



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

ELEKTRONIKA ZÁBLESKOVÉHO SVĚTLA VELKÉHO VÝKONU

ELECTRONIC EQUIPMENT FOR HIGH-POWER FLASH LIGHT

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

BACHELOR'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Karel Fritsch

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

Ing. Jan Knobloch, Ph.D.

BRNO 2018



Bakalářská práce

bakalářský studijní obor **Silnoproudá elektrotechnika a elektroenergetika**

Ústav výkonové elektrotechniky a elektroniky

Student: Karel Fritsch

ID: 173646

Ročník: 3

Akademický rok: 2017/18

NÁZEV TÉMATU:

Elektronika zábleskového světla velkého výkonu

POKYNY PRO VYPRACOVÁNÍ:

1. Nakreslete schéma nabíječe a synchronizačního obvodu.
2. Navrhněte a vyrobte DPS.
3. Zařízení oživte, proveďte zkoušky a diskutujte výsledky.

DOPORUČENÁ LITERATURA:

[1] PATOČKA, Miroslav. Magnetické jevy a obvody ve výkonové elektronice, měřicí technice a silnoproudé elektrotechnice. 1. vyd. V Brně: VUTIUM, 2011, 564 s. ISBN 978-80-214-4003-6.

[2] NOVOTNÝ, Vlastislav, Pavel VOREL a Miroslav PATOČKA. Napájení elektronických zařízení: Přednášky. Brno, 2002.

Termín zadání: 5.2.2018

Termín odevzdání: 28.5.2018

Vedoucí práce: Ing. Jan Knobloch, 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 této práce je seznámení s topologiemi spínaných zdrojů menších výkonů a následná aplikace získaných poznatků při návrhu měniče pro nabíjení kondenzátorové baterie fotografického blesku velkého výkonu. Dále práce obsahuje návrh řídicí elektroniky s mikrokontrolérem a popis postupu při práci na oživování jednotlivých funkčních bloků.

Klíčová slova

blesk; výbojka; blokující měnič; impulzní transformátor; kondenzátor; IFK 2000; mikrokontrolér; řízení

Abstract

Point of this thesis is introduction to topology of small power switching power supplies and final application of gained knowledge during development of converter for charging capacitor battery of high power photographic flash. Thesis also contains design of control unit with microcontroller and description of work process of activation individual function blocks.

Keywords

flash; flash lamp; flyback converter; pulse transformer; capacitor; IFK 2000; microcontroller; control

Bibliografická citace:

FRITSCH, K. *Elektronika zábleskového světla velkého výkonu*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, 2018. 64 s. Vedoucí bakalářské práce Ing. Jan Knobloch, Ph.D.

Prohlášení

„Prohlašuji, že svou závěrečnou práci na téma Elektronika zábleskového světla velkého výkonu 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 závěrečné práce dále prohlašuji, že v souvislosti s vytvořením této závěrečné 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 části druhé, hlavy VI. díl 4 Trestního zákoníku č. 40/2009 Sb.

V Brně dne **29. května 2018**

.....
podpis autora

Poděkování

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

V Brně dne **29. května 2018**

.....
podpis autora

Obsah

1	Úvod	12
2	Teoretická část práce	13
2.1	Historie fotografického blesku.....	13
2.1.1	Osvětlovací směsi	13
2.1.2	Bleskové žárovky	14
2.1.3	První blesky s výbojkou	15
2.2	Základní části fotografického blesku s výbojkou.....	16
2.2.1	Zdroj energie	16
2.2.2	Měnič	16
2.2.3	Kondenzátorová baterie.....	17
2.2.4	Řídící a synchronizační obvod	17
2.2.5	Záblesková výbojka.....	17
2.3	Synchronizace blesku	18
2.3.1	Kabelem.....	18
2.3.2	Opticky.....	19
2.3.3	Rádiově	20
2.4	Možné topologie měniče.....	21
2.4.1	Jednočinný blokující měnič.....	21
2.4.2	Jednočinný propustný měnič (můstek).....	23
2.4.3	Dvočinný propustný měnič (push-pull).....	25
3	Praktická část práce.....	26
3.1	Použitá výbojka.....	26
3.2	Kondenzátorová baterie.....	27
3.3	Zapalovací obvod.....	28
3.4	Řídící a synchronizační obvod	29
3.4.1	Regulace výkonu záblesku	30
3.4.2	Kontrola stavu baterie	30
3.4.3	Ovládání uživatelem	31
3.5	Návrh měniče.....	32
3.5.1	Požadavky na měnič	32
3.5.2	Verze s integrovaným obvodem UC3843	33
3.5.3	Verze s integrovaným obvodem TL494	37
3.6	Návrh transformátoru.....	40
3.6.1	Základní parametry.....	40
3.6.2	Výběr jádra	41
3.6.3	Výpočty	43
3.6.4	Dimenzování průřezu vnutří	44

3.6.5 Skin efekt.....	45
3.6.6 Přehled finálních parametrů a realizace impulsního transformátoru	46
3.7 Dimenzování tranzistoru	50
3.8 Návrh a výroba DPS.....	51
3.9 Oživení měniče 2. verze	53
3.10 Měření průběhů na výbojce.....	58
4 Závěr	61
Literatura	62
Seznam příloh.....	64

Seznam obrázků

Obrázek 1: Použití osvětlovací směsi [2]	13
Obrázek 2: Blesková žárovka [2].....	14
Obrázek 3: Flashcube [2].....	14
Obrázek 4: Kodatron firmy Kodak [2].....	15
Obrázek 5: Základní části blesku.....	16
Obrázek 6: Synchronizační kabel [3].....	18
Obrázek 7: Tandemové řízení blesků [4].....	19
Obrázek 8: Rádiové spouště pro studiové blesky [5].....	20
Obrázek 9: Jednočinný blokující měnič - zjednodušené schéma	21
Obrázek 10: Jednočinný blokující měnič - průběhy.....	22
Obrázek 11: Jednočinný propustný měnič - zjednodušené schéma.....	23
Obrázek 12: Jednočinný propustný měnič – průběhy	24
Obrázek 13: Dvočinný propustný měnič - zjednodušené schéma	25
Obrázek 14: Dvočinný propustný měnič - průběhy.....	25
Obrázek 15: Záblesková výbojka IFK 2000 [6].....	26
Obrázek 16: Kondenzátorová baterie ukotvená v šasi	27
Obrázek 17: Schéma zapalovacího obvodu.....	28
Obrázek 18: Upravený zapalovací transformátor	28
Obrázek 19: Schéma řídicího obvodu.....	29
Obrázek 20: Přední panel s popisky	31
Obrázek 21: Vnitřní zapojení obvodu UC3843 [8]	33
Obrázek 22: Schéma zapojení měniče s UC3843	34
Obrázek 23: Vnitřní zapojení obvodu TL494 [9]	37
Obrázek 24: Schéma zapojení měniče s TL494	38
Obrázek 25: Chování materiálu CF297 [10]	42
Obrázek 26: Hloubka vniku [11]	45
Obrázek 27: Realizace primárního vinutí 1. verze	47
Obrázek 28: Vodič primárního vinutí 2. verze.....	48
Obrázek 29: Rozložení vinutí impulsního transformátoru	49
Obrázek 30: Osazená deska měniče 1. verze	51
Obrázek 31: Osazená deska měniče 2. verze	51
Obrázek 32: Osazená a připojená DPS řízení	52
Obrázek 33: Výstupní signál z budiče MIC4420 při střídě asi 35%	53
Obrázek 34: Výstupní signál z budiče MIC4420 při střídě asi 80%	53
Obrázek 35: Průběh napětí na tranzistoru při střídě $s = 0,2$	54
Obrázek 36: Průběh napětí na tranzistoru při střídě $s = 0,4$	55
Obrázek 37: Průběh napětí na tranzistoru při střídě $s = 0,7$	56
Obrázek 38: Průběh signálu I_{sense} při $s = 0,4$	57

Obrázek 39: Blokové schéma měřícího obvodu	58
Obrázek 40: Průběh napětí a proudu na výbojce.....	59
Obrázek 41: Průběh výkonu na výbojce	60

Seznam tabulek

Tabulka 1: Provozní vlastnosti a režimy výbojky IFK 2000	26
Tabulka 2: Vlastnosti kondenzátorů RIFA PEH200UV4680V [7].....	27
Tabulka 3: Úrovně regulace výkonu	30
Tabulka 4: Základní parametry pro návrh 1. verze transformátoru.....	41
Tabulka 5: Základní parametry pro návrh 2. verze transformátoru.....	41
Tabulka 6: Vlastnosti jádra ETD 44 a materiálu CF297	42
Tabulka 7: Vypočtené parametry 1. verze transformátoru	46
Tabulka 8: Vypočtené parametry 2. verze transformátoru	46
Tabulka 9: Kritéria pro volbu tranzistoru	50
Tabulka 10: Orientační měření měniče	56
Tabulka 11: Základní vlastnosti proudového senzoru ES2000.....	58

1 ÚVOD

Cílem teoretické části této bakalářské práce je krátké seznámení s historií fotografického blesku, popis základních částí fotografického blesku, problematika synchronizace s fotografickým přístrojem. Dále tato část práce obsahuje základní informace o vybraných topologiích spínaných zdrojů.

Úkolem praktické části práce je návrh nabíjecího měniče pro kondenzátorovou baterii včetně všech potřebných výpočtů a návrh řídicího i synchronizačního obvodu. V práci budou také představeny vlastnosti použitých komponent jako např. výbojka IFK2000 a kondenzátorová baterie.

Součástí praktické části bude i realizace celého zařízení, návrh DPS, oživení jednotlivých komponent a diskuze dosažených výsledků.

2 TEORETICKÁ ČÁST PRÁCE

Tato část práce je zaměřena na obecnou problematiku fotografických blesků a měničů. Dále zde budou představeny možnosti synchronizace blesku s fotoaparátem a základní části fotografických blesků používajících výbojku.

2.1 Historie fotografického blesku

V této kapitole budou představeny prvopočátky fotografické osvětlovací techniky od pyrotechnických osvětlovacích směsí až k prvním výbojkovým bleskům z druhé poloviny 20. století.

2.1.1 Osvětlovací směsi

První zařízení určená k přisvětlování fotografované scény se začala používat kolem roku 1865. Pracovala na principu hoření pyrotechnické směsi hořčíku s oxidem železným a zapalována byla ručně. Přesnost synchronizace závisela tedy pouze na šikovnosti fotografa. Výkon blesku se reguloval jednoduše použitím většího či menšího množství směsi. Tento systém byl velmi primitivní a docházelo k nehodám při kterých byl často popálen nejen fotograf ale i fotografovaná osoba. [2]

Navzdory všem nevýhodám a moderním zařízením se tento systém stále využívá při fotografování velkých jeskynních prostor.



Obrázek 1: Použití osvětlovací směsi [2]

2.1.2 Bleskové žárovky

Významné zlepšení v oblasti fotografických blesků přinesl kolem roku 1929 objev takzvané bleskové žárovky. Jednalo se o skleněnou baňku naplněnou chaoticky svinutým hořčíkovým nebo zirkoniovým drátkem v kyslíkové atmosféře. Baňka byla z vnější strany pokryta barevným filmem který srovnal spektrum produkovaného záblesku se spektrem denního světla.

Velkou nevýhodou bleskových žárovek byl fakt že je bylo možné použít pouze jednou a baňka žárovky dosahovala vysokých teplot což znesnadňovalo jejich okamžitou výměnu. [2]



Obrázek 2: Blesková žárovka [2]

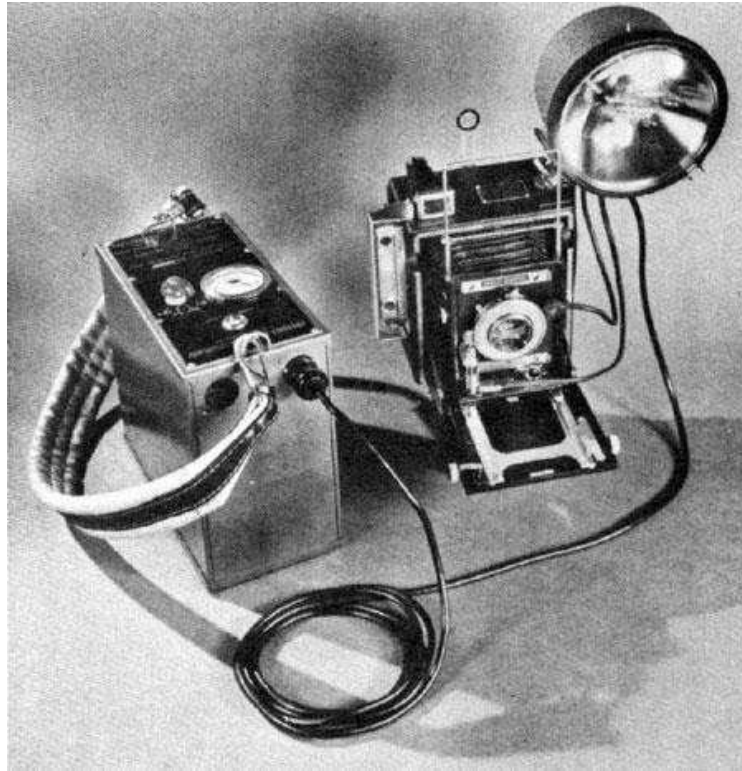
Koncem 60. let 19. století se na trh dostaly takzvané bleskové kostky. Kostka byla tvořena čtyřmi bleskovými žárovkami včetně malého reflektoru. Po každém použití se kostka otočila a celek tak umožňoval pořizování čtyř fotografií s bleskem v řadě. [2]



Obrázek 3: Flashcube [2]

2.1.3 První blesky s výbojkou

První klasické blesky s xenonovou výbojkou se objevily krátce po druhé světové válce. Pokrok v miniaturizaci elektroniky umožnil zmenšení celého zařízení a tento nový systém rychle nahradil oblíbené bleskové žárovky. [2]

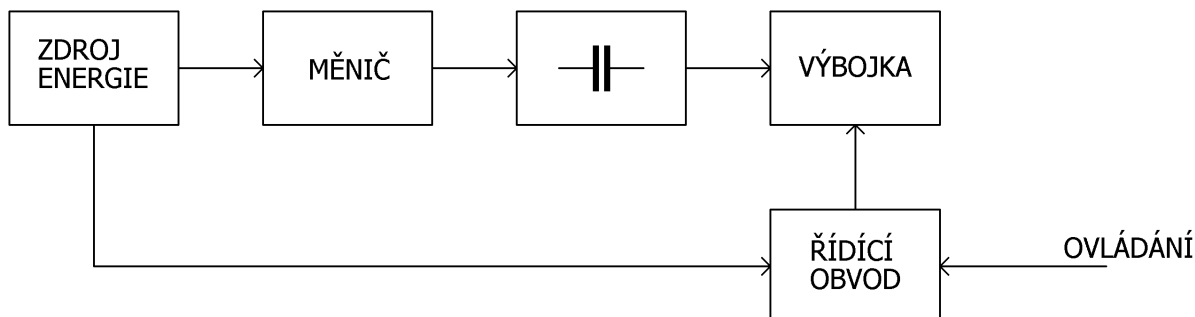


Obrázek 4: Kodatron firmy Kodak [2]

Tyto první blesky nedokázaly regulovat výkon záblesku. Elektronika a baterie zařízení byly těžké a fotografa omezoval propojovací kabel, nicméně se jednalo o první zařízení schopné opakovaného záblesku bez nutnosti měnit některé z komponent. [2]

2.2 Základní části fotografického blesku s výbojkou

Fotografický blesk je zařízení určené ke krátkodobému nasvícení fotografované scény. Délka záblesku je typicky 1-5 milisekund. Barevná teplota emitovaného světla je asi 5500K v závislosti na typu výbojky. Každý moderní blesk používající zábleskovou výbojku se skládá z nejméně pěti základních částí.



Obrázek 5: Základní části blesku

2.2.1 Zdroj energie

Jako zdroj energie pro FB můžeme použít baterii nebo elektrickou síť. Většina zařízení je napájena z akumulátoru, aby zůstala zachována mobilita zařízení. Při nabíjení jsou na baterie kladeny vysoké nároky. Měnič odebírá značný proud a uživatel očekává dlouhou výdrž bez nutnosti nabíjení.

2.2.2 Měnič

Úkolem měniče je zvýšit napětí zdroje na pracovní napětí výbojky. U měničů použitých ve FB je kladen důraz zejména na rychlost nabití kondenzátorové baterie. Při profesionálním fotografování za použití malého externího blesku připojenému k zrcadlovce dosahuje frekvence snímání i 45 snímku za minutu. Měnič tak musí mít dostatečný výkon k rychlému nabití pracovního kondenzátoru.

2.2.3 Kondenzátorová baterie

Kondenzátor ukládá energii potřebnou pro záblesk. Konstrukce jednotlivých kondenzátorů tak i baterie jako celku musí být dostatečně robustní aby zařízení bylo schopné odolávat velmi vysokým špičkovým proudům při zapálení výbojky. Energie v něm uložená je dána vztahem (1)

$$E = \frac{1}{2} C \cdot U^2 \quad (1)$$

Vzhledem k velmi vysokým nárokům na proudové zatížení kondenzátorové baterie bude nutné počítat s ekvivalentním sériovým odporem.

2.2.4 Řídící a synchronizační obvod

Přesná synchronizace blesku s fotoaparátem je základní požadavek na kvalitní zařízení. K záblesku musí dojít přesně v době expozice, tedy v době kdy je clona fotoaparátu otevřena a dochází k osvětlení filmu, CCD nebo CMOS čipu. Tyto časy jsou velmi krátké, proto je kladen velký důraz na přesnost těchto obvodů.

2.2.5 Záblesková výbojka

Speciálním typem výbojek jsou výbojky zábleskové. Jako náplň slouží zpravidla xenon a jeho směsi. Jejich baňka je vyrobena z křemičitého skla a je tvarována buď jako rovný válec, do tvaru písmene U, O, nebo jako spirála. Jsou používány jako blesk u fotoaparátů, signální překážková svítidla nebo v kopírovacích přístrojích. Výboj je vyvolán impulsním napětím 10-15 kV přivedeným na zapalovací elektrodu. Proud obloukem je závislý na výkonu výbojky. U menších se pohybuje v řádech desítek ampér, u velkých výbojek může dosahovat až jednotek kiloampér. Výboj trvá velmi krátkou dobu (0,1 – 50 ms). Měrný světelný výkon výbojky je 25 lm/W pro lineární typ a 30 lm/W pro typ spirálový. [2]

2.3 Synchronizace blesku

Propojení fotoaparátu s bleskem můžeme realizovat několika způsoby. Jednotlivé možnosti, jejich výhody a nevýhody jsou uvedeny níže.

2.3.1 Kabelem

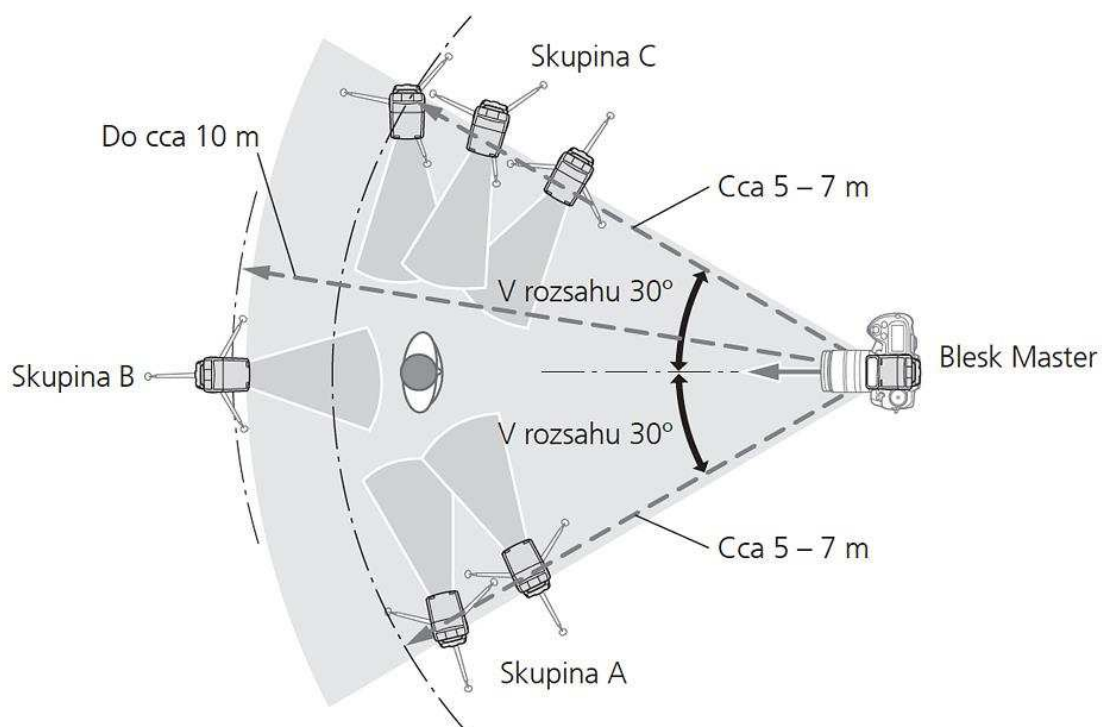
Synchronizace pomocí kabelu nejjednodušší systém, který lze použít. Prostým propojením externího blesku a fotoaparátu za pomoci vhodného rozhraní získáme fungující celek. Propojení je spolehlivé a rychlé. Nevýhodou je kabel, který značně omezuje pohyb fotografa. Tento způsob synchronizace je vhodný například pro případy focení se stativem kdy není třeba blesk ani fotoaparát přemísťovat.



Obrázek 6: Synchronizační kabel [3]

2.3.2 Opticky

Optické neboli tandemové spouštění blesků je pokročilejší metodou synchronizace. Pracuje na principu řízení jednoho blesku druhým. Primární blesk fotoaparátu osvětí optický senzor sekundárního blesku a tím dojde k jeho aktivaci. Optický senzor je často součástí studiových blesků. Výhodou tohoto systému je absence kabelu možnosti ovládní několika blesku najednou. Fotograf není omezen v pohybu. Sekundární blesky však vyžadují přímou viditelnost vůči primárnímu.



Obrázek 7: Tandemové řízení blesků [4]

2.3.3 Rádiově

Rádiová synchronizace je nejmodernější systém komunikace mezi Fotoaparátem a bleskem. Vysílač je umístěný na fotoaparátu a přijímač na blesku. Fotograf takto může ovládat libovolný počet blesků. Tento způsob komunikace umožňuje nejen synchronizaci fotoaparátu, ale také výměnu dalších informací. Například stav baterie sekundárních blesků, popřípadě údaje z expozimetru. Další výhodou je možnost synchronizace bez přímé viditelnosti sekundárních zařízení a dosah závislý pouze na výkonu vysílače a přijímače. Jedinou nevýhodou tohoto systému jsou vyšší pořizovací náklady.



Obrázek 8: Rádiové spouště pro studiové blesky [5]

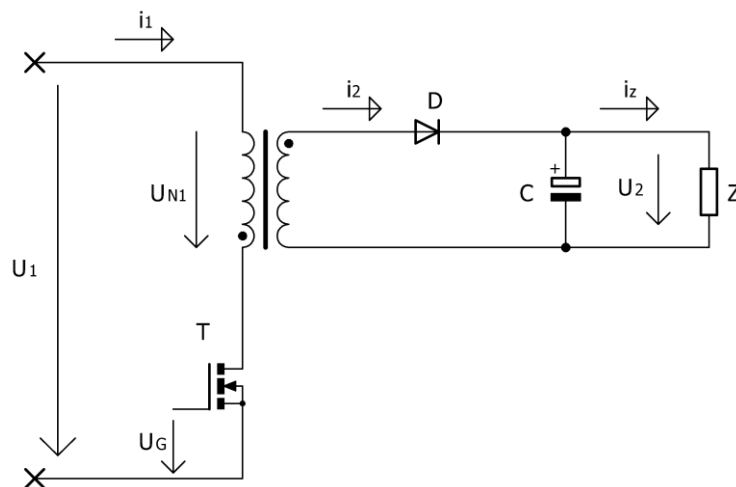
2.4 Možné topologie měniče

V této kapitole budou představeny některé z topologií spínaných zdrojů.

2.4.1 Jednočinný blokující měnič

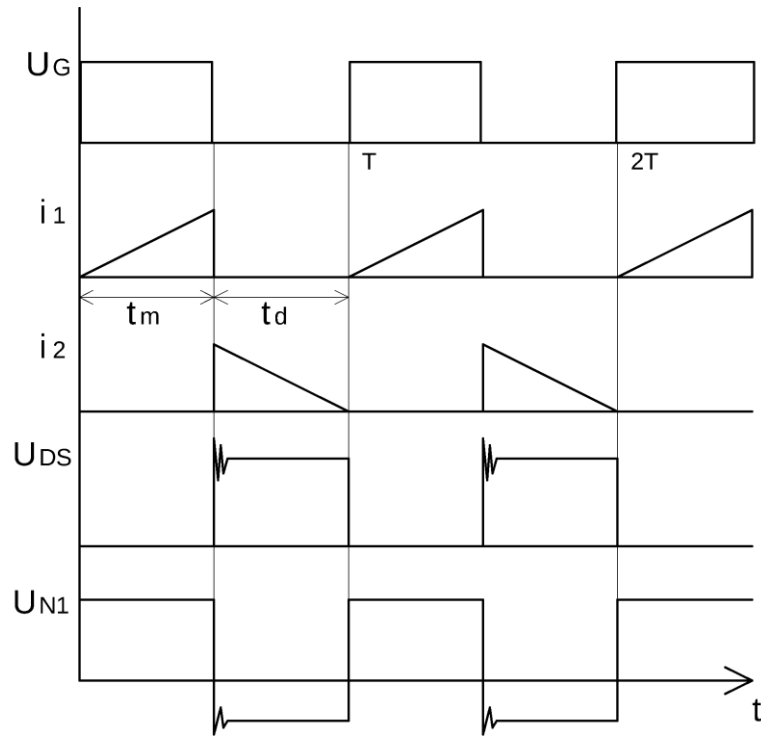
Patří ke konstrukčně nejjednodušším měničům s galvanickým oddělením. Využívá pouze jeden spínací prvek a impulsní transformátor, respektive tlumivku s více vinutími. Magnetický obvod musí mít vzduchovou mezeru. [1]

Základní zapojení jednočinného blokujícího měniče je zobrazeno na Obr. 9



Obrázek 9: Jednočinný blokující měnič - zjednodušené schéma

K přenosu energie u Jednočinných blokujících měničů dochází v době kdy je spínací prvek T vypnutý. V době t_m kdy je spínací prvek sepnut, se jádro transformátoru magnetizuje proudem i_1 proudícím skrz primární vinutí. V době vypnutého spínacího prvku t_d dochází k demagnetizaci jádra skrze sekundární vinutí a proud i_2 nabíjí kondenzátor C. [1]

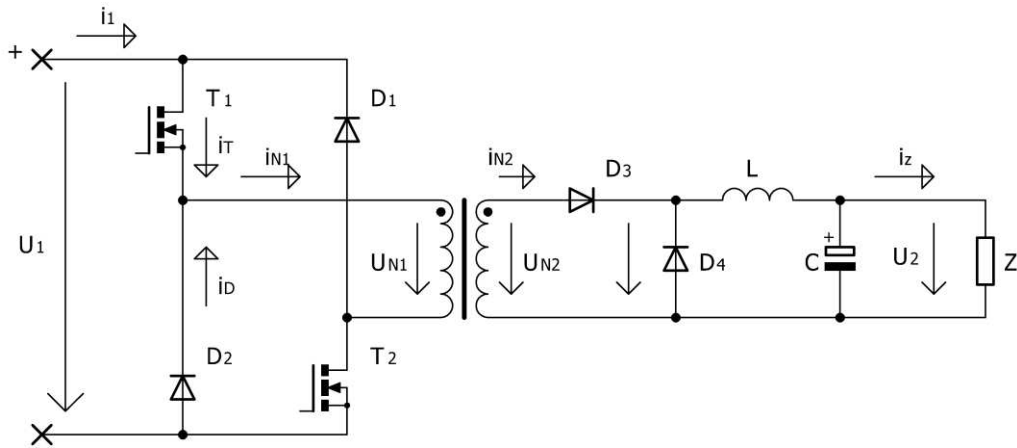


Obrázek 10: Jednočinný blokující měnič - průběhy

Jednočinné blokující měniče jsou velmi rozšířené a můžeme je nalézt téměř v každém zařízení. Pro svou jednoduchost a nízké nároky na množství součástek jsou téměř všechny jednoduché zdroje do 20 W realizovány pomocí této topologie. Velkou výhodou je také mimořádná variabilita vstupního napětí. Zdroje jsou běžně konstruovány pro vstupní napětí 100 – 240 V. [1,13]

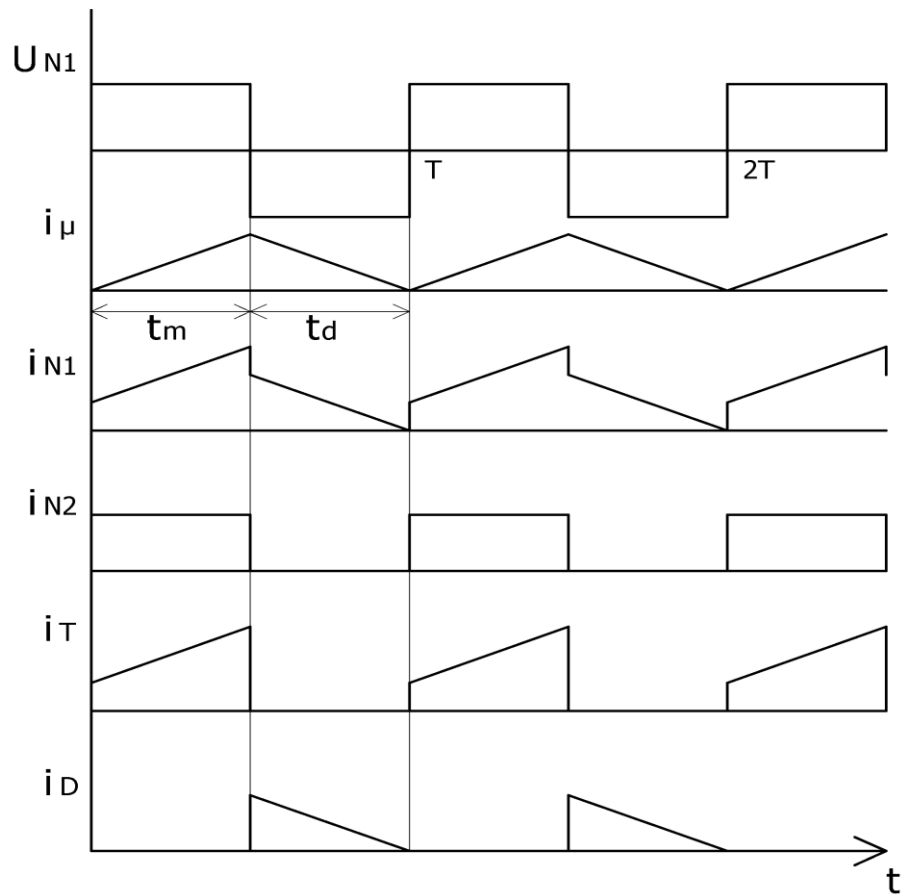
2.4.2 Jednočinný propustný měnič (můstek)

Na rozdíl od blokujících měničů, jednočinný propustný měnič přenáší energii z primární strany na sekundární v době kdy jsou spínací prvky zapnuty.



Obrázek 11: Jednočinný propustný měnič - zjednodušené schéma

Po sepnutí tranzistorů $T_{1,2}$ dochází k magnetizaci transformátoru. Magnetizační proud roste lineárně (pokud zanedbáme nelinearitu magnetizační charakteristiky). Po vypnutí obou tranzistorů dojde k převrácení polarity a tím k uzavření obvodu přes diody $D_{1,2}$ čímž se transformátor demagnetizuje. Napětí U_{N2} na sekundární straně transformátoru má stejný průběh jako napětí U_{N1} na straně primární. Změní se pouze jeho velikost a to v poměru počtu závitů transformátoru. Tlumivka L slouží jako zásobárna energie pro dobu demagnetizace t_d . [1]

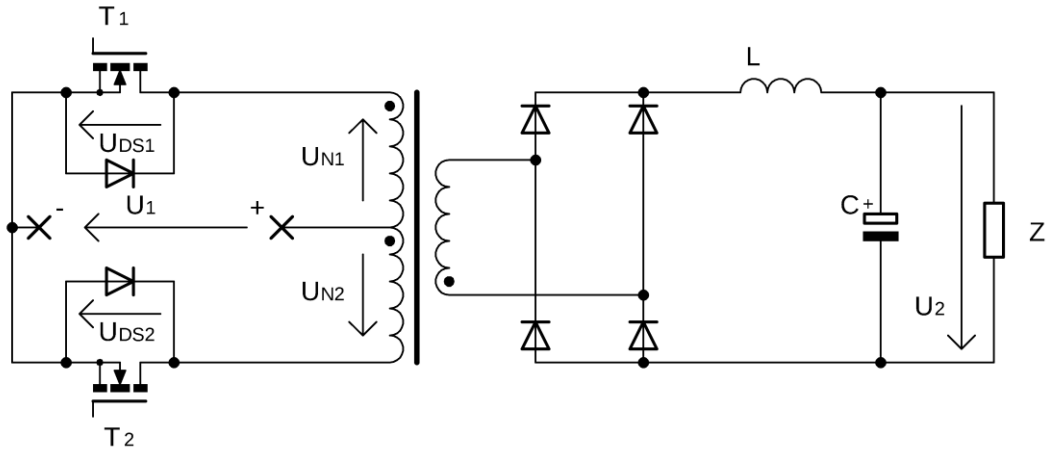


Obrázek 12: Jednočinný propustný měnič – průběhy

S měniči tohoto typu se můžeme setkat v některých typech svářecích invertorů, jejich výhodou je hospodárnější využití transformátoru oproti blokujícím měničům. [13]

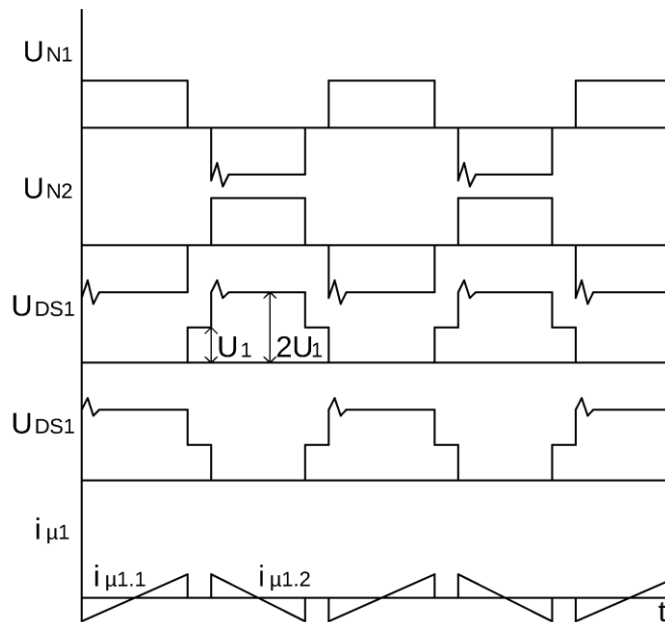
2.4.3 Dvojčinný propustný měnič (push-pull)

Dvojčinné propustné měniče typu push-pull se používají zejména v aplikacích vyšších výkonů s nízkým vstupním napětím. Důvodem je velké napěťové namáhání tranzistorů z důvodu dvojitého primárního vinutí. Velkou výhodou tohoto typu měniče je připojení obou drainů na záporný pól zdroje. Z tohoto důvodu nemusí být řídicí signály galvanicky oddělené. [1]



Obrázek 13: Dvojčinný propustný měnič - zjednodušené schéma

Z obr. 14 je jasně patrné vysoké napěťové zatěžování tranzistorů způsobené napětím transformovaným z neaktivní poloviny primárního vinutí. Překmit je způsoben rozptylovou indukčností transformátoru a zvyšuje se se zatížením měniče. [1]



Obrázek 14: Dvojčinný propustný měnič - průběhy

3 PRAKTICKÁ ČÁST PRÁCE

V praktické části přistoupíme k návrhu a realizaci měniče, řídicího obvodu a dalších důležitých částí.

3.1 Použitá výbojka

V daném blesku je použita xenonová záblesková výbojka IFK 2000. Tato výbojka je primárně určena k osvětlování scén při fotografování ale může být použita pro jiné technické aplikace. Anoda výbojky má válcový tvar, katoda je sférická. Polaritu elektrod je nutné dodržovat! Zapalovací elektroda je tvořena niklovým drátem, obtočeným kolem pracovní části výbojky.

Výbojka může pracovat v různých režimech. Tyto se od sebe liší napětím na kondenzátorové baterii, kapacitou použité kondenzátorové baterie a v důsledku toho energií, délkou záblesku a povolenou frekvencí záblesků. Vlastnosti použité výbojky jsou uvedeny v tabulce.

Tabulka 1: Provozní vlastnosti a režimy výbojky IFK 2000

Parametry	Režim		
	A	B	V
Energie záblesku [J]	2000	400	400
Kapacita zábleskového kond. [μF]	16000	8000	800
Napětí na zábleskovém kond. [V]	500	320	1000
Doba trvání záblesku [ms]	4	2	0,25
Průměrná životnost [záblesků]	5000	100000	30000
Samozápalné napětí [V]	2200		



Obrázek 15: Záblesková výbojka IFK 2000 [6]

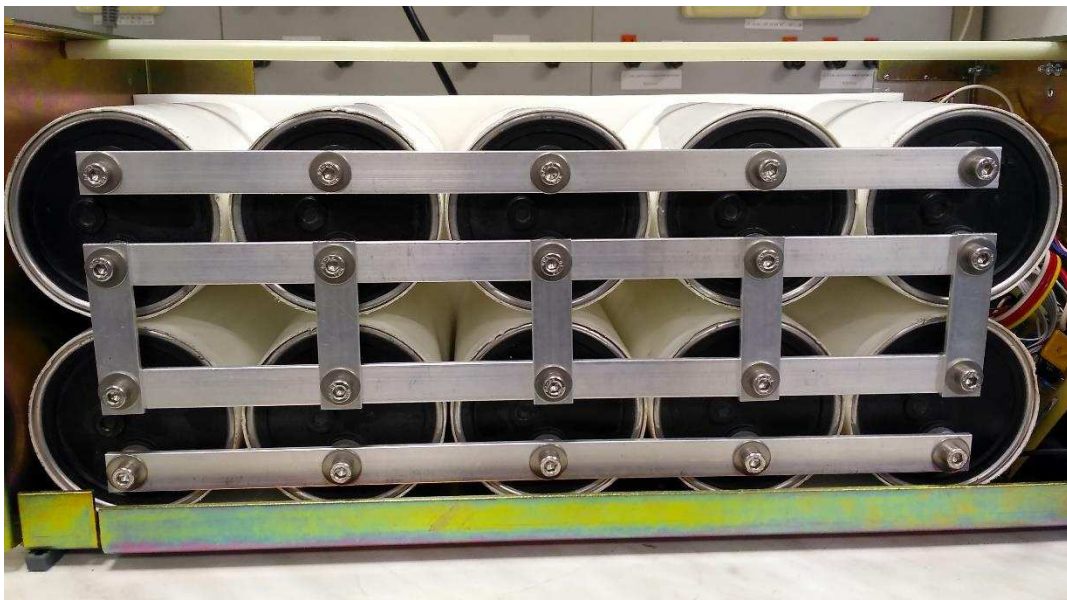
3.2 Kondenzátorová baterie

V baterii jsou použity elektrolytické kondenzátory RIFA PEH200UV4680V. Baterie je složena v sestavě 2S5P tedy dva sériově zapojené kondenzátory v pěti paralelních větvích. Propojení kondenzátorů je realizováno pomocí hliníkových pásů s průřezem 45 mm², které spolehlivě snesou proudové zatížení při zapálení výboje.

Tabulka 2: Vlastnosti kondenzátorů RIFA PEH200UV4680V [7]

C [μF]	U [VDC]	ESR 20 °C 100 Hz [mΩ]	ESR 20 °C 100 kHz [mΩ]
6800	350	15	8

Celá baterie má tedy teoreticky kapacitu 17000 μF, maximální pracovní napětí 700 VDC a uchová energii až 4165 J. Protože však povolená energie použité výbojky je maximálně 2000 J a překročení této hodnoty by mohlo zničit výbojku a vážně ohrozit okolí bude baterie nabíjena na 500 VDC s energií 2125 J. I tato hodnota je nad horním limitem výbojky. Pokud však uvažujeme ztráty na vodičích, kondenzátorech a fakt že k zániku proudu výbojkou dojde dříve než dojde k úplnému vybití kondenzátorů bude výsledná energie dodaná do výbojky spolehlivě pod hranicí 2000 J.

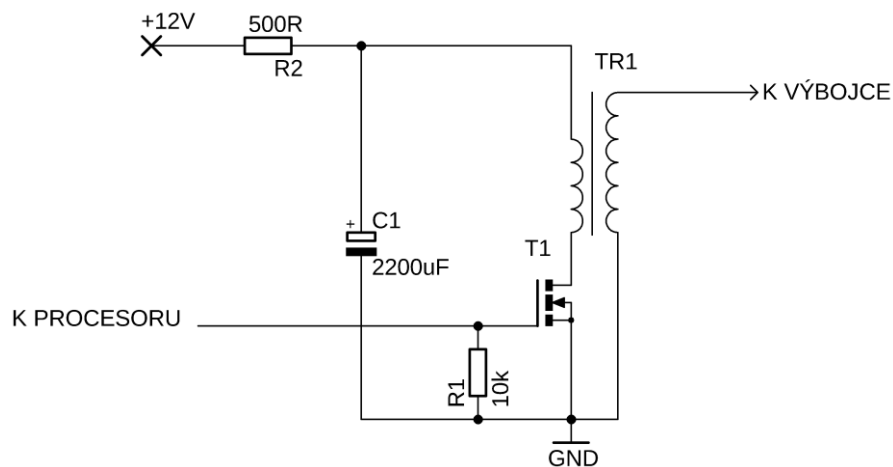


Obrázek 16: Kondenzátorová baterie ukotvená v šasi

3.3 Zapalovací obvod

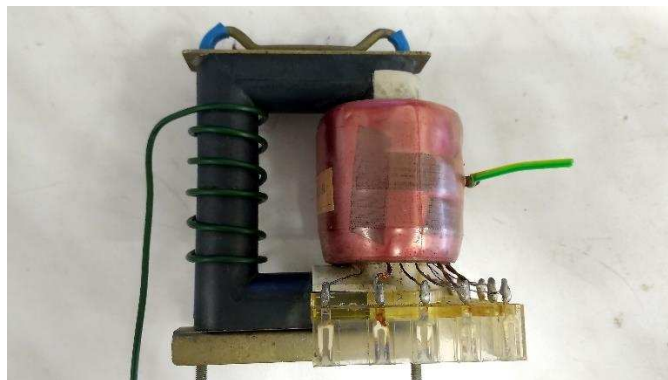
Zapalovací obvod má za úkol vytvořit krátký impuls vysokého napětí s co možná nejvyšší strmostí. Strmost impulsu má velký vliv na zapalování výbojky a to zejména při nižším provozním napětí. Při kontrolních měřeních docházelo k problémům při zapalování výbojky při pracovních napětích nižších než 360 V.

Zapalovací obvod byl navržen jako maximálně jednoduchý a účelný. Rychlým vybitím kondenzátoru C1 do primárního vinutí zapalovacího transformátoru dojde k vygenerování impulsu o velmi vysokém napětí na sekundární straně.



Obrázek 17: Schéma zapalovacího obvodu

Jako zapalovací transformátor posloužil upravený vysokonapěťový transformátor z televizoru TESLA Color. Využito bylo pouze sekundární vysokonapěťové vinutí. Nové primární vinutí bylo vytvořeno jednoduše přivínutím pěti závitů na opačnou stranu jádra.

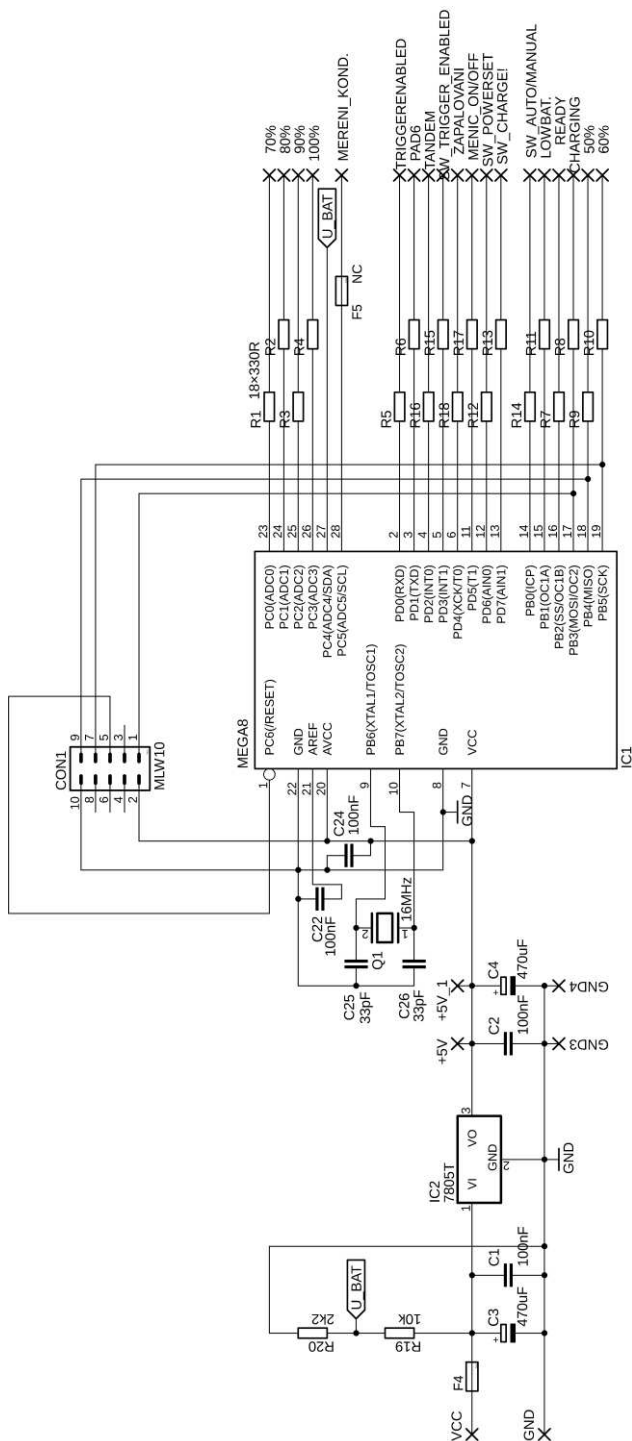


Obrázek 18: Upravený zapalovací transformátor

Vzhledem k jednoduchosti zapalovacího obvodu nebyla pro tuto část zařízení navržena DPS. Realizace proběhla na Univerzální DPS.

3.4 Řídicí a synchronizační obvod

Hlavní část řídicího a synchronizačního obvodu tvoří mikrokontrolér ATMEGA8. Základní funkce obvodu jsou řízení napěťové regulace výkonu, kontrola stavu nabití akumulátoru, řízení zapalovacího obvodu, řízení měniče, synchronizace s fotoaparátem a jednoduchý interface pro komunikace s uživatelem.



Obrázek 19: Schéma řídicího obvodu

3.4.1 Regulace výkonu záblesku

Regulace výkonu záblesku probíhá nastavením odpovídajícího napětí na kondenzátorové baterii. Skutečné napětí je měřeno AD převodníkem na vývodu 28 a porovnáváno s konstantou uloženou v programu. Hodnoty napětí pro určitou procentuální energii záblesku jsou uvedeny v tabulce 3. Po dosažení požadovaného napětí mikroprocesor vypne měnič a udržuje nastavené napětí s hysterezí 5 V.

Tabulka 3: Úrovně regulace výkonu

%	ENERGIE [J]	Napětí [V]
100	2100	500
90	1890	474
80	1680	447
70	1470	418
60	1260	387
50	1050	354

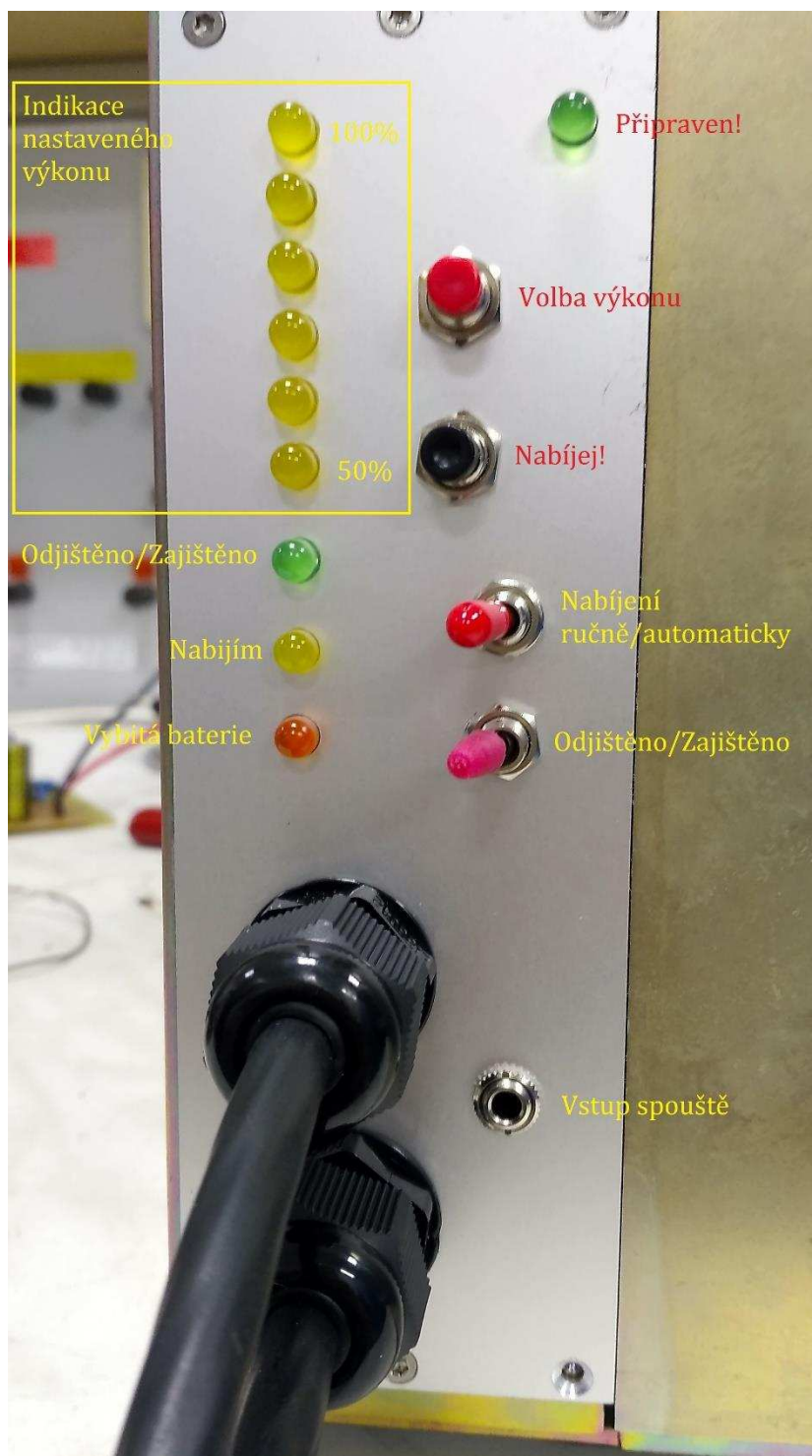
Nastavení výkonu záblesku je možné před začátkem nabíjení nebo po jeho ukončení.

3.4.2 Kontrola stavu baterie

Pomocí druhého vstupu AD převodníku je kontrolováno napětí na akumulátoru. Pokud napětí klesne pod úroveň 11V dojde k uzamčení zařízení a rozsvícení indikační LED diody vybitá baterie. Odblokování zařízení je možné pouze vypnutím a opětovným zapnutím celého zařízení. Pokud k poklesu pod kritickou mez dojde během nabíjení, nabíjecí cyklus je dokončen a zařízení je uzamčeno až po porřízení dalšího snímku.

3.4.3 Ovládání uživatelem

Pro snadné ovládání uživatelem byl vytvořen jednoduchý interface tvořený dvěma tlačítky, dvěma přepínači a deseti stavovými LED diodami. Funkce jednotlivých komponent je popsána na obrázku 20



Obrázek 20: Přední panel s popisky

3.5 Návrh měniče

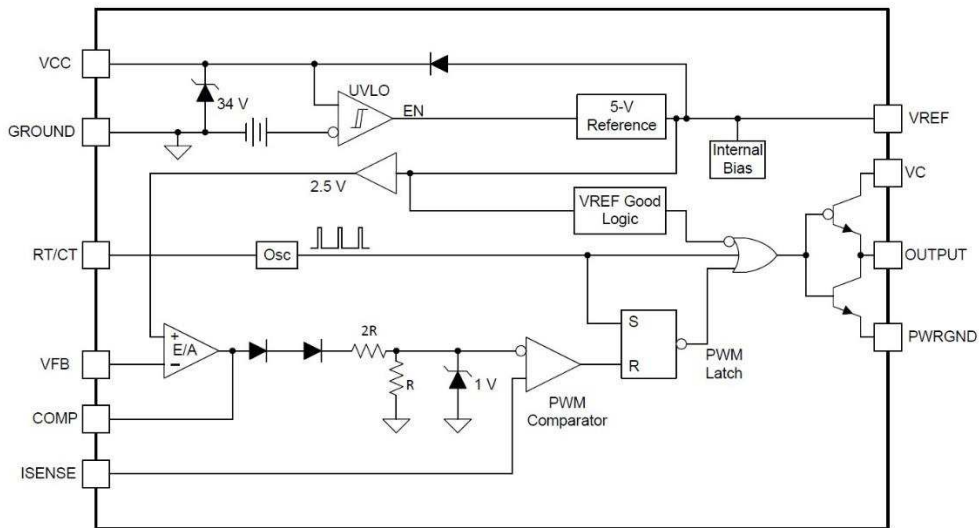
První krok při designování měniče je volba topologie. Pokud přihlídneme k požadavku na napájení celého blesku z autobaterie, musíme počítat s nízkým vstupním napětím a vysokým vstupním proudem měniče. Dalším faktorem je požadavek na vysoký nárůst napětí na měniči, kdy výstupní napětí je téměř 42 krát vyšší než vstupní. Použití měniče bez galvanického oddělení (bez transformátoru) tedy nepřichází v úvahu. Vzhledem k těmto skutečnostem a při zachování nižších nároků na složitost zdroje se nabízí jednoduché řešení v podobě jednočinného blokujícího měniče s impulsním transformátorem.

3.5.1 Požadavky na měnič

- 1) Měnič musí být nezávislý na síti. Celé zařízení by mělo být napájené z jedné autobaterie.
- 2) Měnič by měl poskytovat dostatečný výkon, aby plné nabití kondenzátorové baterie netrvalo příliš dlouho. Proud odebíraný měničem zároveň nesmí přesáhnout maximální povolenou hodnotu pro trvalé zatížení autobaterie.
- 3) Měnič musí být realizován tak, aby byla možná regulace výkonu blesku.
- 4) Účinnost měniče by měla být co nejvyšší.
- 5) Celé zařízení musí být mobilní
- 6) Konstrukce zařízení by měla být co nejjednodušší, aby bylo možné zajistit dostatečnou spolehlivost při nízkých nákladech.
- 7) Celé zařízení musí být bezpečné. Kondenzátorová baterie je schopná uložit náboj dostačující k usmrcení člověka, proto je nutné zavést náležitá bezpečnostní opatření.

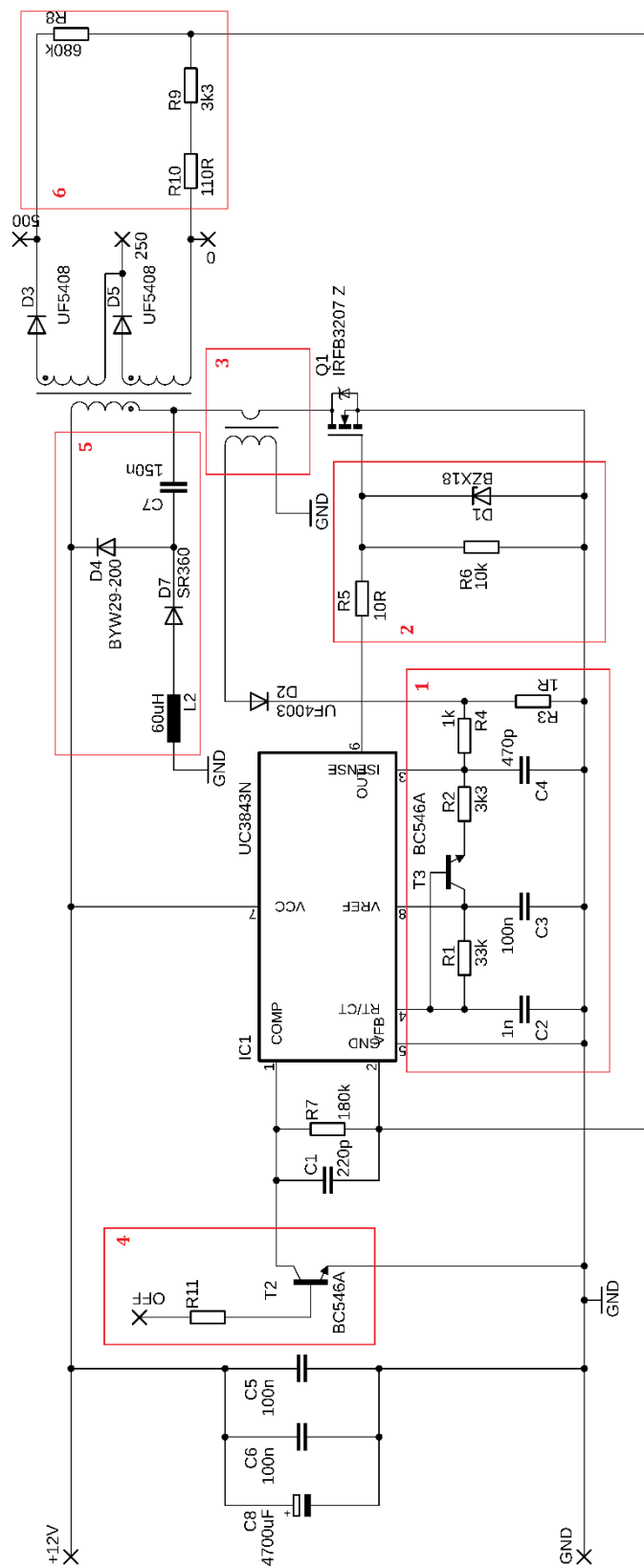
3.5.2 Verze s integrovaným obvodem UC3843

Jako řídicí člen byl použit obvod UC3843. Tento obvod je PWM kontrolér s pevnou frekvencí v proudovém režimu. Obsahuje oscilátor, chybový zesilovač, PWM komparátor a budič hradla tranzistoru MOSFET/IGBT. Je vhodný pro jednočinné propustné a blokuující zdroje i neoddělené měniče s tlumivkou. [8]



Obrázek 21: Vnitřní zapojení obvodu UC3843 [8]

Celkový návrh měniče se z velké části shoduje se zapojením doporučeným výrobcem. Hlavní bloky jsou označeny na schématu měniče viz. obr 22. Jejich návrh a funkce jsou popsány níže v této kapitole.



Obrázek 22: Schéma zapojení měniče s UC3843

BLOK 1

Kompenzace sklonu, nastavení pracovní frekvence, bočník a dolní propust pro proudový transformátor

Pomocí kondenzátoru C2 a rezistoru R1 je nastavena pracovní frekvence obvodu. Potřebnou hodnotu součástek můžeme určit pomocí vztahu (2). [8]

$$f_{osc} = \frac{1,72}{R \cdot C} \text{ pro } R > 5k\Omega \quad (2)$$

Tranzistor T3 a rezistor R2 slouží jako kompenzace sklonu rampy signálu z oscilátoru. Toto zapojení doporučuje výrobce zařadit u měničů z pracovní střídou vyšší než 50%. [8]

Rezistor R3 slouží jako bočník proudového transformátoru. Jelikož proudový transformátor musí pracovat téměř nakrátko jeho hodnota musí být dostatečně nízká.

Rezistor R4 a kondenzátor C4 tvoří dolní propust. Výrobce Doporučuje vložit tento filtr mezi vstup I_{sense} a zdroj signálu (bočník nebo proudový transformátor) z důvodu odstranění rušivých signálů a spínacích špiček.

BLOK 2

Ochrana tranzistoru

Tento blok pouze zajišťuje ochranu tranzistoru před možným zničením.

Rezistor R5 a zenerova dioda D1 chrání GATE tranzistoru před napětovým proražením. Rezistor R6 zajišťuje rychlejší vybíjení kapacity GATEu a tím napomáhá k rychlejšímu zavírání tranzistoru.

BLOK 3

Proudový transformátor

Jako zdroj signálu pro vstup I_{sense} byl použit proudový transformátor.

K jeho realizaci bylo použito Feritové toroidní jádro s navinutým sekundárním vinutím. Primární vinutí je tvořeno vodičem velkého průřezu provlečeného skrze toroid. Poměr závitů primárního a sekundárního vinutí byl zvolen 1:60

BLOK 4

Vypínání měniče

Tranzistor T2 slouží k vypínání celého měniče nebo přesněji ke snížení střídy na nulu. Ovládání tohoto prvku zajišťuje nadřazený systém tedy mikrokontrolér AMEGA8.

BLOK 5

DCDL tlumící člunek

Diody D4 a D7 spolu s kondenzátorem C7 a tlumivkou L2 tvoří člen chránící tranzistor před špičkami způsobenými rozptylovou indukčností impulsního transformátoru.

Návrh tohoto tlumícího člunku probíhá do značné míry metodou pokus omyl. Prvním krokem je volba a testování vhodné kapacity kondenzátoru při které dochází k nejlepšímu tlumení napěťových špiček. Poté se pomocí vzorce (3) dopočítá velikost tlumivky tak aby byly tyto dva prvky v rezonanci. [12]

$$f_r = \frac{1}{2 \cdot \pi \cdot \sqrt{L \cdot C}} \quad (3)$$

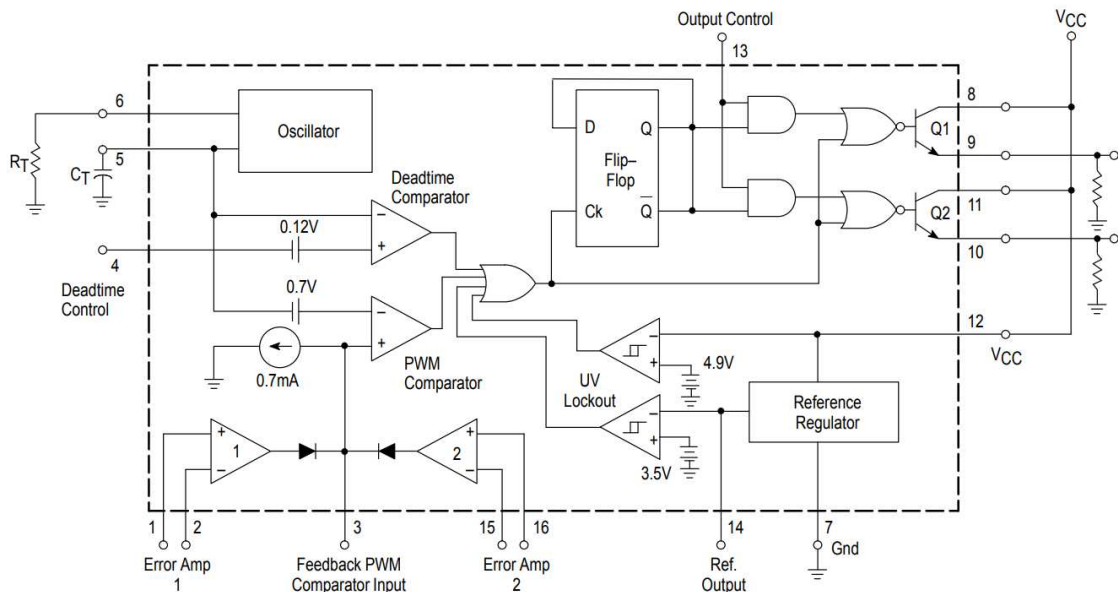
BLOK 6

Dělič pro napěťovou zpětnou vazbu

Rezistory R8, R9 a R10 tvoří dělič pro vstup V_{FB} . Tento vstup zajišťuje snížení střídy měniče při dosažení požadovaného napětí zdroje. Vzhledem k nadřazenému vypínání pomocí mikrokontroléru slouží tento vstup spíše jako pojistka při poruše.

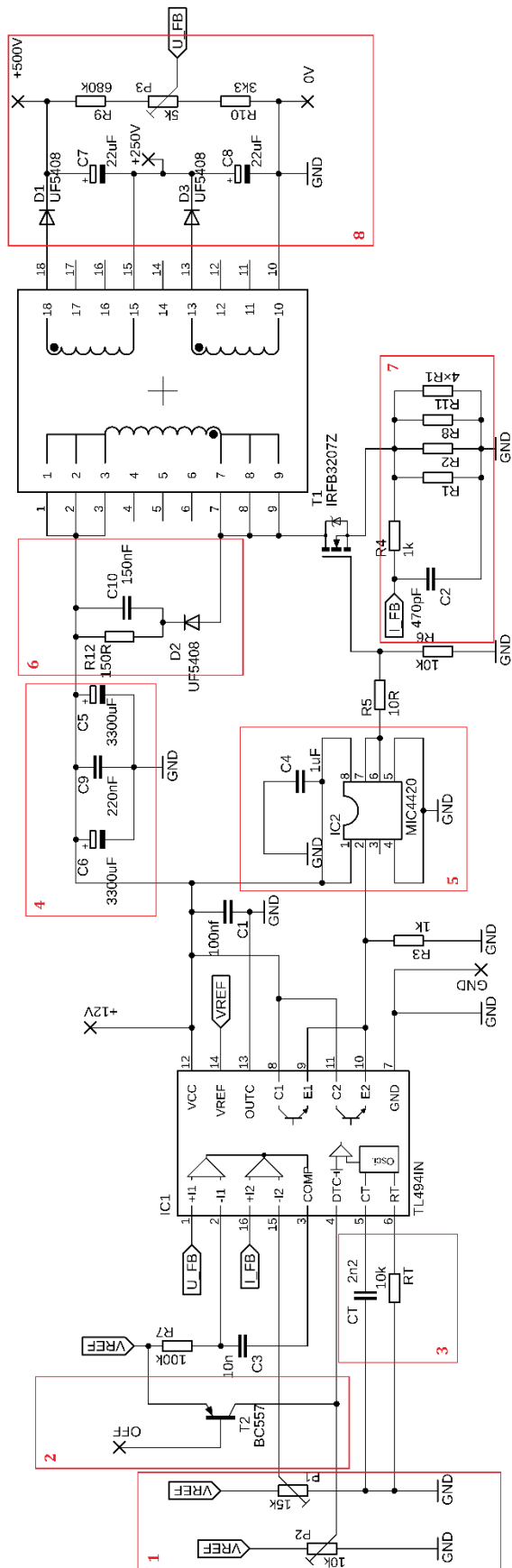
3.5.3 Verze s integrovaným obvodem TL494

V druhé verzi měniče byl použit obvod TL494, který byl původně navržen pro PC zdroje. Oproti UC3843 má tento IO několik zásadních výhod. Nastavení maximální střídy probíhá jednoduše pomocí děliče na vývodu 4. Výstup z oscilátoru je zaveden do PWM komparátoru. Vstupy operačních zesilovačů jsou nezávislé a je možné je nastavit dle potřeby.



Obrázek 23: Vnitřní zapojení obvodu TL494 [9]

Návrh druhé verze měniče probíhal poněkud odlišným způsobem. Integrovaný obvod poskytuje více možností pro nastavení regulačních smyček a celé zapojení obvodu je možné modifikovat. Nastavení maximální střídy pomocí napěťové úrovně na vstupu 4 je velice výhodné při ožiování zdroje.



Obrázek 24: Schéma zapojení měniče s TL494

BLOK 1

Nastavení maximální střídy a maximálního proudu tranzistorem

Trimr P2 slouží k nastavení maximální střídy měniče (v datasheetu označováno jako dead time control). Princip funkce je velmi jednoduchý, čím blíže je napětí na vývodu 4 k referenčnímu napětí integrovaného obvodu, tím nižší je střída měniče. [9]

Trimr P1 slouží k nastavení regulační smyčky proudové zpětné vazby. Signál z bočnicku viz. BLOK 7 je jednoduše komparován s napětím nastaveným výše zmíněným trimrem a po překročení nastavené hodnoty dojde k omezení střídy.

BLOK 2

Vypínání měniče

Tranzistor T2 slouží k připojení vývodu 4 k referenčnímu napětí čímž dojde ke snížení pracovní střídy na nulu. Při testování nadřazeného systému se použití tranzistoru neosvědčilo a byl nahrazen optočlenem. Tento způsob vypínání měniče již fungoval bezchybně.

BLOK 3

Nastavení pracovní frekvence

Pomocí rezistoru RT a kondenzátoru CT je jednoduše nastavena pracovní frekvence celého měniče. Na rozdíl od integrovaného obvodu UC3843 nemá hodnota těchto součástek vliv na další vlastnosti obvodu a jejich vzájemný poměr je při dodržení rozumných hodnot v podstatě libovolný. Přesnou hodnotu součástek můžeme vypočítat pomocí vzorce (4). [9]

$$f_{osc} = \frac{1}{R \cdot C} \quad (4)$$

BLOK 4

Vstupní filtr

Vstupní filtr je tvořen párem elektrolytických kondenzátorů 3300 μ F / 25 V s nízkou hodnotou ESR (ekvivalentní sériový odpor). Tyto kondenzátory slouží jako zásobárna energie pro spínání velkých proudů do primárního vinutí transformátoru.

BLOK 5

Budič tranzistoru

Integrovaný obvod TL494 byl původně zkonstruován pro použití s bipolárními tranzistory a aby byl zajištěn kvalitní průběh signálu pro unipolární tranzistor bylo zapojení doplněno o budič MIC4420.

BLOK 6

RCD tlumící článek

Po neúspěchu s DCCL článkem u první verze měniče byl pro druhou verzi zvolen jednodušší RCD článek. Po neúspěšném otestování několika vypočtených hodnot článků byla opět využita metoda pokusu a omylu. Nejlépe se osvědčila hodnota kondenzátoru $C = 150 \text{ nF}$ a rezistoru $R = 120 \Omega$. Průběhy napětí jsou zobrazeny v kapitole 3.9 [12]

BLOK 7

Bočník a dolní propust pro proudovou zpětnou vazbu

Rezistory R_1 , R_2 , R_8 a R_{11} tvoří bočník pro snímání proudu tranzistorem. Výpočet probíhal jednoduše podle Ohmova zákona viz rovnice (5)

$$U_{max} = I \cdot R = I_{\mu 1max} \cdot R_B \quad (5)$$

Dolní propust je mezi bočník a IO zařazena pro odfiltrování vysokofrekvenčních parazitních signálů a překmitů.

BLOK 8

Výstupní usměrňovač a dělič pro napěťovou zpětnou vazbu

Usměrňovač byl doplněn o dva filtrační kondenzátory pouze pro účely testování. Napěťová zpětná vazba má stejný účel jako u verze první a je primárně realizována jako zdroj signálu pro nadřazený mikroprocesor. Zpětná vazba pro TL494 zde má opět funkci pojistky.

3.6 Návrh transformátoru

Celý návrh transformátoru je rozdělen do několika částí od volby základních parametrů až po samotnou realizaci.

3.6.1 Základní parametry

Před zahájením samotného výpočtu impulsního transformátoru je nutné stanovit některé základní parametry.

Vstupní napětí je určeno provozním napětím použité baterie. Při použití autobaterie se vstupní napětí bude pohybovat v rozmezí 12,7 – 11,5 V proto budeme uvažovat 12 V jako rozumnou střední hodnotu.

Výstupní napětí měniče je určeno maximálním pracovním napětím výbojky.

Volba spínací frekvence významně ovlivňuje počty závitů transformátoru, ztráty v jádře, ztráty na spínacích prvcích atd. Vzhledem k vysokým proudům primárním vinutím by bylo problematické dimenzovat průměr vodiče z hlediska skin efektu. Proto byla zvolena poměrně nízká hodnota 50 kHz.

Maximální příkon měniče byl určen dvěma faktory. Prvním je maximální proud autobaterie a druhým je samotná topologie měniče. Aby nedocházelo k přetěžování

autobaterie a bylo možné použít jádro transformátoru rozumných rozměrů, byla určena maximální hodnota příkonu měniče na 150 W a po jistých korekcích na 120 W u druhé verze.

Tabulka 4: Základní parametry pro návrh 1. verze transformátoru

Vstupní napětí	U_1	12 V
Výstupní napětí	U_2	500 V
Spínací frekvence	f	50 kHz
Maximální příkon	P_1	150 W
Maximální střída	S_{max}	0,5

Tabulka 5: Základní parametry pro návrh 2. verze transformátoru

Vstupní napětí	U_1	12 V
Výstupní napětí	U_2	500 V
Spínací frekvence	f	50 kHz
Maximální příkon	P_1	120 W
Maximální střída	S_{max}	0,7

3.6.2 Výběr jádra

Pro frekvence používané ve spínaných zdrojích není možné použít jádro složené z transformátorových plechů. Ve zdrojích pracujících na frekvencích desítek až stovek kilohertz je nutné použít jádra vyrobená z feritu.

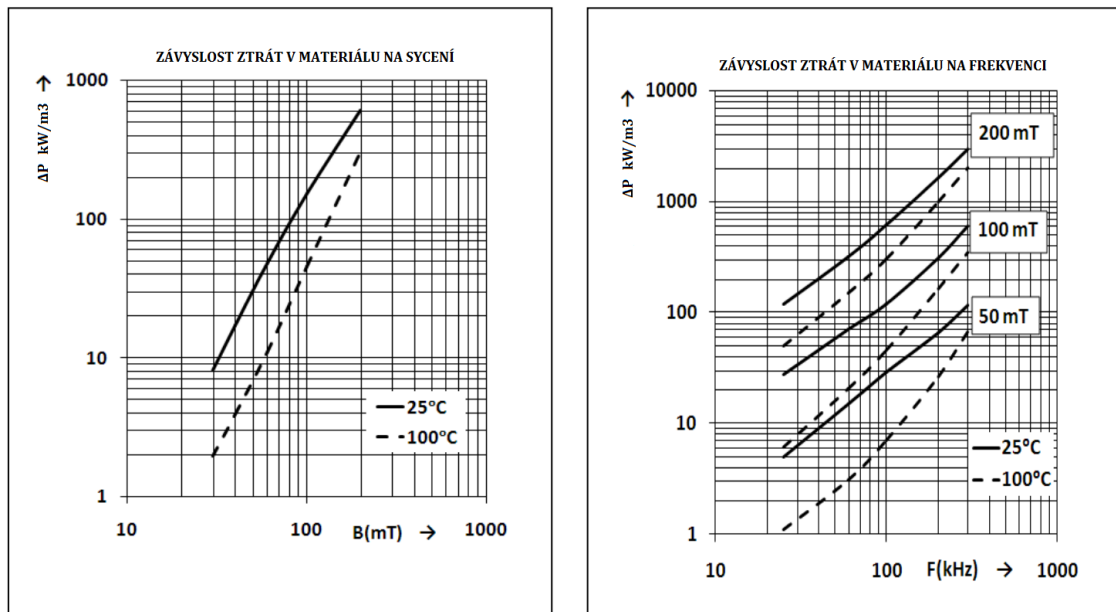
Feritová jádra jsou tvořena směsí oxidů železa a dalších kovů jako mangan, zinek, nikl nebo vzácně hořčík. Jako speciální aditiva slouží kobalt, titan, křemík nebo vápník.

Oproti klasickým plechovým jádrům jsou ferity schopny pracovat na velmi vysokých frekvencích ovšem při poměrně nízké úrovni sycení. Maximální hodnoty magnetické indukce pro většinu běžně používaných materiálů se pohybují kolem 0,3 – 0,4 T.

Vzhledem k požadavkům na jádro byl vybrán materiál CF297 a typ jádra ETD 44. Základní parametry a charakteristiky zvoleného jádra jsou uvedeny v tabulce 6 a obrázku 25.

Tabulka 6: Vlastnosti jádra ETD 44 a materiálu CF297

Efektivní objem	V_j	17800 mm ³
Efektivní délka	l_{Fe}	103 mm
Efektivní plocha	S_j	173 mm ²
Plocha okna	S_o	216 mm ²
Maximální magnetická indukce	B_{MAX}	410 mT
Relativní permeabilita při 20 °C	μ_{rFe}	2300



Obrázek 25: Chování materiálu CF297 [10]

Po výběru konkrétního jádra musíme ověřit jestli bude schopné přenést potřebný výkon. Toto provedeme pomocí vzorce (6) [1]

$$S_o \cdot S_j = 4 \cdot \sqrt{\frac{S_{max}}{3}} \cdot \frac{P_{max}}{k_{p,cu} \cdot f \cdot B_{max} \cdot \sigma} \quad (6)$$

3.6.3 Výpočty

Po zvolení základních parametrů a výběru jádra můžeme přistoupit k samotnému výpočtu impulsního transformátoru.

Pomocí rovnice (7) vypočítáme velikost indukčnosti primárního vinutí L_1 [1]

$$L_1 = \frac{U_1^2 \cdot S_{max}^2}{2 \cdot f \cdot P_{max}} \quad (7)$$

Jako druhý krok vypočítáme maximální a efektivní velikost magnetizačního proudu primárním vinutím $I_{\mu 1max}$ a $I_{\mu 1ef}$. [1]

$$I_{\mu 1max} = \frac{2 \cdot P_{max}}{U_1 \cdot S_{max}} \quad (8)$$

$$I_{\mu 1ef} = I_{\mu 1max} \cdot \sqrt{\frac{S_{max}}{3}} \quad (9)$$

Třetím krokem je určení počtu závitů primárního vinutí N_1 . Výsledný počet závitů případně zaokrouhlíme a v rovnici (10) bude počítat s touto zaokrouhlenou hodnotou. [1]

$$N_1 = \frac{L_1 \cdot I_{\mu 1max}}{B_{max} \cdot S_j} \quad (10)$$

Dosazením do rovnice (11) získáme velikost vzduchové mezery l_v . Velikost relativní permeability materiálu μ_{rFe} je silně závislá na teplotě a při výpočtech transformátorů ke klasickým zdrojům se musí počítat s oteplením jádra. V tomto konkrétním případě se však nepočítá s trvalým provozem měniče a proto budeme uvažovat hodnotu permeability pro pokojovou teplotu. [1]

$$l_v = \frac{N_1 \cdot \mu_0 \cdot I_{\mu 1max}}{B_{max}} - \frac{l_{Fe}}{\mu_{rFe}} \quad (11)$$

Jako poslední krok vypočítáme počet závitů sekundárního vinutí N_2 . Výsledný počet opět zaokrouhlíme a případně přidáme několik závitů z důvodu úbytku napětí na odporu vinutí. [1]

$$N_2 = N_1 \cdot \frac{U_2}{U_1} \cdot \frac{1 - s_{max}}{s_{max}} \quad (12)$$

3.6.4 Dimenzování průřezu vnutí

Před samotným výpočtem je nutné zvolit maximální přípustnou hodnotu proudové hustoty σ ve vodičích vnutí. Vzhledem k přerušovanému provozu měniče bude mít transformátor dost času k ochlazení, proto můžeme zvolit vyšší hodnotu proudové hustoty.

Minimální průřez vodiče poté vypočítáme pomocí rovnice (13)

$$S_{min} = \frac{I}{\sigma} \quad (13)$$

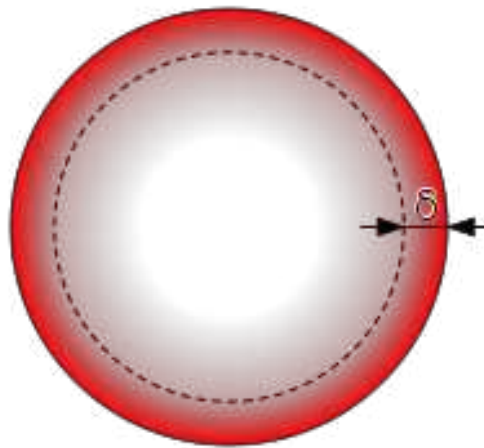
Skutečný použitý průřez vodiče posléze upravíme nejen zaokrouhlením na nejbližší vyšší hodnotu vyráběných lakovaných vodičů ale i tak aby došlo k příznivému vyplnění vrstvy na kostře transformátoru. Částečně vyplněné vrstvy vnutí jsou nepraktické z hlediska konstrukce transformátoru. Mezery je nutné vyplnit vhodným materiálem, aby nedocházelo k deformaci dalších vrstev.

3.6.5 Skin efekt

Vzhledem k vysoké pracovní frekvenci měniče musí být uvažován takzvaný skin efekt. Při průchodu vysokofrekvenčního proudu dochází k vytlačování proudu k povrchu vodiče. To znamená, že odpor vinutí při použití standardního lakovaného drátu by vzrostl na neakceptovatelnou úroveň. Vliv skin efektu na vodič charakterizuje veličina zvaná hloubka vniku.

$$\delta = \sqrt{\frac{\rho}{\pi \cdot f \cdot \mu}} \quad (14)$$

Tento nežádoucí jev můžeme omezit použitím vodičů s průměrem menším než je dvojnásobek hloubky vniku. Tedy $S < 2 \cdot \delta$



Obrázek 26: Hloubka vniku [11]

3.6.6 Přehled finálních parametrů a realizace impulsního transformátoru

Po volbě materiálu a rozměrů jádra, výpočtu obou vnutí a určení potřebné vzduchové mezery můžeme přistoupit k samotné realizaci transformátoru.

Tabulka 7: Vypočtené parametry 1. verze transformátoru

Vypočítaný počet závitů primárního vnutí	N ₁	3,46
Použitý počet závitů primárního vnutí		4
Vypočítaný počet závitů sekundárního vnutí	N ₂	192,14
Použitý počet závitů sekundárního vnutí		2×122
Zvolená proudová hustota $\sigma = 3 \text{ A/mm}^2$		
Minimální průřez primárního vnutí [mm ²]	S _{N1}	4,26
Použitý průřez primárního vnutí [mm ²]		5,4
Použitý průměr primárního vnutí [mm] (plech)	d _{N1}	0,2×27
Minimální průřez sekundárního vnutí [mm ²]	S _{N2}	0,1
Použitý průřez sekundárního vnutí [mm ²]		0,126
Použitý průměr sekundárního vnutí [mm]	d _{N2}	0,4
Vzduchová mezera [mm]	l _v	1,5

Tabulka 8: Vypočtené parametry 2. verze transformátoru

Vypočítaný počet závitů primárního vnutí	N ₁	6,47
Použitý počet závitů primárního vnutí		7
Vypočítaný počet závitů sekundárního vnutí	N ₂	125
Použitý počet závitů sekundárního vnutí		2×65
Zvolená proudová hustota $\sigma = 4 \text{ A/mm}^2$		
Minimální průřez primárního vnutí [mm ²]	S _{N1}	2,5
Použitý průřez primárního vnutí [mm ²]		2,77
Použitý průměr primárního vnutí [mm]	d _{N1}	4×180×0,07
Minimální průřez sekundárního vnutí [mm ²]	S _{N2}	0,06
Použitý průřez sekundárního vnutí [mm ²]		0,16
Použitý průměr sekundárního vnutí [mm]	d _{N2}	0,45
Vzduchová mezera [mm]	l _v	1,5

Realizace 1. verze

Primární vinutí první verze transformátoru bylo realizováno pomocí měděného pásu o šířce 27 mm a tloušťce 0,2 mm. Šířka pásu byla zvolena tak aby po stranách zůstala mezera pro vývody sekundárního vinutí. Izolace byla realizována pomocí kaptonové pásky.



Obrázek 27: Realizace primárního vinutí 1. verze

Při vinutí transformátoru byl plech upraven a na každém jeho konci byl odstraněn jeden vývod.

Sekundární vinutí bylo realizováno pomocí standartního lakovaného vodiče.

Realizace 2. verze

Primární vinutí je realizováno pomocí čtyř paralelních vodičů RUPALIT stočených tak aby vytvořili jeden celek viz. obr. 28. Tyto speciální vodiče jsou tvořeny velkým množstvím vzájemně izolovaných vodičů o velmi malém průměru. Celistvost takovýchto vodičů je zajištěna opředěním.

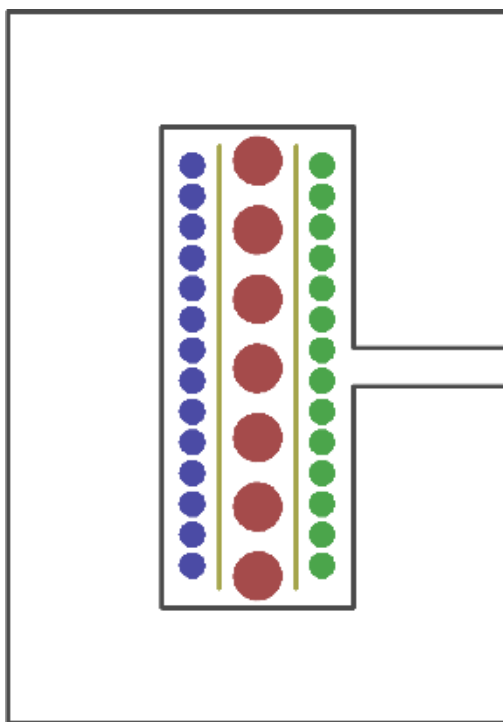


Obrázek 28: Vodič primárního vinutí 2. verze

Sekundární vinutí není namáháno vysokým proudem, proto je navinuto klasickým lakovaným vodičem. Vzhledem k rozměrům kostry byl použit průměr vodiče 0.45 mm aby došlo k vyplnění celé vrstvy.

Rozložení vinutí je vyobrazeno na obrázku 19. Sekundární vinutí bylo rozděleno u obou verzí transformátoru a to z několika důvodů.

1. Rozdělením vinutí došlo ke snížení napětového namáhání usměrňovacích diod na polovinu.
2. Sériově zapojené kondenzátory se nabíjejí zvlášť, proto již není nutné použít vyrovnávací rezistory.
3. Významně se zlepšila vazba mezi primárním a sekundárním vinutím.



Obrázek 29: Rozložení vinutí impulsního transformátoru

Jednotlivé vrstvy vinutí jsou od sebe odděleny vrstvou speciální pásky a teflonovou fólií. Vývody všech vinutí jsou izolovány silikonovou bužírkou. Tyto opatření jsou nutná z důvodu velkého rozdílu napětí na primární a sekundární straně obvodu.

3.7 Dimenzování tranzistoru

Dimenzování tranzistoru provádíme podle dvou základních veličin, to podle Maximálního špičkového proudu tranzistorem a maximální hodnoty napětí které se může na tranzistoru objevit.

Maximální hodnota proudu tekoucího obvodem byla vypočtena v kapitole Návrh transformátoru podle vzorce (8)

Maximální hodnotu napětí které se může na tranzistoru objevit vypočítáme pomocí vzorce 15.

$$U_{DSmax} = U_1 + U_2 \cdot \frac{N_1}{N_2} \quad (15)$$

K vypočteným je nezbytné přidat určitou rezervu.

Důležitým faktorem u unipolárních tranzistorů je také odpor kanálu v sepnutém stavu R_{DSon} který reprezentuje vodivostní ztráty na tranzistoru.

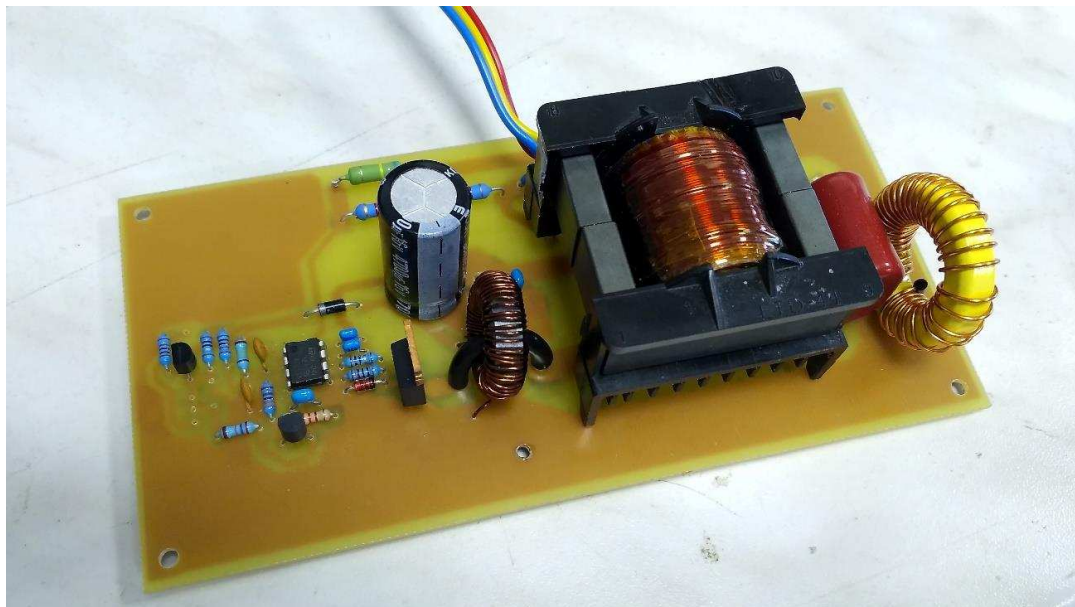
Tabulka 9: Kritéria pro volbu tranzistoru

U_{DSmin} [V]	60
I_{DSmin} [A]	60
$R_{DSon\ max}$ [m Ω]	5

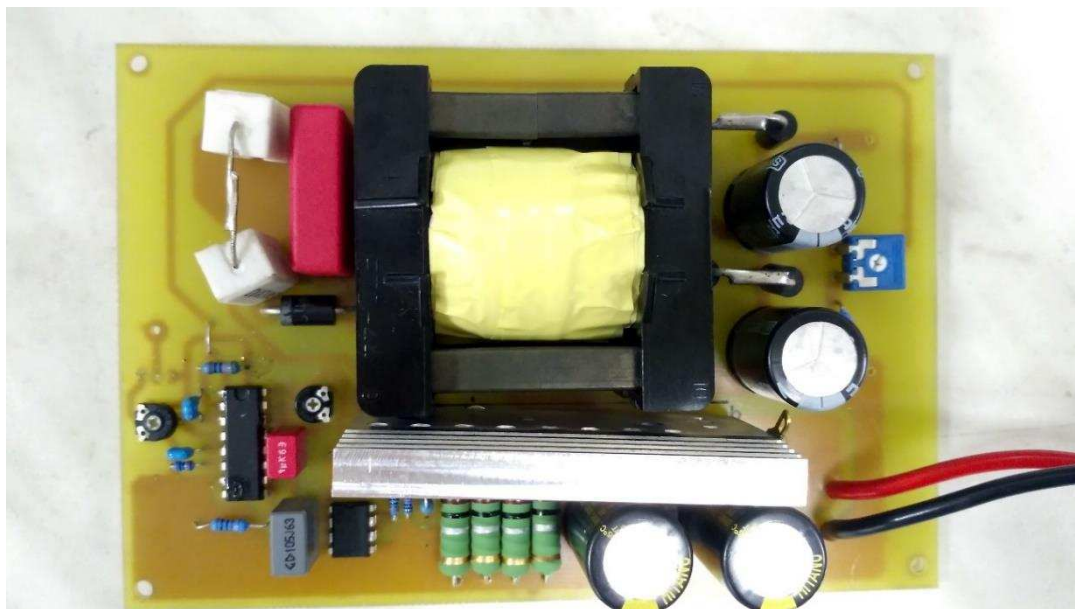
Po porovnání mnoha tranzistorů byl zvolen typ IRFB3207

3.8 Návrh a výroba DPS

DPS pro obě verze měniče byly navrženy jako jednovrstvé s ohledem na cenu a technologické možnosti následné realizace. Výkonové cesty DPS jsou navrženy jako rozlitá měď s co možná nejkratší délkou a odstupem od částí obvodu citlivých na rušení.

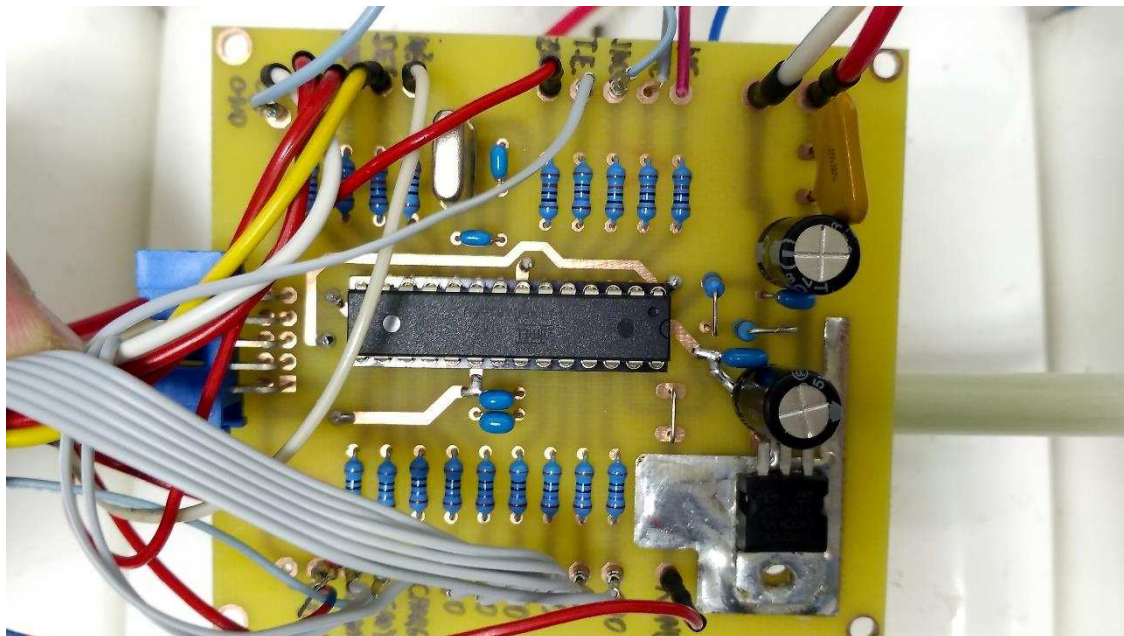


Obrázek 30: Osazená deska měniče 1. verze



Obrázek 31: Osazená deska měniče 2. verze

DPS pro řídicí obvod byla realizována jako dvouvrstvá , bez speciálních požadavků na některou z jejích částí. Obvod řízení nepracuje s vysokofrekvenčními signály (až na krystal) ani s vysokými proudy proto je možné návrh velmi zjednodušit.



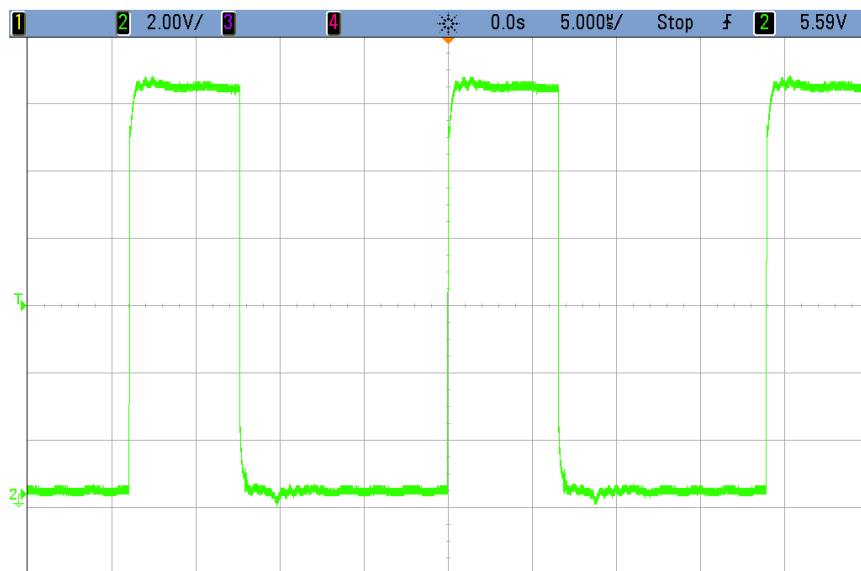
Obrázek 32: Osazená a připojená DPS řízení

Návrh DPS pro obě verze měniče i řídicí obvod s mikroprocesorem proběhl v programu EAGLE.

Obrazce hotových DPS a osazovací plány jsou v příloze.

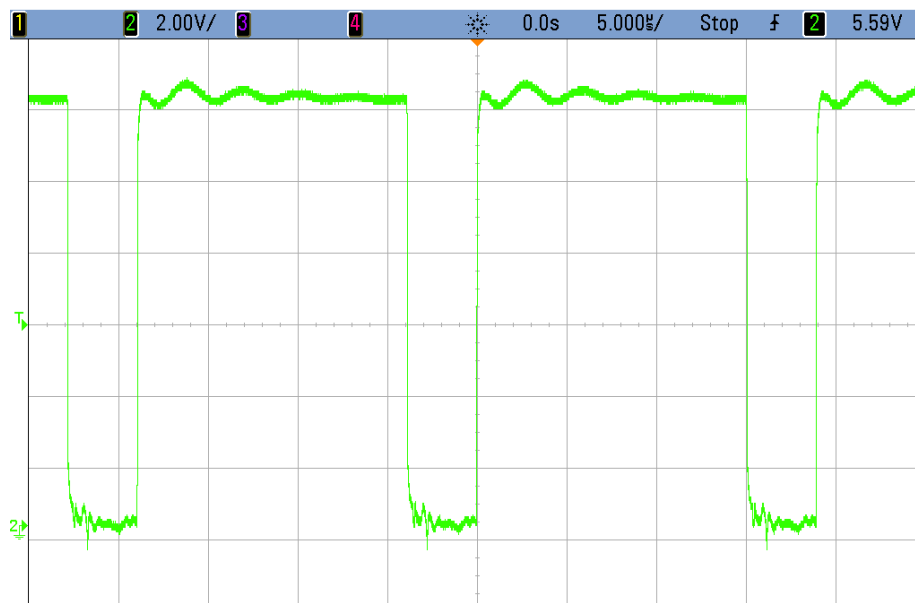
3.9 Oživení měniče 2. verze

Oživování měniče proběhlo ve dvou krocích. Prvním krokem bylo zapnutí integrovaného obvodu TL494 a budiče MIC4420. Po kontrole odebíraného proudu proběhlo měření pracovní frekvence a pokusné nastavení střídy pomocí trimru P2.



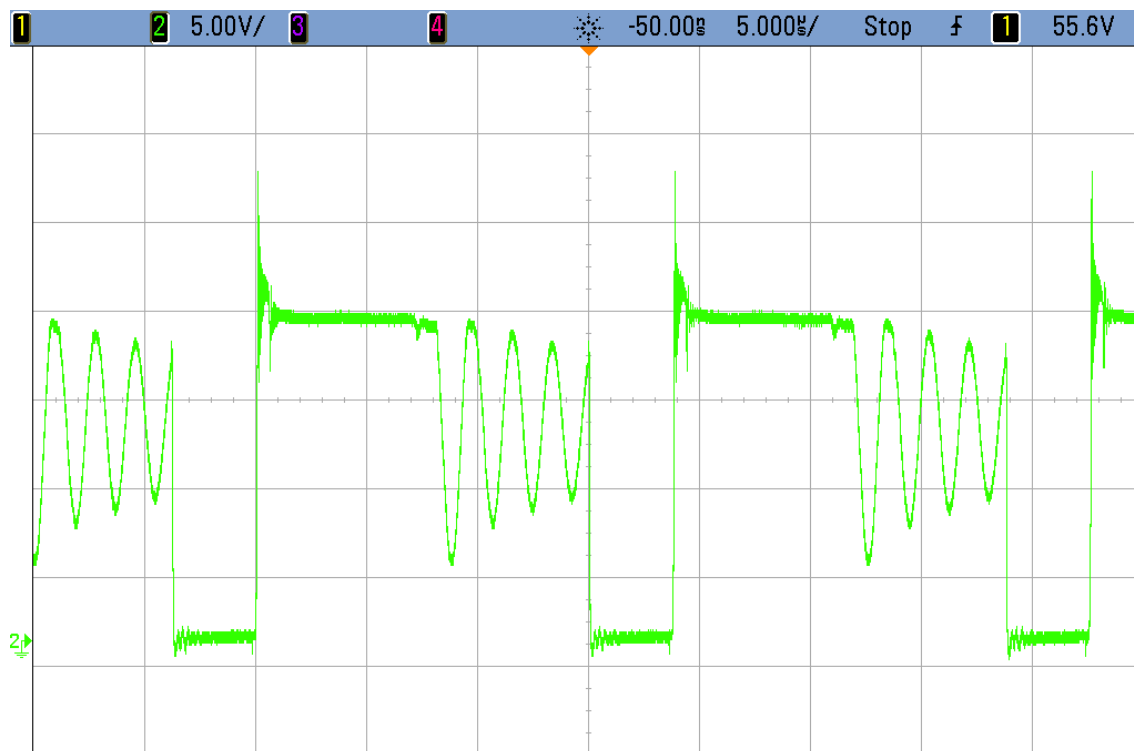
Obrázek 33: Výstupní signál z budiče MIC4420 při střídě asi 35%

Při snížení napětí na vstupu 4 došlo ke zvýšení střídy. Základní funkčnost obvodu TL494 i MIC4420 byla tedy potvrzena.



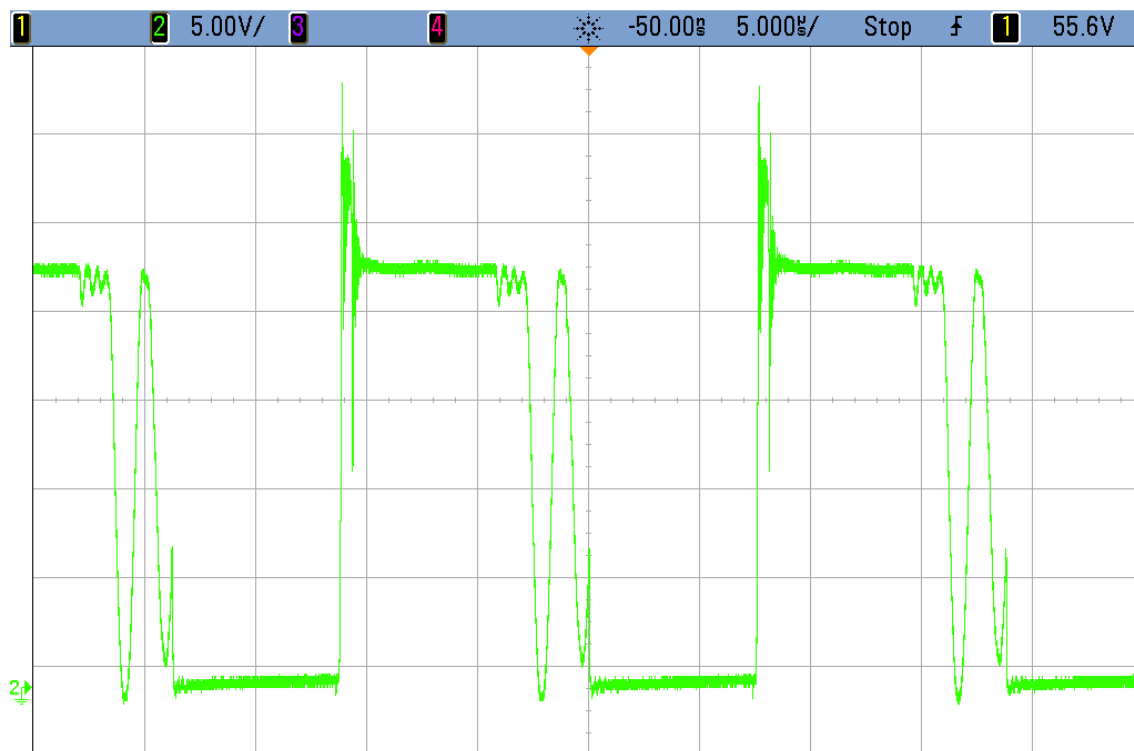
Obrázek 34: Výstupní signál z budiče MIC4420 při střídě asi 80%

Po osazení výkonové části měniče proběhlo měření vlastností výkonové části. První měření proběhlo hodnotě střídě 20 %. Měnič ze zdroje odebíral proud 0,5 A při napětí 12 V a na odporové zátěži 1,9 k Ω bylo naměřeno napětí 105,5 V



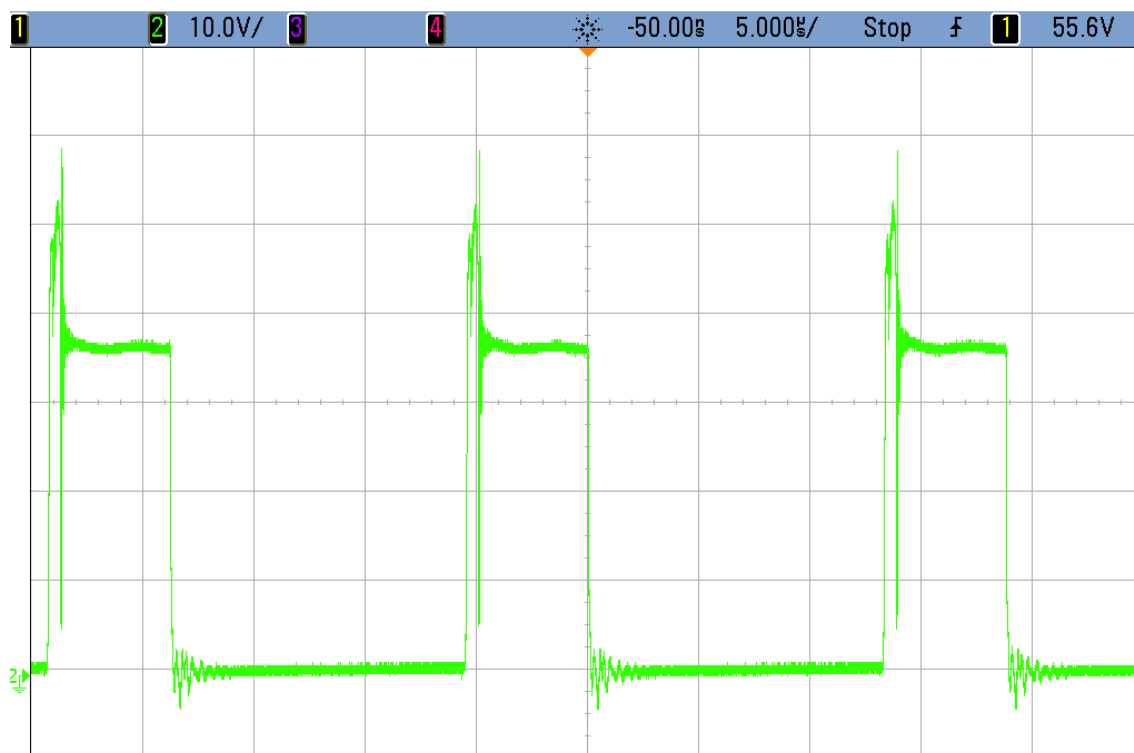
Obrázek 35: Průběh napětí na tranzistoru při střídě $s = 0,2$

Z průběhu je patrné že při vypínání tranzistoru dochází k překmitu, nicméně vzhledem k maximálnímu provoznímu napětí tranzistoru je zanedbatelný.



Obrázek 36: Průběh napětí na tranzistoru při střídě $s=0,4$

Při dalším zvyšování pracovní střídě tedy i výstupního výkonu měniče nedošlo k přílišnému nárůstu velikosti překmitu při vypnutí tranzistoru. Funkčnost tlumícího DRC článku je tedy dostačující, a je možné přistoupit k testu při plném výkonu.



Obrázek 37: Průběh napětí na tranzistoru při střídě $s = 0,7$

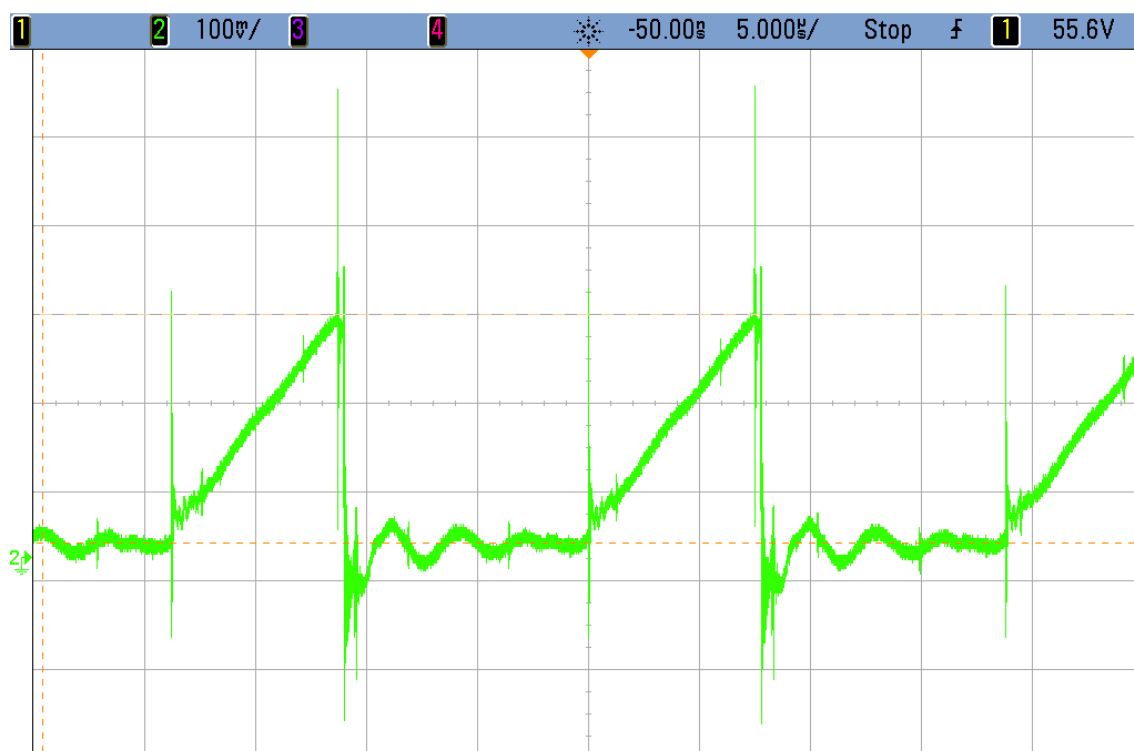
Při provozu se střídou 0,7 tedy při maximálním výkonu měniče zdroj dosáhl napětí 450 V. Musíme mít ovšem na paměti že měnič je určen pro kapacitní zátěž a odebíraný proud bude s rostoucím napětím klesat.

Údaje získané během měření byly zapsány do tabulky a s jejich pomocí byla určena přibližná účinnost zdroje.

Tabulka 10: Orientační měření měniče

s	U1	I1	P1	U2	I2	P2	Rz	η
[-]	[V]	[A]	[W]	[V]	[A]	[W]	[Ω]	[%]
0,2	12	0,6	7,2	105,5	0,06	5,8	1910	80,9
0,4		2,1	25,2	206,6	0,11	22,3		88,7
0,7		11,4	136,8	450	0,24	106,0		77,5

Dalším nezbytným krokem bylo měření průběhu napětí na proudové zpětné vazbě, aby bylo možné nastavit úroveň komparačního napětí.



Obrázek 38: Průběh signálu I_{sense} při $s = 0,4$

Po provedení všech měření byla provedena zátěžová zkouška při které bylo zařízení ponecháno v provozu po dobu 5 minut při maximálním výkonu. Teplota chladiče po ukončení zkoušky dosáhla 78 °C. Vzhledem k tomuto faktu a skutečnosti že zařízení je navrženo pro přerušovaný provoz můžeme chlazení tranzistoru prohlásit za dostatečné.

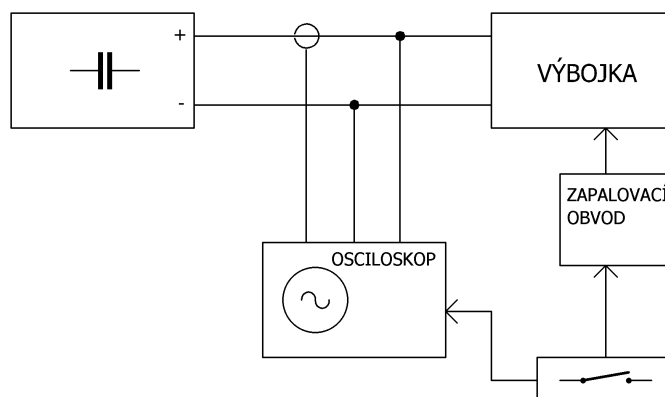
3.10 Měření průběhů na výbojce

Měření proběhlo za improvizovaných podmínek pomocí osciloskopu a proudového senzoru ABB ES2000.

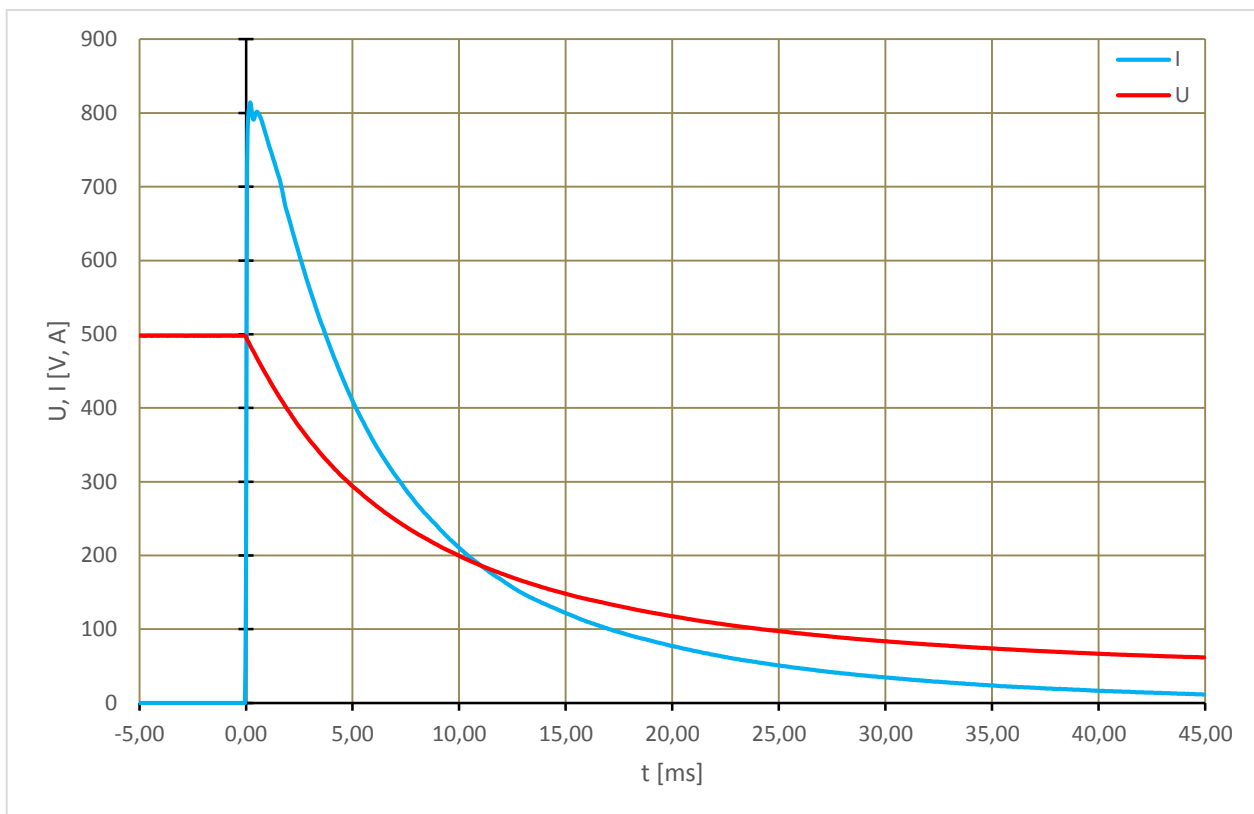
Tabulka 11: Základní vlastnosti proudového senzoru ES2000

Jmenovitý proud	[A]	2000
Maximální špičkový proud	[A]	3000
Poměr závitů N_1/N_2	[-]	1/5000
Sekundární proud	[mA]	400
Odpor sekundárního vinutí	[Ω]	25

Účelem měření bylo zachytit průběh napětí a proudu výbojky při záblesku.

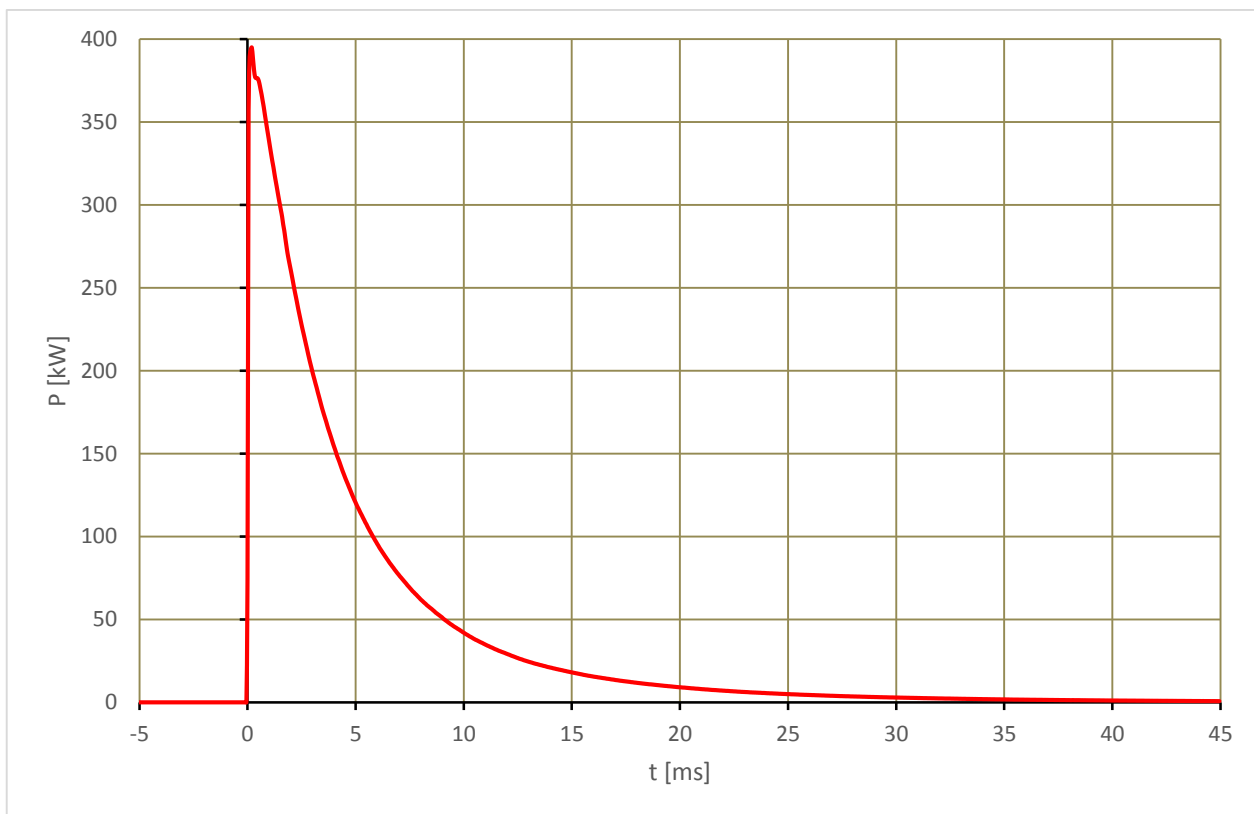


Obrázek 39: Blokové schéma měřícího obvodu



Obrázek 40: Průběh napětí a proudu na výbojce

Ihned po zapnutí je na průběhu proudu patrný zákmit. Tento jev je pravděpodobně způsoben nedokonalým hořením výboje bezprostředně po zapálení.



Obrázek 41: Průběh výkonu na výbojce

Špičková hodnota výkonu naměřeného na výbojce viz Obr. 41 dosahuje téměř 395 kW. Integrovaním tohoto zjistíme reálnou energii záblesku $E_s = 1849,2$ J. Změřená kapacita kondenzátorové baterie činí $16800 \mu\text{F}$ a energie v ní uložená je tedy $E_c = 2100$ J. Výbojkou tedy projde 88,1 % energie uložené v kondenzátorech. Ztráty jsou tvořeny reziduálním napětím kondenzátorové baterie, odporem přívodních vodičů a vnitřním odporem kondenzátorů.

4 ZÁVĚR

Hlavním cílem práce byl návrh a realizace měniče určeného k nabíjení kondenzátorové baterie pro výbojku IFK2000. První verze měniče s integrovaným obvodem UC3843 byla po několika neúspěšných pokusech o oživení zamítnuta a byl proveden návrh druhé verze měniče s obvodem TL494 posíleným budičem TC4420. Oživení druhé verze již bylo úspěšné a postup včetně výsledků měření je uveden v kapitole 3.9.

Další částí práce byl návrh řídicího a synchronizačního obvodu. Tento úkol byl realizován za pomoci mikrokontroléru ATMEGA8 který je schopen řídit celé zařízení a současně zajistit synchronizaci s externím zařízením. Konkrétně mikrokontrolér zajišťuje regulaci výkonu záblesku, kontrolu stavu akumulátoru, zapalování výbojky, synchronizaci s fotoaparátem a komunikaci s uživatelem prostřednictvím stavových LED a ovládacích prvků předního panelu.

V rámci této bakalářské práce byly také provedeny mechanické úpravy celého zařízení. Kondenzátorová baterie, měnič i řídicí obvod byly do odolného kovového šasi. Upraven byl také zapalovací obvod a systém ukotvení výbojky.

Úkolem do budoucna je doladění regulačních smyček měniče a optimalizace synchronizace zařízení s fotoaparátem.

Literatura

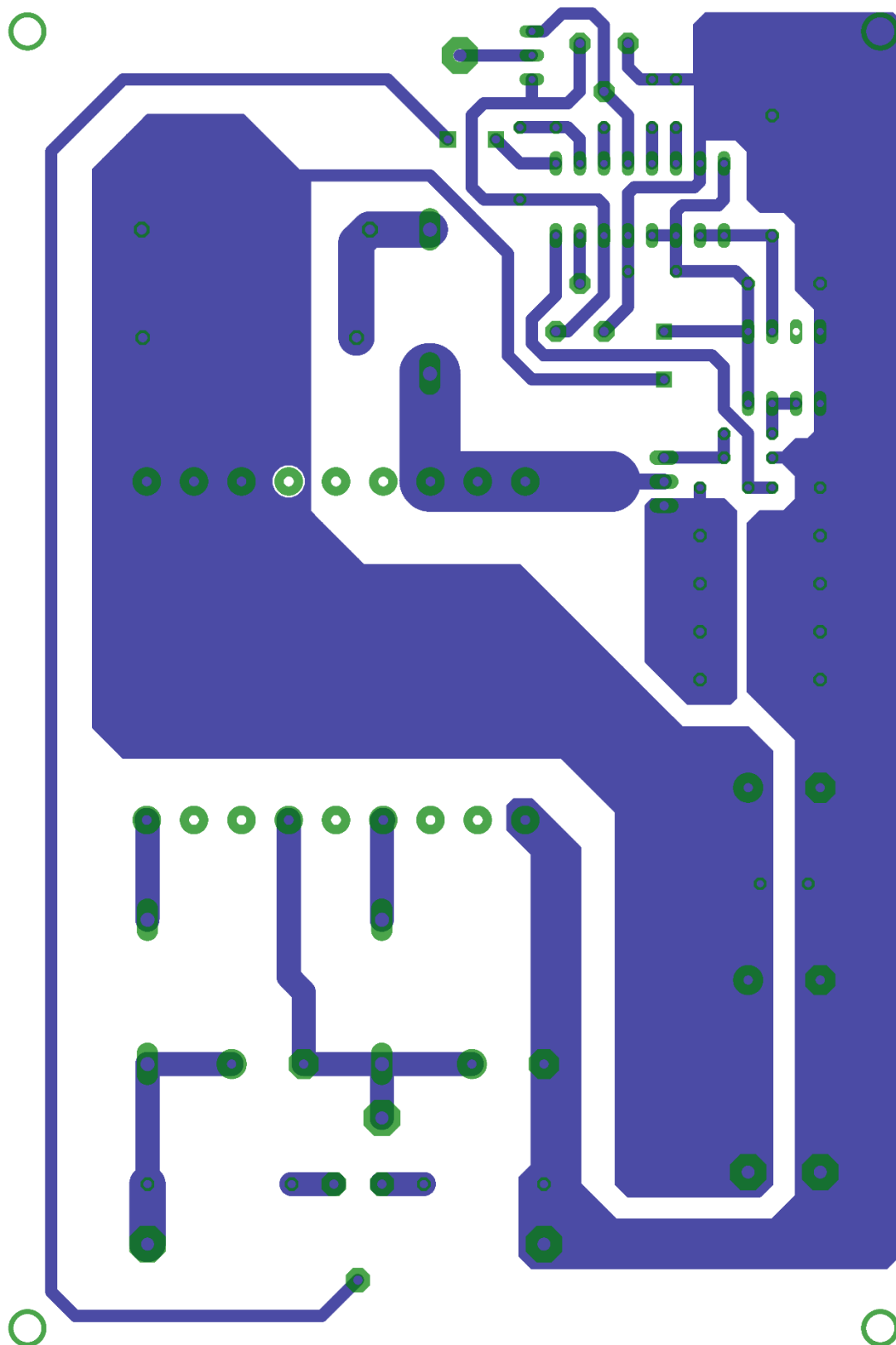
- [1] PATOČKA, doc. Dr. Ing. Miroslav. *Magnetické jevy a obvody ve výkonové elektronice, měřící technice a silnoproudé elektrotechnice*. Brno: VUTIUM, 2011.
ISBN 978-80-214-4003-6.
- [2] PIHAN, Roman. Fotografický blesk na cestě časem – 1. díl. Digimanie [online]. Praha: oXy Online, 1998, 4. 3. 2009 [cit. 2018-04-22]. Dostupné z: <https://www.digimanie.cz/fotograficky-blesk-na-ceste-casem-1-dil/2622>
- [3] Obrázek. In: Profotak [online]. Praha: profotak.cz, 2009, 2017 [cit. 2018-04-22]. Dostupné z: <https://www.profotak.cz/SYNCH-JACK-3-5-mm-premium-synchronizacni-kabel-k-bleskum-svetlum-d2186.htm>
- [4] Obrázek. In: Nikonblog [online]. Praha: Nikon, 2000, 21. 6. 2012 [cit. 2018-04-23]. Dostupné z: <https://nikonblog.cz/blesky-dratuproste-bezdratove-ovladani-blesku-nikon-system-cls/>
- [5] Obrázek. In: Fotoextra [online]. Konice: Fotoextra, 2000, 2000 [cit. 2018-04-24]. Dostupné z: <https://www.fotoextra.cz/bezdratova-spoust-odpalovac-blesku-phottix-strato-ii-multi-5-in-1-n6-n8-n10.html>
- [6] BASILE, Giorgio. MELZ IFK-2000 High Power Xenon Flash lamp. In: Lampes-et-tubes [online]. Belgie: lampes, 2000, 2000 [cit. 2018-04-26]. Dostupné z: <http://lampes-et-tubes.info/fl/fl096.php?l=e>
- [7] Datasheet. In: ALLDATASHEET [online]. USA: KEMET, 2003, 30. 3. 2016 [cit. 2018-05-27]. Dostupné z: <http://pdf1.alldatasheet.com/datasheet-pdf/view/828856/KEMET/PEH200HA5150MB2.html>
- [8] Datasheet. In: ALLDATASHEET [online]. USA: Texas Instruments, 2003, 1999 [cit. 2018-05-27]. Dostupné z: <http://www.alldatasheet.com/datasheet-pdf/pdf/29378/TI/UC3843.html>
- [9] Datasheet. In: ALLDATASHEET [online]. USA: MOTOROLA, 2003, 1996 [cit. 2018-05-27]. Dostupné z: <http://pdf1.alldatasheet.com/datasheet-pdf/view/5775/MOTOROLA/TL494.html>
- [10] Datasheet. In: SEMIC [online]. Praha: SEMIC, 2000, 14. 6. 2017 [cit. 2018-05-27]. Dostupné z: <http://www.semic.cz/!MATERIALY/CF297.pdf>

- [11] Datasheet. In: Wikipedia [online]. USA: wikipedia, 2001, 27. 7. 2008 [cit. 2018-05-27]. Dostupné z: https://en.wikipedia.org/wiki/Skin_effect#/media/File:Skin_depth.svg
- [12] RIDLEY, Dr. Ray. Flyback converter Snubber design. Designers Series: XII [online]. USA, 2000, 2005, **2005**(7), 7 [cit. 2018-05-28]. Dostupné z: http://www.ridleyengineering.com/images/phocadownload/12_%20flyback_snubber_design.pdf
- [13] DANYK, Dan. Impulzní zdroje a měniče I.: Přehled topologií impulzních zdrojů (s galvanickým oddělením). Danyk.cz [online]. ČR, 2000, 2010, **2000**(1), 1 [cit. 2018-05-28]. Dostupné z: <http://www.danyk.cz/zdroje.html>

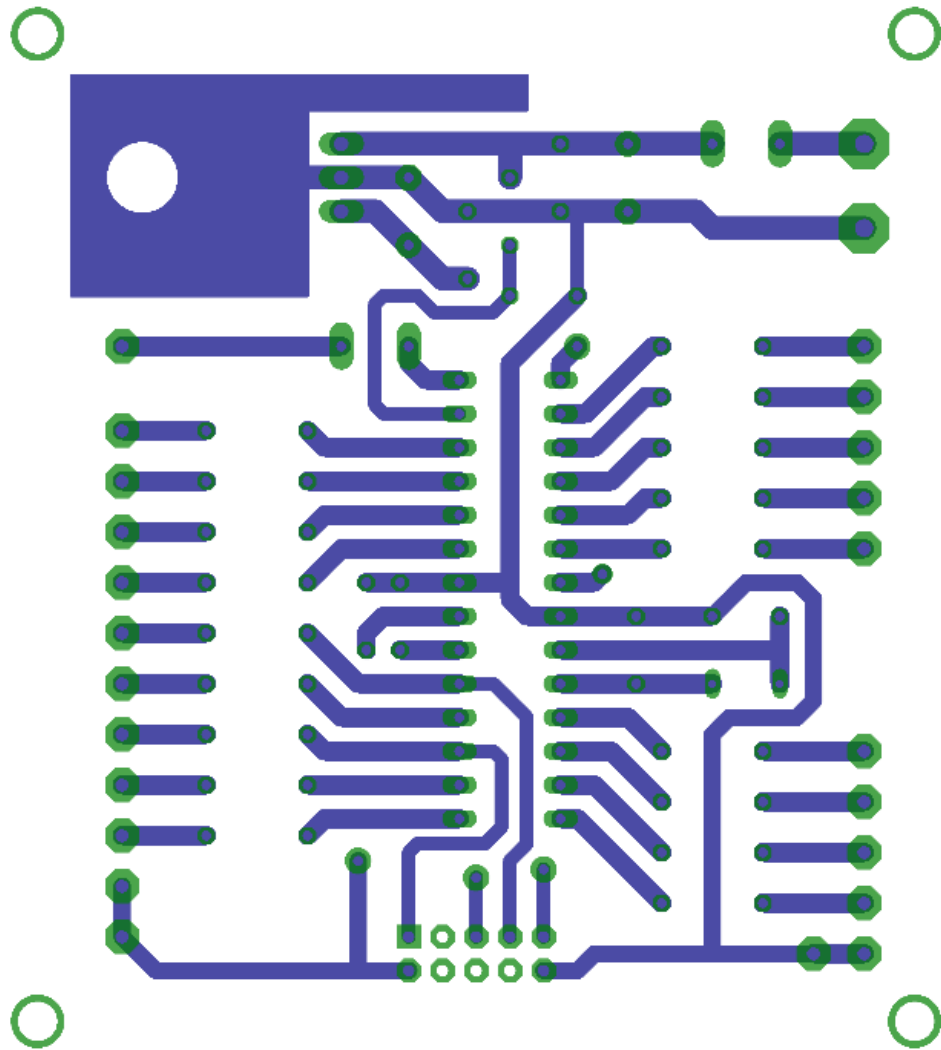
SEZNAM PŘÍLOH

- 1..... Měnič 2. verze DPS_BOT
- 2..... Měnič 2. verze DPS_ OSAZOVACÍ VÝKRES
- 3..... Řízení DPS_BOT
- 4..... Řízení DPS_TOP
- 5..... Řízení DPS_OSAZOVACÍ VÝKRES
- 6..... Fotografie svorek pro kotvení výbojky
- 7..... Fotografie celého zařízení
- 8..... Funkční schéma řídicího programu
- 9..... CD

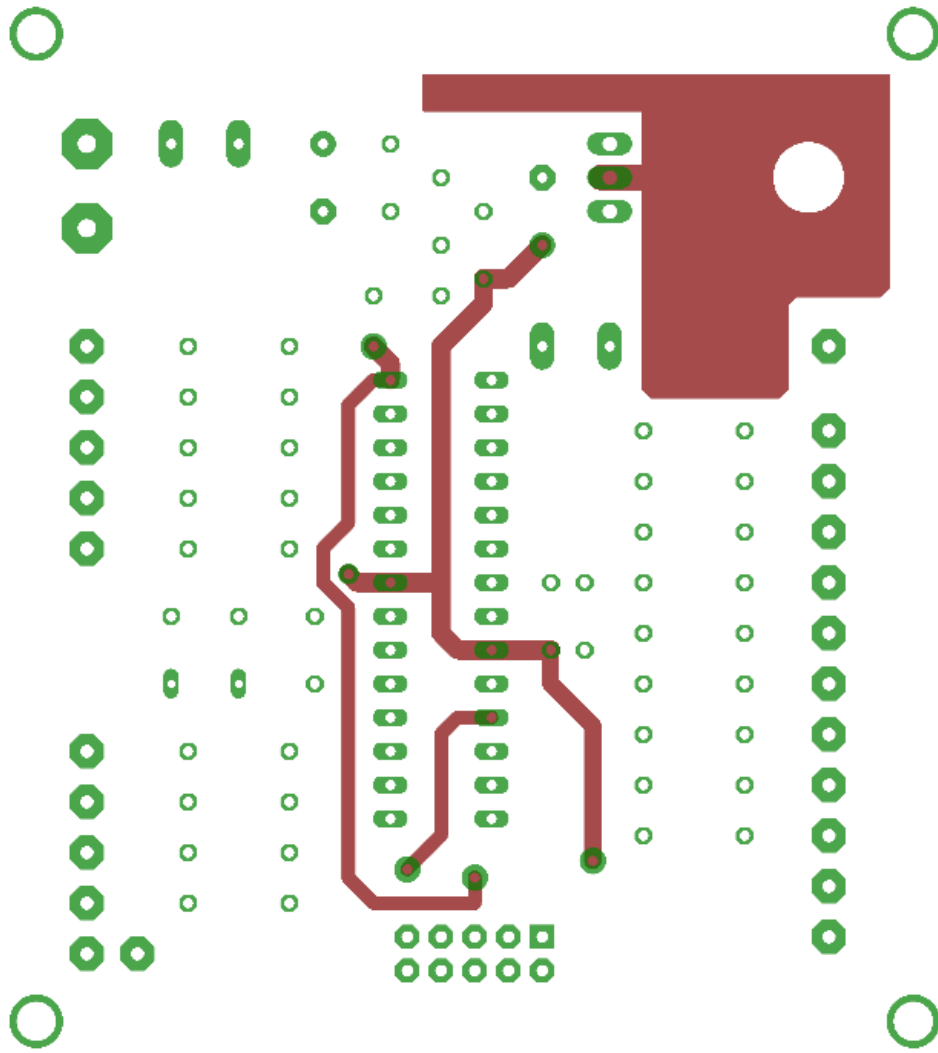
Přílohy



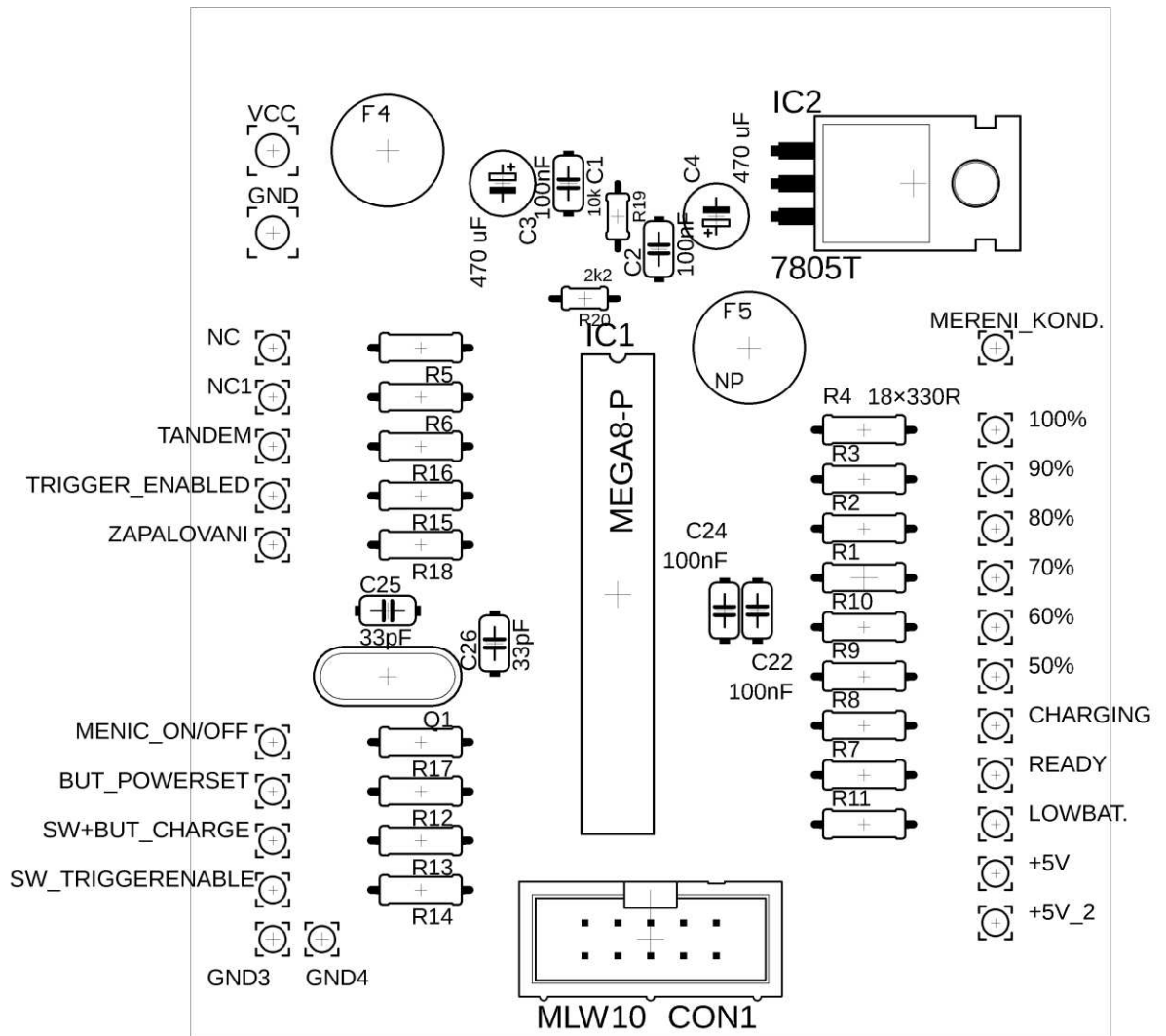
1: Měnič 2. verze DPS_BOT



3: Řízení DPS_BOT



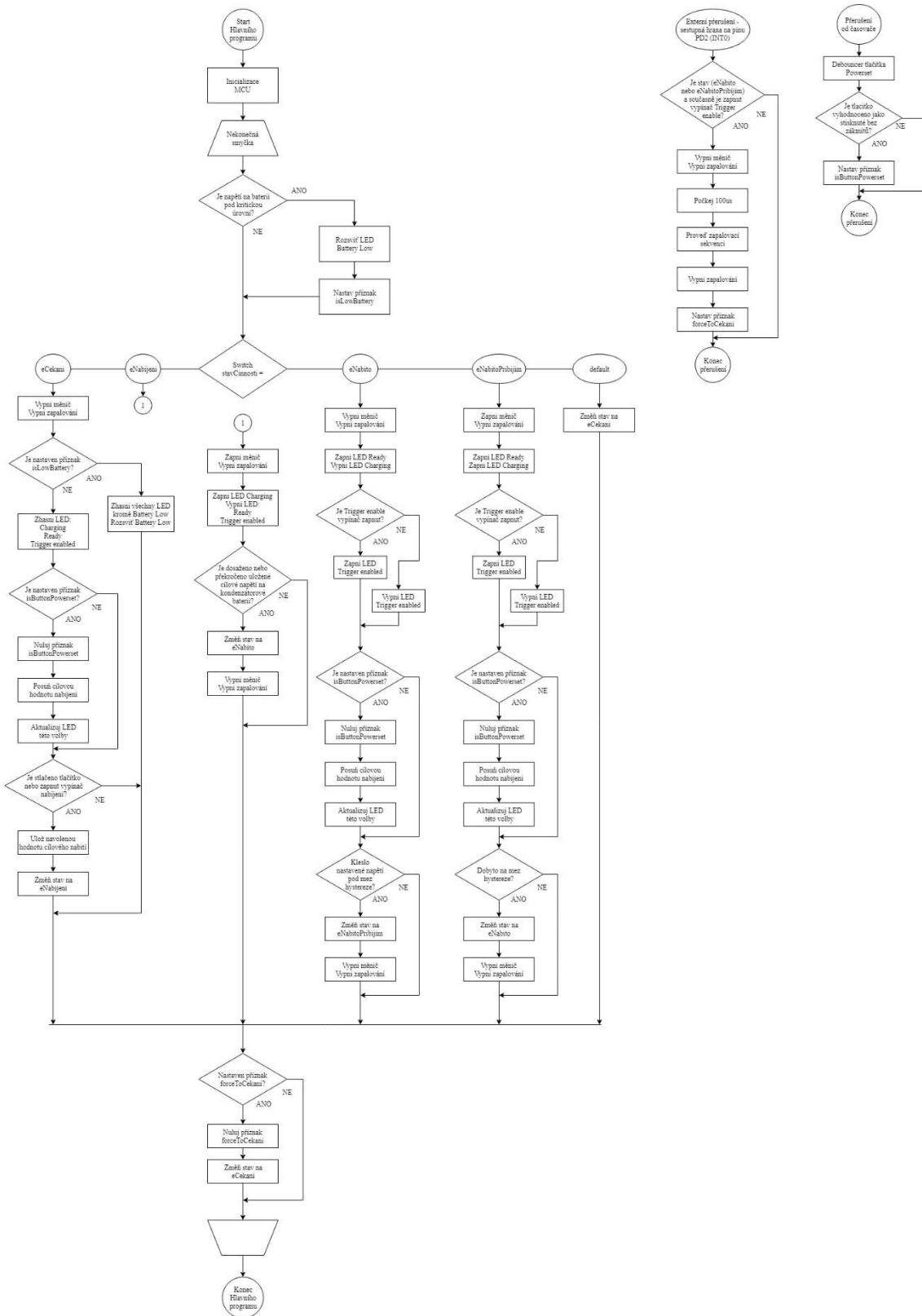
4: Řízení DPS_TOP



6: Fotografie svorek pro kotvení výbojky



7: Fotografie celého zařízení



8: Funkční schéma řídicího programu