



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA ELEKTROTECHNIKY A KOMUNIKAČNÍCH TECHNOLOGIÍ

FACULTY OF ELECTRICAL ENGINEERING AND COMMUNICATION

ÚSTAV VÝKONOVÉ ELEKTROTECHNIKY A ELEKTRONIKY

DEPARTMENT OF POWER ELECTRICAL AND ELECTRONIC ENGINEERING

ELEKTRONICKÝ PŘEDŘADNÍK PRO SODÍKOVOU VÝBOJKU

ELECTRONIC BALLAST FOR SODIUM LAMP

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

BACHELOR'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Jaroslav Eliáš

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

Ing. Petr Huták, Ph.D.

BRNO 2018

Bakalářská práce

bakalářský studijní obor **Silnoproudá elektrotechnika a elektroenergetika**
Ústav výkonové elektrotechniky a elektroniky

Student: Jaroslav Eliáš

ID: 159650

Ročník: 3

Akademický rok: 2017/18

NÁZEV TÉMATU:

Elektronický předřadník pro sodíkovou výbojku

POKYNY PRO VYPRACOVÁNÍ:

1. Proveďte teoretický návrh vhodného elektronického předřadníku.
2. Navrhnutý předřadník realizujte na DPS.
3. Ověřte vlastnosti předřadníku měřeními.

DOPORUČENÁ LITERATURA:

[1] Patočka M.: Magnetické jevy a obvody. VUTIUM, Brno, 2011.

[2] Patočka M.: Vybrané statě z výkonové elektroniky, sv.1. Skriptum, FEKT, VUT Brno.

Termín zadání: 5.2.2018

Termín odevzdání: 28.5.2018

Vedoucí práce: Ing. Petr Huták, Ph.D.

Konzultant:

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.

ABSTRAKT

Cílem práce je seznámit se se způsobem řízení a regulace sodíkových výbojek. Tyto znalosti následně aplikovat do návrhu vlastního předřadníku. V úvodní části jsou uvedeny základní vlastnosti výbojových světelných zdrojů. Jejich chování bylo ověřeno měřeními a poznatky byly uplatněny při vytváření schémat, převážně řídicího obvodu. Teoretický návrh je rozpracován po jednotlivých funkčních částech měniče. V závěru je popsána realizace měniče, ověření funkčnosti a zhodnocení výsledků.

KLÍČOVÁ SLOVA

Výbojka; oblouk; hořák; akustická rezonance; předřadník; tlumivka; zapalovač; blokuující měnič; plný most; PFC; regulace.

ABSTRACT

The aim is to get acquainted with the way the management and regulation of sodium lamps. This knowledge is then applied to design your own gear. The introductory section describes the basic characteristics of discharge light sources. Their behavior was verified by measuring and findings were used to create diagrams, mainly the control circuit. Theoretical design is developed by individual functional parts of the inverter.

KEYWORDS

Lamp; discharge; acoustic resonance; ballast; inductor; ignitor; flyback converter; full bridge converter; power factor corrector; regulation.

BIBLIOGRAFICKÁ CITACE

ELIÁŠ, J. *Elektronický předřadník pro sodíkovou výbojku*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, 2018. 94 s. Vedoucí bakalářské práce Ing. Petr Huták, Ph.D..

PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že svou bakalářskou práci na téma Elektronický předřadník pro sodíkovou výbojku jsem vypracoval samostatně pod vedením vedoucího bakalářské práce a s použitím odborné literatury a dalších informačních zdrojů, které jsou všechny citovány v práci a uvedeny v seznamu literatury na konci práce.

Jako autor uvedené bakalářské práce dále prohlašuji, že v souvislosti s vytvořením této semestrální práce jsem neporušil autorská práva třetích osob, zejména jsem nezasáhl nedovoleným způsobem do cizích autorských práv osobnostních a jsem si plně vědom následků porušení ustanovení § 11 a následujících autorského zákona č. 121/2000 Sb., včetně možných trestněprávních důsledků vyplývajících z ustanovení § 152 trestního zákona č. 140/1961 Sb.

V Brně dne

Podpis autora

PODĚKOVÁNÍ

Děkuji vedoucímu bakalářské práce Ing. Petru Hutákovi, Ph.D. za účinnou metodickou, pedagogickou a odbornou pomoc a další cenné rady při zpracování mé bakalářské práce.

V Brně dne

Podpis autora

OBSAH

Úvod.....	8
1 Přehled světelných zdrojů	9
1.1 Rtuťové výbojky	9
1.1.1 Lineární zářivky.....	9
1.1.2 Vysokotlaké rtuťové výbojky	10
1.2 Sodíkové výbojky	10
1.2.1 Nízkotlaké sodíkové výbojky (LPS).....	10
1.2.2 Vysokotlaké sodíkové výbojky (HPS).....	11
1.3 Halogenidové výbojky	12
2 Předřadníky	14
2.1 Tlumivka	14
2.2 Popis zapalovače	15
2.3 Kompenzace.....	15
2.4 Elektronické předřadníky	15
2.4.1 Akustická rezonance	15
2.4.2 Nízkofrekvenční elektronické předřadníky	17
2.4.3 Vysokofrekvenční elektronické předřadníky	17
2.5 Regulace.....	18
3 Požadavky a koncepce měniče	19
3.1 Blokující měnič	19
3.2 Celý můstek.....	21
3.3 Zapalovač	22
3.4 Typy PFC	23
3.4.1 Pasivní LC filtr.....	23
3.4.2 Aktivní PFC	23
4 Měření parametrů výbojky	25
5 Návrh.....	28
5.1 Vstupní obvody	28
5.2 PFC.....	29
5.2.1 Fyzický návrh cívky:	31
5.2.2 Návrh výstupního filtru.....	32

5.3	Pomocný napájecí zdroj	34
5.4	Budiče tranzistorů	35
5.5	Zapalování.....	36
5.6	Řídicí obvody.....	38
5.7	Výkonový měnič	47
5.8	Návrh chlazení	49
5.9	Návrh a výroba desek plošných spojů.....	50
6	Oživení a měření.....	53
6.1	ATXMEGA32A4U	53
6.2	Deska ovládání.....	54
6.3	Základní deska	57
7	Závěr.....	67
	Literatura.....	68
	Seznam použitých zkratk.....	70
	Seznam použitých veličin.....	71
	Seznam obrázků	75
	Seznam příloh	78

ÚVOD

Historie elektrického osvětlování sahá do poloviny 19. století, kdy byla zkonstruována první použitelná oblouková lampa. Koncem 19. století k jejímu zdokonalení výraznou mírou přispěl český vynálezce František Křižík. V této době se začalo experimentovat s uzavíráním výboje do baněk s náplní různých prvků. Později tyto pokusy daly základ pro vznik výbojek. Na přelomu 19. a 20. století vznikly první produkční nízkotlaké výbojky. Zkonstruované světelné zdroje pracovaly s náplní neonu, později neonu a rtuti. Také se se experimentovalo se sodíkem. Velký problém bylo najít vhodný průsvitný materiál, který by odolal velmi agresivním parám sodíku. Tento problém se podařilo vyřešit až ve 30. letech minulého století a tak vznikly nízkotlaké sodíkové výbojky LPS (low pressure sodium lamp). V té době se do produkce dostaly také vysokotlaké rtuťové výbojky (jako hořák byl použit stejný materiál křemičitého skla). Dalšími typy těchto světelných zdrojů už byla jen jejich evoluce. V 60. letech přišly vysokotlaké sodíkové výbojky HPS (high pressure sodium lamp) a vysokotlaké halogenidové výbojky HID (high intensity discharge) [1]. Poslední jmenované jsou nejperspektivnější výbojové světelné zdroje. Výboj probíhá v parách kovů ve formě halogenidů. Vyzařované světlo získává své vlastnosti podle použitých prvků. Jejich mícháním můžeme dosáhnout různých parametrů. Od různých odstínů světla přes vysoký index podání barev až po velmi vysokou účinnost. Nejlepší parametry mají dnes výbojky s keramickým hořákem.

Všechny tyto světelné zdroje mají jedno společné, potřebují ke svému provozu předřadník. Tento prvek musí zajistit spolehlivý provoz světelného zdroje. V první řadě jeho start - zapálení oblouku vysokým napětím. Poté jeho chod, tak aby nedošlo k poškození hořáku – omezení proudu výbojem. U nízkotlakých sodíkových výbojek a neonových trubic se používá rozptylový transformátor, který oba tyto požadavky dokáže splnit. U nízkotlakých rtuťových výbojek a ostatních typů vysokotlakých výbojek se musí použít zapalovač (pro zapálení výboje) a tlumivka (pro omezení proudu výbojem). V posledních letech se hlavně u zářivek (nízkotlakých rtuťových výbojek) prosadily elektronické předřadníky. Výhodou je nízká hmotnost, vyšší účinnost, vyšší životnost zářivek a snazší regulace. Těchto vlastností lze dosáhnout i u vysokotlakých výbojek. Zde je však velkým problémem akustická rezonance. Ta se dá omezit dostatečně vysokou pracovní frekvencí, nebo speciálním návrhem předřadníku, který dokáže měnit pracovní frekvenci, pokud se výboj dostane do rezonance. V posledních letech, kdy zlevňují rychlé spínací prvky a je možno levně konstruovat vhodné elektronické předřadníky, se udržuje konkurenceschopnost těchto zdrojů světla vůči LED technologiím.

1 PŘEHLED SVĚTELNÝCH ZDROJŮ

Tato kapitola se zabývá přehledem používaných světelných zdrojů větších výkonů za účelem osvětlování. Tyto zdroje světla se nejčastěji používají v průmyslu, při osvětlování hal, sportovišť, nádraží a ve veřejném osvětlení.

1.1 Rtuťové výbojky

Vzhledem k tomu, že velká část vznikajícího záření je v ultrafialové části spektra musí se všechny typy zdrojů obsahujících rtuť opatřovat vrstvou luminoforu, který toto záření dokáže převádět na viditelné záření v červené oblasti spektra. Další možností je použití skla, které zabraňuje průchodu ultrafialového záření.

1.1.1 Lineární zářivky

Jsou to nízkotlaké rtuťové výbojky, které se nejčastěji používají pro osvětlování budov. Výjimkou však není ani osvětlování veřejných prostranství. Od tohoto způsobu se však ustoupilo kvůli velkému počtu spojů, a z toho vyplývající nízké provozní spolehlivosti. Další nevýhodou tohoto řešení je malá odolnost systému vůči nízkým teplotám. Za nízkých teplot je velkým problémem ionizovat plyn v trubici a poté udržet stabilní výboj. Navíc za nízkých teplot dochází ke snižování účinnosti [2].

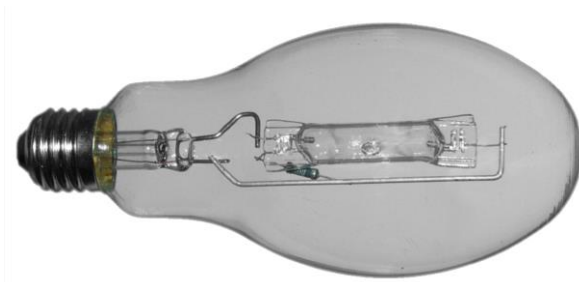
Pro osvětlení interiérů je v současné době platná norma ČSN EN 12464-1. Dle ní se vybírá vhodný světelný zdroj. Výhodou lineárních zářivek je dobrá světelná účinnost kolem 100 lm/W, dobrý index podání barev (CRI) 80 až 96, a dále velký výběr různých teplot chromatičnosti vyzařovaného světla (2700 K až 8000 K) [3]. Nespornou výhodou je rozložení vyzařovaného světelného toku na větší plochu, kdy poté nedochází k oslňování. Konstrukce lineární zářivky viz Obr. 1.1.



Obr. 1.1: Lineární zářivka čirá – viditelné žhavicí vlákno (zdroj germicidního UV záření) / s luminoforem, převzato z [4].

1.1.2 Vysokotlaké rtuťové výbojky

Tyto výbojky se v době se již nepoužívají, a to především kvůli nízké světelné účinnosti, která dosahuje kolem 50 až 60 lm/W. Dále kvůli nízkému indexu podání barev CRI, který je kolem 60. Další nevýhoda je ekologického charakteru, protože hořáky výbojek obsahují rtuť. Jejich výhodou je zvládnutá technologie výroby a nízká cena. Další výhodou je, že k provozu nepotřebují externí zapalovač, který je nahrazen pomocnou elektrodou v hořáku, viz Obr. 1.2, která je připojena přes rezistor.



Obr. 1.2: Rtuťová výbojka RVC (zdroj germicidního UV záření) uvnitř jde vidět křemenný hořák, převzato z [5].



Obr. 1.3 Rtuťová výbojka Osram HQL (s luminoforem), převzato z [4].

1.2 Sodíkové výbojky

V obou následujících případech je dominantní náplní hořáku sodík. Tyto výbojky nevyzařují světlo v ultrafialové oblasti, proto nepotřebují vrstvu luminoforu. Některé typy vysokotlakých výbojek jsou opatřeny vrstvou opálu kvůli lepšímu rozptylu světla a snížení oslnění.

1.2.1 Nízkotlaké sodíkové výbojky (LPS)

Nízkotlaké sodíkové výbojky jsou po rtuťových výbojkách druhým nejstarším výbojovým zdrojem světla. Tyto světelné zdroje mají uplatnění jen ve specifických aplikacích, protože vyzařují monochromatické záření. Toto záření je specifické a jedná se o tzv. sodíkový dublet. Jde o dvě rezonanční čáry v oranžové oblasti spektra na vlnových délkách 589,0 nm a 589,6 nm – oblast s nejvyšší citlivostí pro lidské oko. Z toho vyplývá výhoda tohoto zdroje světla, kterou je vysoký měrný výkon překračující hodnotu 200 lm/W [1]. Takového měrného výkonu zatím nedosahuje žádný jiný světelný zdroj. Obrovskou nevýhodou je nulový index podání barev, kdy se předměty jeví jako oranžové, nebo oranžové s různou složkou šedi. Této vlastnosti se dá využít pro různé designové aplikace, osvětlování budov (dokáže „schovat“ defekty na fasádách). V Nizozemsku se využívají pro osvětlování dálnic, protože díky specifickému světlu je v mlze lepší viditelnost než při jakémkoliv jiném druhu osvětlení.

Jako předřadník většinou slouží rozptylový transformátor. Je to z toho důvodu, že výbojka potřebuje pro rozhoření vysoké napětí a pro provoz je důležité udržet konstantní proud [3]. Jelikož jsme omezeni maximální proudovou hustotou výboje, tak kvůli udržení nízkého tlaku

par sodíku můžeme dosahovat vyššího výkonu jen tehdy, když prodloužíme délku hořáku. Z toho vyplývá další nevýhoda, kterou je velký rozměr výbojek vyšších výkonů, viz Obr. 1.4.



Obr. 1.4: Nízkotlaká sodíková výbojka Philips SOX 55 W, převzato z [4].

1.2.2 Vysokotlaké sodíkové výbojky (HPS)

V dnešní době jde o nejpoužívanější světelný zdroj. Produkuje příjemné zlato-oranžové světlo a pro účely veřejného osvětlení je výhodou i lepší viditelnost v mlze. Výbojka pracuje na principu hoření výboje v parách sodíku za vysokého tlaku a teplot. Při zvýšení tlaku a teploty par sodíku dochází k rozpadu tzv. sodíkové dublety na více spektrálních čar. Výsledné spektrum má spojitý charakter v oblasti od žluté po oranžovou – není monochromatické. Avšak poté dojde ke snížení měrného výkonu. Nevýhodou je vysoká agresivita sodíku, který naleptává stěny hořáku. Proto je třeba použít speciální sklo. V dnešní době se používají hořáky z korundu (oxid hlinitý), které se vyznačují matným vzhledem, viz Obr. 1.5.

V bývalé Tesle Holešovice se experimentovalo s hořáky z monokrystalického korundu (čirý materiál), avšak byly příliš složité a drahé na výrobu. Průchodky hořáku jsou z niobu a uvnitř jsou dvě wolframové elektrody. V hořáku se nevyskytuje pouze sodík, ale obsahuje i jiné prvky, které ulehčují zapálení a zlepšují rozhoření a stabilitu výboje. Plní se tzv. Penningovou směsí (směs neonu a malého množství argonu). Dále pro vylepšení indexu CRI se do hořáku přidává malé množství xenonu a dalších prvků [5]. Výsledná náplň hořáku je závislá od výrobce a typu. Vysokotlaké sodíkové výbojky se vyrábí v řadě od 50 W do 1000 W. Můžeme je dostat v provedení s CRI 25 a měrným výkonem od 80 lm/W, až po moderní výbojky s CRI 40 nebo měrným výkonem až 140 lm/W.

Vysokotlaké sodíkové výbojky používají jako předřadníky jednoduchou tlumivku, která omezuje proud výbojem na požadovanou hodnotu a externí zapalovač. Externí zapalovač se nedá použít doutnavkový jako u zářivek, protože napěťová špička vzniklá na tlumivce nemá dostatečně vysoké napětí pro ionizaci plynu. Musí se použít elektronický zapalovač, který generuje napěťové impulzy přibližně 4,5 kV.

Výhodou sodíkových výbojek je jejich dlouhá životnost (30000 hodin při 20 % selhání), vysoký měrný výkon až 140 lm/W a nízká cena. Nevýhodou je pro některé aplikace nevhodná barva světla a nízký index CRI 20 – 30 [3].



Obr. 1.5: Vysokotlaká sodíková výbojka Phillips SON-T 250 W, převzato z [4].

1.3 Halogenidové výbojky

Jedná se o jeden z druhově nejrozmanitějších používaných světelných zdrojů. Ve výrobcích najdeme výbojky pro téměř jakékoliv použití. Ve výkonech od 35 W až po 3500 W. Výjimkou nejsou ani speciální výbojky s výkonem až 20 kW.

Vývoj probíhá od 60. let minulého století a konstrukce vychází ze rtuťových výbojek. Hořák je naplněn argonem a malým množstvím rtuti. Toto je pro všechny výbojky stejné. Dále pak záleží na požadovaných vlastnostech světla. Jak již název vypovídá, hořáky jsou plněny halogenidovými sloučeninami různých kovů, nejčastěji jodidy. Vzhledem k velkému množství použitelných kovových prvků a jejich kombinací lze docílit různých barev vyzařovaného světla a efektivity. Proto je kladen velký důraz na materiál hořáku, který musí odolat korozivním účinkům všech prvků náplně hořáku za vysokých tlaků a teplot. Např. polygrafické výbojky vyzařující tvrdé UV záření jsou plněné jodidy železa a galia, barevné (modrá s jodidem indným, zelená s jodidem thalným) [5]. Nejčastěji používanými jsou výbojky určené pro osvětlování. Kvůli přítomnosti malého množství rtuti v náplni hořáku je nutné tyto výbojky opatřit sklem, které dokáže odfiltrovat UV záření. Jejich vývoj stále pokračuje a vyrábějí se výbojky s CRI od 60 do 98 a účinností do 120 lm/W. Nejlepších parametrů dnes dosahují výbojky s keramickým hořákem, viz Obr. 1.7. Tyto výbojky mají oproti klasické konstrukci z křemenného skla, viz Obr. 1.6, větší stálost barev a nižší pokles světelného toku v průběhu života. Navíc není vyžadována předepsaná poloha svítidla. Tyto výbojky se zatím vyrábějí v řadách do 400 W.



Obr. 1.6: Philips HPI-T 2000W s křemenným hořákem (nestmívatelná), převzato z [4].



Obr. 1.7: Philips MASTER CityWhite s keramickým hořákem (stmívatelná), převzato z [4].

Jako předradníky jsou používány tlumivky, které jsou u některých typů vzájemně kompatibilní s typy pro sodíkové výbojky a externí tyristorový zapalovač. Některé typy výbojek jsou vybaveny integrovaným zapalovačem a jsou určeny jako náhrada za dosluhující rtuťové výbojky. Výhodou halogenidových výbojek je obrovská škála vyráběných výkonů a provedení. Velká rozmanitost barev pro designové účely. Vysoký měrný výkon 85 až 120 lm/W při zachování vysokého indexu CRI 70 až 98.

2 PŘEDŘADNÍKY

2.1 Tlumivka

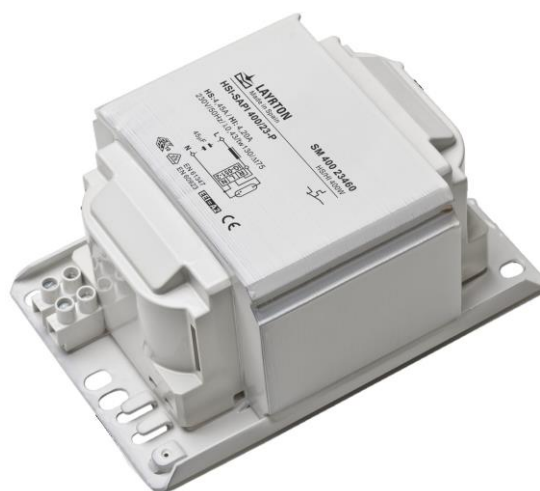
Je to jednobran. Skládá se z transformátorových plechů ve tvaru T a U, viz Obr. 2.2. Obsahuje vzduchovou mezeru, kvůli lineárnějšímu průběhu proudu při startu výbojky. Je navinuta měděným lakovaným drátem. Některé novější tlumivky jsou opatřeny pomocným vývodem z vinutí pro speciální zapalovač.

Tlumivka je navrhována pro určitou pracovní hodnotu proudu, která vychází z požadavků na konkrétní typ výbojky – rozdílná oblouková napětí. Například pracovní napětí rtuťových výbojek se pohybuje kolem 110 až 120 V a napětí sodíkových výbojek je 90 až 110 V.

Velkou výhodou tlumivek je jednoduchá konstrukce, a vzhledem k absenci aktivních prvků vysoká spolehlivost. Nevýhodou je vysoká hmotnost (je to prakticky kovový kvádr). Tepelné ztráty na vnitřním odporu vinutí cívky a v železném jádře už závisí jen na konstrukci, která je určitým kompromisem. Při naddimenzování tlumivky sice poklesnou ztráty, avšak vzroste její hmotnost a především její cena. Ztráty na tlumivkách se proto ustálily na zhruba 10 až 20 % (pro 70 W až 400 W). S rostoucím výkonem se ztráty snižují, protože např. pro 2000 W výbojku se tlumivky umísťují na patu stožáru kvůli snazší obsluze, proto je konstrukční řešení mírně odlišné, viz Obr. 2.1, a nevádí vyšší hmotnost (používá se EI nebo M jader a vinutí s menší proudovou hustotou).



Obr. 2.1: Moderní tlumivka pro 2000W halogenidové výbojky, převzato z [6].



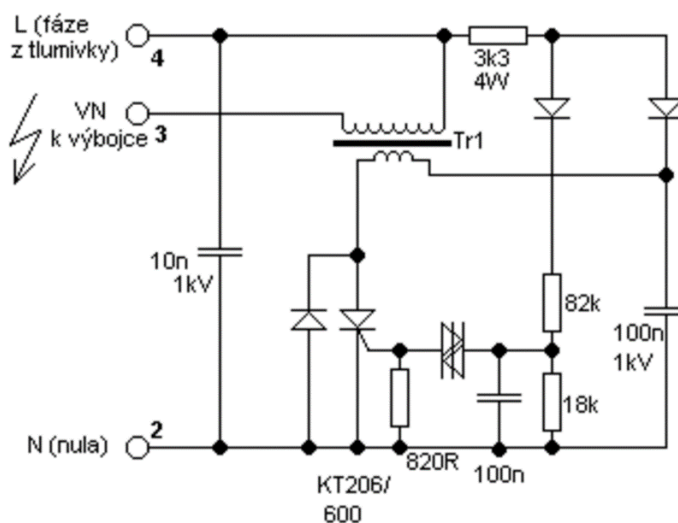
Obr. 2.2: tlumivka pro sodíkové i halogenidové 400 W výbojky, převzato z [6].

2.2 Popis zapalovače

Je to elektronická součástka, která se stará o prvotní ionizaci plynu v hořáku výbojky. Uvnitř je impulzní transformátor a spínací prvek, obvykle tyristor. Ten spíná přes odpor, nebo kondenzátor a vinutí transformátoru síťové napětí. Na druhém vinutí s vyšším počtem závitů, které je připojeno v sérii s tlumivkou a výbojkou, se indukují napětí o špičkové hodnotě 4,5 až 5,5 kV, viz Obr. 2.4. Toto napětí ionizuje plyn a výbojem může protékat proud, který je stabilizován tlumivkou. Po zapálení oblouku musí činnost zapalovače ustát. Jeho funkce již není zapotřebí, a při jeho provozu dochází k napěťovému namáhání všech komponentů. Na Obr. 2.3 lze vidět moderní zapalovač, využívající spínací součástku sidac.



Obr. 2.3 Moderní sidacový zapalovač, převzato z [6]



Obr. 2.4: Schéma tyristorového zapalovače TESLA, převzato z [7]

2.3 Kompenzace

U systémů využívající tlumivku je žádoucí kompenzace účinníku $\cos\varphi$ ideálně na hodnotu 0,95. Používají se foliové kondenzátory. V regulovaných systémech, kde se používají triakové regulátory, se kompenzace musí přesunout ze svítidel před regulátor. Spínací prvek nemůže pracovat do kapacitní zátěže (jeví se pro něj jako zkrat) a regulátor by shořel.

2.4 Elektronické předřadníky

2.4.1 Akustická rezonance

Při provozu výbojek na vyšší frekvenci nežli je síťový kmitočet se začíná vyskytovat jev akustické rezonance. Tento jev je nežádoucí a při konstrukci předřadníků se tomuto jevu musíme vyhnout. Pokud se frekvence procházejícího proudu shoduje s frekvencí akustické rezonance hořáku, dochází k nerovnoměrnému hoření oblouku a k nežádoucímu kmitání, díky kterému může hořák explodovat. Deformace oblouku jsou patrné na Obr. 2.5 a Obr. 2.6.

Akustická rezonance vzniká na principu mechanického vlnění v látkách (v tomto případě v plynu). Plyn v uzavřené trubici je buzen vysokofrekvenčním proudem, který při určité frekvenci může způsobit rozkmitání plynu v trubici [8]. Frekvence kmitání je závislá především na délce hořáku a rychlosti zvuku v plynu (náplni hořáku). Rychlost zvuku v plynu je ovlivněna složením (v tomto případě se nemění) a teplotou plynu. Jelikož při regulaci výkonu dochází i ke změně teploty hořáku, dochází ke změně frekvence akustické rezonance. Z toho důvodu nemůžeme nastavit frekvenci měniče na konstantní hodnotu.

Projevem akustické rezonance je nerovnoměrné rozložení tlaku plynu v hořáku. Při kmitání plynu se v hořáku vyskytují místa s velmi nízkým tlakem (až 6 kPa – zúžená místa výboje na Obr. 2.5) hned vedle míst s velmi vysokým tlakem (až násobky normálního pracovního tlaku, který je přes 100 kPa). Počet těchto bodů je dán násobkem poloviny délky vlny rezonanční frekvence [9]. Tento rozdíl způsobuje velké namáhání stěn hořáku, dále může dojít k rozkmitání skleněné stěny hořáku, který může v krajním případě explodovat.

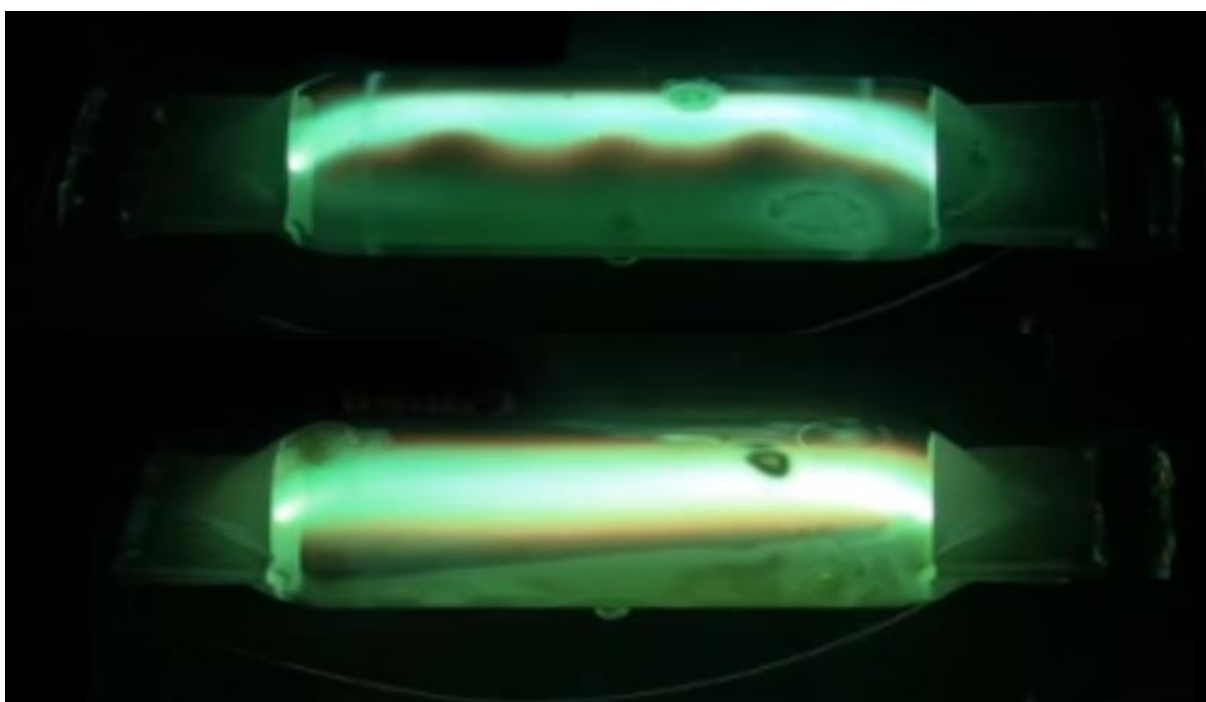
Tomuto jevu můžeme předcházet třemi způsoby [10].

1. Zvolením dostatečně nízké frekvence (z praxe maximálně 400 Hz) kdy polovina délky vlny (nejnižší hodnota frekvence akustické rezonance) je delší nežli délka hořáku. V tomto případě nemůže k rozkmitání plynu v hořáku dojít. Toto řešení využívají nízkofrekvenční elektronické předřadníky. Hlavní nevýhodou je stroboskopický efekt, který může vylučovat použití v některých prostorách.
2. Konstrukcí předřadníku s dostatečně vysokou pracovní frekvencí (stovky kHz – u výbojek nižších výkonů nad 300 kHz), kdy začnou splývat oblasti s nízkým a vysokým tlakem. V tomto případě nad určité frekvence jev zaniká. Tato frekvence je závislá i od průměru hořáku kdy při zvětšujícím se průměru (většinou s rostoucím výkonem výbojky) tato mezní frekvence klesá. Proto ji například nepozorujeme u zářivek, kde předřadníky bezpečně pracují na frekvenci 30 – 35 kHz. Avšak při velmi vysokých frekvencích dochází k výrazným ztrátám na spínacích prvcích.
3. Konstrukcí předřadníku s proměnnou frekvencí, kdy předřadník upravuje svou frekvenci tak, že když se výboj dostane do rezonance, pracovní frekvence se o několik kHz posune. Tímto způsobem se můžeme tomuto nežádoucímu jevu vyhnout. Nevýhodou je problematická detekce a vyhodnocení akustické rezonance.
4. Návrhem předřadníku s variabilní frekvencí, kdy se pracovní frekvence neustále pohybuje ve vymezené oblasti. Při plynulé změně frekvence se neustále mění rychlost změny procházejícího proudu, a tím pádem nemůže dojít k rozkmitání hořáku na jedné frekvenci.

Fyzikální podstata vzniku jevu akustické rezonance nebyla doposud uspokojivě vysvětlena, avšak projevy akustické rezonance a požadavky na konstrukci předřadníků omezující její vznik jsou dobře zpracovány [11].



Obr. 2.5: Nahoře ukázka nestabilního výboje sodíkové výbojky při výskytu akustické rezonance. Dole hořák při správných provozních podmínkách. Převzato z [12].



Obr. 2.6: Nahoře nestabilní výboj v hořáku halogenidové výbojky při výskytu akustické rezonance. Dole při správných provozních podmínkách. Převzato z [12].

2.4.2 Nízkofrekvenční elektronické předřadníky

Tyto předřadníky jsou velmi rozšířené kvůli jejich jednoduché konstrukci. Většina těchto komerčních řešení využívá integrovaný obvod IRS2573D [13]. Tento obvod má integrované vše potřebné k provozu výbojek. Výkonový stupeň je zapojen do plného mostu, který pracuje na frekvenci 200 Hz a regulace proudu probíhá pomocí PWM modulace. Zapalování výboje je zajištěno pomocným vinutím na výkonové tlumivce. Jejich výhodou je spolehlivá funkce a lepší EMC vzhledem k použití nižších frekvencí. Nevýhodou je horší možnost regulace.

2.4.3 Vysokofrekvenční elektronické předřadníky

Tyto předřadníky pracují na frekvencích od 35 kHz. Vysoká frekvence je výhodná i z hlediska účinnosti. Při buzení plynu vysokofrekvenčním proudem dosahují výbojové světelné zdroje

při stejném příkonu vyššího světelného toku. Některé typy vykazují delší střední dobu života. Dále dochází k linearizaci VA charakteristiky výboje. Nespornou výhodou je, že při regulaci výkonu nedochází ke zhasínání výboje. Toto je způsobeno tím, že doba, po kterou výbojem neprochází proud je výrazně kratší než při použití síťové frekvence. Tím pádem nedochází k tak výrazné rekombinaci ionizovaných částic plynu a stabilní výboj můžeme udržet i při nižších výkonových hladinách. Z tohoto také vyplývá, že nedochází ke stroboskopickému efektu. Velkou nevýhodou pak je možnost vzniku akustické rezonance a větší rušení vznikající na spínacích prvcích [10].

2.5 Regulace

Regulace výbojových zdrojů světla je problematická hned z několika důvodů. Prvním a největším problémem je změna vlastností vyzařovaného světla. Je to způsobeno tím, že při poklesu výkonu světelného zdroje dochází ke snižování teploty hořáku. Dochází k poklesu energií ionizovaných částic, nebo dochází k ionizaci jen části náplně. Toto negativně ovlivňuje vyzařované světelné spektrum. Snižuje se index barevného podání a dochází ke změně barvy světla. U sodíkových výbojek tento jev není tak patrný, protože hlavním zdrojem světelného záření je sodík. U halogenidových výbojek dochází k velmi výrazným změnám, protože je zdrojem světla rozmanitá směs kovových prvků s různou hodnotou energie potřebnou k ionizaci. Při poklesu teploty náplně hořáku se přestávají některé prvky uplatňovat na generaci světla. Vyzařované spektrum je pak o tyto složky spektra chudší, což se negativně projevuje na výsledné barvě světla a indexu podání barev.

Dalším problémem je pokles účinnosti. Vzniká stejným způsobem jako změna barvy vyzařovaného světla. U některých výbojek může docházet i ke zkracování životnosti.

Některé druhy výbojek lze regulovat v omezeném rozsahu díky speciální konstrukci typicky až do 60 % jmenovité hodnoty výkonu. Většinou se jedná o sodíkové výbojky a některé novější typy keramických halogenidových výbojek. Když chceme výbojku provozovat na snížený výkon, je lepší ji nechat rozběhnout na jmenovitý výkon, a až poté regulovat. Je to vhodnější kvůli rychlejšímu náběhu výbojky na požadovanou hodnotu, a také dojde k lepšímu prohřátí hořáku. Díky tomu má vyzařované světlo lepší parametry [14].

Regulace výkonu výbojových světelných zdrojů se nejčastěji používá ve veřejném osvětlení kvůli snaze snížení nákladů. Nejsou zde tak vysoké požadavky na kvalitu osvětlení, takže malé snížení CRI a odchylka ve vyzařované barvě světla je tolerována. K regulaci se používá několik metod. Všechny pracují na principu snížení napájecího napětí soustavy. K tomuto účelu se používají triakové regulátory – v tomto případě regulovaná soustava nesmí obsahovat žádné kompenzační kondenzátory. Další možností je použití transformátoru, kde přepínáme odbočky vinutí. Tento způsob není moc vhodný kvůli skokové změně napájecího napětí, kde při přepínání vinutí může dojít ke zhasnutí výbojek. Další možností je použití autotransformátoru, tento způsob je více vhodný, neboť nedochází ke skokové změně napájecího napětí [15]. Použití transformátorů má další výhodu v tom, že regulovaná soustava může obsahovat kompenzační kondenzátory.

3 POŽADAVKY A KONCEPCE MĚNIČE

Navrhovaný měnič musí dokázat plně nahradit klasický elektromagnetický předřadník a vylepšit některé jeho funkce.

- Pracovní frekvence je variabilní.
- Musí zajistit spolehlivé zapálení výboje za studena. Horký start se provádí pomocí velmi vysokého napětí u výbojek speciální konstrukce. Tato funkce není vyžadovaná.
- Měl by umožňovat plynulou regulaci výkonu minimálně v rozsahu 60-100%. Díky možnosti změny hodnoty výstupního proudu bude možné na předřadníku provozovat různé typy výbojek v určitém rozsahu výkonů (sodíkové i halogenidové – rtuťové lze taky provozovat, ale už se od jejich používání upouští). Při změně výbojky bude třeba předřadník vždy ručně přenastavit.
- Dalším požadavkem je dobrý činitel tvaru odebíraného proudu (využití aktivního PFC). Nízké vyzařované rušení (dobrá EMC kompatibilita). Vysoká účinnost (přes 90 %) a vysoká spolehlivost. Doplnkově rozsah vstupního napětí 85-240V AC.

V následujících kapitolách jsou popsány technologie měničů a způsoby možných řešení obvodů, které vyhovují tomuto zadání.

Definujeme pojem střída s . Jedná se o délku doby sepnutí tranzistorů t_{on} ku jedné periodě měniče T . Maximální střída s se proto pohybuje v rozmezí od 0 do 1 nebo od 0 % do 100 % a lze ji vypočítat:

$$s = \frac{t_{ON}}{T}. \quad (3.1)$$

3.1 Blokující měnič

Jako nejvhodnější řešení pro napájení řídicích obvodů a budičů tranzistorů se jeví použití blokujícího měniče. Oproti řešení s transformátorem umožňuje velký rozsah vstupních napětí a vyšší účinnost. Tyto měniče obsahují jen minimální počet aktivních součástek oproti ostatním řešením. Používají se pro výkony do 100 W a nepotřebují výstupní tlumivku. Blokující měnič využívá impulzního transformátoru jako akumulární tlumivky. Energie se na výstup přenáší v době, kdy je uzavřen spínací prvek [16]. Typické zapojení je na Obr. 3.1.

V čase 0 sepne tranzistor T_1 , U_{ce} je nulové a na primárním vinutí je napájecí napětí U_{cc} . Proud primární cívky lineárně roste (v transformátoru se akumuluje energie). Na konci času t_{mag} rozepneme tranzistor a napětí na obou cívkách transformátoru změní polaritu. Hodnota napětí primární cívky u_1 je pak v ideálním případě:

$$u_1 = -U_z \cdot \text{převod transformátoru.} \quad (3.2)$$

Napětí u_{ce} je pak:

$$u_{CE} = U_{cc} + U_{out} \cdot \text{převod transformátoru.} \quad (3.3)$$

Díky změně polarity napětí na sekundární cívce začne diodou D téct proud (začne se uvolňovat akumulovaná energie v jádře), který nabíjí kondenzátor. Maximální hodnota tohoto proudu je:

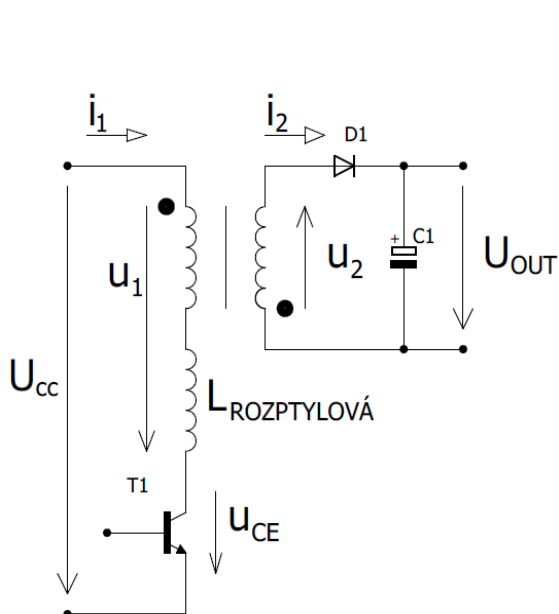
$$I_2 = I_{1 \text{ maximální}} \cdot \text{převod transformátoru.} \quad (3.4)$$

Tento proud teče do konce doby t_{demag} a lineárně klesá na nulovou hodnotu. Tranzistor T_1 je pak zavřený do konce periody T . Tyto základní průběhy jsou zobrazeny v Obr. 3.2. Doba, kdy už neteče žádný proud, ale tranzistor zůstává vypnutý, je časová rezerva sloužící k ochraně obvodu. Tato doba se nazývá *deadtime* (DT).

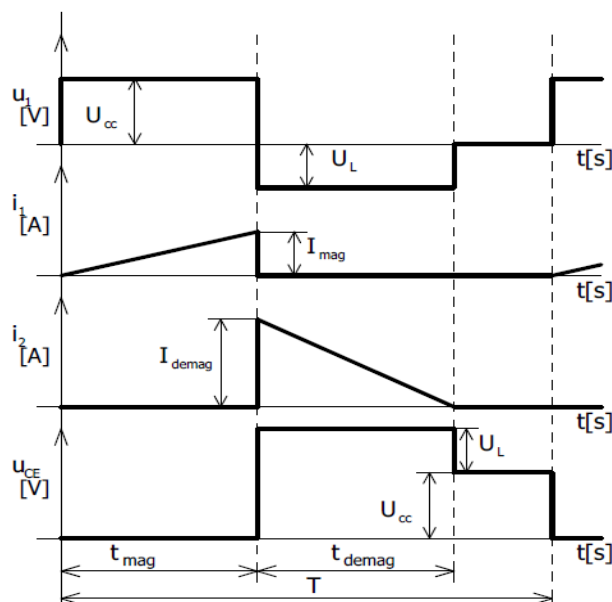
Poté se celý cyklus opakuje.

Výhodou tohoto měniče je, že nepotřebuje výstupní tlumivku, je odolný proti zkratu na výstupní straně a může být pozmeněno napěťové namáhání tranzistoru.

Nevýhodou je nutnost použít transformátor se vzduchovou mezerou. Díky tomu vychází větší jádro než u propustných měničů. Další nevýhodou je napěťové namáhání tranzistoru vyšším napětím, než je napájecí.



Obr. 3.1: Základní schéma blokujícího měniče.



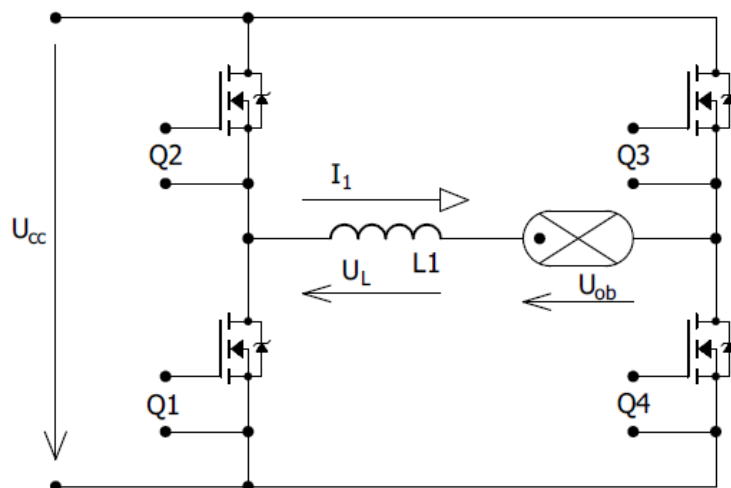
Obr. 3.2: Základní průběhy blokujícího měniče.

3.2 Celý můstek

Jedná se o topologii dvojčinného propustného měniče (nebo také plný most – full bridge) použitého jako střídač. Obsahuje čtyři spínací prvky. Nevýhodou je nutnost použití plovoucího buzení dvou horních tranzistorů. Pro tuto aplikaci je vhodné, že dokážeme jednoduše vytvářet střídavý proud o vysoké frekvenci. Místo impulzního transformátoru však použijeme tlumivku zapojenou do série s výbojkou. Viz principiální schéma na Obr. 3.3. Tlumivka omezuje proud procházející výbojkou. Díky použité vysoké frekvenci jsou rozměry tlumivky několikanásobně menší než u tlumivek pro síťový kmitočet.

Můžeme použít několik způsobů řízení tohoto měniče [16]. U všech algoritmů je společné, že doba sepnutí tranzistorů je menší než jedna polovina délky periody, a z toho vyplývá, že střída je maximálně 0,5. Při spínání musíme zajistit, aby se doba sepnutí tranzistorů v jedné větvi (Q1 a Q2 nebo Q3 a Q4) nepřekrývala – nesmí být sepnuty současně, protože by došlo ke zkratu napájecího napětí. Proto do tohoto času zařazujeme ještě ochrannou dobu DT (deadtime). Plný most můžeme řídit dvěma základními algoritmy, nebo jejich kombinací.

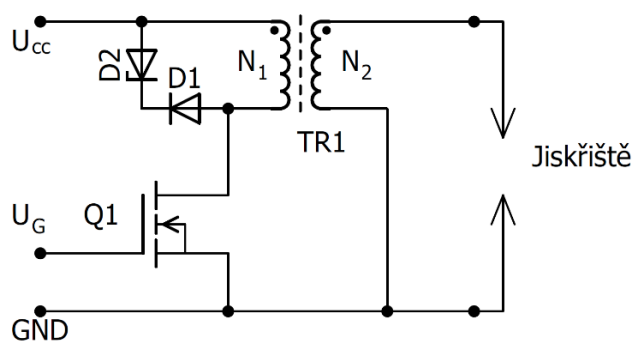
1. Prvním algoritmem střídavě spínáme tranzistory Q1, Q3 ve stejnou dobu a Q2, Q4 ve stejnou dobu. Délkou sepnutí těchto dvojic volíme střidu měniče a tedy výkon.
2. Druhým řídicím algoritmem střídavě spínáme tranzistory Q1 a Q2 tak, aby byly otevřeny po maximálně možnou dobu (max. $\frac{1}{2}T$) To samé se děje v druhé větvi s tranzistory Q3 a Q4. Mezi tyto dvě větve zařazujeme fázový posun ve spínání, který se pohybuje od 0 do doby půlky periody. Tento fázový posun určuje, po jakou dobu jsou společně sepnuty tranzistory Q1, Q3 a v druhé půlperiodě Q2, Q4. Výsledek je stejný jako v případě řízení prvním algoritmem, kdy společná doba sepnutí těchto dvojic určuje výslednou střidu měniče.



Obr. 3.3: Principiální schéma plného mostu.

3.3 Zapalovač

Musí zajistit co nejspolehlivější start výbojky. K tomu je potřeba napětí o špičkové hodnotě minimálně 4,5 kV. Jako transformátor se dá použít výkonová tlumivka omezující proud výbojkou, ale musí se dovinout jedno vinutí jako primární cívka. Primární cívku poté spínáme velmi krátkými impulzy synchronně s výkonovým měničem. Díky tomu se na sekundárním vinutí cívky (hlavním vinutí zapojeném do série s výbojkou) generují krátké napěťové impulzy, které jsou schopny ionizovat plyn v hořáku a zapálit výboj. Napětí těchto impulzů je závislé na převodu transformátoru. Základní schéma viz Obr. 3.4.



Obr. 3.4: Principiální schéma generátoru vysokonapěťových impulzů

3.4 Typy PFC

Power factor corrector (zkráceně PFC) je obvod, který zajišťuje, že tvar odebíraného proudu ze sítě je co nejpodobnější ideálnímu sinusovému průběhu. Elektrické přístroje, které obsahují usměrňovač s filtračním kondenzátorem nebo nelineární zátěž a nejsou vybaveny PFC, způsobují nerovnoměrný odběr proudu ze sítě. Díky tomu je rozvodná síť nerovnoměrně zatěžována. Toto způsobuje vyšší ztráty při přenosu elektrické energie a přetěžování distribučních transformátorů.

Tomuto lze předcházet zakomponováním PFC do napájecího obvodu zařízení. PFC můžeme řešit pasivními prvky, LC filtr nebo zapojením valley fill. Poslední zmiňované je patrně nevhodné, protože zvlnění výstupního napětí přesahuje 50 %.

Nabízí se taky varianta řešení PFC pomocí aktivních prvků (ve většině případů zvyšující měniče s různým způsobem řízení).

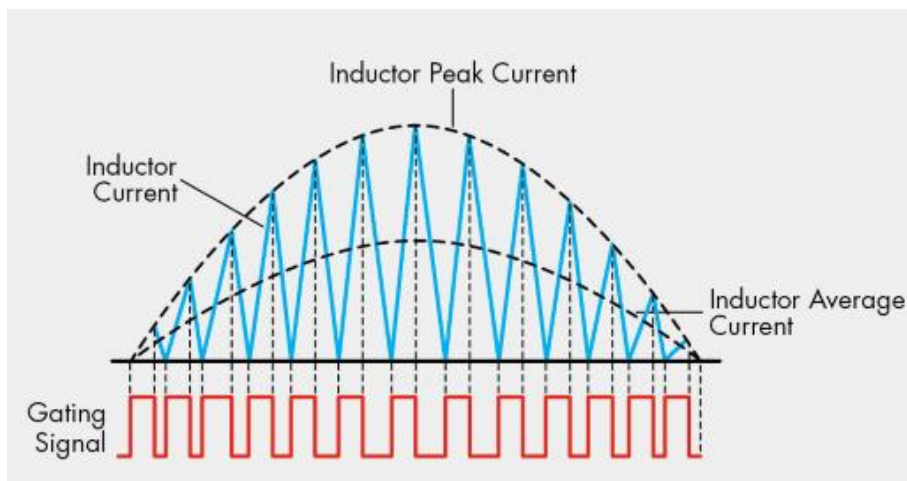
3.4.1 Pasivní LC filtr

Jedná se o pasivně řešené PFC obsahující tlumivku a kondenzátor. Tento LC obvod je sestaven jako dolní propust. Díky tomu je ze sítě odebírán konstantní proud. Tlumivka je navrhována na 100Hz. Nevýhodou tohoto řešení jsou velké rozměry tlumivky. Proto je toto řešení nevhodné.

3.4.2 Aktivní PFC

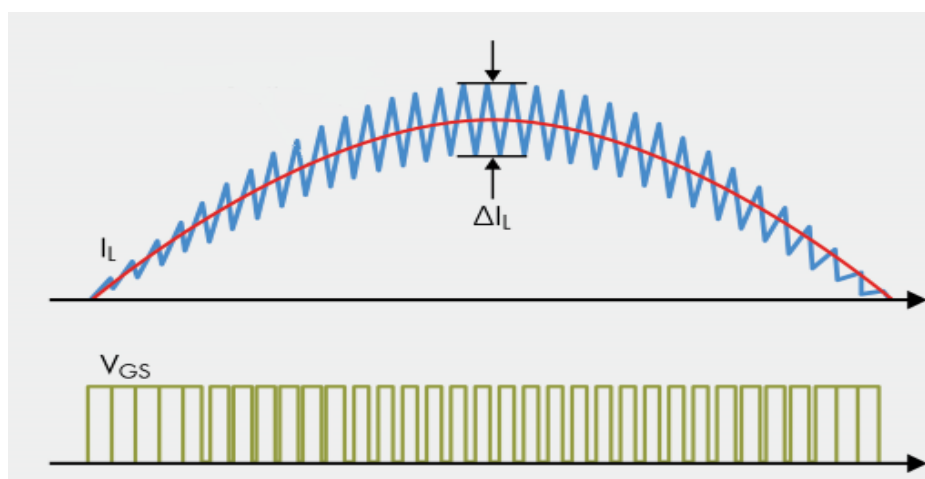
Zde je na výběr ze tří režimů způsobu řízení. Tato řešení jsou konstrukčně velmi podobná. Rozdílem je pouze použitelnost pro různě velké maximální výkony.

1. Prvním způsobem pro nejmenší výkony je PFC s režimem přerušovaného proudu (DCM). Je to obdobný způsob řízení jako u PFC v režimu na hranici kontinuálního proudu (CrM) avšak mezi dobou poklesu proudu cívku na nulu a opětovným sepnutím tranzistoru je určité časové zpoždění. Toto je výhodné kvůli delšímu času na zotavení diody. Díky tomu můžeme použít pomalejší (levnější) součástky. Dále při vyšších dosahovaných strmostech změny velikosti proudu můžeme použít menší tlumivku. Nevýhodou je více než dvojnásobné proudové namáhání tranzistoru oproti střední hodnotě.
2. Další řešení je použití řízení v režimu na hranici kontinuálního proudu (CRM). Toto řešení vyhovuje pro výkony do 600 W. Tranzistor je namáhán dvojnásobkem střední hodnoty proudu a je spínán po poklesu proudu tlumivkou na nulovou hodnotu. Viz Obr. 3.5.



Obr. 3.5: Typické průběhy CRM PFC obvodu, převzato z [17].

- Posledním a nejvhodnějším řešením je použití PFC v režimu kontinuálního proudu (CCM) Jelikož je plánováno umožnění provozu výbojek od 250 W až do 1000 W je nezbytně nutné použít integrovaný obvod umožňující toto řízení. V tomto režimu prochází proud cívku I_L po celou dobu se zvlněním ΔI_L maximálně 30 % a proud kopíruje průběh vstupního napětí [17]. Typické průběhy viz Obr. 3.6



Obr. 3.6: Typické průběhy CCM PFC obvodu, převzato z [17].

4 MĚŘENÍ PARAMETRŮ VÝBOJKY

Bylo provedeno měření kvůli prvotnímu odhadu nastavení měniče podle zapojení Obr. 4.1. Při tomto měření bylo zjištěno, že příkon nových výbojek se pohybuje kolem 140 % jmenovitého výkonu, všechny katalogové hodnoty, viz Tab. 4.1. To odpovídá tvrzení, že příkon nových soustav je zhruba o třetinu vyšší nežli jmenovitý navrhovaný. S postupem času dochází vlivem opotřebení náplně hořáku ke snižování obloukového napětí. Na předřadníku vzniká vyšší úbytek, což sebou nese nárůst proudu. Tento jev může u výbojek po dosažení plánované životnosti přetěžovat předřadníky.

Při provádění regulační zkoušky a snižování napájecího napětí zůstane obloukové napětí konstantní (díky tomu, že hořák má stále stejnou teplotu) a klesá pouze proud. Je to patrné z Tab. 4.2, při porovnání 4. a 5. sloupce. Hořák výbojky se až po chvíli začne ochlazovat a dochází k poklesu tlaku par plynů náplně hořáku. Ty kladou procházejícímu proudu menší odpor, dochází k mírnému růstu proudu a snižování obloukového napětí. Za povšimnutí stojí, že při ustalování výboje po regulaci (snižování napájecího napětí) nedochází k výrazné změně výkonu.

Díky tomuto měření se ukázalo, že nejvhodnější regulace měniče je na konstantní výkon, s bezpečnostním maximem proudu a napětí. To zajistí konstantní výkon světelného zdroje po celou dobu jeho života. Dále musí být regulace prováděna postupně v rozsahu i několika minut, jinak dojde k velmi razantnímu snížení odebíraného proudu, který nestačí na udržení výboje a dojde ke zhasnutí. Tyto jevy jsou společné pro sodíkové i halogenidové výbojky.

Tab. 4.1: Jmenovité parametry výbojky použité při měření

Jmenovité parametry výbojky Philips MASTER SON-T PIA Plus 250W E40	
Napájecí napětí (včetně předřadníku)	230 V
Jmenovitý výkon	250 W
Obloukové napětí	100 V
Proud	3 A
Smývatelná	Ano
CRI	25
Náhradní teplota chromatičnosti	2000 K
Světelný tok	33000 lm
Světelná účinnost	130 lm/W
Patice	E40

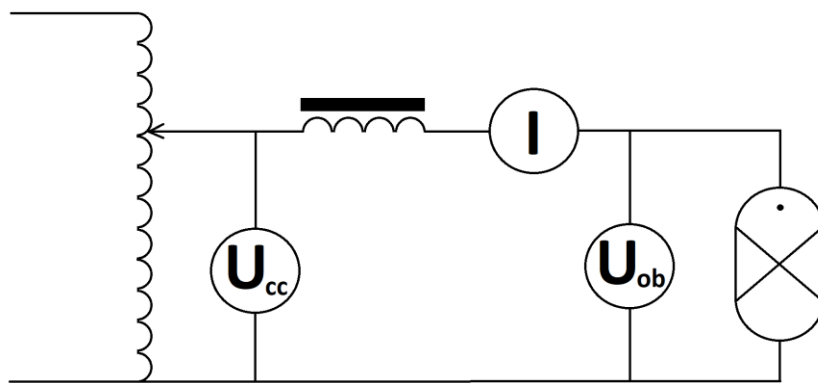
Tab. 4.2: Naměřené hodnoty na oblouku při regulaci nové 250 W sodíkové výbojky

Napájecí napětí	Napětí oblouku ihned po regulaci	Napětí oblouku po ustálení	Proud obloukem ihned po regulaci	Proud obloukem po ustálení	Výkon ihned po regulaci	Výkon po ustálení	Poměr výkonů ihned po regulaci	Poměr výkonů po ustálení
U_{cc} [V]	U_{ob} [V]	U_{ob} [V]	I [A]	I [A]	P [W]	P [W]	P/P_{nom} [%]	P/P_{nom} [%]
230	140	140	2,56	2,56	358,40	358,40	143,36	143,36
220	140	131	2,36	2,47	330,40	323,57	132,16	129,42
210	132	121	2,27	2,40	299,64	290,40	119,85	116,16
200	122	111	2,20	2,34	268,40	259,740	107,36	103,89
190	111	100	2,13	2,28	236,43	228,00	94,57	91,20
180	100	91	2,10	2,20	210,00	200,20	84,00	80,08
170	91	84	1,98	2,08	180,18	174,72	72,07	69,88
160	85	79	1,88	1,95	159,80	154,05	63,92	61,62
150	80	74	1,75	1,81	140,00	133,94	56,00	53,57
140	76	71	1,60	1,67	121,60	118,57	48,64	47,42
130	72	68	1,47	1,53	105,84	104,04	42,33	41,61
120	70	64	1,30	1,38	91,00	88,32	36,40	35,32
110	67	61	1,17	1,24	78,39	75,64	31,35	30,25
100	65	60	1,00	1,10	65,00	66,00	26,00	26,40
90	64	56	0,84	0,96	53,76	53,76	21,50	21,50
80	51	45	0,71	0,92	36,21	41,40	14,48	16,56
70	45	40	0,72	0,80	32,40	32,00	12,96	12,80

Příklad výpočtu (první řádek) Hodnota výkonu, a poměr výkonu ku výkonu jmenovitému:

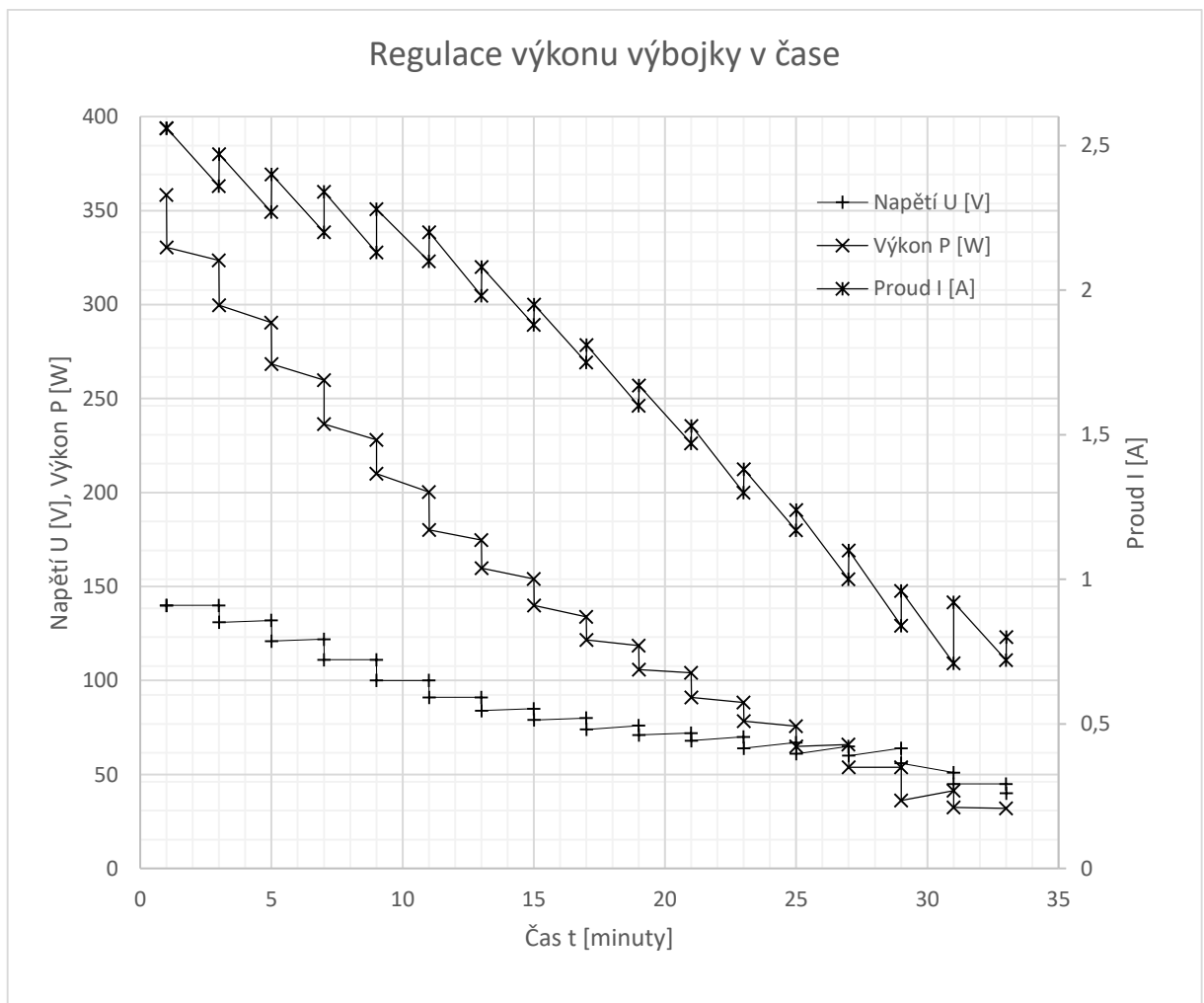
$$P = U_{ob} * I = 140 * 2,56 = 358,4 \quad (4.1)$$

$$P/P_{nom} = \frac{P}{P_{nom}} = \frac{358,4}{250} = 143,36\% \quad (4.2)$$



Obr. 4.1 Zapojení při měření.

V grafu níže je shrnuta regulační zkouška.



5 NÁVRH

5.1 Vstupní obvody

Vstupní obvody, Obr. 5.1, zajišťují základní funkci napájení. První v cestě je pojistka, kterou navrhujeme jako ochranu vedení. U výbojových zdrojů světla se navrhuje na přibližně dvojnásobnou hodnotu jmenovitého proudu. To je 10 A. Pojistka je umístěna mimo desku plošných spojů v těle konstrukce předradníku kvůli snadnějšímu přístupu.

Výstupní výkon až 400W při účinnosti 90% při rozsahu napájecího napětí 85-240V AC. Efektivní hodnota střídavého proudu potom bude:

$$I_{in_RMS} = \frac{P_{out}}{V_{in_min} * \eta} = \frac{400}{85 * 0,9} = 5,228 \text{ A} \quad (5.1)$$

Maximální hodnota střídavého proudu:

$$I_{in_pk} = \sqrt{2} \cdot I_{in_RMS} = \sqrt{2} * 5,228 = 7,395 \text{ A} \quad (5.2)$$

Ztrátový výkon usměrňovače:

$$P_{bridge} = \sqrt{2} \cdot V_f * I_{in_RMS} = \sqrt{2} * 1,0 * 5,228 = 10,456 \text{ W} \quad (5.3)$$

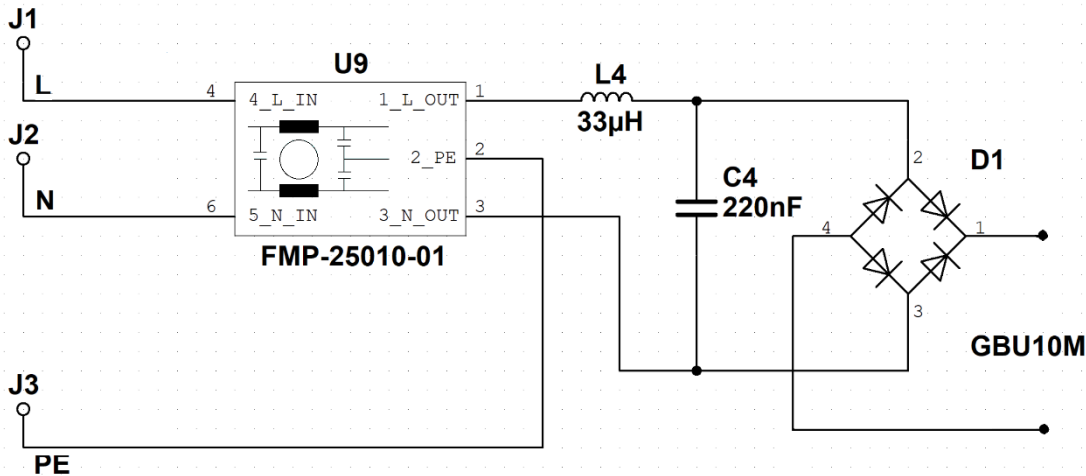
Zde lze vidět, že se už vyplatí použít aktivní usměrňovač.

AC line output filter (LC filtr – L4,C4) I_{hf_spec} volíme přibližně 0,2

$$L_{filtr} \geq \frac{\frac{I_{hf}}{I_{hf_spec}} + 1}{(2 * \pi * f_{sw})^2 * C_{filter}} = \frac{\frac{0,737}{0,2} + 1}{(2 * \pi * 180000)^2 * 220\mu F} \geq 33\mu H \quad (5.4)$$

Následuje EMI filtr. Jedná se o katalogové zapojení uvedené v dokumentaci PFC měniče a integrovaného filtru potlačující souhlasné rušení, který lze běžně zakoupit [18].

Usměrňovač je dvojpulsní a je zapojen jako Graetzův můstek. Využit byl obvod GBU10M s parametry 8A 1000V.



Obr. 5.1 Schéma zapojení vstupních obvodů

5.2 PFC

Zapojení obvodu ICE2PCS01G je převzato z katalogového listu [19]. Jedná se o CCM PFC kontrolér. Pracuje na frekvenci 180 kHz. Výstupní napětí je 370 V DC. Schéma zapojení lze nalézt na Obr. 5.2. Kontrolér je napájen z pomocného měniče z úrovně 15 V. Součástí PFC je soft-start řešený pomocí relé a rezistoru 27 ohmů. Soft start je ovládán signálem z pomocného zdroje, nebo externě pomocí konektoru J8. Kvůli nadproudu při zapnutí je v obvodu umístěna překlenovací dioda D14, která má odlehčit cívce a Schottkyho diodě D14.

Tranzistor T9

Jako spínací prvek byl zvolen tranzistor IPP60R280P6XKSA1, s parametry: závěrné napětí 650V 8,7A trvalý proud při 100°C a odpor v sepnutém stavu 0,28Ω, dále viz katalogový list [20], dále jsou použity i jako spínače plného mostu. Tranzistor je namáhán napětím okolo 400V, avšak kvůli napěťovým překmitům se doporučuje počítat s rezervou. Obvykle používaná hodnota závěrného napětí je okolo 600V.

Střída:

$$D_{on} = 1 - \frac{V_{in_min}}{V_{out}} = 1 - \frac{85}{370} = 0,77 \quad (5.5)$$

Vodivostní ztráty tranzistoru:

$$P_{cont} = I_{in_RMS}^2 * D_{on} * R_{ds(on)} = 5,228 * 0,77 * 0,6 = 12,627 \text{ W} \quad (5.6)$$

Spínací ztráty tranzistoru:

$$P_{sw} = (E_{on} * E_{off}) * f_{sw} = (0,005 + 0,015) * 180000 = 4 \text{ W} \quad (5.7)$$

Celkové ztráty:

$$P_{MOS_{tot}} = P_{cont} + P_{sw} = 12,627 + 4 = 16,627 \text{ W} \quad (5.8)$$

Dioda U14

Použitá dioda je silikon karbidová Schottkyho s parametry 600V závěrné napětí a 3A při 135°C v propustném směru [21]. Diody se navrhuji na střední hodnotu proudu, která v tomto případě činí do 1,5A. Výše uvedená dioda je v tomto případě dostačující.

Ztráty na Schottkyho diodě:

$$P_{diode} = V_f * I_{in_{RMS}} * (1 - D_{on}) = 2 * 5,228 * (1 - 0,77) = 2,4 \text{ W} \quad (5.9)$$

Hlavní cívka PFC

Návrh cívky, pro rozsah napájecího napětí od 85V a 190V do 240V vychází rozdílné hodnoty indukčnosti cívky. Proto je zvolena větší indukčnost pro rozsah 190-240V s tím, že cívka je celkově naddimenzována a na výrobku proběhne testování i pro nižší napětí, případně bude možnost testování i vyšších výkonů. Přepočtené parametry jsou: $D_{on} = 0,486$, $I_{in_{pk}} = 3,3A$. Vliv skinefektu není třeba uvažovat, protože cívka je navinuta VF lankem.

Zvlnění proudu cívkou se volí v rozsahu 15-25%

$$I_{HF} = k * \sqrt{2} * \frac{P_{in_{max}}}{V_{in_{min}}} = 0,22 * \sqrt{2} * \frac{450}{190} = 0,737 \text{ A} \quad (5.10)$$

Špičkový proud cívkou:

$$I_{LPK} = I_{in_{pk}} + \frac{I_{HF}}{2} = 3,3 + \frac{0,737}{2} = 3,67 \quad (5.11)$$

Požadovaná indukčnost cívky:

$$L_{BOOST} \geq \frac{D_{on} * (1 - D_{on}) * V_{out}}{I_{HF} * f_{sw}} = \frac{0,486 * (1 - 0,486)}{0,737 * 180000} \geq 760 \mu\text{H} \quad (5.12)$$

5.2.1 Fyzický návrh cívky:

Postupnou aproximací bylo zvoleno jádro ETD44 s mezerou 4mm z materiálu 3C97.

Tab. 5.1 Hodnoty, ze kterých vychází návrh tlumivky PFC:

Indukčnost L_{BOOST}	760 μ H	Plocha okna S_o	210mm ²
Proud I_{LPK}	8,144A	Objem jádra V_e	17800mm ³
Frekvence f_{sw}	180000	Střední délka závitů l_n	77mm
Délka mezery l_v	4mm	Rel. permitivita materiálu μ_{r_j}	2300
Délka mag. Obvodu l_e	103mm	Rel. permitivita vzduchu μ_{r_v}	1
Průřez jádra A_e	172mm ²	Ztráty materiálu ΔP_V	150 $\frac{kW}{m^3}$
Průřez drátu S_{cu}	0,7mm ²	Měrný odpor vinutí ρ_{cu} při 100°C	0,023 $\mu\Omega$ m

Celkový magnetický odpor tlumivky:

$$R_{m_{celk}} = \frac{1}{\mu_0 * \mu_{r_v}} * \frac{l_v}{A_e} + \frac{1}{\mu_0 * \mu_{r_j}} * \frac{l_e}{A_e} = \quad (5.13)$$

$$\frac{1}{4\pi * 10^{-7} * 1} * \frac{4 * 10^{-3}}{172 * 10^{-6}} + \frac{1}{4\pi * 10^{-7} * 2300} * \frac{103 * 10^{-3}}{172 * 10^{-6}} = 18,7\text{MH}^{-1}$$

Počet závitů:

$$N_{pfc} = \sqrt{R_{m_{celk}} * L_{BOOST}} = \sqrt{18,7 * 10^6 * 760 * 10^{-6}} = 120 \quad (5.14)$$

Ověření maximální indukce v jádře (Pro materiál 3C97 je při 100°C B_{max} 410mT):

$$B_{max} = \frac{L_{BOOST} * I_{LPK}}{N_{pfc} * A_e} = \frac{760 * 10^{-6} * 8,144}{120 * 172 * 10^{-6}} = 0,299\text{T} \quad (5.15)$$

Ztráty v jádře pouze odhadneme, protože tlumivkou pochází proud o frekvenci 100Hz, který se na ztrátách podílí zanedbatelně. Hlavní složku ztrát vytváří pulsující proud o frekvenci 180kHz, který má amplitudu $I_{HF}=0,737\text{A}$. Tento proud se pohybuje v rozmezích sycení jádra od 0 do 250mT s amplitudou 50mT. Podle [22] jsou ztráty odhadnuty na přibližně 150 $\frac{kW}{m^3}$.

$$\Delta P_j = \Delta P_V * V_e = 150000 * 17,8 * 10^{-9} = 2,67\text{W} \quad (5.16)$$

Činitel plnění mědi:

$$K_{pcu} = \frac{S_{cu} * N_{pfc}}{S_o} = \frac{0,7 * 10^{-6} * 120}{210 * 10^{-6}} = 0,4 \quad (5.17)$$

Proudová hustota (pro 110V a 450W je $I_{in_RMS_110}$ 4A):

$$\delta_{cu} = \frac{I_{in_RMS_110}}{S_{cu}} = \frac{4}{0,7} = 5,84A/mm^2 \quad (5.18)$$

Ztráty ve vinutí:

$$\Delta P_{cu} = \left(\rho_{cu} * \frac{l_n * N_{pfc}}{S_{cu}} \right) * I_{in_RMS_110}^2 = \left(0,023 \frac{0,077 * 120}{0,7} \right) * 4^2 = 4,86W \quad (5.19)$$

Celkové ztráty PFC tlumivky:

$$\Delta P_{celk} = \Delta P_j + \Delta P_{cu} = 2,67 + 4,86 = 7,53W \quad (5.20)$$

5.2.2 Návrh výstupního filtru

Filtrační kapacita: $V_{out_ripple_pp}$ musí být menší než 10% V_{out} (39V), zvolíme 12V

$$C_{out} \geq \frac{I_{out}}{2 * \pi * f_{sw} * V_{out_ripple_pp}} = \frac{1,2}{2 * \pi * 180000 * 12} \geq 318\mu F \quad (5.21)$$

S rezervou použijeme 4 kusy kondenzátorů po 100 μ F. Každý má dovolený pracovní proud přibližně 400mA což dohromady vyhovuje pracovnímu proudu 1,2A. Druhé kritérium filtrační kapacity souvisí s frekvencí síťového napětí t_{holdup} pro 50Hz je 20ms:

$$C_{out} \geq \frac{2 * P_{out} * t_{holdup}}{V_{out}^2 * V_{out_min}^2} = \frac{2 * 450 * 0,02}{370^2 * 250^2} \geq 241\mu F \quad (5.22)$$

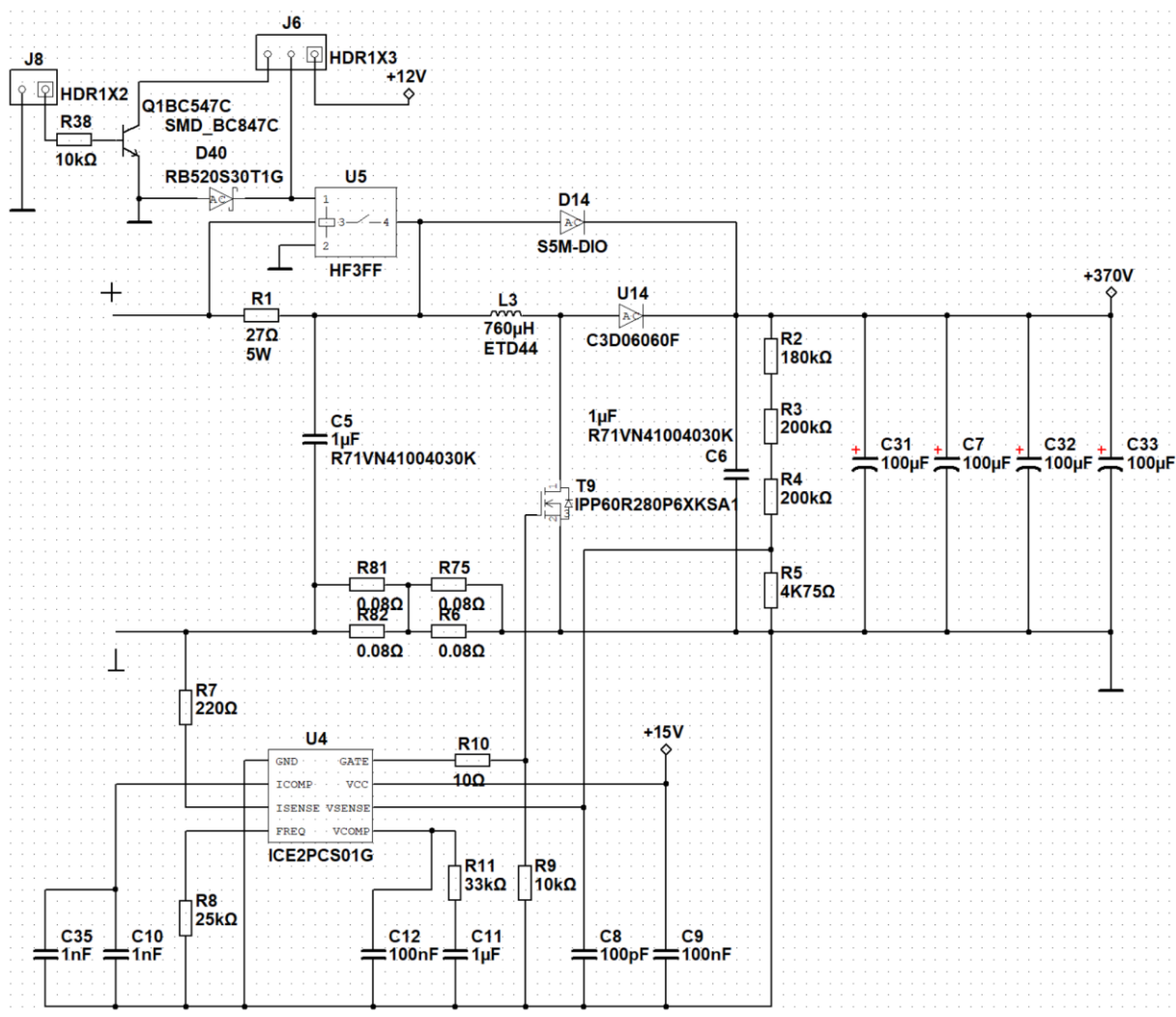
Snímání proudu: Napěťová reference je 0,68V a při $V_{in_min} = 85V$ je I_{LPK} 8,144A. Rezistory jsou určeny na snímání proudu v SMD pouzdře 2512.

$$R_{sense} \leq \frac{0,68}{I_{LPK}} = \frac{0,68}{8,144} \leq 0,08\Omega \quad (5.23)$$

Snímání výstupního napětí: Napěťová reference je 3V a jako R2 je vybrán přesný rezistor 4,75kΩ. Fyzicky je dělič složen ze čtyř rezistorů, kvůli rozložení napětí. Maximální hodnota napětí na jednom rezistoru je 200V.

$$R_{div} = \frac{V_{out} - V_{ref}}{V_{ref}} = \frac{370 - 3}{3} = 580k\Omega \quad (5.24)$$

Hodnoty součástek nelineárního bloku byli převzaty z PFC z přístroje s identickými parametry. Pokud se bude vyskytovat jakákoliv nestabilita, hodnoty lze přesně dopočítat podle aplikačního listu výrobce [19].



Obr. 5.2 Schéma zapojení PFC

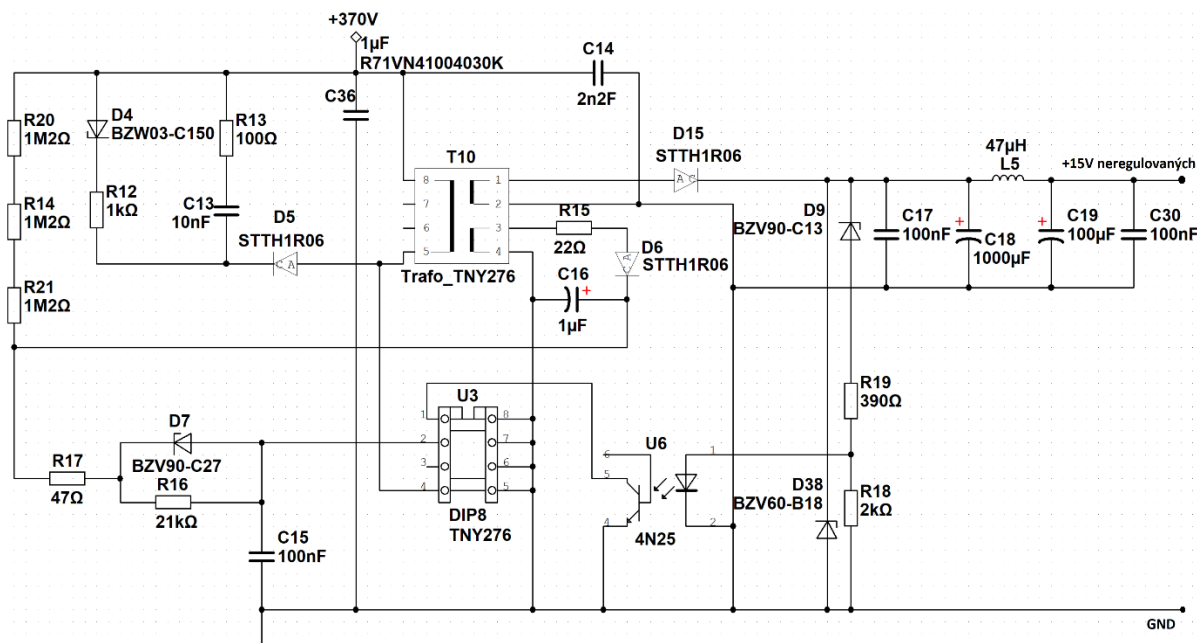
5.3 Pomocný napájecí zdroj

Pomocný napájecí zdroj je řešen obvodem TNY276 [23]. Je to blokující měnič. Zapojení vychází z katalogového listu, kde je uvedeno zapojení pro 12V s mírnou úpravou odlehčovacího členu (použit transil místo zenerovy diody) kvůli maximálnímu závěrnému napětí integrovaného tranzistoru a změnou hodnoty zenerovy diody D9 na 13V. Schéma zapojení na

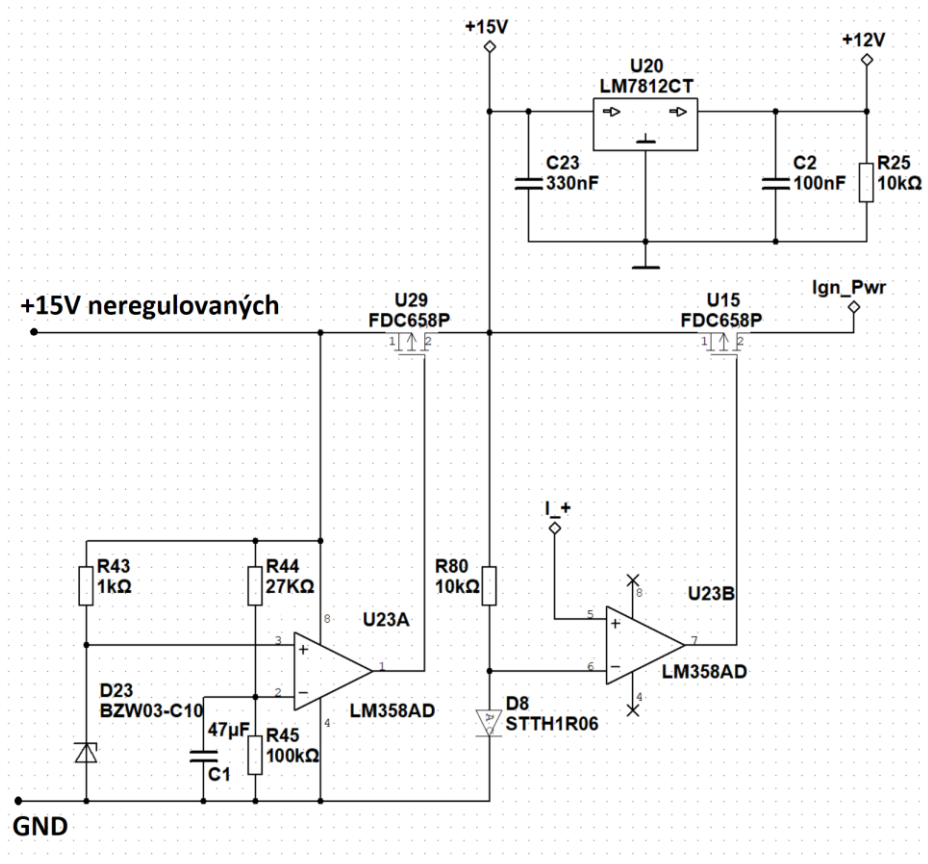
Obr. 5.3. Transformátor je s výstupním napětím 2x15V o výkonu 7W produkční V50113. Pomocný zdroj je napájen z výstupu PFC.

Součástí pomocného zdroje je i soft start a ovládání zapalování viz Obr. 5.4. Po náběhu zdroje dojde k přivedení napětí na komparátor U23A obvodu, dokud zde nedojde k nárůstu napětí nad 10V (reálně mezi 13V a 14V), tranzistor U29 zůstává vypnut. Zpoždění 2s zajišťuje kondenzátor C1. Jeho hodnota byla zjištěna experimentálně, protože elektrolytické kondenzátory mají nezanedbatelný svod proudu. Zenerova dioda D23 s hodnotou 10V zároveň složí jako ochrana proti podpětí.

Na druhý komparátor U23B je přiveden signál ze snímače proudu. Tranzistor U15 slouží k ovládání zapalování. Referenční napětí zajišťuje dioda D8, která má napětí v propustném směru 0,6V. Toto napětí odpovídá proudu výbojky asi 2A. Pokud je proud menší, obvod zapalovače je v provozu. Hodnota 2A je dost vysoká pro výbojky nižších výkonů (250W a níž), nebo pro regulaci na nízkou hodnotu výkonu, nicméně bude nutné tuto citlivost upravit záměnou diody za diodu s nižším napětím (do 0,2V = 0,6A), nebo zesílením vstupujícího signálu.



Obr. 5.3: Schéma zapojení pomocného zdroje



Obr. 5.4: Schéma zapojení podpěťové ochrany, řízení zapalování a 12V zdroje

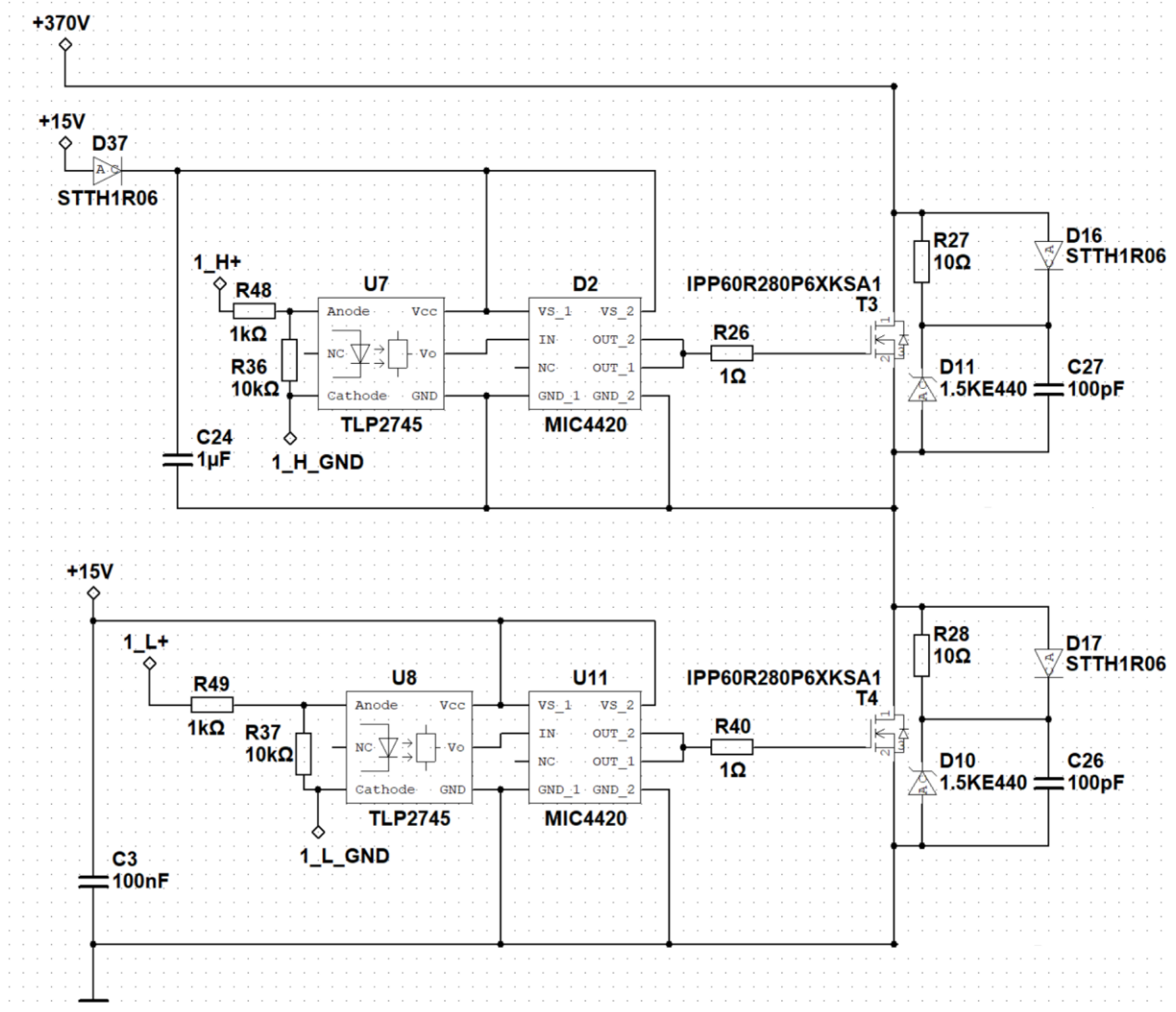
5.4 Budiče tranzistorů

Pro budiče všech tranzistorů byl zvolen obvod MIC4420, který zajišťuje dostatečně rychlé nabíjení a vybíjení gate elektrody tranzistoru (2,5nF za maximálně 35ns) [24] v kombinaci s optočlenem TLP2745 - nízký propagation delay time 120ns, neinvertovaný unipolární výstup s komplementárními tranzistory a vysoká odolnost dv/dt $\pm 30kV/\mu s$ [25]. Optočleny jsou umístěny u všech budičů kvůli srovnání časů při průchodu signálu optočlenem. Na výstupu budiče je zapojen rezistor 1Ω. Předepsaný odpor pro gate tranzistoru je 3,6Ω avšak vnitřní odpor budiče je 2,5Ω což dohromady dává katalogovou hodnotu. Schéma zapojení na Obr. 5.5.

Budiče horních tranzistorů jsou buzeny stejným způsobem a plovoucí buzení zajišťuje dioda D37. Při sepnutí dolních tranzistoru je přizemněn source horního tranzistoru a může dojít k nabití kondenzátoru C24 (kondenzátor je použit bezindukční polypropylenový s dovolenou vysokou strmostí du/dt), který slouží jako zálohovací kondenzátor. Dolní tranzistory otevíráme a zavíráme s neměnným časem. Tím dochází k bezpečnému nabití zálohovacího kondenzátoru C24 a energie uložená v kondenzátoru bezpečně stačí pro ovládání horního tranzistoru, protože kapacita 1μF je řádově větší než kapacita 1nF gate elektrody tranzistoru. Regulace výkonu je proto provedena pouze změnou střídý horní dvojice tranzistorů. Princip je podobný jako u

změny řízení plného mostu změnou fáze otevírání horní a dolní dvojice tranzistorů. Tento způsob řízení byl zvolen s ohledem na to, že nebyl nalezen vhodnější řídicí obvod.

Umístění tohoto obvodu na desce je co nejbližší řídicí elektrodě tranzistoru s co nejmenší zemní smyčkou. U dolních budičů je umístěn blokovací kondenzátor 100nF přímo u napájení budiče MIC4420. Rezistor pro gate je bezindukční SMD. Pro zvýšení bezpečnosti byl při osazování DPS přidán rezistor 10kΩ mezi gate a source tranzistoru.



Obr. 5.5: Schéma zapojení driveru tranzistorů

5.5 Zapalování

Jako zapalovací cívka slouží výkonová tlumivka, na kterou je navinut jeden závit jako primární vinutí. Tranzistorem T2 je spínáno primární vinutí synchronně s řídicími signály ostatních tranzistorů. Proudový impuls je zajištěn kondenzátorem C20. Vybíjení kondenzátoru zajišťuje rezistor R22. Dioda U19 slouží jako ochrana tranzistoru T2 proti přepětovým špičkám. Časování zapalování zajišťuje RC člen R34 a C37. Tento člen vytváří velmi krátké impulsy, kterými je otevírán tranzistor T2. Obvod je napájen z pomocného zdroje pouze za situace, že

5.6 Řídící obvody

Návrh řízení byl proveden podle následujících požadavků:

- Pracovní frekvence zdroje je proměnná v čase, a to v rozsahu 120-150kHz. Způsob a rychlost frekvenční modulace může být nastavitelný.
- Spodní tranzistory jsou spínány s pevnou střídou 45% a horní tranzistory v rozsahu 0-45%.
- Řízení musí zajišťovat proudovou regulaci při rozhoření výbojky, poté zajišťovat regulaci na konstantní výkon, a dále možnost regulace výkonu.
- Musí obsahovat tepelnou a nadproudovou ochranu s blokováním funkce při a po stavu chyby do resetování měniče.

Pro řízení byly vybrány dva obvody TL494 [26] zapojené jako MASTER a SLAVE. MASTER se stará o regulaci střídý měniče a SLAVE má nastavenou střídu na maximální hodnotu. Zpětná vazba je řešena regulací na hodnotu výkonu, nebo na hodnotu proudu. Logiku obstarávají dva operační zesilovače s diodami na výstupu. Výsledná hodnota střídý závisí na tom, která veličina dosáhne dříve maximální požadované hodnoty (paralelní regulátor). Obvod TL494 slouží jako převodník napětí na střídu. Všechny operační zesilovače jsou napájeny stabilizovaným napětím 12V.

Řízení je postaveno na samostatné desce plošných spojů a se základní deskou měniče propojeno hřebínky. Na řídicí desku se dále zapojuje deska s mikrokontrolérem ATXMEGA32A4U [27]. Řídící deska obsahuje 4 samostatné funkční části.

Vstupní parametry

- Na základní desce je umístěn proudový transformátor s převodem 1:100.
- Vstup do A/D převodníku má rozsah 0-1V.
- Rozsah vstupu nastavení střídý u TL494 je 0-5V.
- Proud výbojkou předpokládáme trojúhelníkového průběhu. Efektivní hodnota tohoto proudu je 4,7A při obloukovém napětí 85V u 400W sodíkové výbojky.
- Průběh hodnoty napětí na výbojce konstantní po dobu pulzu a obdélníkového tvaru (předpokládá se chování jako u diody).
- Na základní desce jsou umístěny dva děliče na měření napětí na výbojce (diferenčně) s převodovým poměrem 663kΩ/3,3kΩ

Snímač proudu

Měření proudu vykonává měřicí transformátor proudu B82801B [28] s převodem 1/100, maximálním proudem 20A a maximální strmostí napětí na výstupu 50V/μs.

Výpočet špičkové hodnoty proudu kvůli návrhu snímacího rezistoru:

$$I_{výb_max} = I_{výb_eff} * \sqrt{3} = 4,7 * \sqrt{3} = 8,14A \quad (5.27)$$

S rezervou počítáme proud 10A a velikost snímacího rezistoru je:

$$R_{sense_tr} = \frac{V_{sense_max} * \text{převod}}{I_{výb_max}} = \frac{2,68 * 100}{10} = 26,8\Omega \quad (5.28)$$

Ověření maximální povolené indukce (200mT) v jádře. Hodnota střídavy $D_{onfb} = 45\%$, Průřez jádra $A_{eI} = 2,5 * 10^{-6} m^2$, $nS = 100$:

$$B_{max_isense} = \frac{V_{sense_I_max} * D_{onfb}}{nS * A_{eI} * f_{min}} = \frac{2,68 * 0,45}{100 * 2,5 * 10^{-6} * 120000} = 40mT \quad (5.29)$$

Použit je proto rezistor R61 o hodnotě 27Ω. Před snímacím rezistorem je umístěn usměrňovač, protože nelze filtrovat signál o střídavé hodnotě (střední hodnota je 0). Napětí na rezistoru je filtrováno dolní propustí druhého řádu (střední hodnota z trojúhelníkového průběhu je 1/2), která byla navržena v programu FilterPro Desktop s mezní frekvencí 15kHz (desetina pracovní frekvence měniče) Nejlepší parametry vykazoval typ Butterworth. Jako operační zesilovače je zvolen obvod TL974ID obsahující 4 operační zesilovače s dostačující dosažitelnou strmostí 5V/μs, typu rail to rail [29]. Schéma zapojení je umístěno na Obr. 5.7.

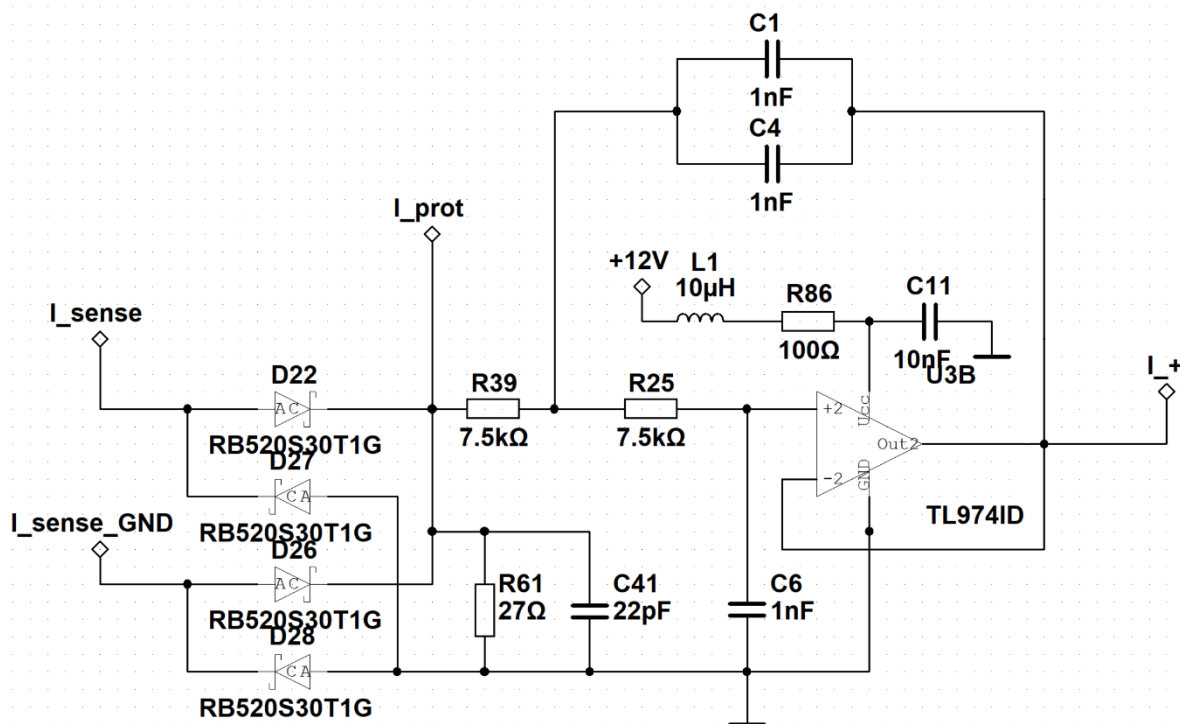
Výstupní napětí bude (pro trojúhelníkový signál $I_{eff} = \sqrt{3} * I_{max}$):

$$U_{isense_bw} = \frac{V_{sense_max}}{2} = \frac{2,68}{2} = 1,34V/10A \text{ neboli } 1,34V/5,77A_{eff} \quad (5.30)$$

Z rovnic vyplývá, že převodník proudu na napětí má převod $5,77A_{eff}/1,35V$. Výstup z převodníku přivádíme na vstup A/D převodníku mikrokontroléru přes dělič 1,35/1 složený z rezistorů 5k6 a 7k5. Zároveň musíme tento signál přivést na vstup PWM kontroléru TL494, avšak jej první musíme zesílit na úroveň 5V. K tomu slouží neinvertující zesilovač U3A se zesílením 3,7.

$$k_{ozneinv} = 1 + \frac{R78 + R4}{R77} = \frac{2700}{1000} = 3,7 \quad (5.31)$$

Celkový převod snímače proudu pro TL494 je 10A/5V. To znamená, že obvod TL494 začne omezovat střídavu až u hodnoty 10A, což odpovídá efektivní hodnotě proudu 5,7A. Toto je ještě přípustné, protože je lepší provádět rozhoření výboje při zvýšeném proudu. Pokud bude docházet k jakýmkoliv problémům v provozu, lze zesílení upravit prostou změnou hodnoty odporu.



Obr. 5.7: Schéma zapojení měření proudu

Snímání napětí

je provedeno dvěma děliči umístěnými na základní desce. Z těchto děličů je přiveden signál na dva operační zesilovače U28A a U28B zapojené jako sledovače napětí kvůli impedančnímu oddělení, a poté na vstup diferenčního zesilovače U28C s filtrem se stejnými parametry, jako v případě převodníku proudu realizovaného operačním zesilovačem U28D. Schéma zapojení je na Obr. 5.8.

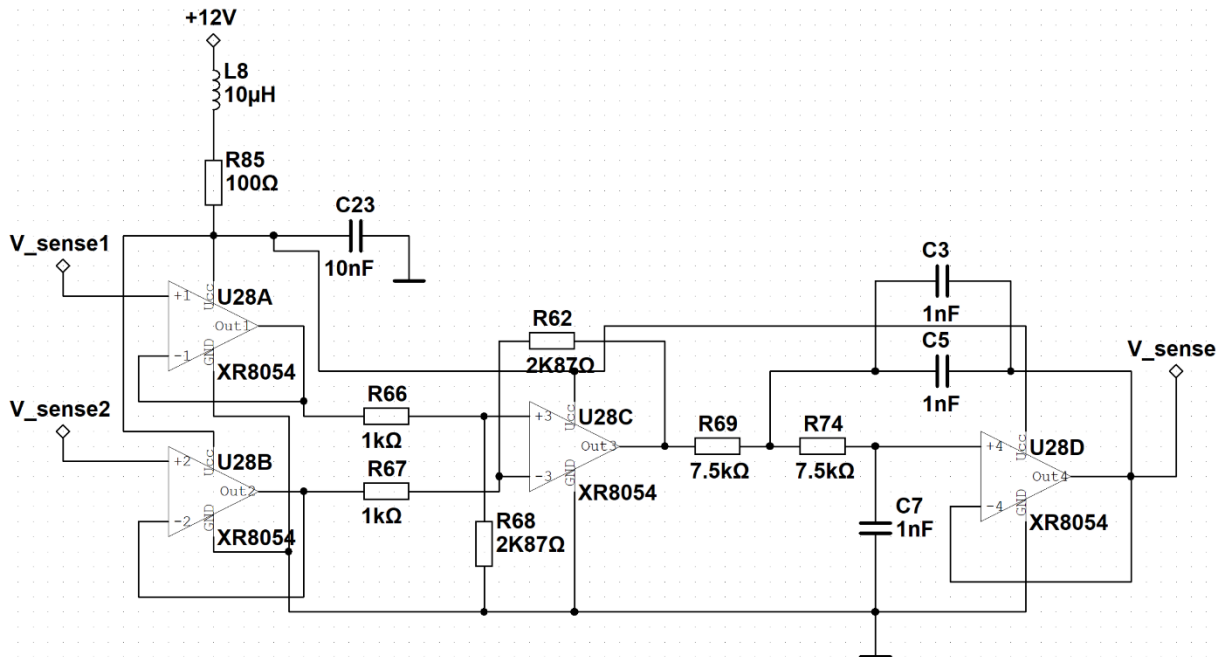
První přívod výbojky střídavě připojujeme k nule a k napájecímu napětí. Zde je umístěn první dělič napětí. Druhý konec výbojky je připojen na tlumivku, kde se očekává napětí vždy o obloukové napětí vyšší, pokud je první strana připnuta k nule. A naopak o obloukové napětí nižší, pokud je první konec připnut k napájecímu napětí plného mostu. Mezi tlumivku a výbojku je umístěn druhý dělič. Protože se polarita napětí na výbojce mění a rozdílový zesilovač je napájen nesymetricky, polovina průběhů není změřena. Střední hodnota napětí na výstupu z měřicího obvodu je potom poloviční, než kdyby se výstup usměrnil a byly změřeny obě polarity napětí.

Jako operační zesilovač byl vybrán obvod XR8054 s velkou rychlostí přeběhu $190\text{V}/\mu\text{s}$ kvůli očekávané velké strmosti napětí na rezistorovém děliči (jeden konec výbojky je připojen ke středu pravé větve plného mostu, kde je očekávána strmost $4\text{kV}/\mu\text{s}$ podobně jako na opačné straně). OZ je typu rail to rail [30].

Rozdílový zesilovač:

$$U_{dif} = (V_{sense2} - V_{sense1}) * \frac{R62}{R66} = \frac{2870}{1000} = 2,87 * \Delta U \quad (5.32)$$

Výsledný převod je 140V/1V. Hodnota 140V je zvolena s ohledem na vlastnosti nových výbojek, kdy se obloukové napětí může pohybovat až 130V. Signál je poté přiváděn na vstup AD převodníku mikrokontroléru, kde můžeme provádět kalibraci).



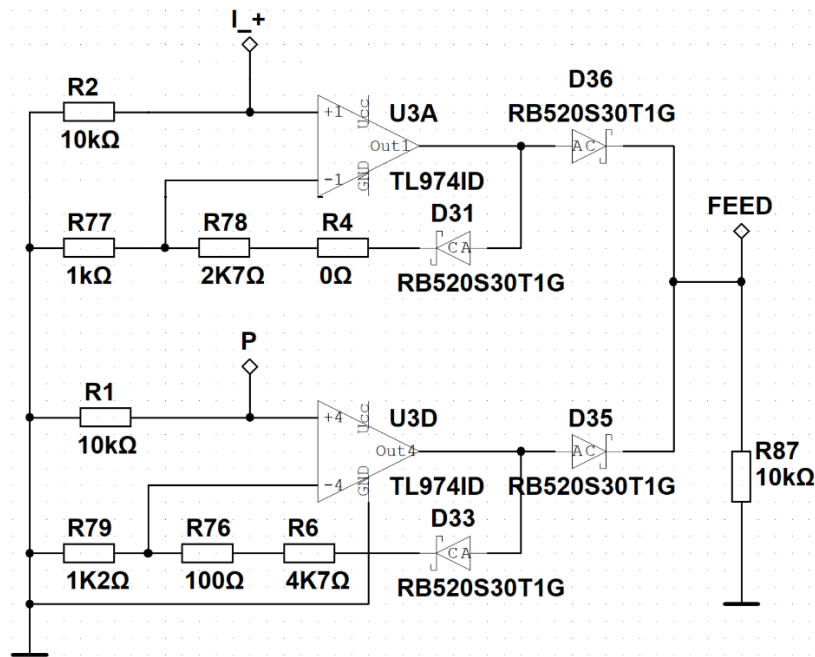
Obr. 5.8: Schéma zapojení měření napětí

Úprava signálu pro TL494

Napětí, se kterými pracuje obvod TL494, jsou rozdílná, než dokáže zpracovat ATXMEGA32A4U Proto jsou použity dva operační zesilovače U3A a U3D, které slouží jako člen OR. Na první přivádíme hodnotu proudu a na druhý přivádíme výstup s D/A převodníku s hodnotou výkonu. Výstup tohoto členu je přiveden do zpětné vazby obvodu TL494. Soustava bude regulována na tu hodnotu (regulace na konstantní výkon s maximem proudu), která dosáhne dříve svého maxima. Schéma zapojení je na Obr. 5.9.

D/A převodník mikrokontroleru má rozsah výstupního napětí 0-1V. Toto napětí musíme zesílit pětkrát, aby s ním bylo možno ovládat obvod TL494

$$k_{U3D} = \frac{R6 + R76}{R79} = \frac{100 + 4700}{1200} = 5 \quad (5.33)$$

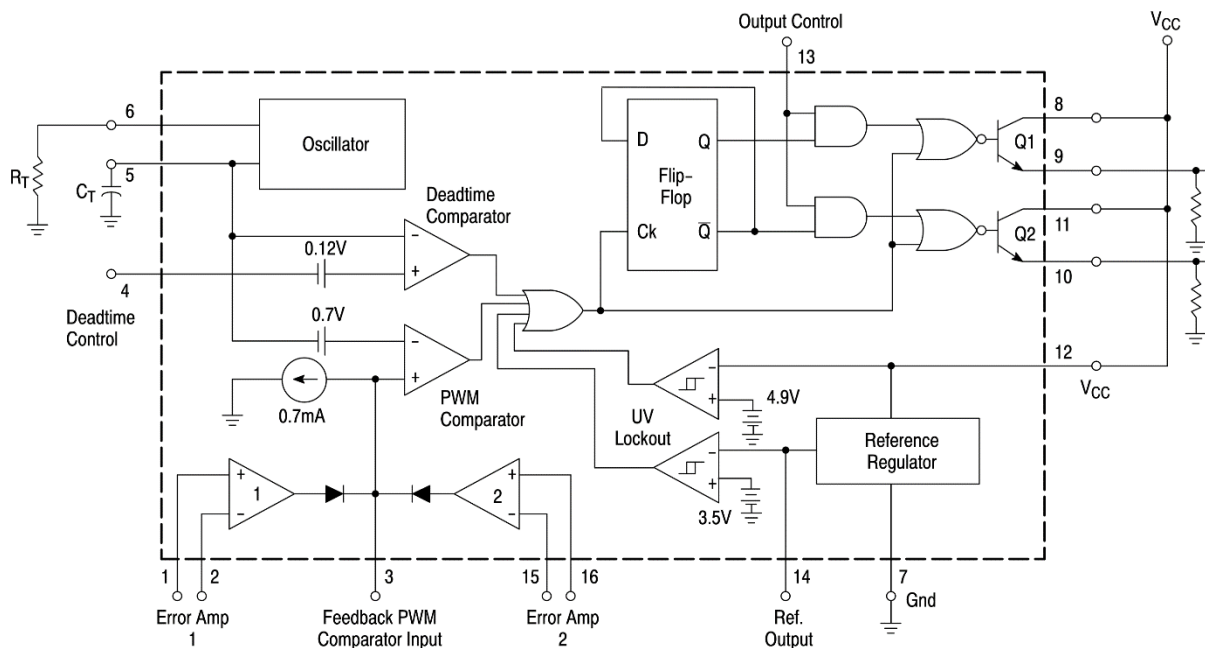


Obr. 5.9: Schéma zapojení paralelní regulace

TL494

Samotné řízení provádí dvojice obvodů TL494. Obvod U1 je zapojen jako Master a U2 jako Slave. Obvod U2 generuje impulsy synchronně s obvodem U1 s konstantní střídu 45%. Jeho dva operační zesilovače Error Amp 1 a 2 jsou využity jako komparátory. První z nich je použit jako nadproudová pojistka, kdy při překročení 15A ve špičce dojde k překlopení obvodu a omezení střídy na 0%. Druhý Error Amp je využit pro tepelnou ochranu. Z PWM výstupu U2 jsou řízeny dolní spínače plného mostu. Aby byl zajištěn synchronní chod plného mostu a nedocházelo ke spínání horních tranzistorů po delší čas než spodních, jsou tyto výstupy připojeny na kolektory výstupních tranzistorů obvodu U1. Pomocný obvod složený z tranzistorů Q8 a Q9 slouží k trvalému odstavení měniče v případě výskytu poruchy – Při překlopení výstupu Feedback PWM přidržuje hodnotu 5V na tomto vstupu a dojde k omezení střídy na 0%. Dále je vyveden signál Error out, který podává informaci mikrokontroléru o funkčnosti nebo nefunkčnosti obvodu. Vnitřní zapojení ilustruje obrázek Obr. 5.10.

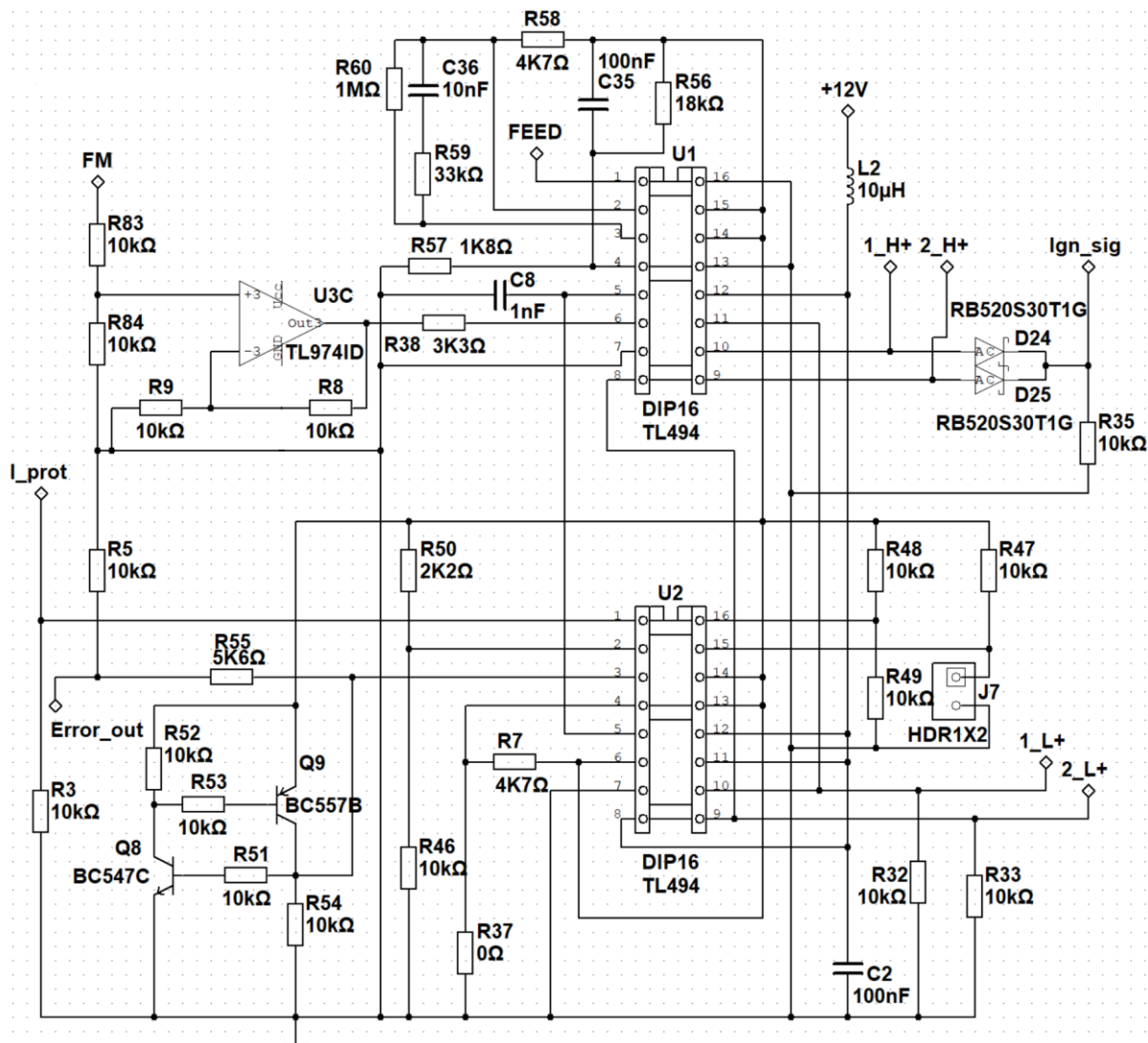
Obvod U1 ovládá horní dvojici spínačů plného mostu. Aby byl zajištěn synchronní chod s obvodem U2 jsou kolektory výstupních tranzistorů připojeny na výstupy emitorů obvodu U2. Pin U1 Output control musí být připojen do nuly protože. Kdyby byl zapojen stejně jako v případě U2, kdy jsou výstupní tranzistory spínány střídavě, zhruba v polovině případů by docházelo k nerozběhnutí měniče. Pokud však výstupy U1 spínáme současně, je zajištěna vždy správná funkce a časování řídí obvod U2.



Obr. 5.10: Schéma vnitřního zapojení TL494

Citlivost zpětné vazby je nastavena prvním Error Amp, který má nastaveno zesílení asi 1000x a tvoří proporcionální složku regulátoru. Integrovaná část regulátoru je tvořena kondenzátorem C36. Hodnoty vycházejí z předchozího zapojení, které se osvědčilo jako stabilní. Na vstup tohoto operačního zesilovače je přiveden signál zpětné vazby z „členu OR“

Rozmítání frekvence je realizováno pomocí změny napětí virtuální zemně časovacího rezistoru R38. Časovací kondenzátor C8 o hodnotě 1nF tvoří stabilní prvek (kapacitu v čase je obtížné měnit), zatímco rezistor R38 sloužící jako proudový zdroj využíváme pro změnu hodnoty frekvence. Buď můžeme měnit hodnotu odporu např. digitálním potenciometrem, nebo měnit napětíovou úroveň zemně, ke které je rezistor připojen (v obou případech měníme hodnotu proudového zdroje nastavujícího frekvenci). Zvolena byla možnost s posouváním napětí, protože ke změně dochází lineárně, a jako zdroj této frekvenční modulace můžeme použít cokoliv. O potřebnou úpravu signálu pro frekvenční modulaci, a jako impedanční oddělení se stará operační zesilovač U3C, který je zapojen jako neinvertující. Frekvence měniče pro nulovou úroveň napětí je nastavena na 150kHz a při offsetu 1V frekvence klesne na 120kHz. Velkou výhodou je, že tímto způsobem řízení neměníme střihu při změně pracovní frekvence. Celkové zapojení obou obvodů je na Obr. 5.11.



Obr. 5.11: Schéma zapojení obvodů TL494.

ATXMEGA32A4U

Druhá deska plošných spojů obsahuje mikrokontrolér ATXMEGA32A4U. Tento obvod provádí násobení napětí a proudu, generuje signál pro frekvenční modulaci a nastavuje hodnotu výkonu měniče. Jako napěťová reference všech A/D i D/A převodníků je použita interní hodnota 1V. Diody D1, D8 a D29 slouží jako ochrany proti přepětí na vstupech A/D převodníků. Kondenzátory C2, C11 a C12 slouží spolu s rezistory R6, R8 a R74 jako pomocné filtry pro A/D převodníky. Zapojení na Obr. 5.14.

Mezní frekvence filtrů:

$$f_{mez} = \frac{1}{2 * \pi * R * C} = \frac{1}{2 * \pi * 7500 * 1 * 10^{-9}} = 21\text{kHz} \quad (5.34)$$

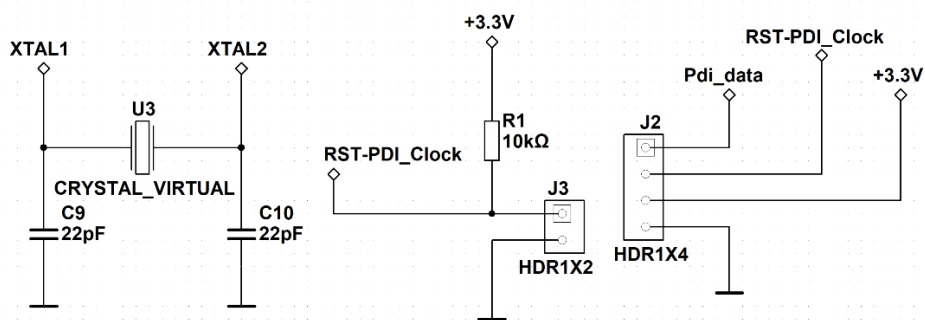
RGB led diagnostikuje stav mikrokontroléru. Obvod používá externí krystal 16MHz a je napájen lineárním stabilizátorem 78L33 3,3V, viz Obr. 5.13. Nastavení požadovaného výkonu provádíme změnou napětí na vstupu A/D převodníku PA2 (můžeme připojit potenciometr na konektor J12).

Deska s mikrokontrolerem je oddělitelná od řídicí desky kvůli předpokládaným úpravám funkčnosti a možnosti osadit desku jinou. Základní funkce měniče a veškeré ochrany jsou na mikrokontroleru nezávislé a měnič lze za určitých okolností provozovat i bez něj. Pouze regulátor výkonu je nenahraditelný.

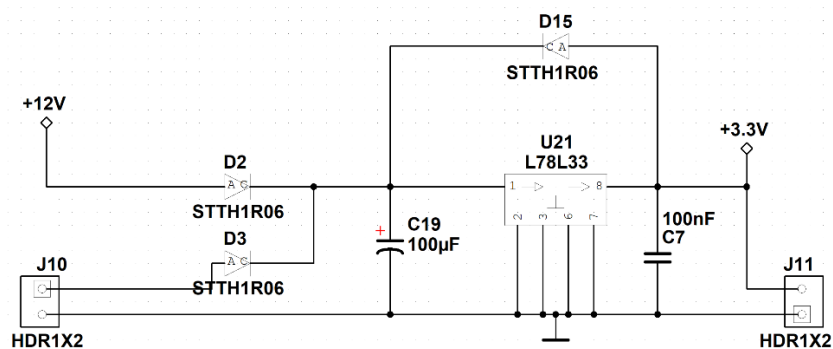
Frekvenční modulaci je možné provádět jakýmkoliv průběhem napětí. Pro testování je naprogramován pilovitý průběh o frekvenci přibližně 500Hz. Po sestavení měniče bude probíhat testování vhodných průběhů.

Regulaci a stabilitu měniče bude zajišťovat naprogramovaný PI nebo PID regulátor. Jeho charakteristika bude odladěna na funkčním prototypu.

Pomocné obvody zajišťující funkčnost mikrokontroléru na Obr. 5.12



Obr. 5.12: Vlevo externí krystal, uprostřed reset, napravo linka programování.



Obr. 5.13: Stabilizátor 3,3V s různými možnostmi napájení.

5.7 Výkonový měnič

Výkonová část měniče se skládá z plného mostu. Tato část obsahuje i zapalování výboje pomocí transformátoru T7 a tranzistoru T2. Dále je zde zakomponováno měření proudu proudovým transformátorem T8 a měření napětí pomocí dvou děličů. Na každém tranzistoru je osazen DRC odlehčovací obvod. Hlavní výkonová tlumivka T7 omezuje proud výbojkou, Měření napětí je prováděno pomocí rozdílového zesilovače, protože na zátěži je každou půlperiodu rozdílné napětí. Jeden dělič musí být umístěn i na větvi, kde se při zapalování výboje objevuje napětí až 5kV. Kdyby dělič nebyl ošetřen proti tomuto napětí, došlo by ke zničení rezistorů děliče, nebo k přeskoku výbojů mezi jednotlivými rezistory. Z tohoto důvodu je instalováno relé (na testování je osazeno relé do 10kV), které dělič odpojí od vysokého napětí v případě, kdy je aktivní činnost zapalovače.

Přenos signálu mezi řídicí deskou a budiči tranzistorů je řešen pomocí proudové smyčky, kdy je zem svedena na jedno místo u propojovacích hřebínků a proud ovládající optočleny teče ve smyčce mezi řídicí deskou. Toto řešení je odolnější proti zarušení.

Ochranu tranzistorů zajišťují transily 1.5KE440A s napětím v závěrném směru 418-462V s maximálním vypínacím napětím 376V [31]. Kapacita transilu je zároveň využita jako kondenzátor odlehčovacího DRC členu. V případě potřeby lze však kapacitu zvětšit.

Návrh cívky:

Výkonová cívka musí omezovat proud tekoucí výbojkou ideálně tak, že při napájecím napětí 400V a maximální střídě měniče, může výbojkou protéci její jmenovitý proud 4,7A.

Při trojúhelníkovém průběhu proudu je maximální hodnota proudu:

$$I_{PWR_PK} = \sqrt{3} * I_{jm} = \sqrt{3} * 4,7 = 8,14A \quad (5.35)$$

Tento proud musí protéct tlumivkou za čtvrt periody při horní pracovní frekvenci 150kHz:

$$\frac{1}{4} t_{per} = \frac{1}{4 * f_{sw}} = \frac{1}{4 * 150000} = 1,666 * 10^{-6}s \quad (5.36)$$

Hodnota indukčnosti výkonové tlumivky ($dt=1,6\mu s$ a $di=8,14A$):

$$L_{PWR} = \frac{(U_{cc} - U_{výb}) * dt}{di} = \frac{(400 - 85) * 1,666 * 10^{-6}}{8,14} = 65\mu H \quad (5.37)$$

Tlumivky se navrhují s přibližně 10-20% nadhodnocením indukčnosti, protože s indukci v jádře a teplotou hodnota indukčnosti klesá. Nejvyšší bližší hodnota indukčnosti v řadě je 76uH, proto v návrhu počítáme s touto hodnotou.

Postupnou aproximací bylo zvoleno jádro ETD39 s mezerou 2mm z materiálu 3C97.

Tab. 5.2 Hodnoty potřebné k návrhu výkonové tlumivky pro omezení proudu výbojkou:

Indukčnost L_{PWR}	76 μ H	Plocha okna S_o	178mm ²
Proud I_{LPK}	10A	Objem jádra V_e	11500mm ³
Frekvence f_{sw}	150000	Střední délka závitů l_n	69mm
Délka mezery l_v	2mm	Rel. permitivita materiálu μ_{r_j}	2300
Délka mag. Obvodu l_e	78mm	Rel. permitivita vzduchu μ_{r_v}	1
Průřez jádra A_e	125mm ²	Ztráty materiálu ΔP_V	400 $\frac{kW}{m^3}$
Průřez drátu S_{cu}	2mm ²	Měrný odpor vinutí ρ_{cu} při 100°C	0,023 $\mu\Omega$ m

Celkový magnetický odpor tlumivky:

$$R_{m_{celk}} = \frac{1}{\mu_0 * \mu_{r_v}} * \frac{l_v}{A_e} + \frac{1}{\mu_0 * \mu_{r_j}} * \frac{l_e}{A_e} = \quad (5.38)$$

$$\frac{1}{4\pi * 10^{-7} * 1} * \frac{2 * 10^{-3}}{125 * 10^{-6}} + \frac{1}{4\pi * 10^{-7} * 2300} * \frac{78 * 10^{-3}}{125 * 10^{-6}} = 12,9\text{MH}^{-1}$$

Počet závitů:

$$N_{PWR} = \sqrt{R_{m_{celk}} * L_{PWR}} = \sqrt{12,9 * 10^6 * 76 * 10^{-6}} = 31 \quad (5.39)$$

Ověření maximální indukce v jádře (Pro materiál 3C97 je při 100°C B_{max} 410mT):

$$B_{max} = \frac{L_{PWR} * I_{LPK}}{N_{pfc} * A_e} = \frac{75 * 10^{-6} * 10}{31 * 125 * 10^{-6}} = 0,193\text{T} \quad (5.40)$$

$$\Delta P_j = \Delta P_V * V_e = 400000 * 11500 * 10^{-9} = 4,6\text{W} \quad (5.41)$$

Činitel plnění mědi:

$$K_{pcu} = \frac{S_{cu} * N_{pfc}}{S_o} = \frac{2 * 10^{-6} * 31}{178 * 10^{-6}} = 0,35 \quad (5.42)$$

Proudová hustota:

$$\delta_{cu} = \frac{I_{RMS}}{S_{cu}} = \frac{10}{2} = 2,9A/mm^2 \quad (5.43)$$

Ztráty ve vinutí:

$$\Delta P_{cu} = \left(\rho_{cu} * \frac{l_n * N_{PWR}}{S_{cu}} \right) * I_{inRMS110}^2 = \left(0,023 \frac{0,077 * 31}{2} \right) * 5,8^2 = 0,92W \quad (5.44)$$

Celkové ztráty výkonové tlumivky:

$$\Delta P_{celk} = \Delta P_j + \Delta P_{cu} = 4,6 + 0,92 = 5,52W \quad (5.45)$$

5.8 Návrh chlazení

Velikost použitého chladiče byla vybrána až po výrobě desek plošných spojů. Byl použit chladič typu T88 o parametrech 1,7°C/W pro 10cm z katalogu [32] o délce 15cm a hliníkový plech o tloušťce 5mm z jedné strany překrývající celou desku plošného spoje. Plech zároveň slouží jako opora a mechanické zpevnění desky plošného spoje. Tepelný výkon chladiče T88 je při dovoleném oteplení 40°C:

$$P_{t88} = \frac{l}{10} * \frac{T_{\Delta}}{\kappa} = \frac{15}{10} * \frac{40}{1,7} \approx 35W \quad (5.46)$$

Celkový dovolený tepelný výkon je odhadnut na 50W, avšak to platí pouze při pasivním chlazení. Při oživování byl použit ventilátor k ofukování chladiče, který dovolený tepelný výkon výrazně zvyšuje. Při oživování byla funkce PFC a hlavního měniče testována zvlášť, proto je výkon provizorního chlazení více než dostatečný.

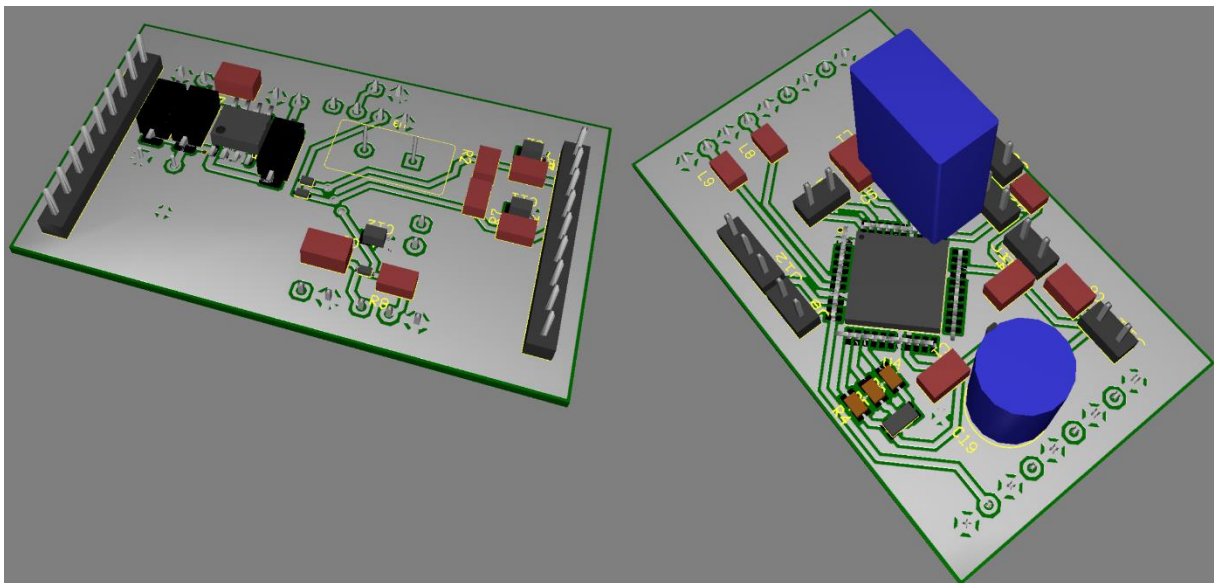
5.9 Návrh a výroba desek plošných spojů

K návrhu byl použit program Multisim, ve kterém byly vytvořeny knihovny se součástkami a Ultiboard, ve kterém byla navržena samotná deska a některá pouzdra součástek. Nejvyšší časová náročnost spočívala ve vytvoření nestandardních modelů součástek, které knihovny neobsahují. Zejména cívky, optočleny, filtry a relé.

Navrženy jsou tři samostatné desky pospojované kolíkovou lištou (hřebínky). Všechny desky jsou navrženy jako dvouvrstvé s omezeným počtem prokovev kvůli snadnější ruční výrobě. Převážná většina součástek je typu SMD, kvůli nižšímu vlivu parazitních jevů. Zemně je rozložena do hvězdy a místa se zvýšeným proudovým namáháním jsou vylita cínem. Izolační vzdálenosti mezi místy s potenciálem vyšším než 48V jsou 1,5mm. U VN výstupu z výkonové tlumivky je izolační vzdálenost 6mm s přípravou na frézování a obklopeno pouze zemí. Polygon spojený se zemí je taky pod každou tlumivkou a slouží k odstínění součástek osazených z druhé strany desky.

ATXMEGA32A4U

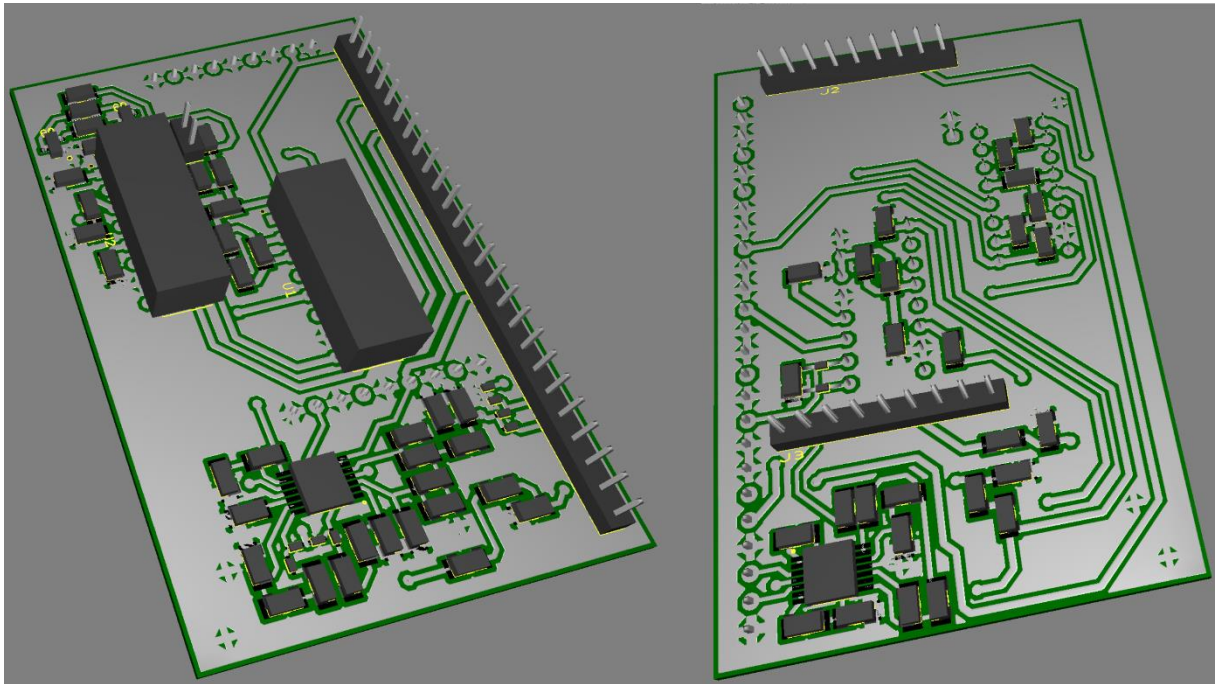
Deska je navržena jako oboustranná s oboustranně vylitým polygonem připojeným na zem. Kromě propojovacích konektorů obsahuje minimum THT součástek, které jsou osazeny seshora, protože součástky nesmí kolidovat s obvody TL494 v THT provedení na řídicí desce. Izolační vzdálenosti na desce jsou 0,254mm. Oba pohledy můžeme vidět na Obr. 5.15.



Obr. 5.15: Vizualizace desky s mikrokontrolerem. Levá strana Bottom, pravá Top

Deska ovládání

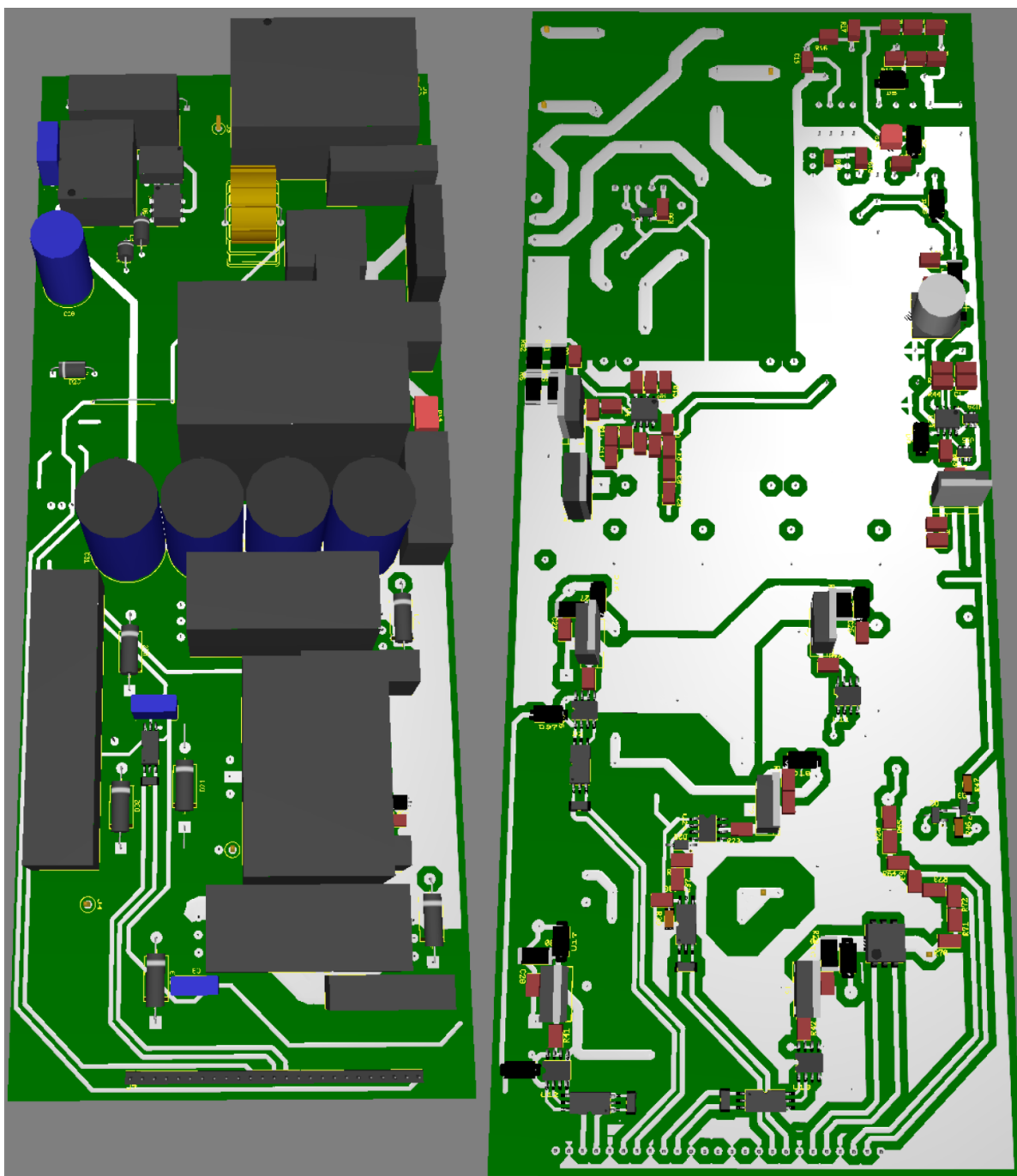
Oboustranná deska s minimální výškou součástek a oboustranně vylitým polygonem připojeným k zemi. Izolační vzdálenosti jsou 0,4mm. Pasivní součástky jsou umístěny co nejbližší k operačním zesilovačům, a napájení k zesilovačům je přivedeno vždy z druhé strany plošného spoje. Vizualizace je na Obr. 5.16, s rozdílem osazení hřebínků 1x9 typu zástrčka.



Obr. 5.16: Vizualizace desky řízení. Levá strana Bottom, pravá Top

Základní deska

Základní deska byla navržena s maximální šířkou 100mm kvůli snadnějšímu umístění na chladič. Ze spodní strany je kromě síťové části vylitý polygon připojený na zem. Vrchní strana obsahuje propojení síťového napětí a napětí 370V napájecího hlavní měnič. Budiče tranzistorů jsou umístěny co nejbliž k tranzistorům, které jsou symetricky rozmístěny po desce. Deska je rozdělena na tři hlavní části. Síťová část s PFC, pomocný zdroj a hlavní měnič, viz Obr. 5.17. Deska je navržena jako prototypová, tak aby byl k jednotlivým součástkám přístup kvůli měření. Výkonové prvky jsou umístěny ze spodní strany, kde jsou připevněny ke chladiči.



Obr. 5.17: Vizualizace základní desky. Levá strana top, pravá bottom.

6 OŽIVENÍ A MĚŘENÍ

V této části jsou uvedeny postupy ožívání obvodů, zkoušky jednotlivých desek plošných spojů a následné měření parametrů jednotlivých částí obvodu. Při ožívání bylo postupováno od nejmenších funkčních celků, aby byla zaručena správná funkce celého měniče.

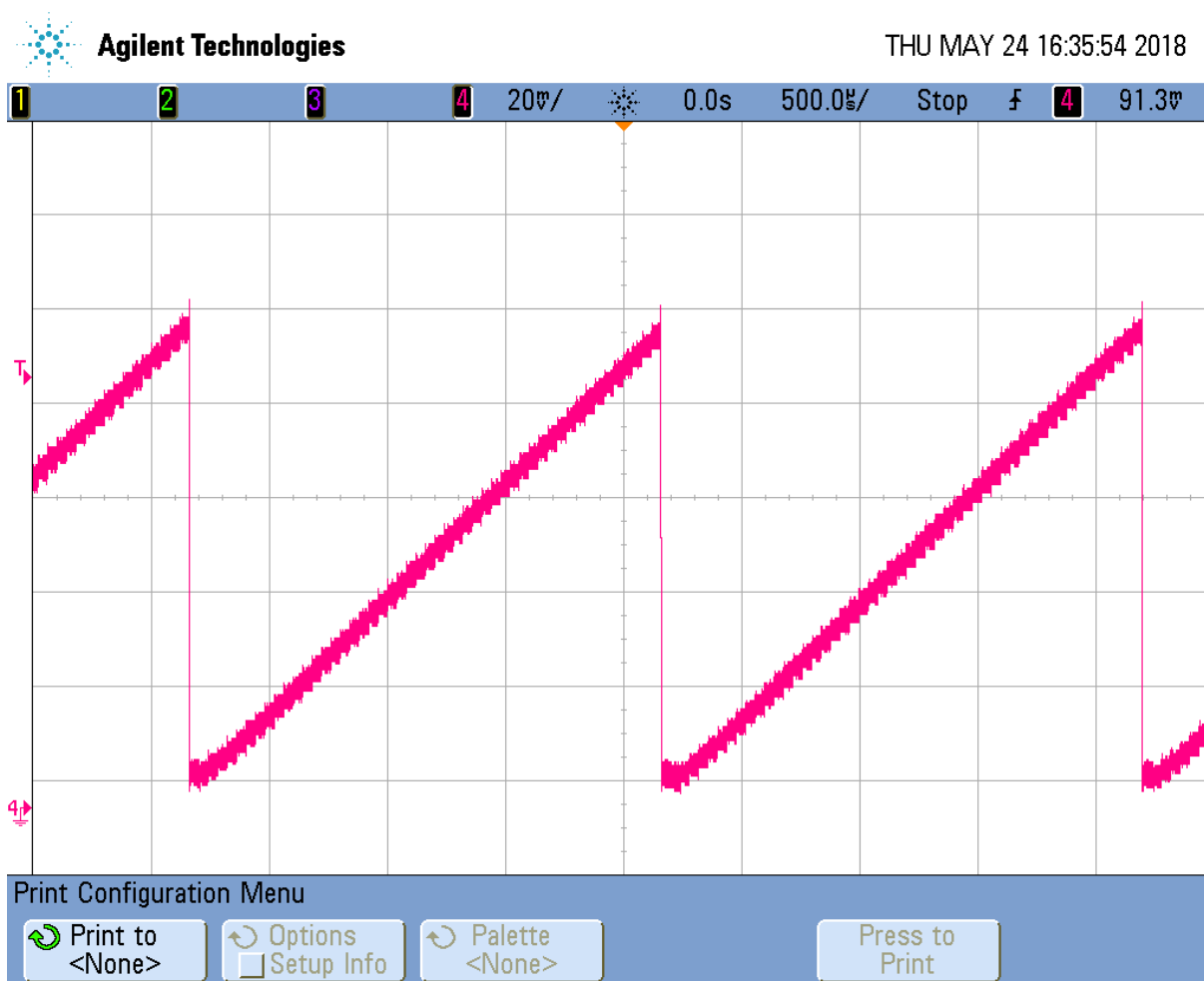
6.1 ATXMEGA32A4U

Oživení

Deska byla překontrolována na přítomnost zkratu a proběhla kontrola hodnot osazených součástek. Postupným zvyšováním napětí byla zkontrolována činnost stabilizátoru. Hodnota napětí se ustálila na 3,297V. Poté byl nahrán program do mikrokontroléru.

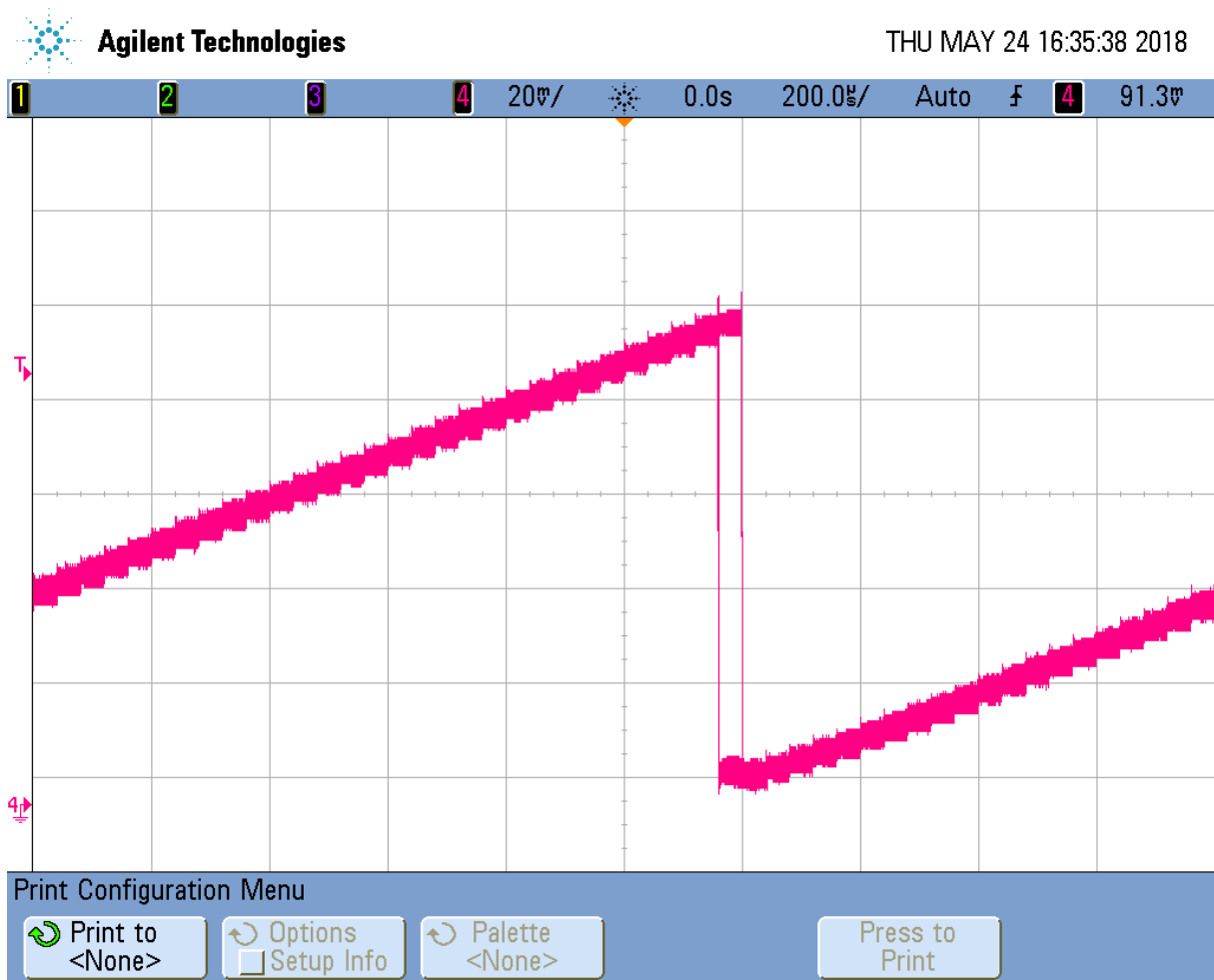
Měření

Funkce generování signálu pro frekvenční modulaci. Frekvence je 500Hz, amplituda 1V na Obr. 6.1



Obr. 6.1: Pilovitý průběh výstupu frekvenční modulace.

Ověření záměrné nestability, která zaručuje náhodnější rozkmit frekvence. Náhodné střídání hodnoty posledního bitu, viz Obr. 6.2.



Obr. 6.2: Detail pilovitého průběhu.

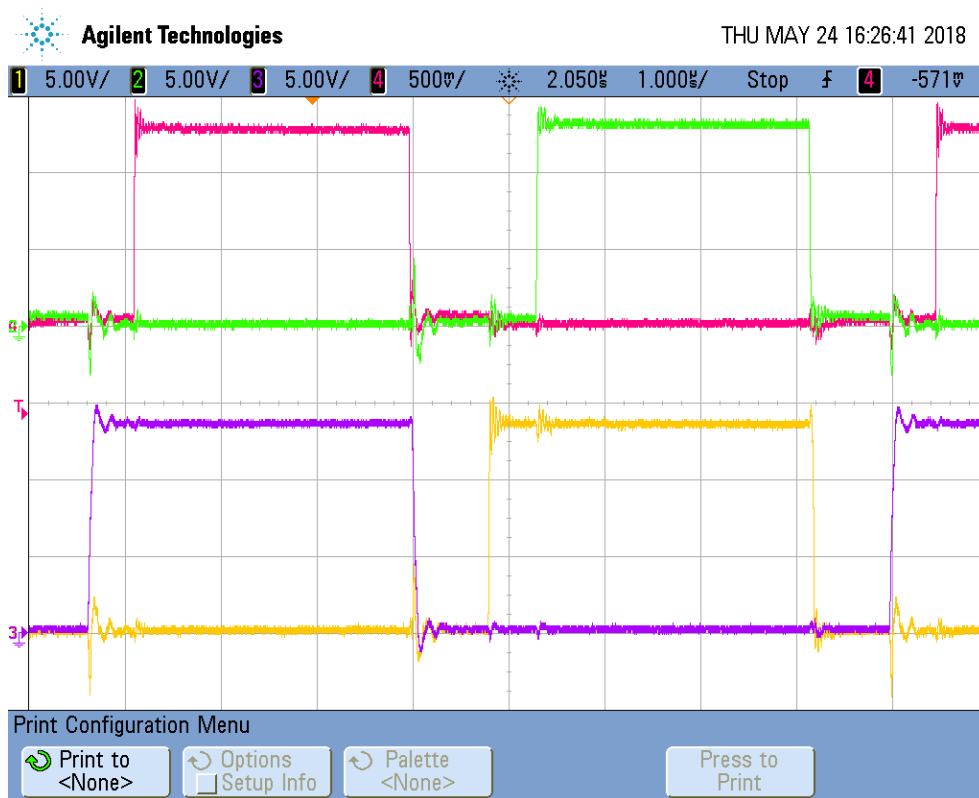
6.2 Deska ovládání

Stejný postup jako u desky s mikrokontrolerem. Zde bylo nalezeno několik chyb, které ale byly úspěšně odstraněny. První chybou bylo použití operačního zesilovače TL974, který není stoprocentně rail to rail. Vstup tohoto zesilovače je standardní, pouze výstup může pracovat v režimu rail to rail (byl vyměněn za obvod XR8054). Poté došlo při návrhu k překřížení dvou pinů na operačním zesilovači XR8054. Toto je opraveno mikrodrátovou propojkou.

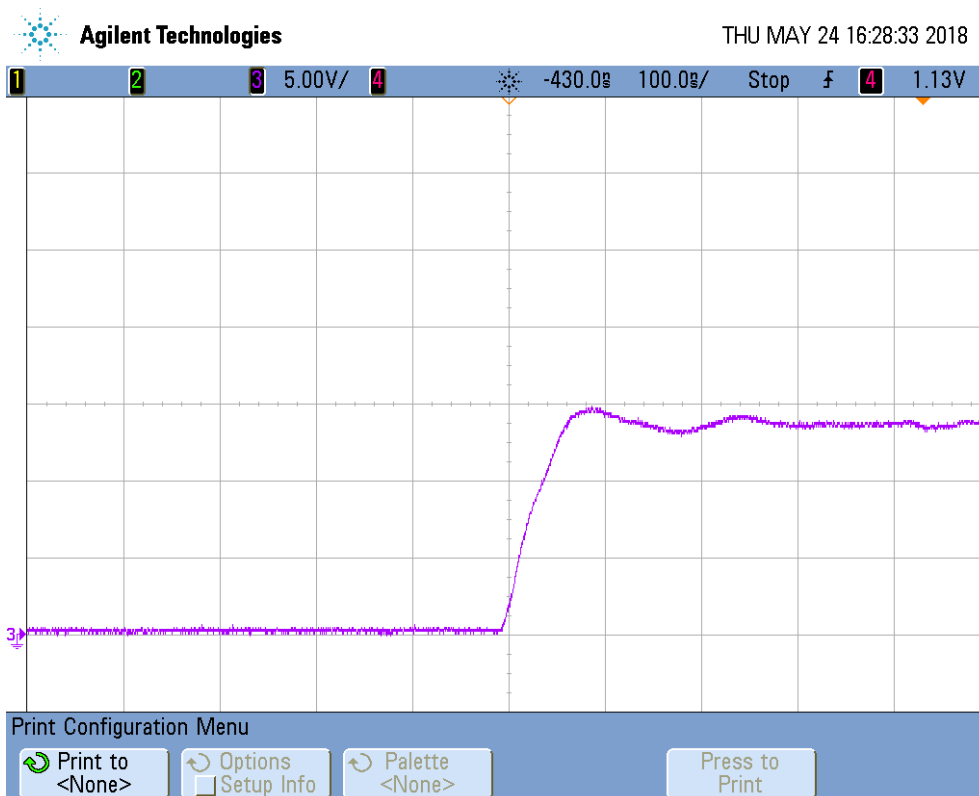
Byly změřeny průběhy na výstupech pro tranzistory a ověřeny strmosti na náběžných a sestupných hranách, detail na Obr. 6.4. Dále byla ověřena synchronizace výstupů, viz Obr. 6.3.

Staticky bylo zkontrolováno zesílení, a ověřen převod snímačů napětí a proudu.

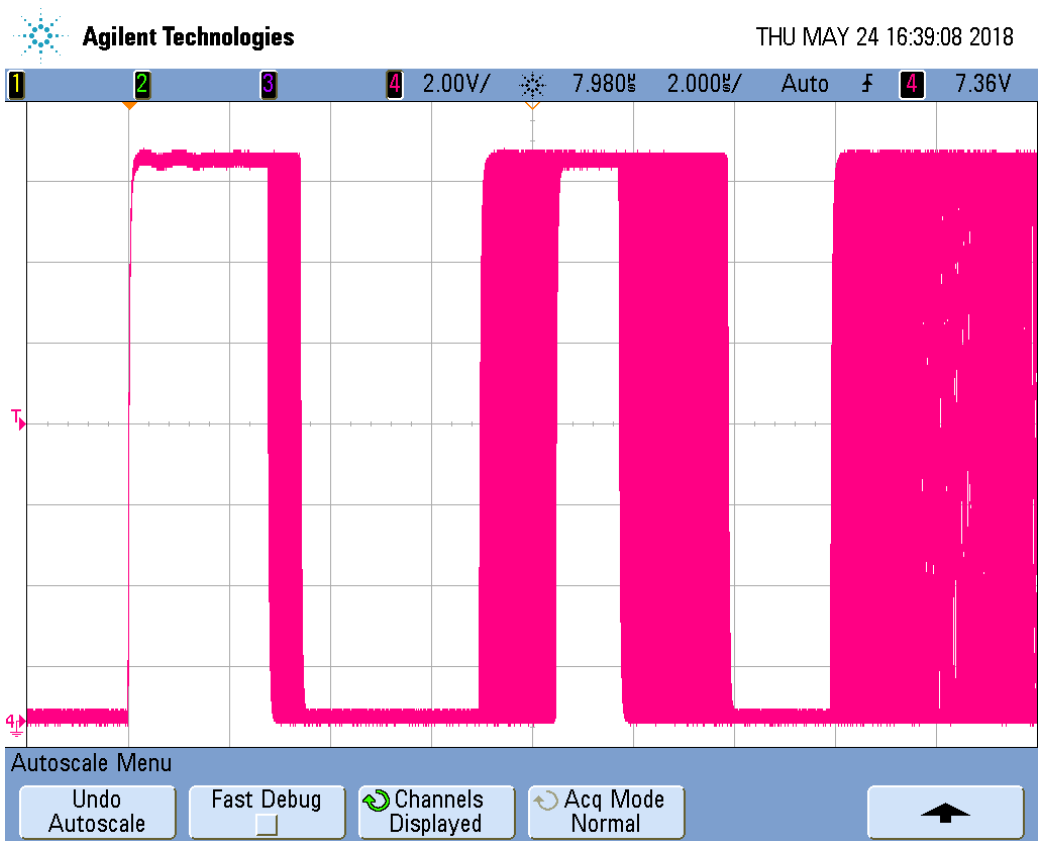
Dále byla připojena deska s mikrokontrolérem a ověřena funkce frekvenční modulace. Z naměřených průběhů lze určit rozkmit frekvence od 122kHz do 154kHz. Detail na Obr. 6.5 a srovnání v delším časovém horizontu na Obr. 6.6.



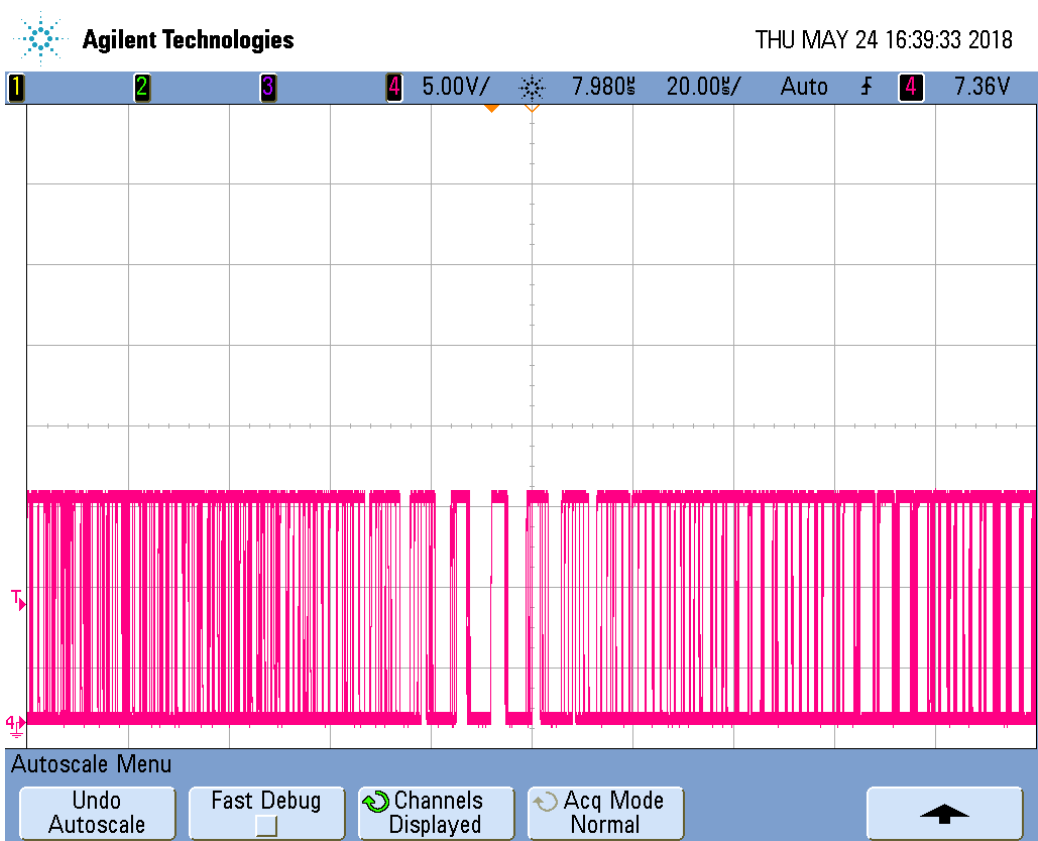
Obr. 6.3: Pulzy otevírající jednotlivé tranzistory v plném mostu.



Obr. 6.4: Detail náběžné hrany signálu pro otevření tranzistoru (sestupná hrana je identická).



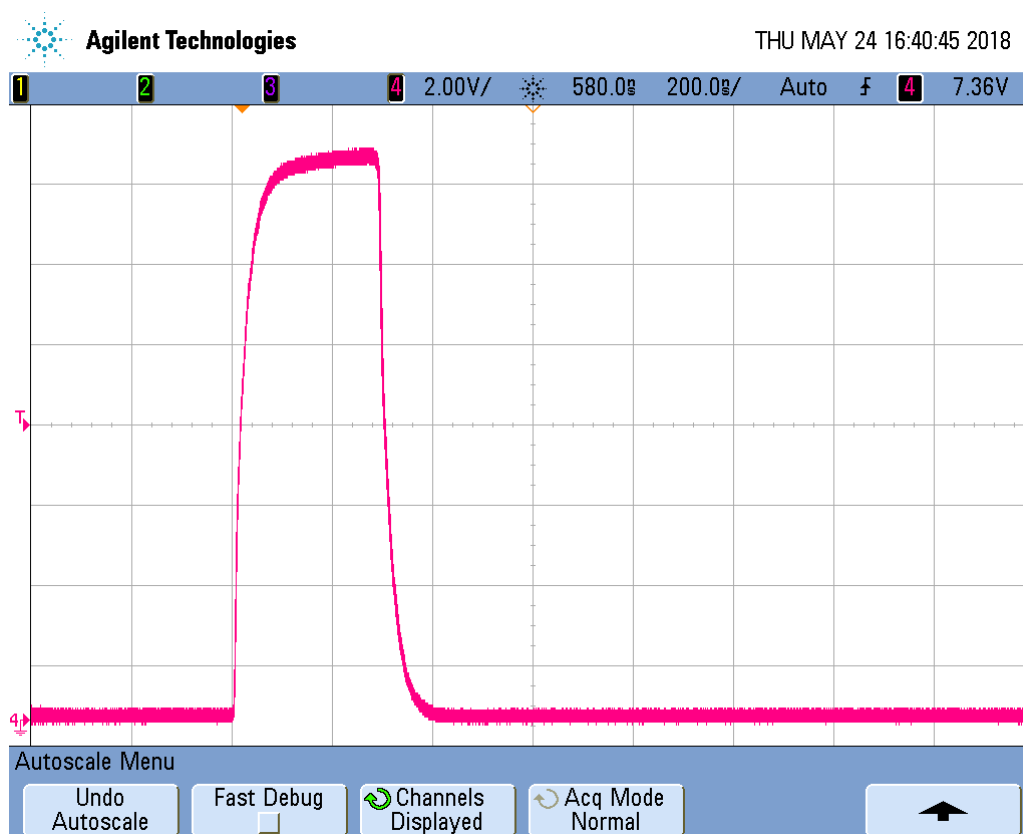
Obr. 6.5: Rozkmit pracovní frekvence.



Obr. 6.6: Rozkmit pracovní frekvence v delším časovém horizontu.

6.3 Základní deska

První byla deska překontrolována na zkraty a ověřena funkce zpožděného startu se softstartem, viz Obr. 6.8. Zde vzniknul stejný problém jako v případě problému s operačním zesilovačem TL974. Po výměně za správný typ a prodloužení časové konstanty zpoždovacího členu vše funguje. Po instalaci řídicí desky byla ověřena funkčnost zapalování. Doba trvání zapalovacího impulsu je 300ns oproti vypočítaným 200ns. Detail pulzu na Obr. 6.7. Zapalovací obvod je odpojován při proudu vyšším než 2A.



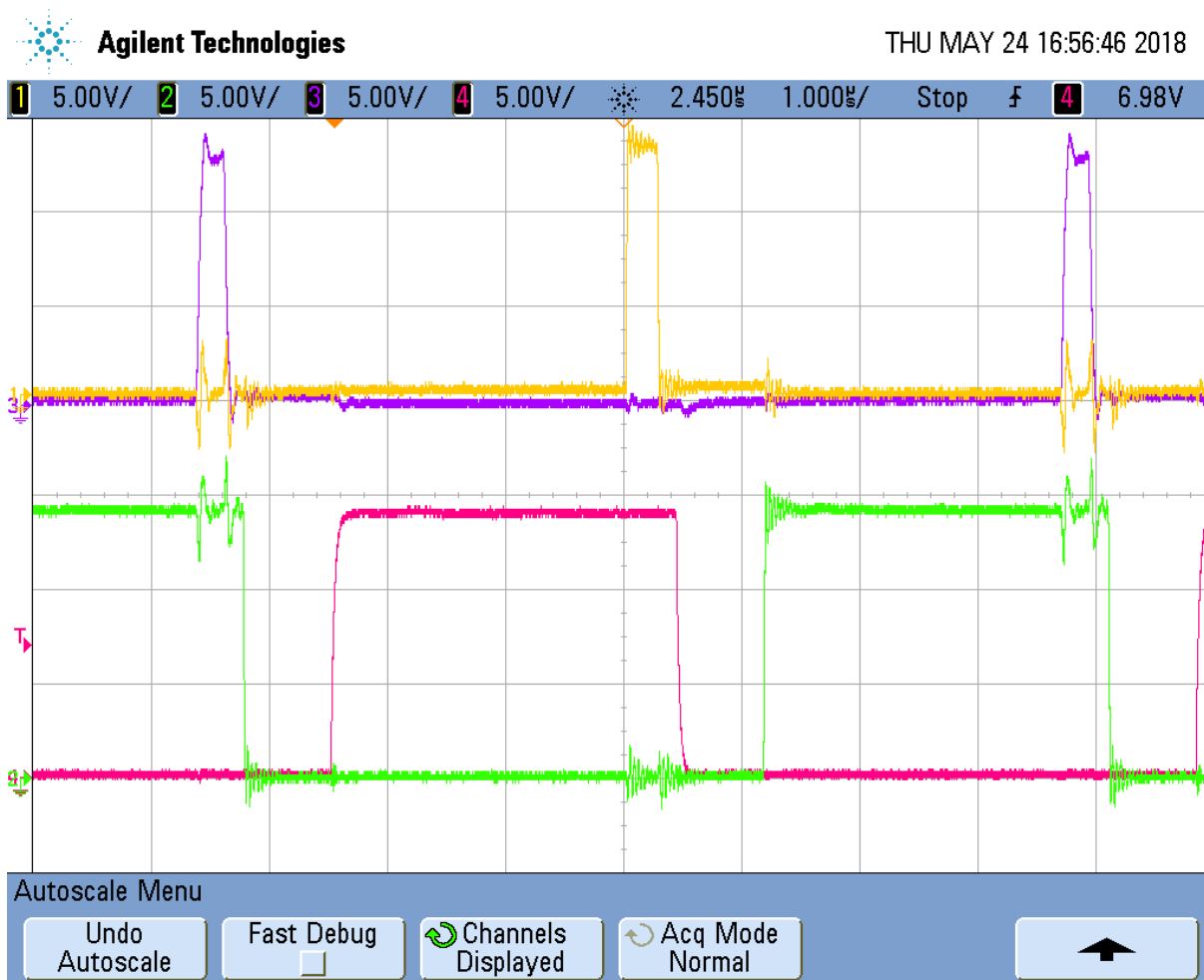
Obr. 6.7: Průběh řídicího impulsu zapalování.



Obr. 6.8: Ukázka postupného náběhu střídá.

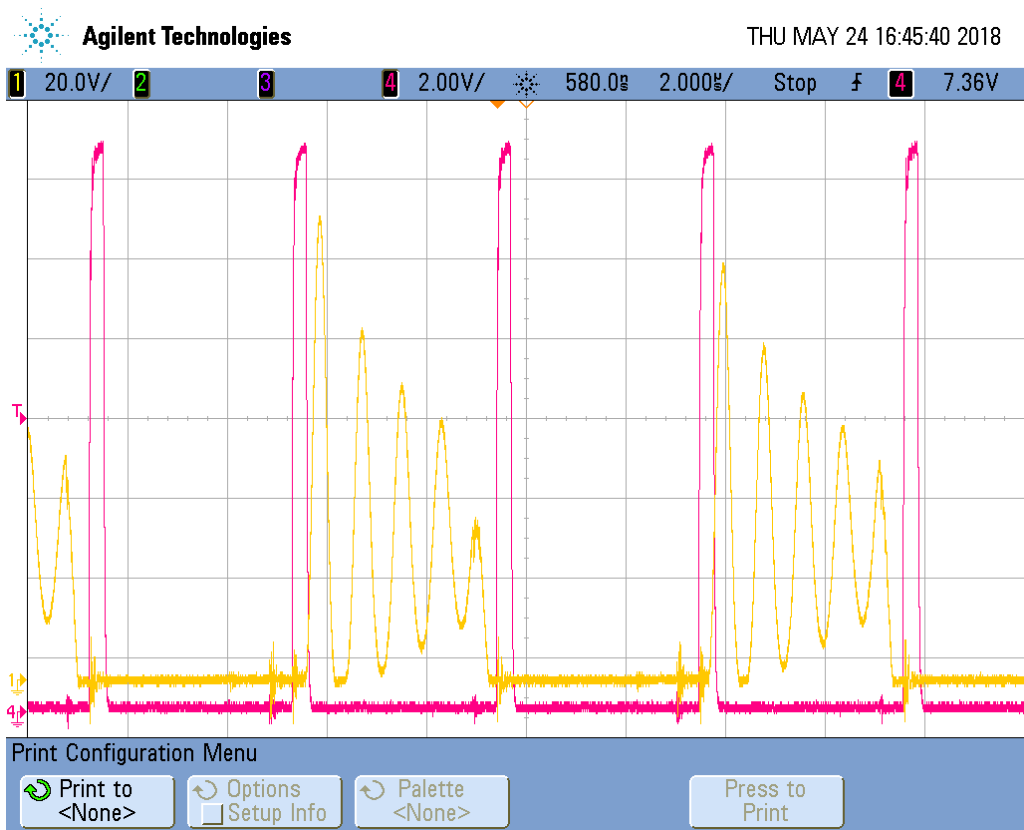
Dalším krokem bylo přivedení napájecího napětí na výkonovou část. Aby se zabránilo rozběhu měniče na plné napětí, bylo dočasně deaktivováno PFC. Kvůli napájení výkonové části od velmi nízkých napětí musel být rovněž deaktivován pomocný zdroj a řízení napájeno z externího zdroje.

Byla ověřena funkce proporcionálního regulátoru proudové pojistky Obr. 6.9.

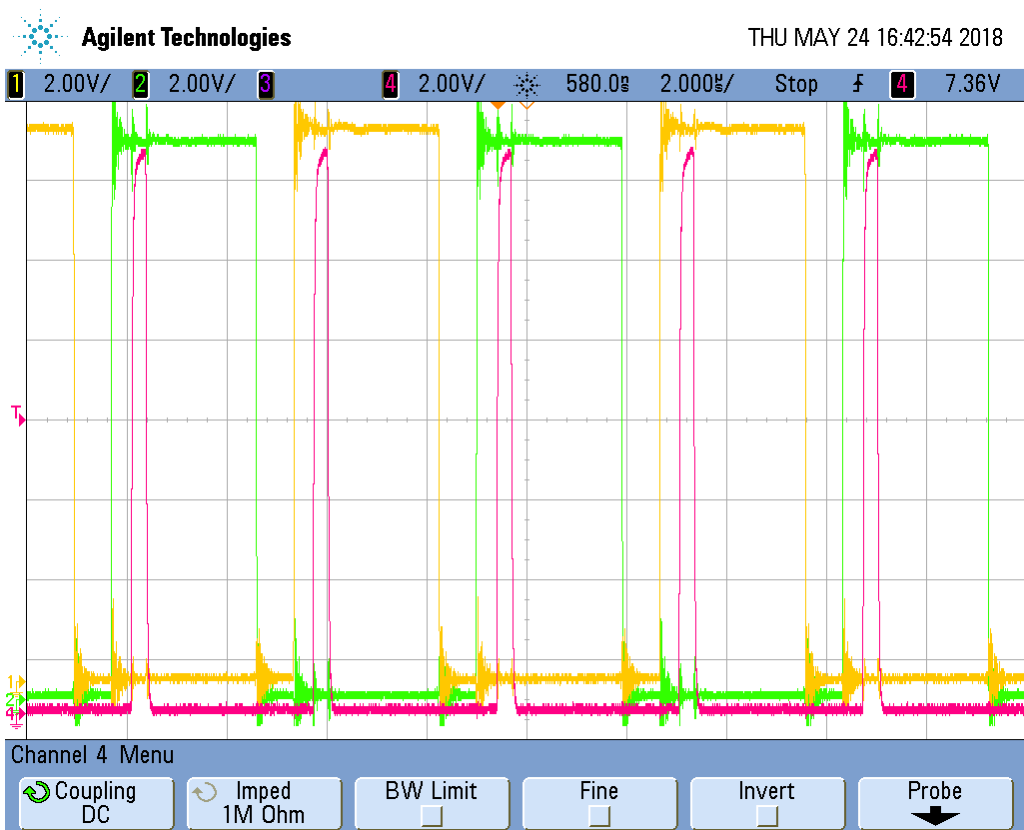


Obr. 6.9: Snižování střídavé horní dvojice tranzistorů při dosažení mezní hodnoty proudu (žlutý a fialový).

Bylo ověřeno sesynchronizování s ostatními řídicími signály plného mostu Obr. 6.11. Změřeny napěťové průběhy na nezátížené straně výkonové tlumivky Obr. 6.10. V dalším kroku dokonalejšího návrhu měniče bude zvažována možnost přepracování obvodu zapalování na rezonanční princip. Dojde tak k výraznému zjednodušení tohoto obvodu.

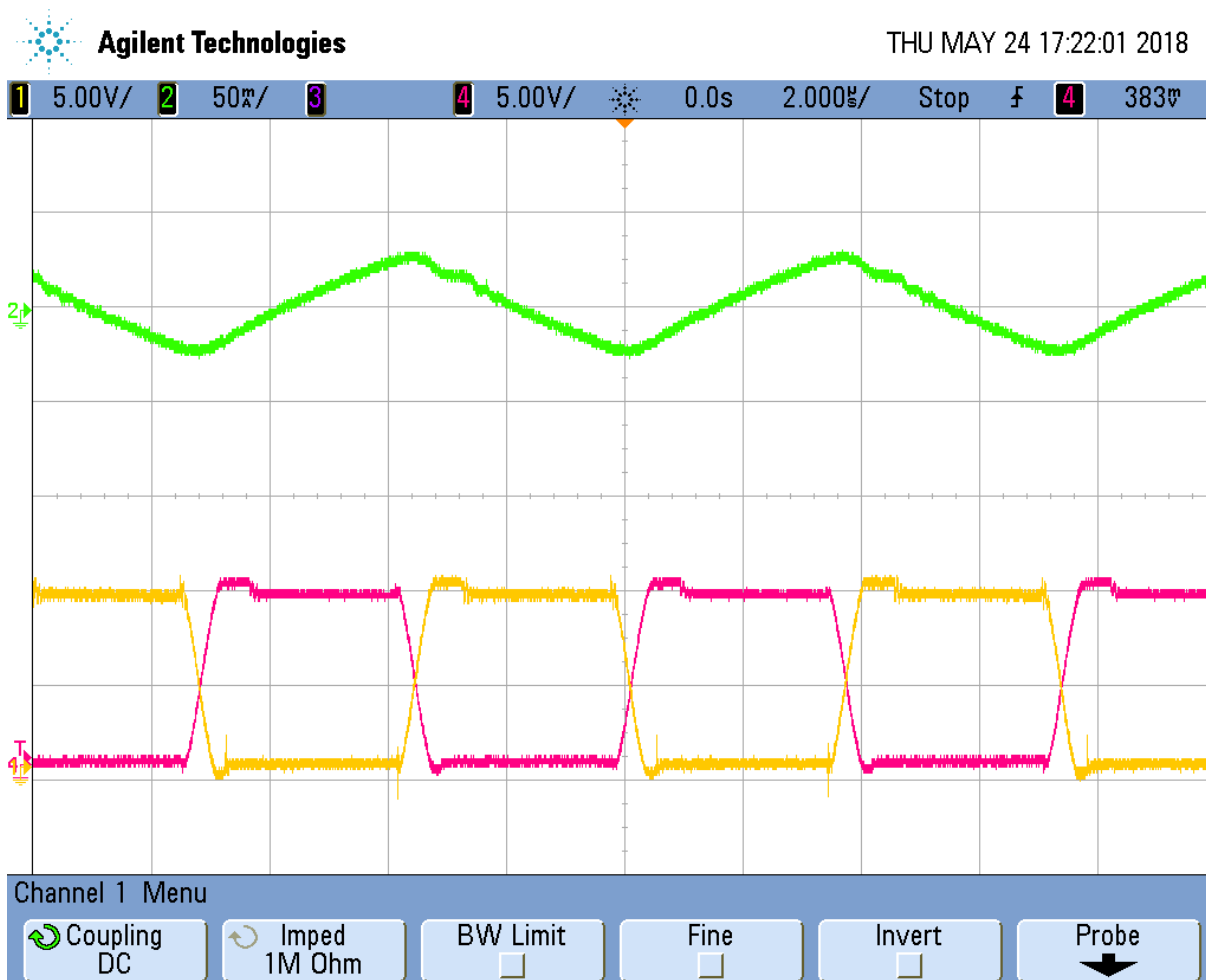


Obr. 6.10: Průběh napětí (žlutý) na nezatížené straně tlumivky při aktivním zapalování (červený).



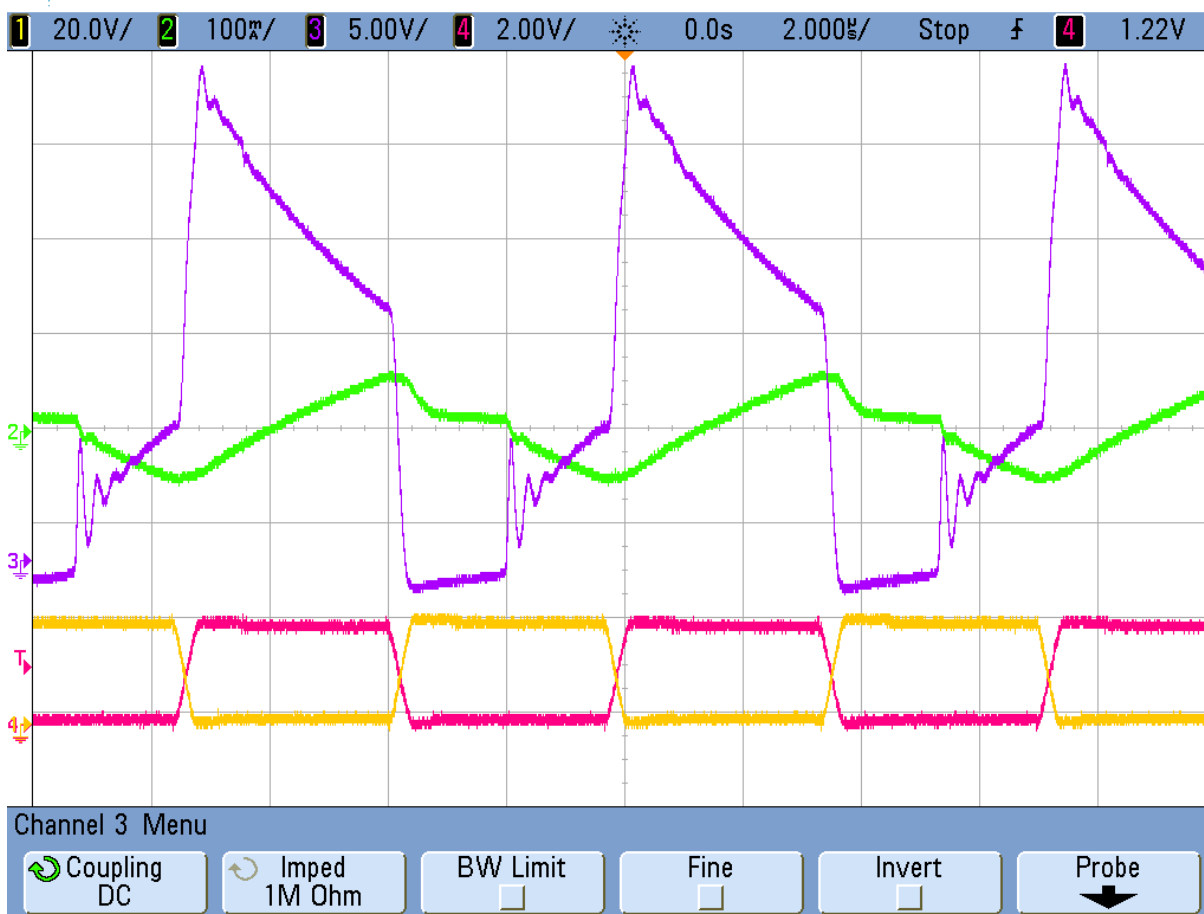
Obr. 6.11: Ukázka synchronního chodu zapalování (červený zapalovací impuls).

Dalším krokem bylo připojení čistě rezistivní zátěže. Všechny reostaty v laboratoři byly konstrukčně nevhodné (navinutý drát na keramickém tělese) a dosahovaly více než řádově vyšší indukčnosti než výkonová tlumivka. Po více neúspěšných pokusech byla použita 400W halogenová lampa z teplometu (odpor za studena 17Ω), která neměla ideální charakteristiku, ale pro demonstraci funkčnosti postačovala. Průběh první zkoušky na Obr. 6.12.



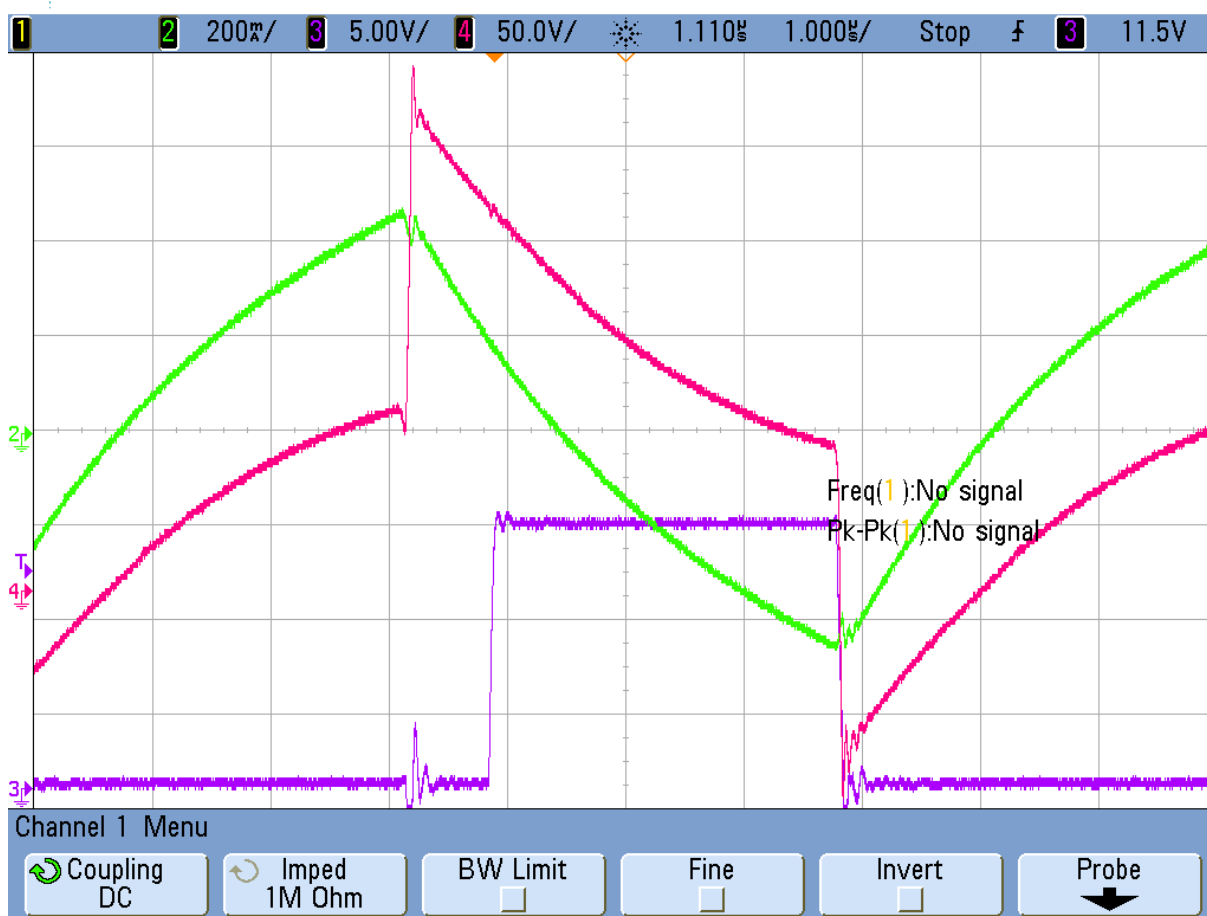
Obr. 6.12: Průběh proudu (zelený) napětí na středech plného mostu(žlutý a červený).

Při měření napětí na zátěži byl naměřen diametrálně odlišný průběh napětí, nežli byl očekáván Obr. 6.14 podle [33]. Jedna strana zátěže je střídavě připojována k zemi a napájecímu napětí. Napětí na druhé straně je oproti očekávání fázově posunuto a mění polaritu (oproti druhému kontaktu zátěže) v polovině délky pulzu místo v době při překlápění napětí na středech plného mostu. Dále se nepohybuje v rozmezí nula až napájecí napětí, ale je posunuto o významnou část nad úroveň napájecího napětí a pod úroveň zemně (napájecí napětí a zem tvoří nuly střídavého napětí na výbojce). Na tento průběh nebyl obvod měření napětí navržen, a tak dochází při záporném napětí oproti zemi k průtoku proudu přes ochranný transil do nuly. To způsobuje deformace spodní části fialového průběhu Obr. 6.13 Proto musí být obvod přepracován.



Obr. 6.13: Průběh proudu (zelený), napětí na zátěži (fialový) a napětí na středech plného mostu (žlutý a červený).

Po odpojení měření napětí a otestování na napětí 250V byla zjištěna schopnost předradníku funkce s výbojkou. Protože při 250V ještě nedochází ke generaci dostatečně vysokého napětí na zapálení výbojky, byl na nepájivém poli sestaven pomocný zapalovací obvod, a plyn v hořáku ionizován kapacitně skrz baňku. Použita byla sodíková výbojka 250W Obr. 6.21. Napájecí napětí bylo nastaveno na 170V, kterému odpovídal proud 0,5A (příkon 85W).



Obr. 6.14: Průběh proudu (zelený), napětí na středech plného mostu (žlutý, červený), gate tranzistoru (fialový). Použit zesilovač proudu – 1A na dílek.

Z průběhu proudu můžeme podle Obr. 6.14 vypočítat reálnou indukčnost tlumivky a ověřit tak správnost jejího návrhu. Střední hodnota napětí na tlumivce 150V se rovnala přibližně napájecímu napětí 170V, strmost proudu je přibližně 5A za 3 μ s.

$$L_{PWR} = \frac{U_{cc} * \Delta t}{\Delta i} = \frac{150 * 3 * 10^{-6}}{5} \approx 90\mu\text{H} \quad (6.1)$$

Dále můžeme podle zjištěných skutečností vypočítat pro porovnání novou potřebnou indukčnost výkonové tlumivky:

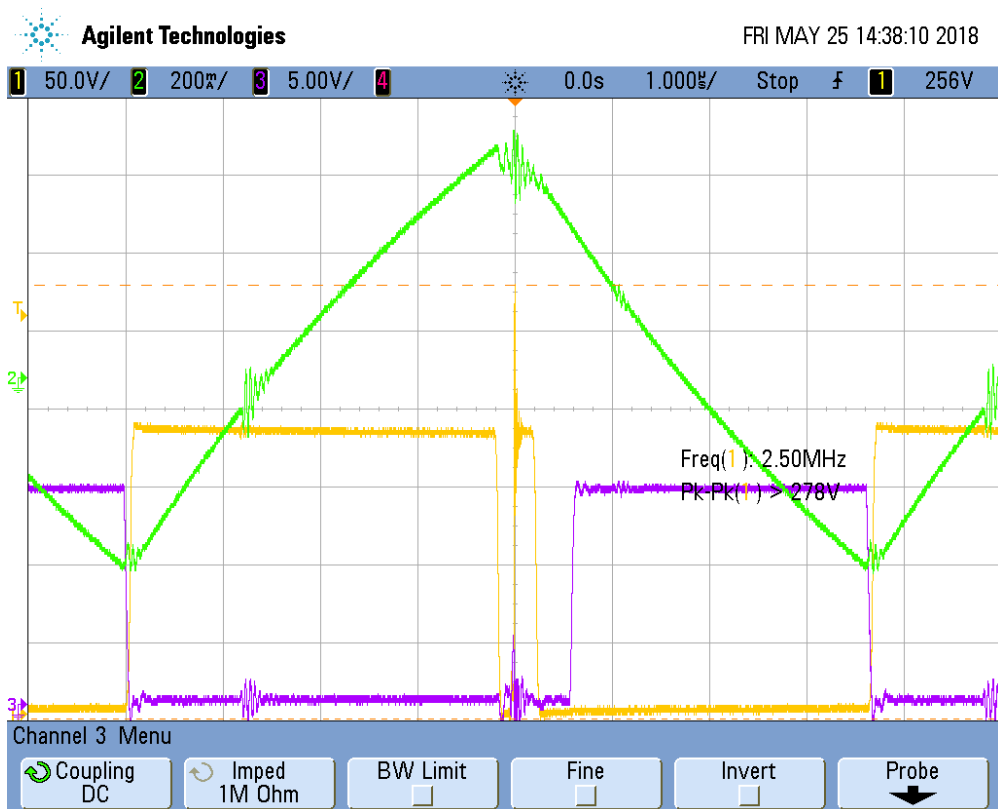
$$L_{PWR} = \frac{U_{cc} * \Delta t}{\Delta i} = \frac{400 * 1,666 * 10^{-6}}{8,14} \approx 82\mu\text{H} \quad (6.2)$$



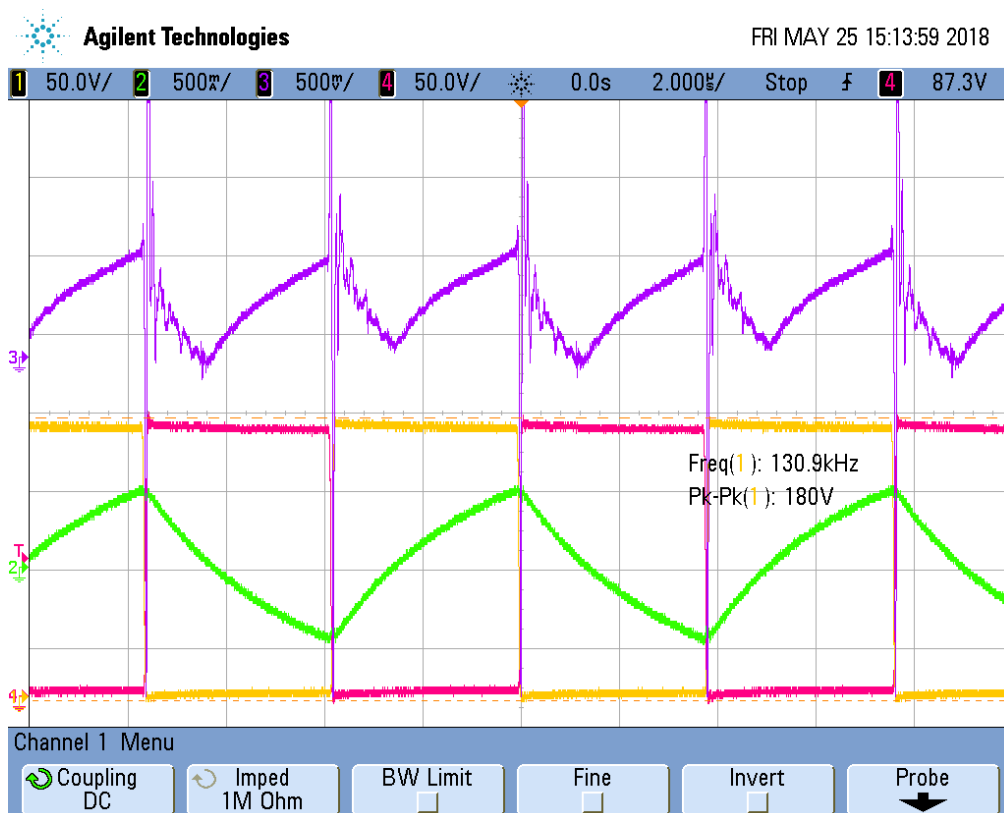
Obr. 6.15: Průběh proudu (zelený), napětí na středech plného mostu (žlutý, červený), gate tranzistoru (fialový). Použit zesilovač proudu – 1A na dílek.

Při dalším zvyšování napájecího napětí docházelo k přotevírání tranzistorů mimo požadovanou dobu, Obr. 6.16. Toto bylo způsobeno velkým zarušením řídicí desky. Rušivé impulsy se nakmitávají na příliš dlouhé cestě uzemňující řídicí obvod. Původ rušení je odhadován na impuls, který vzniká velkou strmostí růstu napětí mezi tlumivkou a výbojkou. Toto rušení se šíří do okolí i z přívodních kabelů k výbojce. Pro další zkoušky bude otestován stíněný napájecí kabel.

Silné zarušení řídicí desky znemožňovalo další postup měření, a je potřeba navrhnout desku novou s ohledem na zjištěné skutečnosti. Stejně rušení lze vidět na průběhu měřícího transformátoru Obr. 6.17, na výstupu ze snímače proudu, Obr. 6.18, i na výstupu ze snímače napětí Obr. 6.19.



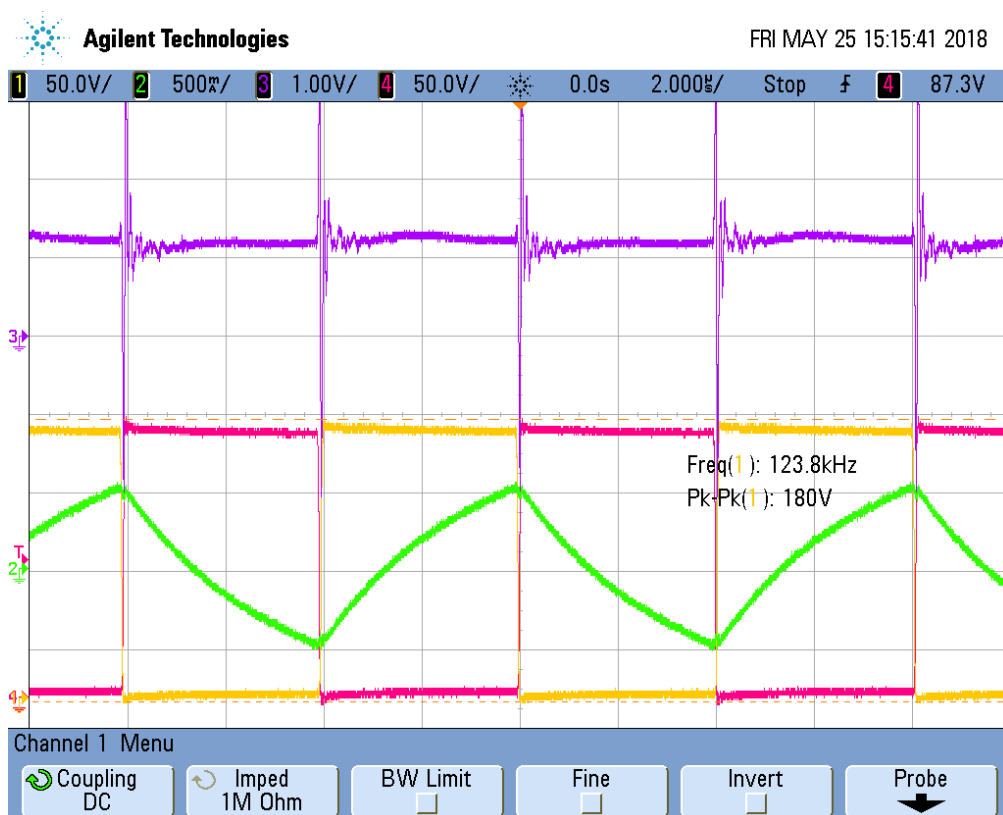
Obr. 6.16: Nechtěné otevření tranzistoru – špička žlutého průběhu (zelený průběh proudu, fialový gate transistoru) Použit zesilovač proudu – 1A na dílek.



Obr. 6.17: Průběh napětí na výstupu z proudového transformátoru po usměrnění fialový, (průběh proudu zelený, žlutý a červený napětí na středu plného mostu). (proud 2,5A/dílek).

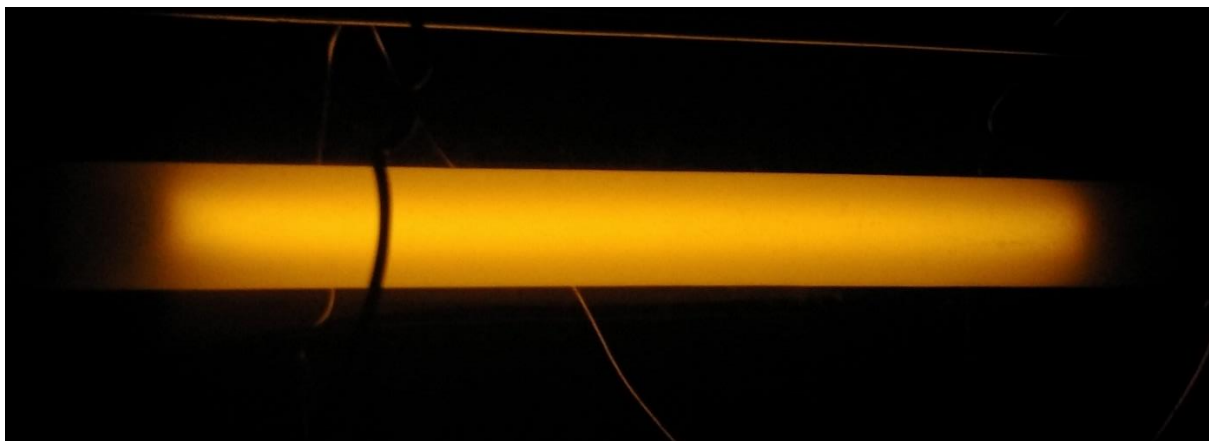


Obr. 6.18: Napětí na výstupu snímače proudu - fialový. (odpovídá návrhu – 0,335V při 5A špička špička). (zelený proud 2,5A/ dílek, žlutý a červený napětí na středech plného mostu).



Obr. 6.19: Napětí na výstupu snímače napětí - fialový. (odpovídá návrhu – 1,2V při rozdílu napětí 170V). (zelený proud 2,5A/ dílek, žlutý a červený napětí na středech plného mostu).

Ověření nepřítomnosti jevu akustické rezonance. Bylo provedeno pozorování hořáku sodíkové výbojky během celého cyklu od rozhoření výboje až po ustálení (celková doba provozu byla asi 30 minut) Během této doby nebyla pozorována žádná nestabilita ani vychýlení oblouku ze stabilní polohy, nebo náznak přerušení oblouku vlivem lokálního poklesu tlaku plynu v hořáku, Obr. 6.20.



Obr. 6.20: Foto hořáku po ustálení výboje (ostré přerušení hořáku je drát konstrukce).



Obr. 6.21: Testovací výbojka SON 250W.

Dále byla provedena zkouška regulačních smyček. Proporcionální regulátor proudové pojistky fungoval dobře, avšak zesílení OZ v obvodu zpětné vazby TL494 se ukázalo jako příliš vysoké pro regulátor výkonu. Proto bude zesílení řádově sníženo. To způsobí menší citlivost proudové ochrany (stále bude zajištěna základní funkčnost), avšak výrazně zlepší stabilitu regulace výkonu. K regulaci výkonu dochází podle předpokladů až při poklesu střídavy pod 25%.

7 ZÁVĚR

V bakalářské práci byla prostudována problematika výbojových světelných zdrojů. Na základě toho byl navržen a realizován experimentální model předřadníku. Práce si kladla za cíl navrhnout a odzkoušet regulovatelný elektronický předřadník pro sodíkové výbojky, u kterého by při provozu nedocházelo k akustické rezonanci. Toto se podařilo vyřešit pomocí proměnné pracovní frekvence předřadníku. Při testech se poté řešení ukázalo jako plně funkční. Další předpokládaná výhoda tohoto řešení se ukázala při provozu, kdy hlučnost předřadníku je na velmi nízké úrovni. Při regulaci pomocí PWM dochází pouze k slabému akustickému šumu. Všechny testy probíhaly při výkonu do 100W (potenciál předřadníku je 600W). Limitujícím faktorem bylo napájecí napětí, kdy při dalším zvyšování docházelo k růstu rušení, které přesahovalo odolnost řídicí desky. Při dodržení tohoto limitu nedocházelo k zahřívání a měnič mohl pracovat i bez žebrovaného chladiče. Z toho lze vyvodit vysokou účinnost řešení.

Kvůli chybnému předpokladu průběhů napětí na oblouku byl nesprávně navržen obvod měření napětí, který musel být při zkoušce odpojen. Hodnota napětí při testu byla nasimulována. Při opravě návrhu se počítá s využitím měřicího transformátoru napětí (galvanicky oddělené přímé měření napětí oblouku). Regulace výkonu je funkční, ale při omezení střídavy dochází k periodické změně jasu. Odstranění problému spočívá ve snížení zesílení obvodu zpětné vazby a úpravou programu. Toto nebylo změřeno, protože osciloskop nebyl schopný signál správně zobrazit.

Návrh desek plošných spojů předřadníku se řídil základními návrhovými pravidly. Samostatné desky řízení nevykazují defekty. Operační zesilovače i při své vysoké rychlosti nevykazují náchylnost ke kmitání a měřicí obvody mají vysokou přesnost díky použití součástek s nízkou tolerancí. Průběhy napětí plného mostu a na budičích tranzistorů jsou taky vyhovující. Zásadní problém, kdy vyzařování rušení ovlivňovalo chod měniče, vznikalo na výstupu pro výbojku. Vedení bude muset být provedeno stíněným kabelem, přepracováno uzemnění plošného spoje a přidán filtr na napájení řídicí desky.

Použití mikrokontroléru rozšiřuje možnosti použití předřadníku a kombinace analogové PWM části s řízením procesorem vylučuje zničení měniče při jakékoliv chybě programu. Po odstranění výše uvedených vad je velký prostor ke zdokonalení funkce např. přidáním výkonových parametrů různých typů výbojek, ochrana proti znovuzapálení za tepla, hlídání životnosti lampy, dálkové ovládání nebo kontrola provozních vlastností.

LITERATURA

- [1] Edison Tech Center. *Edison Tech Center* [online]. 2013 [cit. 2017-01-04]. Dostupné z: <http://www.edisontechcenter.org/Fluorescent.html>
- [2] *SVĚTELNÉ ZDROJE A SVÍTIDLA PRO VEŘEJNÉ OSVĚTLENÍ V ROCE 2012* [online]. 2012, , 12-15 [cit. 2017-01-04]. Dostupné z: <http://www.svn.cz/assets/files/informacni-materialy/2012/Svetelne-zdroje-a-svitidla-ve-VO.pdf>
- [3] *Osram - výbojky* [online]. b.r. [cit. 2017-01-04]. Dostupné z: http://www.cne.cz/e_download.php?file=data/editor/110cs_1.pdf&original=Katalog_OSRAM_vybojky.pdf
- [4] *Philips* [online]. b.r. [cit. 2017-01-04]. Dostupné z: http://www.lighting.philips.cz/prof/svetelne-zdroje#pfpfpath=0-EP01_GR
- [5] *Výbojkopedie* [online]. 2013 [cit. 2017-01-04]. Dostupné z: <http://www.vybojky-zarovky.cz/vybojkopedie.html>
- [6] *Layrton* [online]. b.r. [cit. 2017-01-04]. Dostupné z: <http://www.layrton.com>
- [7] Zapalovač TZ10. *Danyk* [online]. b.r. [cit. 2017-01-04].
- [8] JONGERIUS, M. a A. RAS. *OPTOGALVANIC DETECTION OF ACOUSTIC RESONANCES IN A HIGH-PRESSURE SODIUM DISCHARGE*. Francie, 1983.
- [9] CHI-HWAN, Lee. *Electronic Ballast for 400W Metal Halide Lamp: Technology of HID Ballast* [online]. KOREA, b.r. [cit. 2017-01-04]. Dostupné z: http://labkit.ru/userfiles/file/projects/car_shm/Xenon/Electronic_Ballast_for_400W_Metal_Halide_Lamp.pdf
- [10] CHHUN, Labo, Pascal MAUSSION, Sounil BHOSLE a Georges ZISSIS. *Characterization of Acoustic Resonance in a High Pressure Sodium Lamp* [online]. Toulouse, France, 2010 [cit. 2017-01-04]. Dostupné z: <http://ieeexplore.ieee.org/document/5678640/>
- [11] AFSHAR, Farhang. The Theory of Acoustic Resonance and Acoustic Instability in HID Lamps. *LEUKOS* [online]. 2008, 5(1), 27-38 [cit. 2018-05-25]. DOI: 10.1080/15502724.2008.10747627. ISSN 1550-2724. Dostupné z: <http://www.tandfonline.com/doi/abs/10.1080/15502724.2008.10747627>
- [12] *Youtube* [online]. b.r. [cit. 2017-01-04]. Dostupné z: www.youtube.com
- [13] *IRS2573D: HID Ballast for 70W Lamp Using the IRS2573D* [online]. b.r. [cit. 2017-01-04]. Dostupné z: <http://www.infineon.com/dgdl/irplhid2.pdf?fileId=5546d462533600a4015356a011722c87>
- [14] Osram. *Osram* [online]. b.r. [cit. 2017-01-04].
- [15] *Význam regulace v soustavách veřejného osvětlení* [online]. b.r. [cit. 2017-01-04]. Dostupné z: <http://artechnic-schreder.cz/cs/wp-content/uploads/regulace.pdf>
- [16] PATOČKA, Miroslav. *Magnetické jevy a obvody ve výkonové elektronice, měřicí technice a silnoproudé elektrotechnice*. 1. vyd. V Brně: VUTIUM, 2011. ISBN 978-80-214-4003-6.
- [17] The next gen high power advanced PFC: PFC. *Electronic products* [online]. 2014 [cit. 2017-01-04]. Dostupné z:

- http://www.electronicproducts.com/Power_Products/Power_and_Control/The_next_gen_high_power_advanced_PFC.aspx
- [18] *UCC28019: CCM PFC* [online]. b.r. [cit. 2017-01-04]. Dostupné z: <http://www.ti.com/lit/ds/symlink/ucc28019.pdf>
- [19] *ICE2PCS01G* [online]. b.r. [cit. 2018-05-26]. Dostupné z: <https://www.tme.eu/cz/Document/27a054b41b4280ff128d00ca9f5400ba/ICE2PCS01G.pdf>
- [20] *IPP60R280P6XKSAI* [online]. b.r. [cit. 2018-05-26]. Dostupné z: <https://www.tme.eu/cz/Document/51b2e05a273e640312166b7ee1f9b865/IPP60R280P6-DTE.pdf>
- [21] *C3D06060F* [online]. b.r. [cit. 2018-05-26]. Dostupné z: <https://www.wolfspeed.com/media/downloads/43/C3D06060F.pdf>
- [22] *3c97* [online]. b.r. [cit. 2018-05-26]. Dostupné z: <https://ferrite.qutic.com/pdf/3c97.pdf>
- [23] *TNY274-280: Flyback controller* [online]. b.r. [cit. 2017-01-04]. Dostupné z: <https://www.power.com/sites/default/files/product-docs/tny274-280.pdf>
- [24] *MIC4420* [online]. b.r. [cit. 2018-05-26]. Dostupné z: <http://ww1.microchip.com/downloads/en/DeviceDoc/mic4420.pdf>
- [25] *MIC4420* [online]. b.r. [cit. 2018-05-26]. Dostupné z: <http://ww1.microchip.com/downloads/en/DeviceDoc/mic4420.pdf>
- [26] *TL494* [online]. b.r. [cit. 2017-01-04]. Dostupné z: http://www.onsemi.com/pub_link/Collateral/TL494-D.PDF
- [27] *ATXMEGA32A4U* [online]. b.r. [cit. 2018-05-26]. Dostupné z: <https://www.microchip.com/wwwproducts/en/ATxmega32A4U>
- [28] *B82801B* [online]. b.r. [cit. 2018-05-26]. Dostupné z: <https://en.tdk.eu/inf/85/ds/b82801b.pdf>
- [29] *TL974* [online]. b.r. [cit. 2018-05-26]. Dostupné z: <http://www.ti.com/lit/ds/symlink/tl971.pdf>
- [30] *XR8054* [online]. b.r. [cit. 2018-05-26]. Dostupné z: https://www.exar.com/ds/xr8051_xr8052_xr8054.pdf
- [31] *1.5KE440A* [online]. b.r. [cit. 2018-05-26]. Dostupné z: <https://www.tme.eu/cz/Document/1d56b131325d12217d6344d8d359dc21/1.5KExxxA-taiwan-DTE.pdf>
- [32] *Chladiče* [online]. b.r. [cit. 2018-05-26]. Dostupné z: <http://www.eling.cz/cz/produkty/chladice>
- [33] *250W HID metal halide electronic ballast* [online]. b.r. [cit. 2018-05-27]. Dostupné z: http://www.st.com/content/ccc/resource/technical/document/application_note/38/d7/d8/d0/00/1f/4d/63/CD00192161.pdf/files/CD00192161.pdf/jcr:content/translations/en.CD00192161.pdf

SEZNAM POUŽITÝCH ZKRATEK

A/D	Analogově digitální převodník
AC	Střídavý proud.
CCM	Režim kontinuálního proudu.
CRI	Index barevného podání.
CrM	Režim na hranici kontinuálního proudu.
D/A	Digitálně analogový převodník
DC	Stejnoseměrný proud.
DCM	Režim přerušovaného proudu.
DPS	Deska plošného spoje
DRC	Článek dioda, rezistor, kondenzátor
DT	Dead time (ochranná doba).
EMC	Elektromagnetická kompatibilita.
EMI	Odrušovací filtr.
FM	Frekvenční modulace
HID	Vysokotlaká halogenidová výbojka.
HPS	Vysokotlaká sodíková výbojka.
LC	Cívka, kondenzátor
LED	Luminiscenční dioda.
LPS	Nízkotlaká sodíková výbojka.
MASTER	Řídící obvod.
OR	Porovnávací člen
OZ	Operační zesilovač
PFC	Power factor corector (tvarovač proudu).
PI	Proporcionálně integrační regulátor
PID	Proporcionálně integračně derivační regulátor
PWM	Pulsně šířková modulace
RGB	Rot, Green, Blue – červená, zelená modrá
SLAVE	Podřízený obvod.
SMD	Typ součástek osazovaný na povrch desky
THT	Typ součástek osazovaný do vyvrtaných otvorů desky
UV	Ultrafialové záření.
VA	Volt-ampérová charakteristika.
VN	Vysoké napětí

SEZNAM POUŽITÝCH VELIČIN

Veličina	Jednotka	Vysvětlení
ρ_{cu}	[Ωm]	Měrná elektrický odpor mědi
μ_0	[Fm^{-1}]	Relativní permitivita
μ_{r-j}	[-]	Relativní permitivita materiálu
μ_{r-v}	[-]	Relativní permitivita vzduchu
A_e	[m^2]	Průřez feritového jádra
B_{max}	[T]	Maximální hodnota magnetické indukce
B_{max_isense}	[T]	Maximální hodnota sycení proudového transformátoru
C_{filter}	[F]	Filtrační kapacita
$\text{Cos}\varphi$	[-]	Účinit
C_{out}	[F]	Kapacita na výstupu PFC
CRI	[-]	Index barevného podání
D_{ON}	[-]	Střída otevírání
D_{onfb}	[-]	Maximální střída plného mostu
e	[-]	Eulerovo číslo
E_{off}	[J]	Vypínací energie
E_{on}	[J]	Zapínací energie
f	[Hz]	Frekvence
f_{mez}	[Hz]	Mezní frekvence
f_{min}	[Hz]	Minimální frekvence
f_{sw}	[Hz]	Frekvence spínání
I	[A]	Proud
I_{hf}	[A]	Zvlnění proudu cívkou
I_{hf_spec}	[A]	Zvlnění proudu vstupní cívkou
I_{in_pk}	[A]	Špičková hodnota proudu
I_{in_RMS}	[A]	Efektivní hodnota proudu
I_{jm}	[A]	Jmenovitá hodnota proudu
I_{LPK}	[A]	Špičkový proud cívkou

I_{out}	[A]	Výstupní proud
I_{PWR_PK}	[A]	Maximální hodnota proudu výkonovou tlumivkou
$I_{výb_eff}$	[A]	Efektivní hodnota proudu výbojkou
$I_{výb_max}$	[A]	Maximální hodnota proudu výbojkou
K	[-]	Měrný světelný výkon, měrný výkon
$k_{ozneinv}$	[-]	Zesílení neinvertujícího zesilovače
K_{pcu}	[-]	Činitel plnění mědi
K_{U3D}	[-]	Zesílení operačního zesilovače U3D
L_{BOOST}	[H]	Indukčnost cívky PFC
l_e	[m]	Délka magnetického obvodu
L_{filtr}	[H]	Filtrační kapacita
l_n	[m]	Střední délka závitů cívky
L_{PWR}	[H]	Indukčnost výkonové tlumivky
l_v	[m]	Délka vzduchové mezery
N_{pfc}	[-]	Počet závitů cívky PFC
N_{PWR}	[-]	Počet závitů výkonové tlumivky
ns	[-]	Převod proudového transformátoru
P	[W]	Výkon
p	[Pa]	Tlak
P_{bridge}	[W]	Ztrátový výkon usměřovače
P_{cont}	[W]	Vodivostní ztráty
P_{diode}	[W]	Ztráty na diodě
P_{in_max}	[W]	Maximální vstupní výkon
P_{MOS_tot}	[W]	Celkové ztráty na tranzistoru
P_{nom}	[W]	Jmenovitý výkon
P_{out}	[W]	Výstupní výkon
P_{sw}	[W]	Spínací ztráty tranzistoru
P_{T88}	[W]	Ztrátový výkon chladiče
R_{div}	[Ω]	Odpor děliče napětí

R_{DSon}	[Ω]	Odpor tranzistoru v sepnutém stavu
$R_{m_{celk}}$	[H^{-1}]	Celkový magnetický odpor
R_{sense}	[Ω]	Rezistor snímání proudu
s	[-]	Střída
S	[m^2]	Plocha okna cívky
S_{cu}	[m^2]	Průřez drátu vinutí
T	[s]	Perioda
T_c	[K]	Náhradní teplota chromatičnosti
t_{demag}	[s]	Doba demagnetizace
t_{mag}	[s]	Doba magnetizace
t_{off}	[s]	Doby vypnutí
t_{on}	[s]	Doba sepnutí
t_{per}	[s]	Doba periody
t_{pulz}	[s]	Doba pulzu
U	[V]	Napětí
U_{cc}	[V]	Napájecí napětí
U_{ce}	[V]	Napětí na tranzistoru
U_{dif}	[V]	Výstupní napětí diferenciálního zesilovače
U_{isense_bw}	[V]	Citlivost snímače proudu
U_{ob}	[V]	Obloukové napětí
U_{out}	[V]	Výstupní napětí
u_{r34}	[V]	Koncové napětí
U_{r34}	[V]	Počáteční napětí
V_e	[m^3]	Objem feritového jádra
V_f	[V]	Napětí v propustném směru
V_{in_min}	[V]	Minimální vstupní napětí
V_{out}	[V]	Výstupní napětí PFC
$V_{out_ripple_pp}$	[V]	Výstupní zvlnění napětí
$V_{sense_i_max}$	[V]	Maximální napětí na proudovém transformátoru

V_{sense1}	[V]	Snímané napětí 1
V_{sense2}	[V]	Snímané napětí 2
λ	[nm]	Vlnová délka
π	[-]	Číslo pí
Δi	[A]	Strmost proudu
ΔP_{celk}	[W]	Celkové ztráty cívky
ΔP_{cu}	[W]	Ztráty v mědi
ΔP_v	[W]	Ztráty ve feritovém materiálu
Δt	[s]	Změna času
δ_{cu}	[A/mm ²]	Proudová hustota
η	[-]	Účinnost
τ	[-]	Časová konstanta

SEZNAM OBRÁZKŮ

Obr. 1.1: Lineární zářivka čirá – viditelné žhavicí vlákno (zdroj germicidního UV záření) / s luminoforem, převzato z [4].	9
Obr. 1.2: Rtuťová výbojka RVC (zdroj germicidního UV záření) uvnitř jde vidět křemenný hořák, převzato z [5].	10
Obr. 1.3 Rtuťová výbojka Osram HQL (s luminoforem), převzato z [4].	10
Obr. 1.4: Nízkotlaká sodíková výbojka Philips SOX 55 W, převzato z [4].	11
Obr. 1.5: Vysokotlaká sodíková výbojka Phillips SON-T 250 W, převzato z [4].	12
Obr. 1.6: Philips HPI-T 2000W s křemenným hořákem (nestmívatelná), převzato z [4].	13
Obr. 1.7: Philips MASTER CityWhite s keramickým hořákem (stmívatelná), převzato z [4].	13
Obr. 2.1: Moderní tlumivka pro 2000W halogenidové výbojky, převzato z [6].	14
Obr. 2.2: tlumivka pro sodíkové i halogenidové 400 W výbojky, převzato z [6].	14
Obr. 2.3 Moderní sidacový zapalovač, převzato z [6].	15
Obr. 2.4: Schéma tyristorového zapalovače TESLA, převzato z [7].	15
Obr. 2.5: Nahoře ukázka nestabilního výboje sodíkové výbojky při výskytu akustické rezonance. Dole hořák při správných provozních podmínkách. Převzato z [12].	17
Obr. 2.6: Nahoře nestabilní výboj v hořáku halogenidové výbojky při výskytu akustické rezonance. Dole při správných provozních podmínkách. Převzato z [12].	17
Obr. 3.1: Základní schéma blokujícího měniče.	20
Obr. 3.2. Základní průběhy blokujícího měniče.	20
Obr. 3.3: Principiální schéma plného mostu.	22
Obr. 3.4: Principiální schéma generátoru vysokonapětových impulzů	22
Obr. 3.5: Typické průběhy CRM PFC obvodu, převzato z [17].	24
Obr. 3.6: Typické průběhy CCM PFC obvodu, převzato z [17].	24
Obr. 4.1 Zapojení při měření.	27
Obr. 5.1 Schéma zapojení vstupních obvodů	29
Obr. 5.2 Schéma zapojení PFC	33
Obr. 5.3: Schéma zapojení pomocného zdroje	34
Obr. 5.4: Schéma zapojení podpětové ochrany, řízení zapalování a 12V zdroje	35
Obr. 5.5: Schéma zapojení driveru tranzistorů	36
Obr. 5.6: Schéma zapojení zapalovače	37

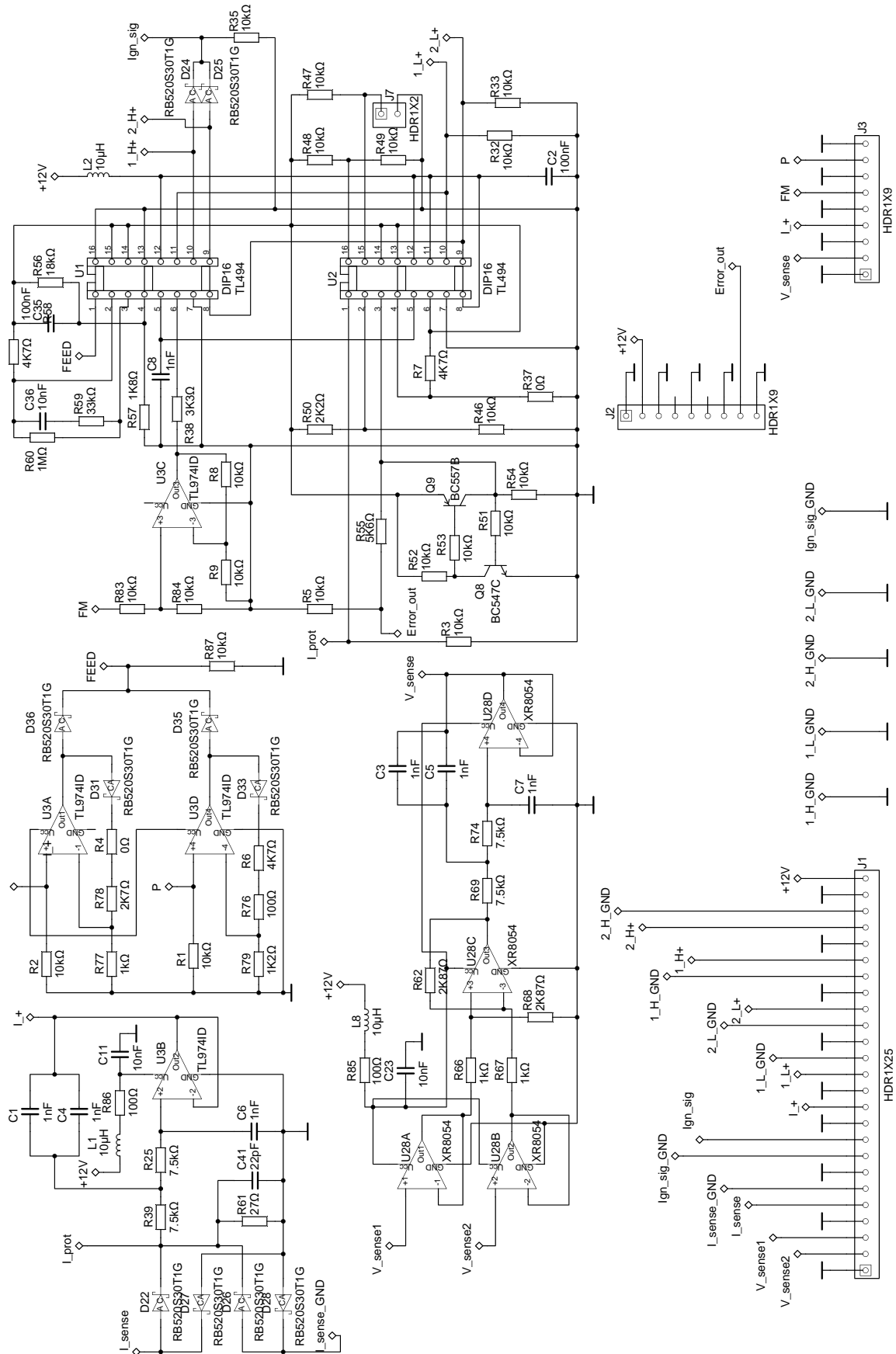
Obr. 5.7: Schéma zapojení měření proudu	40
Obr. 5.8: Schéma zapojení měření napětí	41
Obr. 5.9: Schéma zapojení paralelní regulace	42
Obr. 5.10: Schéma vnitřního zapojení TL494	43
Obr. 5.11: Schéma zapojení obvodů TL494.....	44
Obr. 5.12: Vlevo externí krystal, uprostřed reset, napravo linka programování.....	45
Obr. 5.13: Stabilizátor 3,3V s různými možnostmi napájení.	45
Obr. 5.14: Schéma zapojení mikrokontroleru	46
Obr. 5.15: Vizualizace desky s mikrokontrolerem. Levá strana Bottom, pravá Top.....	50
Obr. 5.16: Vizualizace desky řízení. Levá strana Bottom, pravá Top	51
Obr. 5.17: Vizualizace základní desky. Levá strana top, pravá bottom.	52
Obr. 6.1: Pilovitý průběh výstupu frekvenční modulace.	53
Obr. 6.2: Detail pilovitého průběhu.	54
Obr. 6.3: Pulzy otevírající jednotlivé tranzistory v plném mostu.	55
Obr. 6.4: Detail náběžné hrany signálu pro otevření tranzistoru (sestupná hrana je identická).	55
Obr. 6.5: Rozkmit pracovní frekvence.	56
Obr. 6.6: Rozkmit pracovní frekvence v delším časovém horizontu.	56
Obr. 6.7: Průběh řídicího impulsu zapalování.....	57
Obr. 6.8: Ukázka postupného náběhu střídavy.	57
Obr. 6.9: Snižování střídavy horní dvojce tranzistorů při dosažení mezní hodnoty proudu (žlutý a fialový).	58
Obr. 6.10: Průběh napětí (žlutý) na nezatížené straně tlumivky při aktivním zapalování (červený).	59
Obr. 6.11: Ukázka synchronního chodu zapalování (červený zapalovací impuls).....	59
Obr. 6.12: Průběh proudu (zelený) napětí na středech plného mostu(žlutý a červený).	60
Obr. 6.13: Průběh proudu (zelený), napětí na zátěži (fialový) a napětí na středech plného mostu (žlutý a červený).....	61
Obr. 6.14: Průběh proudu (zelený), napětí na středech plného mostu (žlutý, červený), gate tranzistoru (fialový). Použit zesilovač proudu – 1A na dílek.....	62
Obr. 6.15: Průběh proudu (zelený), napětí na středech plného mostu (žlutý, červený), gate tranzistoru (fialový). Použit zesilovač proudu – 1A na dílek.....	63

Obr. 6.16: Nechtěné otevření tranzistoru – špička žlutého průběhu (zelený průběh proudu, fialový gate transistoru) Použit zesilovač proudu – 1A na dílek.	64
Obr. 6.17: Průběh napětí na výstupu z proudového transformátoru po usměrnění fialový, (průběh proudu zelený, žlutý a červený napětí na středu plného mostu). (proud 2,5A/dílek).	64
Obr. 6.18: Napětí na výstupu snímače proudu - fialový. (odpovídá návrhu – 0,335V při 5A špička špička). (zelený proud 2,5A/ dílek, žlutý a červený napětí na středech plného mostu).....	65
Obr. 6.19: Napětí na výstupu snímače napětí - fialový. (odpovídá návrhu – 1,2V při rozdílu napětí 170V). (zelený proud 2,5A/ dílek, žlutý a červený napětí na středech plného mostu).....	65
Obr. 6.20: Foto hořáku po ustálení výboje (ostré přerušení hořáku je drát konstrukce).....	66
Obr. 6.21: Testovací výbojka SON 250W.	66

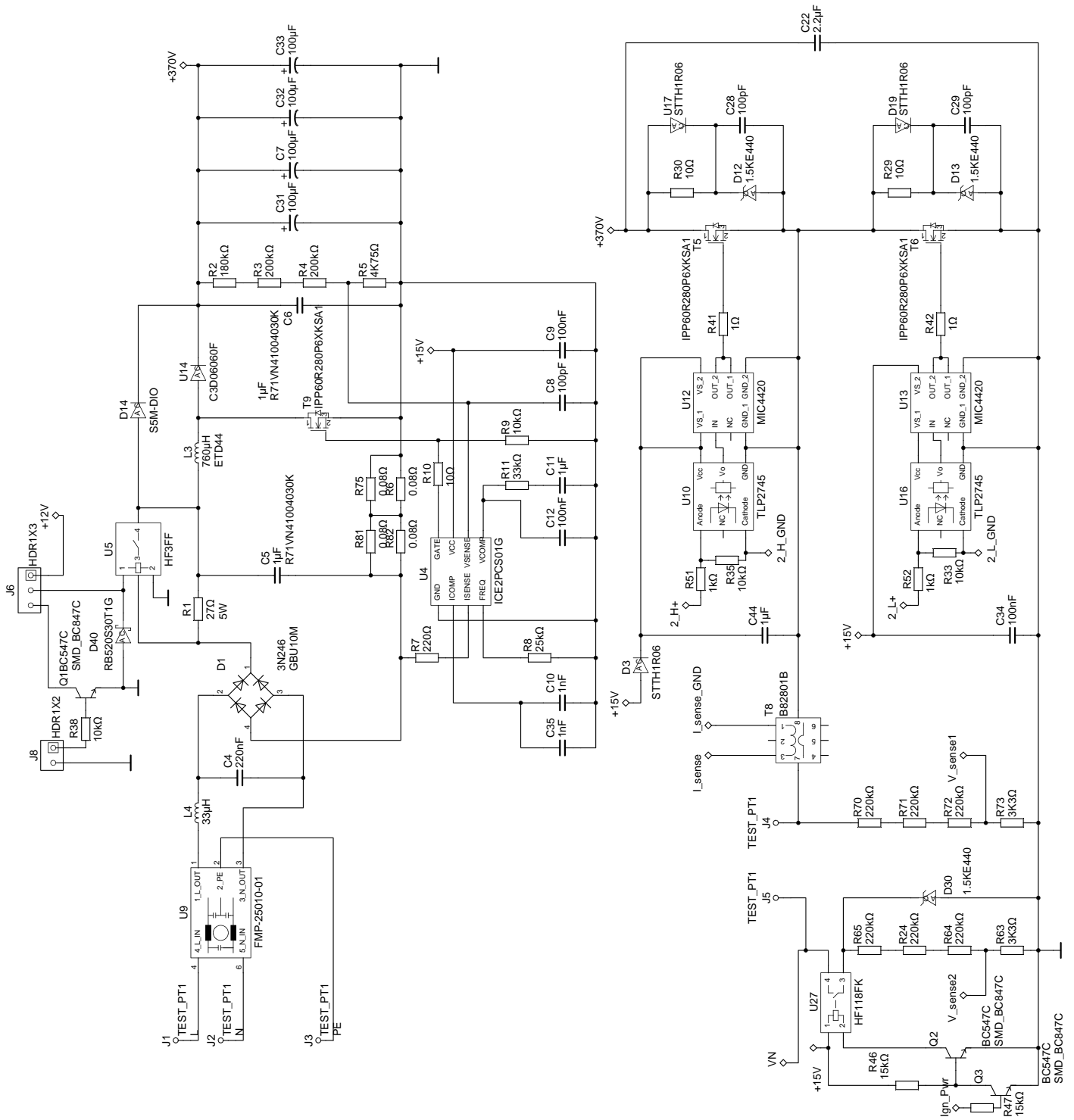
SEZNAM PŘÍLOH

A	schéma	79
	A.1 ATXMEGA32A4U	79
	A.2 Deska ovládání	80
	A.3 Základní deska	81
B	Desky plošných spojů	83
	B.1 ATXMEGA32A4U	83
	B.2 Deska ovládání	84
	B.3 Základní deska	85
C	Seznam použitých součástek	87
	C.1 ATXMEGA32A4U	87
	C.2 Deska ovládání	88
	C.3 Základní deska	90
D	Fotografie výrobku	93

A.2 Deska ovládání



A.3 Základní deska

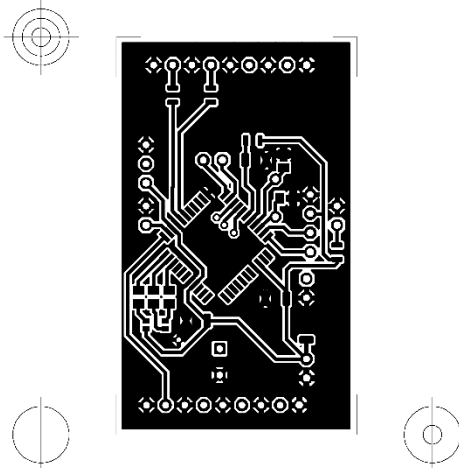


B DESKY PLOŠNÝCH SPOJŮ

B.1 ATXMEGA32A4U

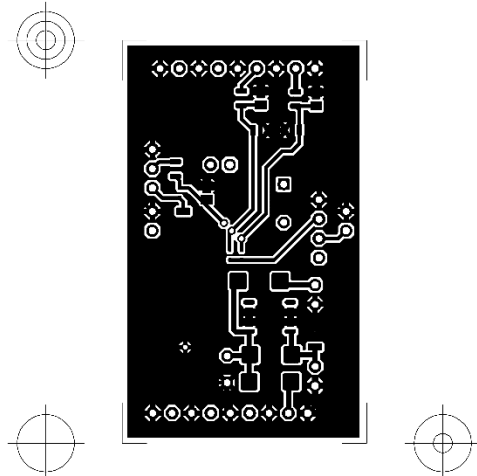
Vrchní strana:

Ultiboard-ATXMEGA - 28.05.2018 - 13:27:41 Copper Top



Spodní strana:

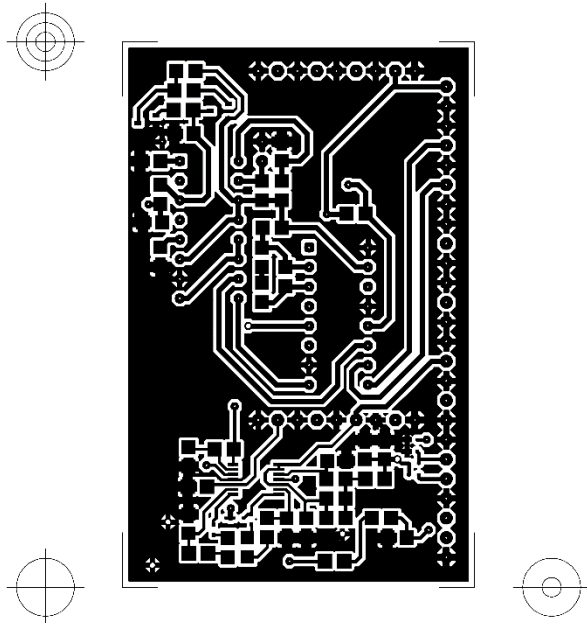
Ultiboard-ATXMEGA - 28.05.2018 - 13:49:45 Copper Bottom



B.2 Deska ovládání

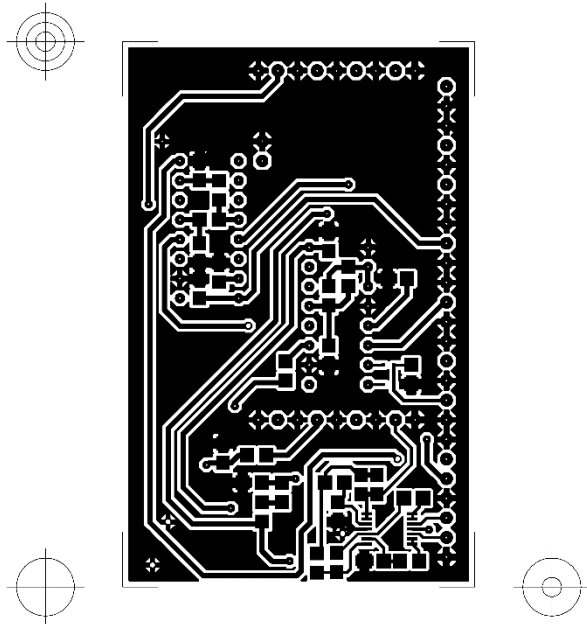
Vrchní strana.

Ultiboard-Bakalarka ovladani - 28.05.2018 - 13:56:13 Copper Top



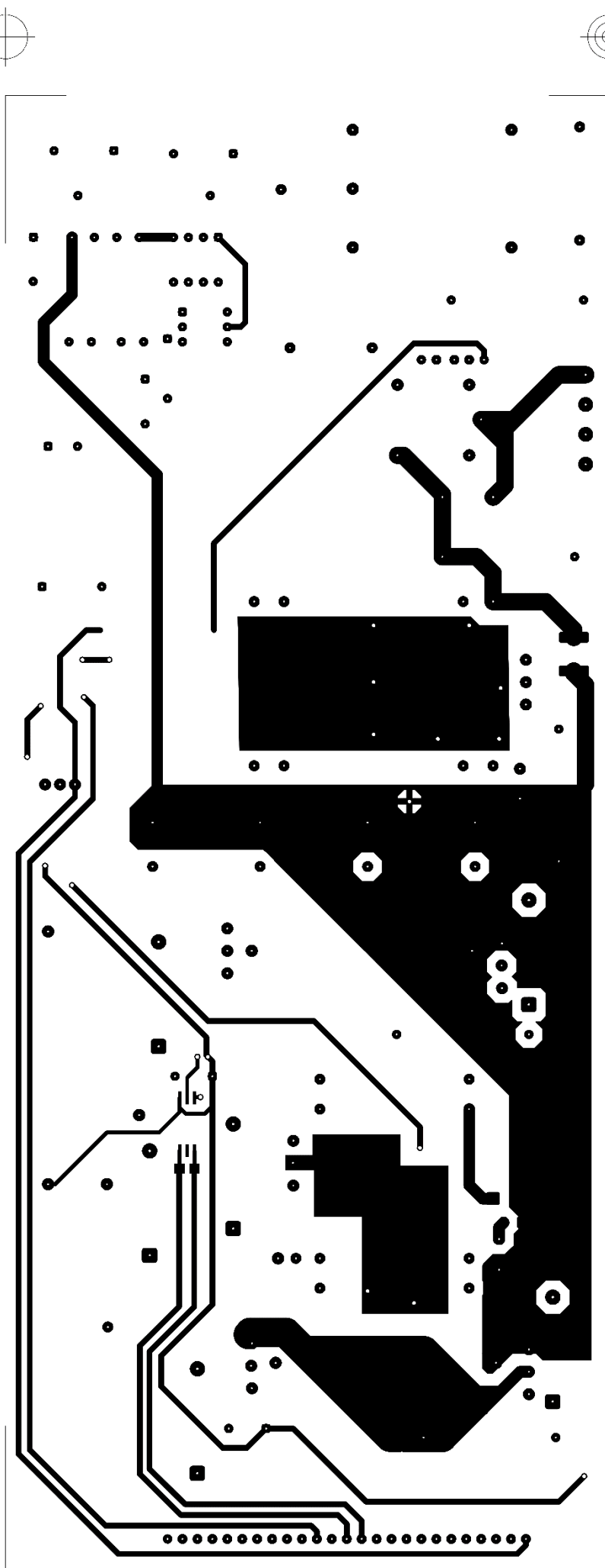
Spodní strana.

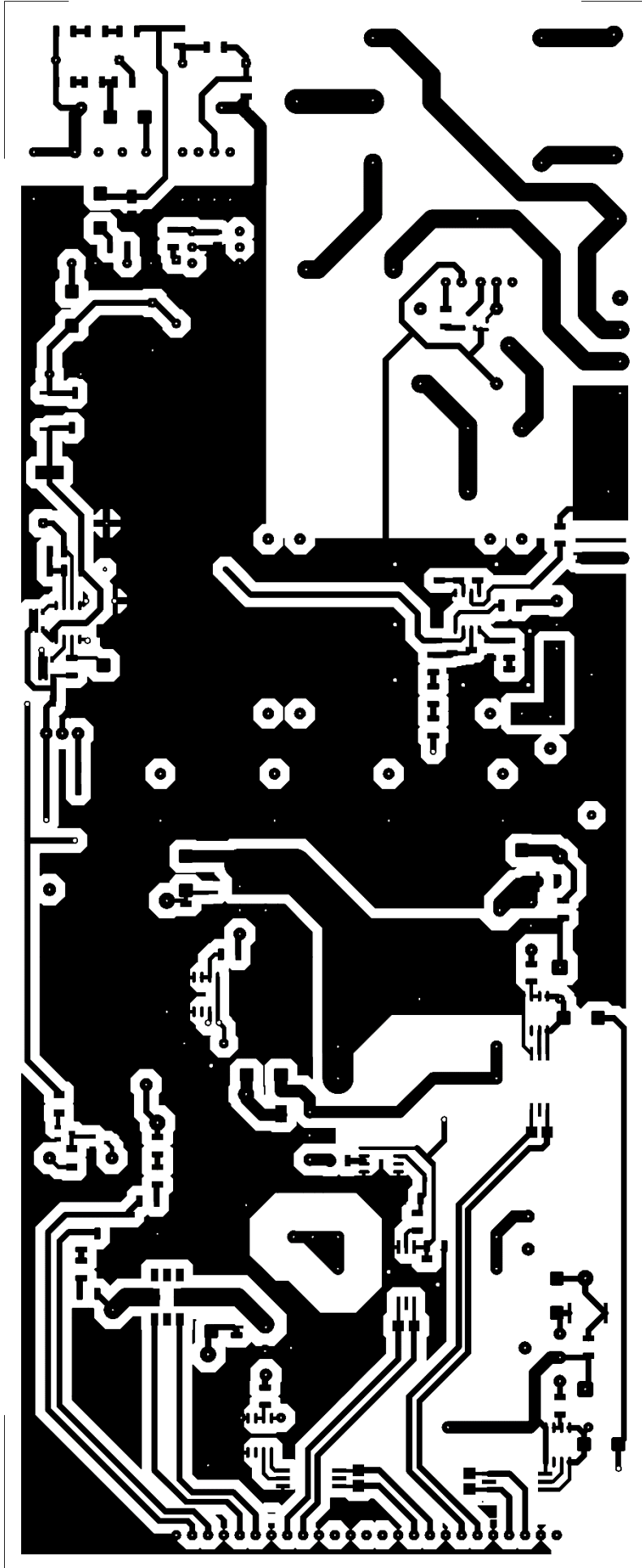
Ultiboard-Bakalarka ovladani - 28.05.2018 - 14:04:05 Copper Bottom



B.3 Základní deska

Vrchní strana.





Spodní strana.

C SEZNAM POUŽITÝCH SOUČÁSTEK

C.1 ATXMEGA32A4U

Množství	Součástka	Označení	Pouzdro	Cena/ks
1	Atmel, ATXMEGA32A4U	U4	IPC-7351\TQFP-44	63
3	CAPACITOR, 1nF	C2, C11, C12	IPC-7351\Chip-C0805	0,644
2	CAPACITOR, 22pF	C9, C10	IPC-7351\Chip-C0805	
5	CAPACITOR, 100nF	C1, C3, C4, C5, C7	Generic\1206	1,51
1	CAP_ELECTROLIT, 10uF	C6	Generic\1206	7
1	CAP_ELECTROLIT, 100uF	C19	IPC-2221A/2222\CAPPR350-800X1150	2
5	CONNECTORS, HDR1X2	J3, J8, J10, J11, J13	Generic\HDR1X2	
1	CONNECTORS, HDR1X3	J12	Generic\HDR1X3	
1	CONNECTORS, HDR1X4	J2	Generic\HDR1X4	
2	CONNECTORS, HDR1X9	J1, J7	Generic\HDR1X9	
3	Diode, RB520S30T1G	D1, D8, D29	Ultiboard\SOD523	0,7
3	Diode, STTH1R06	D2, D3, D15	Ultiboard\SMA	4,2
3	INDUCTOR, 10uH	L1, L8, L9	Generic\0805	0,5
1	LED, RGB_LED_1206	D4	Ultiboard\1206_RGB_LED	5,6
1	MISC_VIRTUAL, CRYSTAL_VI	U3	IPC-2221A/2222\CAPR500-1200X650X1650	23
1	RESISTOR, 5K60hm	R6	Generic\0805	
4	RESISTOR, 7K50hm	R2, R7, R8, R74	Generic\0805	
1	RESISTOR, 10kOhm	R1	Generic\0805	0,33
2	RESISTOR, 2490hm	R3, R4	IPC-7351\Chip-R0805	0,27
1	RESISTOR, 7500hm	R5	IPC-7351\Chip-R0805	0,16
1	Regulators, L78L33	U21	IPC-7351\SO-8	3,5

C.2 Deska ovládání

Množství	Součástka	Označení	Pouzdro	Cena/ks
2	SOCKETS, DIP16	U1, U2	IPC-2221A/2222\DIP-16	
2	RESISTOR, 0Ω	R4, R37	Ultiboard\0805+1206	
1	RESISTOR, 3K3Ω	R38	Ultiboard\0805+1206	0,27
1	CONNECTORS, HDR1X2	J7	Generic\HDR1X2	
2	CAPACITOR, 100nF	C2, C35	Ultiboard\0805+1206	1,5
1	BJT_PNP, BC557B	Q9	Motorola\SOT-23	0,59
1	RESISTOR, 18kΩ	R56	Ultiboard\0805+1206	
1	RESISTOR, 1K8Ω	R57	Ultiboard\0805+1206	
3	RESISTOR, 4K7Ω	R6, R7, R58	Ultiboard\0805+1206	0,28
1	RESISTOR, 33kΩ	R59	Ultiboard\0805+1206	
1	RESISTOR, 1MΩ	R60	Ultiboard\0805+1206	
3	CAPACITOR, 10nF	C11, C23, C36	Ultiboard\0805+1206	0,52
1	RESISTOR, 2K2Ω	R50	Ultiboard\0805+1206	
10	Diode, RB520S30T1G	D22, D24, D25, D26, D27, D28, D31, D33, D35, D36	Ultiboard\SOD523	0,7
3	RESISTOR, 1kΩ	R66, R67, R77	Ultiboard\0805+1206	2,6
1	RESISTOR, 1K2Ω	R79	Ultiboard\0805+1206	
4	RESISTOR, 7.5kΩ	R25, R39, R69, R74	Ultiboard\0805+1206	0,53
1	RESISTOR, 27Ω	R61	Ultiboard\0805+1206	
1	CAPACITOR, 22pF	C41	Ultiboard\0805+1206	
2	RESISTOR, 2K87Ω	R62, R68	Ultiboard\0805+1206	2,47
1	OZ, XR8054	U28	Microchip\TSSOP-14(ST)	40
3	RESISTOR, 100Ω	R76, R85, R86	Ultiboard\0805+1206	
20	RESISTOR, 10kΩ	R1, R2, R3, R5, R8, R9, R32, R33, R35, R46, R47, R48, R49, R51, R52, R53, R54, R83, R84, R87	Ultiboard\0805+1206	0,33
1	BJT_NPN, BC547C	Q8	Motorola\SOT-23	0,55

1	CONNECTORS, HDR1X25	J1	Generic\HDR1X25	
1	RESISTOR, 5K6Ω	R55	Ultiboard\0805+1206	
2	CONNECTORS, HDR1X9	J2, J3	Generic\HDR1X9	
1	RESISTOR, 2K7Ω	R78	Ultiboard\0805+1206	
7	CAPACITOR, 1nF	C1, C3, C4, C5, C6, C7, C8	Ultiboard\0805+1206	0,644
3	INDUCTOR, 10μH	L1, L2, L8	Ultiboard\0805+1206	0,5
1	OZ, TL974ID	U3	Microchip\TSSOP-14(ST)	18

C.3 Základní deska

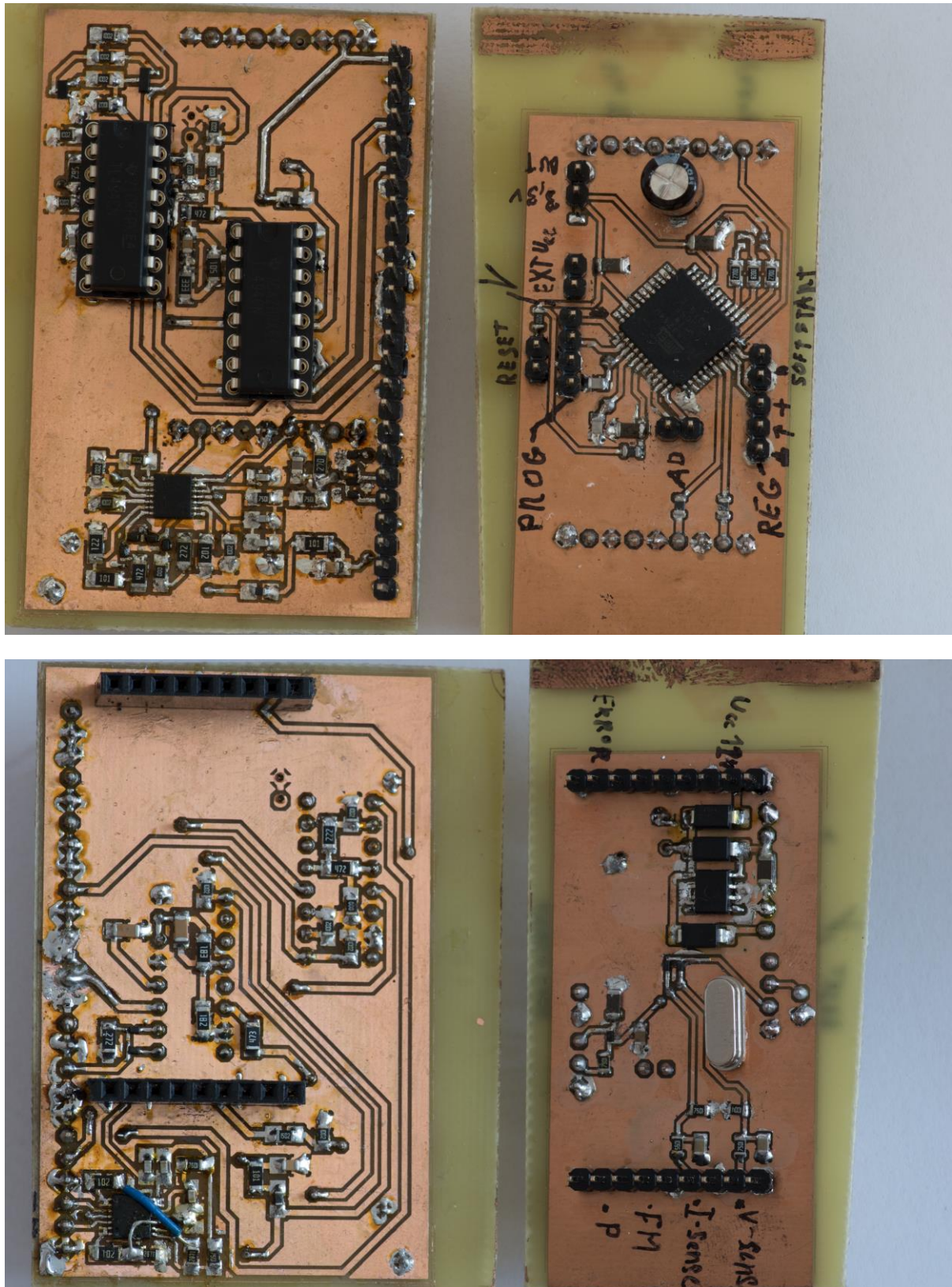
Množství	Součástka	Označení	Pouzdro	Cena/ks
1	SOCKETS, DIP8	U3	IPC-2221A/2222\DIP-8	
1	ZENER, BZW03-C150	D4	IPC-2221A/2222\SOD-27	
2	RESISTOR, 1k Ω	R12, R43	Generic\1206	2,6
1	RESISTOR, 100 Ω	R13	Generic\1206	
1	CAPACITOR, 10nF	C13	Generic\1206	0,516
12	Diode, STTH1R06	D3, D5, D6, D8, D15, D16, D17, D18, D19, D37, U17, U19	Ultiboard\SMA	4,2
1	CAPACITOR, 2n2F	C14	IPC-2221A/2222\CAPR750-1100X500X1200	
7	CAPACITOR, 100nF	C2, C9, C12, C15, C17, C30, C38	Generic\1206	1,51
3	RESISTOR, 1M2 Ω	R14, R20, R21	Generic\1206	
1	OPTOCOUPLER, 4N25	U6	IPC-2221A/2222\CASE730A-02	
1	RESISTOR, 22 Ω	R15	Generic\1206	
1	CAP_ELECTROLIT, 1 μ F	C16	Generic\SP_ELKO_B	2,9
1	RESISTOR, 21k Ω	R16	Generic\1206	
1	ZENER, BZV90-C27	D7	IPC-2221A/2222\SOD-27	
1	RESISTOR, 47 Ω	R17	Generic\1206	
1	RESISTOR, 2k Ω	R18	Generic\0805	0,28
1	RESISTOR, 390 Ω	R19	Generic\1206	
1	ZENER, BZV90-C13	D9	IPC-2221A/2222\SOD-27	
1	CAP_ELECTROLIT, 1000 μ F	C18	IPC-2221A/2222\CAPPR500-1250X2500	
1	INDUCTOR, 47 μ H	L5	Generic\2512	
1	CAP_ELECTROLIT, 100 μ F	C19	IPC-7351\AlumElec-CaseG	5,2
1	ZENER, BZW03-C10	D23	IPC-2221A/2222\SOD-27	
1	RESISTOR, 2K7 Ω	R44	Generic\1206	
5	RESISTOR, 10k Ω	R9, R25, R38, R45, R80	Generic\1206	
1	CAPACITOR, 47 μ F	C1	Generic\1206	

1	OPAMP, LM358AD	U23	IPC-7351\SO-8	
5	CONNECTORS, TEST_PT1	J1, J2, J3, J4, J5	Generic\TEST_PT1	
1	FWB, 3N246	D1	Ultiboard\KBUXM1000	12,3
1	INDUCTOR, 760μH	L3	Ultiboard\ETD44-vertical	
1	RESISTOR, 27Ω	R1	Ultiboard\RES_5W_na_vysku	2,1
1	INDUCTOR, 33μH	L4	Ultiboard\DRO_TDK24X13	30
1	CAPACITOR, 220nF	C4	Ultiboard\CAPR2250-2650x700x1650	3,6
3	CAPACITOR, 1μF	C5, C6, C36	Ultiboard\CAPR2250-2650x1000x1850	
1	RESISTOR, 180kΩ	R2	Generic\1206	2,72
2	RESISTOR, 200kΩ	R3, R4	Generic\1206	3,24
1	RESISTOR, 4K75Ω	R5	Generic\1206	3,24
4	RESISTOR, 0.08Ω	R6, R75, R81, R82	Generic\2512	2,85
1	RESISTOR, 220Ω	R7	Generic\1206	
1	RESISTOR, 25kΩ	R8	Generic\1206	
2	RESISTOR, 10Ω	R10, R31	Generic\1206	
7	CAPACITOR, 100pF	C8, C25, C26, C27, C28, C29, C37	Generic\1206	10
1	CAPACITOR, 1μF	C11	Generic\1206	
1	RESISTOR, 4000Ω	R22	Ultiboard\Res_3W_na_vysku	
1	CAPACITOR, 500pF	C20	Generic\1206	
2	CAPACITOR, 2.2μF	C21, C22	Ultiboard\CAPR3750-4150x1700x290	
2	CAPACITOR, 1μF	C24, C44	Ultiboard\CAPR2250-2650x700x1650	
4	RESISTOR, 10Ω	R27, R28, R29, R30	Generic\2512	
4	CAP_ELECTROLIT, 100μF	C7, C31, C32, C33	IPC-2221A/2222\CAPPR750-1800X3550	31
1	CONNECTORS, HDR1X3	J6	Generic\HDR1X3	
5	RESISTOR, 1Ω	R23, R26, R40, R41, R42	Generic\1206	
2	CAPACITOR, 100nF	C3, C34	IPC-2221A/2222\CAPR635-1000X399X1000	
6	RESISTOR, 220kΩ	R24, R64, R65, R70, R71, R72	Generic\1206	3,25
2	RESISTOR, 3K3Ω	R63, R73	Generic\1206	0,27
1	RESISTOR, 800Ω	R34	Generic\1206	
1	PFC, ICE2PCS01G	U4	IPC-7351\SOP8	27

5	MOS_DRIVER, MIC4420	D2, U11, U12, U13, U24	Ultiboard\S08	24
1	Diode, S5M-DIO	D14	Generic\SMC	3,3
1	Diode, C3D06060F	U14	Generic\TO-220AC	67
5	N_MOS, IPP60R280P6XKSA1	T3, T4, T5, T6, T9	Generic\TO-220	32,7
5	Optocoupler, TLP2745	U7, U8, U10, U16, U26	Ultiboard\11-4N1A	18
1	N_MOS, IPA60R650CE	T2	Generic\TO-220	19
1	Diode, MBR0520L	D20	IPC-7351\SOD-123	1,1
1	Transformer, Inductor	T7	Ultiboard\ETD39-vertical	
1	Transformer, B82801B	T8	Ultiboard\B82801B	40
1	Relay, HF3FF	U5	Ultiboard\Rele_HF3FF	8
1	Relay, HF118FK	U27	Ultiboard\Rele_7.5kV	
6	Zener_Transil, 1.5KE440	D10, D11, D12, D13, D21, D30	IPC-2221A/2222\DO-201AD	6,6
1	ZENER, BZV60-B18	D38	IPC-2221A/2222\DO-34	
2	P_MOS, FDC658P	U15, U29	Ultiboard\SOT-457	
1	PFC, FMP-25010-01	U9	Ultiboard\EMI	88
1	Diode, RB520S30T1G	D40	Ultiboard\SOD523	0,7
1	VOLTAGE_REGULATOR, LM7812CT	U20	Generic\TO-220	
1	CAPACITOR, 330nF	C23	Generic\1206	
5	RESISTOR, 10k Ω	R32, R33, R35, R36, R37	Ultiboard\0805+1206	0,33
1	CONNECTORS, HDR1X2	J8	Generic\HDR1X2	
1	RESISTOR, 33k Ω	R11	Generic\1206	
1	CONNECTORS, HDR1X25	J7	Generic\HDR1X25	
1	Transformer, Trafo_TNY276	T10	Ultiboard\Trafo_TNY276	
2	CAPACITOR, 1nF	C10, C35	Generic\1206	
3	BJT_NPN, BC547C	Q1, Q2, Q3	Motorola\SOT-23	0,55
1	RESISTOR, 2K2 Ω	R39	IPC-7351\Chip-R1206	
2	RESISTOR, 15k Ω	R46, R47	IPC-7351\Chip-R1206	
5	RESISTOR, 1k Ω	R48, R49, R50, R51, R52	Ultiboard\0805+1206	2,6

D FOTOGRAFIE VÝROBKU

Pohled na řídicí desku vlevo a na desku s mikrokontrolérem vpravo.



Pohled na celý předřadník

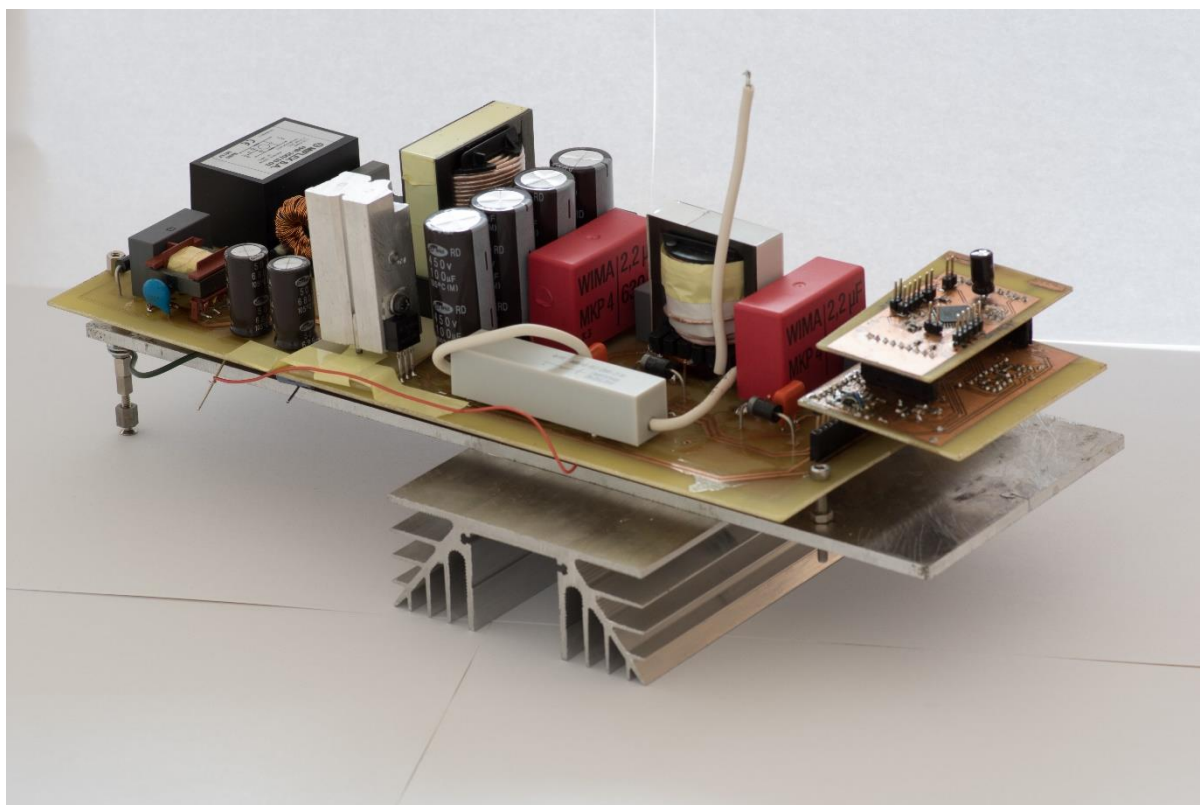


Foto z testování

