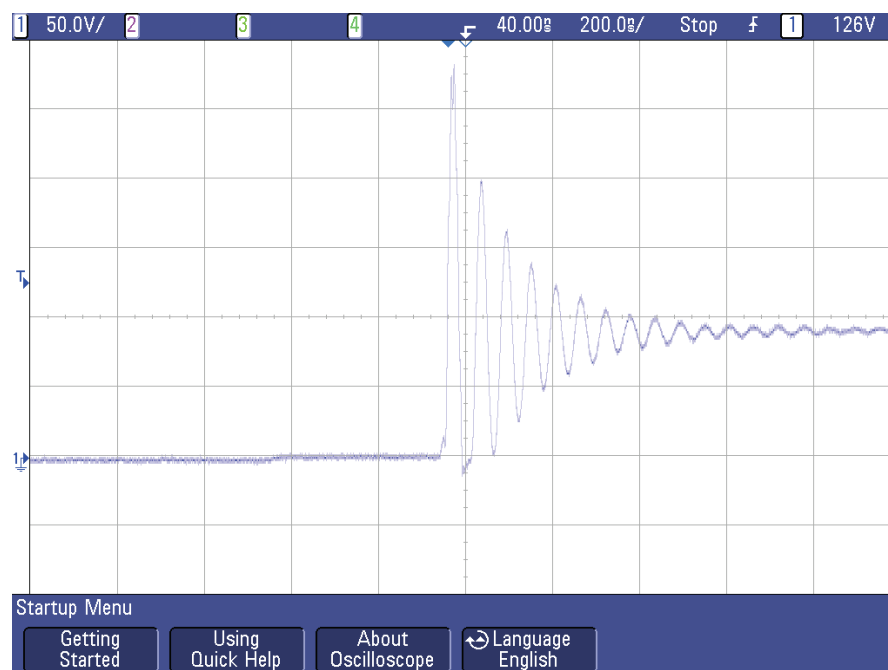


Obr. 18: Detail náběžné hrany U_{ce} na tranzistoru T_4 , při plné zátěži

ÚSTAV VÝKONOVÉ ELEKTROTECHNIKY A ELEKTRONIKY
Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií
Vysoké učení technické v Brně



Obr. 19: Překmit na diodě D7, zátěž 40A



Obr. 20: Překmit na diodě D7(detail), zátěž 100A

6 Závěr:

V tomto projektu jsem se seznámil s problematikou nejen spínaných zdrojů, ale také s komplexností oboru jakým je svařování. Problémem a úskalím pro mě bylo při mé práci to, že problematikou a návrhem takového zdroje, jakým je invertor, jsme se v dosud absolvovaných předmětech nezabývali. Naštěstí jsem měl k dispozici kvalitní studijní materiály a literaturu.

Při návrhu svářečky jsem zvolil zapojení jednočinného impulsního měniče s impulsním transformátorem pro jeho jednoduchost jak po konstrukční stránce tak i z hlediska jednoduchosti jeho řízení. Dalším aspektem při výběru byla cena, jelikož obsahuje nejméně výkonových prvků, které jsou zároveň i ty nejdražší. Pro řízení výkonových tranzistorů bylo použito zapojení jednočinného propustného měniče s demagnetizací do zenerovy diody, které je vhodné pro uskutečnění galvanicky odděleného přenosu řídicího signálu od silové části obvodu.

V práci se nezabývám výpočtem plochy chladičů pro výkonové prvky, neboť jsem pro konstrukci použil poměrně masivní hliníkové chladiče, navíc celé chlazení je konstruováno jako aktivní, s ventilátorem 120mm s poměrně vysokým výkonem. Zařízení navíc obsahuje tepelnou ochranu proti přehřátí při nadměrné a nebo dlouhodobé zátěži.

Pro zařízení jsem vyrobil plechovou skříň, a do ní ho upevnil na distanční sloupky. Pro zvýšení izolace od stěny skříně je zde použita plastová izolační deska nalepená na stěnu skříně, navíc je celý plošný spoj ze strany spojů přelakován silnou vrstvou laku, jednak jako ochrana proti oxidaci, tak i jako izolace kvůli vysokému potenciálu mezi spoji. Celá silová část desky byla posílena 2,5mm měděnými propojkami, a ze strany spojů řádně pocínována, aby zvládla přenést tak vysoké proudy.

Schémata a desky plošných spojů jsem navrhoval v programu Eagle 5.6.0 . desky plošných spojů jsou uvedeny v originální velikosti na nečíslovaných stranách na konci práce. Pro ukázkou závěrem přikládám fotografie celé svářečky.





7 Použité zdroje a literatura:

PATOČKA, Miroslav. *Vybrané statě z výkonové elektroniky: Pulsní měnič s transformátorem*. Brno, 2005. 306 s. Elektronické skriptum FEKT VUT v Brně.

LANGER, Radim. *Rychlonabíječka pro trakční akumulátor elektromobilu Peugeot 106 electric*. Brno, 2009. 62s. Diplomová práce FEKT VUT v Brně

AMBROŽ, Oldřich. *SVARITELNOST MATERIÁLU*. Brno, 2007. 135s. Skriptum FSI VUT v Brně.

Svárečí inventory – pohled pod pokličku I. [online]. SVARINFO.CZ , c2006. Text v češtině dostupný z WWW: <<http://www.svarbazar.cz/phprs/view.php?cislocclanku=2006092101>>.

Svárečí inventory I. – Co to je? [online]. SVARINFO.CZ , c2006. Text v češtině dostupný z WWW: <<http://www.svarbazar.cz/phprs/view.php?cislocclanku=2006061501>>.

Bodovky a bodování [online]. SVARINFO.CZ , c2006. Text v češtině dostupný z WWW: <<http://www.svarbazar.cz/phprs/view.php?cislocclanku=2008033102>>.

Welding[online]. Wikipedia.org., c2004. Text v angličtině dostupný z WWW: <<http://www.fairchildsemi.com/ds/HG/HGTG30N60A4D.pdf>>.

8 Příloha:

