

VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA ELEKTROTECHNIKY A KOMUNIKAČNÍCH TECHNOLOGIÍ
ÚSTAV TELEKOMUNIKACÍ

FACULTY OF ELECTRICAL ENGINEERING AND COMMUNICATION
DEPARTMENT OF TELECOMMUNICATIONS

MIKROPROCESOREM ŘÍZENÝ AUTONOMNÍ ZDROJ KONSTANTNÍHO
PROUDU A NAPĚTÍ

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE
BACHELOR'S THESIS

AUTOR PRÁCE
AUTHOR

MAREK KOVÁČ

BRNO 2012



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY



FAKULTA ELEKTROTECHNIKY A KOMUNIKAČNÍCH
TECHNOLOGIÍ

ÚSTAV TELEKOMUNIKACÍ

FACULTY OF ELECTRICAL ENGINEERING AND COMMUNICATION
DEPARTMENT OF TELECOMMUNICATIONS

MIKROPROCESOREM ŘÍZENÝ AUTONOMNÍ ZDROJ KONSTANTNÍHO PROUDU A NAPĚTÍ

MICROPROCESSOR-CONTROLLED AUTONOMOUS SOURCE OF CONSTANT CURRENT AND
VOLTAGE

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

BACHELOR'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

MAREK KOVÁČ

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

Ing. ONDŘEJ PAVELKA

BRNO 2012



VYSOKÉ UČENÍ
TECHNICKÉ V BRNĚ

Fakulta elektrotechniky
a komunikačních technologií

Ústav telekomunikací

Bakalářská práce

bakalářský studijní obor
Teleinformatika

Student: Marek Kováč

ID: 125495

Ročník: 3

Akademický rok: 2011/2012

NÁZEV TÉMATU:

Mikroprocesorem řízený autonomní zdroj konstantního proudu a napětí

POKYNY PRO VYPRACOVÁNÍ:

Navrhněte a realizujte spínaný zdroj konstantního proudu/napětí vhodného pro konstrukci nabíječe gelového olověného akumulátoru 12V. Zdroj realizujte pomocí mikrokontroléru ATmega, ovládací program pro zdroj a ovládání vytvořte v jazyce C. Zdroj bude nastavitelný pomocí ovládacích prvků nebo RS232/USB rozhraní včetně nastavení nabíjecího proudu. Správnou funkci nabíječe ověřte na realizovaném vzorku detailním měřením.

DOPORUČENÁ LITERATURA:

- [1] Krejčířík, A. : Napájecí zdroje 1. díl, BEN, 2002. ISBN 80-86056-02-3
- [2] Krejčířík, A. : Napájecí zdroje 2. díl, BEN, 2002. ISBN 80-86056-03-1
- [3] Mann, B. : C pro mikrokontroléry, BEN, 2003. ISBN 80-7300-077-6
- [4] Kainka, B.: Měření, řízení a regulace pomocí PC, BEN, 2003, ISBN 80-7300-089-X

Termín zadání: 6.2.2012

Termín odevzdání: 31.5.2012

Vedoucí práce: Ing. Ondřej Pavelka

Konzultanti bakalářské práce:

prof. Ing. Kamil Vrba, CSc.

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

Úlohou bakalářské práce je návrh a realizace spínaného zdroje pro konstrukci nabíječe olověných baterií 6/12V řízenou mikroprocesorem. Je založený na snižujícím měniči napětí STEP-DOWN. První část prezentuje činnost měniče a vlastnosti olověných baterií, následovaná návrhem měniče pro danou aplikaci. Druhá část popisuje kritéria pro výběr jednotlivých součástek a jejich dimenzování. Výsledkem práce je simulace měniče v programu Micro-Cap 9 spolu s potřebnými výpočty, návrh zapojení zdroje s výpočtem tlmivky a metodami měření výstupních veličin. Nakonec je realizovaná deska plošného spoje spolu s několika měřeními a samotný ovládací program pro mikrokontrolér. Celý návrh a realizace je zaměřená na dosažení co největší jednoduchosti zařízení a zároveň účinnosti a kvality nabíjení akumulátorů při nízkých nákladech na výrobek.

KLÍČOVÉ SLOVÁ

Znižující měnič; střída; pulzně šířková modulace; pracovní frekvence; účinnost, olověné baterie; dióda; tranzistor; rezistor; tlmivka; mikroprocesor; Eagle; Micro-Cap; simulace, ATmega32, C, RS232, regulátor PI

ABSTRACT

The task of bachelor thesis is proposal of switching source for the construction of lead-acid battery charger 6/12V controlled by microprocessor. It is based on buck converter of voltage. The first part presents the activity of converter and properties of lead-acid batteries, followed by a proposal of converter for a given application. The second part describes a criteria for selection of individual components and dimensioning them. The result of this thesis is simulation of converter in PC program Micro-Cap 9, along with the necessary calculations, a proposal of circuit with the calculation of inductor and methods of measurement of output quantities. Finally, is realized circuit board with a couple measurements and control program for the microcontroller.

The entire proposal is focused to achieving the greatest simplicity of facility and efficiency and quality of charging accumulators together at low cost to the product.

KEYWORDS

Step-down converter; inverter; pulse wide modulation; reference frequency; efficiency, lead-acid battery; diode; transistor; resistance; inductor; microprocessor; Eagle; Micro-Cap; simulation, ATmega32, C, RS232, regulator PI

KOVÁČ, M. *Mikroprocesorem řízený autonomní zdroj konstantního proudu a napětí*: bakalářská práce. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, Ústav telekomunikací, 2012. 69 s. Vedúci práce bol Ing. Ondřej Pavelka

PREHLÁSENIE

Prehlasujem, že som svoju bakalársku prácu na tému „Mikroprocesorem řízený autonomní zdroj konstantního proudu a napětí“ vypracoval samostatne pod vedením vedúceho bakalárskej práce, využitím odbornej literatúry a ďalších informačných zdrojov, ktoré sú všetky citované v práci a uvedené v zozname literatúry na konci práce.

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

Brno

.....

(podpis autora)

POĎAKOVANIE

Chcem poďakovať vedúcemu bakalárskej práce Ing. Ondřejovi Pavelkovi za metodickú, odbornú pomoc, konzultácie a trpezlivosť pri návrhu a realizácii bakalárskej práce.

Brno

.....

(podpis autora)

OBSAH

Úvod	12
1 Základné vlastnosti meničov	13
1.1 Základný princíp znižujúceho DC/DC meniča	13
1.2 Pracovné kvadranty DC/DC meničov	14
1.3 Pulzne šírková modulácia (PWM)	15
2 Vlastnosti olovených batérií	16
2.1 Popis oloveného akumulátora	16
2.2 Nabíjanie olovených akumulátorov	16
3 Znižujúci STEP-DOWN menič	18
3.1 Princíp činnosti znižujúceho meniča	18
3.1.1 Režim prerušovaných prúdov	20
4 Návrh znižujúceho meniča	21
4.1 Požiadavky na menič	21
4.2 Kritéria pre výber jednotlivých súčiastok	21
4.2.1 Vstupný kondenzátor	21
4.2.2 Rekuperačná dióda	21
4.2.3 Tlmivka	22
4.2.4 Výstupný kondenzátor	23
4.2.5 Výstupný LC filter	24
4.3 Dimenzovanie jednotlivých prvkov	24
4.4 Napätové dimenzovanie polovodičov	24
4.5 Prúdové dimenzovanie polovodičov	25
4.5.1 Spínací tranzistor	25
4.5.2 Rekuperačná dióda	25
4.5.3 Výpočet indukčnosti tlmivky a zvlnenia prúdu	26
4.5.4 Výpočet hodnoty kapacity a zvlnenia výstupného napätia	26
4.6 Straty na meniči	27
4.6.1 Straty vedením	27
4.6.2 Prepínacie straty	27
5 Simulácia v programe Micro-Cap 9	29
5.0.3 Zvlnenie prúdu na tlmivke	29
5.0.4 Vplyv kondenzátora na výstupné napätie	30
5.0.5 Pribeh prúdu na tranzistore a dióde	30

5.0.6	Napätie budiaceho obvodu a prúd na G tranzistoru	30
6	Návrh zapojenia nabíjača	36
6.1	Napájací systém	36
6.2	Výkonová časť	36
6.3	Riadiaca časť	36
6.3.1	Nastavenie RC filtru A/D prevodníku	37
6.4	Metódy merania výstupných veličín	40
6.4.1	Meranie napätia	40
6.4.2	Meranie prúdu	41
6.5	Použité súčiastky	42
6.5.1	Tranzistor	42
6.5.2	Dióda	42
6.5.3	Tlmivka	42
6.6	Voľba riadiaceho mikrokontroléra	43
6.7	Mikrokontrolér Atmel ATmega32	44
6.7.1	Popis použitých periférií	44
7	Prevedenie dosky plošného spoja	47
7.1	Merania na hotovom výrobku	48
8	Štandard RS232	51
9	Programovanie mikrokontroléru	52
9.1	Možnosti programovania	52
9.1.1	Sériový download pomocou zbernice SPI	52
9.2	Programovací jazyk C	52
9.2.1	Vývojové prostredie	52
9.3	Nastavenie prepojok	53
9.4	Obslužné programy	53
9.4.1	Regulátor PI	55
10	Záver	56
	Literatúra	57
	Zoznam symbolov, veličín a skratiek	59
	Zoznam príloh	64

A	Výkresová dokumentácia	65
A.1	Doska plošného spoja	65
A.2	Osadzovací výkres	66
A.3	Fotodokumentácia	67
B	Zoznam použitých prístrojov a pomôcok	68
C	Zoznam príloh na priloženom DVD	69

ZOZNAM OBRÁZKOV

1.1	Definícia striedy	14
1.2	Pracovné kvadranty meničov	14
1.3	Princíp činnosti PWM	15
3.1	Základné zapojenie znižujúceho meniča	18
3.2	Priebehy na jednotlivých prvkoch meniča	19
3.3	Priebehy napätia a prúdu na záťaži	20
4.1	Náhradná schéma pre cievku	22
4.2	Náhradná schéma pre kondenzátor	23
5.1	Schéma obvodu simulovaného v programe Micro-Cap	29
5.2	Priebeh zvlneného prúdu a napätia na výstupnej tlmivke	31
5.3	Priebeh prúdu a napätia na výstupnom kondenzátore	32
5.4	Priebehy prúdu a napätia na polovodičových prvkoch	33
5.5	Výstupné napätie budiča a priebeh budiaceho prúdu tranzistoru . . .	34
5.6	Priebehy na meniči s výstupným napätím 15 V a zaťažovacím prúdom 3 A	35
6.1	Schéma zapojenia nabíjača, výkonová časť	38
6.2	Schéma zapojenia nabíjača, riadiaca časť	39
6.3	Princíp merania napätia na batérií	40
6.4	Princíp merania prúdu	41
6.5	Prevedenie tlmivky	43
6.6	Púzdro a značenie vývodov mikrokontroléru ATmega32 [2]	46
7.1	Priebehy napätí na polovodičových prvkoch meniča	48
7.2	Napätie na tlmivke	48
7.3	Zvlnenie prúdu na tlmivke pri $s = 0,5$	49
7.4	Zvlnenie prúdu na tlmivke pri $s = 0,88$	49
7.5	Výstupné impulzy PWM na vývode mikrokontroléra	50
7.6	Výstupné impulzy budiča	50
8.1	Prenos písmena J cez RS232 [16]	51
9.1	Vývojový diagram programu	54
9.2	PI regulátor	55
A.1	Pohľad zo strany súčiastok (TOP), skutočný rozmer 136×86 mm . . .	65
A.2	Pohľad zo strany spojov (BOTTOM), skutočný rozmer 136×86 mm .	65
A.3	Strana súčiastok (TOP), skutočný rozmer 136×86 mm	66
A.4	Strana spojov (BOTTOM), skutočný rozmer 136×86 mm	66
A.5	Realizovaný plošný spoj, pohľad zo strany súčiastok (TOP)	67
A.6	Realizovaný plošný spoj, pohľad zo strany spojov (BOTTOM)	67

ZOZNAM TABULIEK

2.1	Parametre olovených akumulátorov.	16
2.2	Nabíjacie charakteristiky	17
6.1	Parametre tlmivky.	43

ÚVOD

Súčasný trend a zvyšujúci sa dopyt po malých prenosných zariadeniach zvýšili nároky na výkonnosť akumulátorov. Na trhu je široké spektrum výrobcov nikelmetalhydridových, nikelkadmiových, lítiových a olovených akumulátorov, od ktorých sa vyžaduje čo najdlhšia doba života, spoľahlivá funkcia či nezávadnosť voči prostrediu. Nabíjateľné články potrebujú mať hlavne pri rýchlom nabíjaní presne stanovené hranice odpojenia pri nabití či vybití a taktiež nabíjacie a vybíjacie prúdy. Len takým správnym ošetrením je možné dosiahnuť maximálnej kapacity, životnosti či spoľahlivosti. Ku správne návrhu spoľahlivej a flexibilnej nabíjačky je potrebné poznať nielen nabíjacie charakteristiky batérie, ale aj požiadavky napájaného systému. Pri rýchlom nabíjaní musia nabíjačky obsahovať obvody zabraňujúce poškodeniu batérie prebíjaním, pretože sa ním znižuje počet nabíjacích cyklov. U niektorých druhov batérií je nebezpečné nielen prebitie ale aj podbitie. [3]

Pri dnešnej dostupnosti elektronických súčiastok nieje problém postaviť kvalitný, výkonný, ľahký a malý spínaný nabíjač, ktorý spĺňa vyššie uvedené požiadavky. Pri použití vhodne naprogramovaného mikroprocesora môžeme nabíjať niekoľko druhov batérií jedným malým zariadením. V prípade pripojenia displeja si pohodlne odčítame množstvo parametrov práve nabíjaného akumulátora ako napr. aktuálny nabíjacie prúd, napätie na akumulátore, dodaný náboj či celkový čas nabíjania. Mikroprocesor sa dá jednoducho pripojiť pomocou sériového rozhrania, čo umožňuje nastavovanie parametrov a zistenie aktuálnych hodnôt veličín prostredníctvom počítača.

V úvode bakalárskej práce je spomenutý základný popis a niektoré výhody spínaných zdrojov nabíjačov, vlastnosti olovených batérií, nasleduje návrh, kritéria pre výber súčiastok a ich dimenzovanie, schéma zapojenia a simulácia výkonovej časti zdroja v počítačovom programe. Ďalej je návrh a popis zapojenia nabíjača spolu s výpočtom tlmivky, realizácia dosky plošného spoja s meraním a ovládací program.

1 ZÁKLADNÉ VLASTNOSTI MENIČOV

Pojem menič v elektrotechnike označuje zariadenie, ktoré slúži k zmene parametrov elektrickej energie. Medzi jej základné parametre patrí elektrické napätie, prúd, u striedavých systémov tiež frekvencia. Účinnosť takýchto meničov je vždy menšia než 100 %, čo vyplýva z fyzikálnej podstaty. Každé elektrické zariadenie má straty, teda aj u meničov sa určité množstvo energie premení na teplo. Tie však pracujú s vysokou účinnosťou a tak sú straty pomerne malé. [7]

1.1 Základný princíp znižujúceho DC/DC meniča

DC/DC meniče sú také, na ktoré je privádzané jednosmerné vstupné napätie, ktoré sa premení na vyššie alebo nižšie výstupné napätie, tzv. meniče napätového typu. Podľa toho sa rozlišujú dva druhy: tzv. STEP-UP alebo STEP-DOWN. Tento menič alebo menič BUCK je znižujúci spínaný menič. DC/DC menič môže prenášať energiu oboma smermi. Pozostáva z dvoch častí: silového obvodu a riadiacej elektroniky. Silové obvody pozostávajú zo spínačov a akumuláčnych prvkov. Ako spínacie prvky sa používajú tranzistory a diódy, zásobníkmi energie sú cievky a kondenzátory. Akumulačné prvky slúžia na vyhladenie výstupného napätia a prúdu a predávajú energiu spojite do záťaže v dobe vypnutia spínacích prvkov. Tlmivka znižuje aj amplitúdy vyšších harmonických a preto je zdroj len slabým zdrojom rušenia.

Spínané meniče sú založené na spínaní a odpájaní vstupného napätia na pripojenú záťaž. Pracujú na oveľa vyššom kmitočte ako je sieťový kmitočet 50 Hz. Následkom spínania o vysokej frekvencii vzniká nepriaznivé rušenie napájacej a napájanej časti obvodu, ktoré sa dá odstrániť napr. pripojením rôznych filtrov na vstup či vytvorením jedného závitú napájacieho vodiča na feritový krúžok. Impulzný charakter vstupného prúdu odoberaného zo zdroja spôsobuje väčšie vf. rušenie.

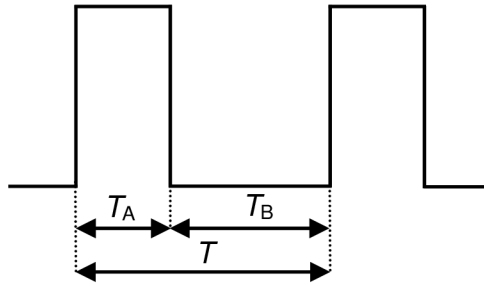
Spínacie tranzistory sa používajú bipolárne alebo unipolárne. Zmenou striedy pri konštantnej frekvencii alebo zmenou frekvencie pri konštantnej alebo premenlivej striede regulujeme výkon spínaného meniča. Straty v takomto meniči sú straty spínacie, spôsobené polovodičovými súčiastkami. Strieda je definovaná ako pomer času kedy je spínací prvok v zopnutom stave ku celkovému času periódy.

Matematické vyjadrenie striedy:

$$s = \frac{T_A}{T}, \quad s \in \langle 0, 1 \rangle \quad (1.1)$$

kde s je strieda (z angl. Duty Cycle), T_A je doba, kedy je spínací prvok zopnutý, T je perióda.

Obrázok 1.1 nám znázorňuje definíciu striedy:

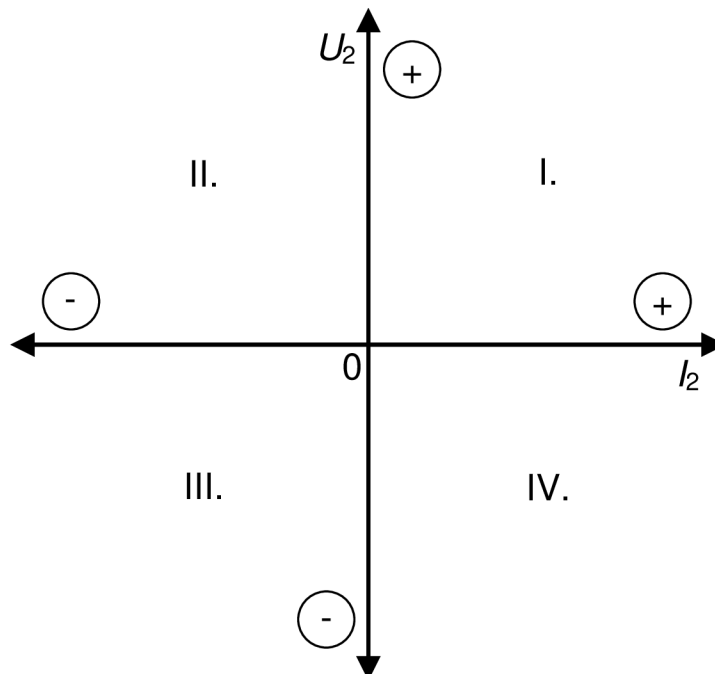


Obr. 1.1: Definícia striedy

Niekedy sa strieda vyjadruje aj ako pomer dĺžky trvania jednotlivých stavov: napr. 1:1 vyjadruje striedu 50 %, 1:3 25 % a podobne. [18]

1.2 Pracovné kvadranty DC/DC meničov

Podľa polarít výstupného napätia a prúdu sa určuje, v ktorom kvadrante menič pracuje. V prvom a treťom kvadrante majú napätie a prúd rovnakú polaritu. V druhom a štvrtom majú opačnú. V I. a III. kvadrante menič dodáva energiu do záťaže, v II. a IV. dodáva aktívna záťaž energiu späť do meniča. Obr. 1.2 nám znázorňuje štyri kvadranty V-A roviny. [13]

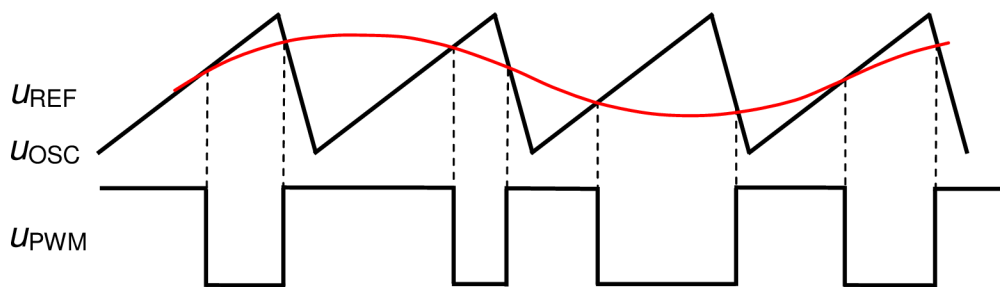


Obr. 1.2: Pracovné kvadranty meničov

1.3 Pulzne šírková modulácia (PWM)

Pulzne šírková modulácia PWM (z angl. Pulse Wide Modulation) je modulácia vhodná na riadenie pulzných meničov. Jej princíp je nakreslený na obr. 1.3.

Najkvalitnejším a principiálne najjednoduchším pulzne šírkovým modulátorom je komparátor. Na jeho vstupy privádzame trojuholníkový nosný signál u_{OSC} s kmitočtom f a na druhý vstup nízko-frekvenčný modulačný signál u_{REF} . Z výstupu komparátora odoberáme signál v podobe pulzne šírkovo modulovaného signálu u_{PWM} . Týmto signálom sa riadi spínanie a vypínanie externého spínača, teda tranzistora. V prípade, že má signál u_{OSC} väčšiu hodnotu ako signál u_{REF} , impulz má log. 1 a tranzistor je zopnutý. Na tomto je založená výkonová regulácia zdroja. [13]



Obr. 1.3: Princíp činnosti PWM

2 VLASTNOSTI OLOVENÝCH BATÉRIÍ

2.1 Popis oloveného akumulátora

Olovený akumulátor je sekundárny zdroj jednosmerného napätia. Sekundárny preto, lebo ani po naliatí elektrolytu sa medzi jeho elektródami na bázi olova nenachádza elektrické napätie. Akumulátor sa teda musí najskôr nabiť. Elektrolytom je kyselina sírová. Olovený akumulátor má nevýhodu, že keď je vybitý – aj čiastočne – a dlhšiu dobu nieje používaný, tak na jeho elektródach dochádza k zmenám, ktoré znižujú jeho kapacitu. Preto by sa mal akumulátor po použití dobiť. Rozdiel oproti galvanickým článkom sú hlavne tie, že je možné ich mnohokrát nabiť a vybiť, sú schopné dodávať väčšie prúdy než galvanické články, rádovo až stovky ampérov. Hlavnými výhodami týchto akumulátorov je relatívne nízka cena, vysoký výkon. Olovené akumulátory sa vyrábajú rádovo od 1 až 10 000 Ah. V nasledujúcej tabuľke sú vypísané niektoré parametre olovených batérií. [11]

Tab. 2.1: Parametre olovených akumulátorov.

Energetická hustota [Wh/kg]	30
Energetická hustota [Wh/I]	60
Pracovné napätie na 1 článok [V]	2
Profil vybíjania	pomaly klesajúci
Počet nabíjacích cyklov	500
Samovybíjanie [%/mesiac]	3
Vnútorň odpor	malý
Maximálna rýchlosť vybíjania	menšia než 5C

2.2 Nabíjanie olovených akumulátorov

Všetky typy batérií plnia v zariadení jednu úlohu a to dodávku obnoviteľnej elektrickej energie. Nie každý typ je vhodný pre konkrétnu aplikáciu. Batérie odlišných technológií majú odlišné vlastnosti, ktoré určujú vhodnosť jej použitia. Medzi tieto vlastnosti patrí energetická hustota v pomere k váhe alebo objemu, napätie na článok, profil vybíjania, počet nabíjacích a vybíjacích cyklov, rýchlosť samovybíjania, vnútorň odpor a maximálna rýchlosť vybíjania. Na prehľad jednotlivých parametrov slúži tab.2.1. Kapacita je popísaná veľkým C, ktorá udáva kapacitu v Ah. Bežne sú batérie vybíjané prúdom, niekoľkonásobne väčším než určuje kapacita C. Kvôli rozdielom v chemickom zložení rôznych typov batérií sa líšia aj požiadavky

na priebeh nabíjania. Nabíjacie charakteristiky pre dva druhy nabíjania sú popísané v tab. 2.2. Aby sa vylúčilo prebíjanie akumulátora, treba použiť základné a doplnkové metódy pre ukončenie nabíjania. Keďže batérie nemajú pri prevode dodanej energie na akumulovanú účinnosť 100 %, nedosiahneme pri nabíjaní prúdom veľkosti C počas 1 hodiny úplného nabitia, ale iba 75 až 95 % plnej kapacity. Preto je vhodné čas nabíjania predĺžiť a zvoliť vhodnú metódu nabíjania podľa technickej špecifikácie výrobcu. [11]

Sealed Lead-Acid (SLA) batérie sú nabíjané buď konštantným napätím s prúdovým obmedzením alebo konštantným prúdom. Pri prvej metóde je prúd dodávaný do batérie dovtedy, kým napätie na batérii nedosiahne požadovanej veľkosti. To je potom udržiavané na konštantnej hodnote, zatiaľ čo prúd sa znižuje, úmerne tomu ako sa batéria blíži plnému nabitiu. Napätie na článku je asi 2,25 V. Napätie naprázdno pre 6článkovú batériu je 12,6–12,8 V. Rýchle nabíjanie s použitím tejto metódy je realizované pri zväčšení napätia nabitého článku na 2,45 V, čím sa dosiahne predĺženie času nabíjania pri režime prúdového obmedzenia a skrátenie celkovej doby pre plné nabitie. Pri zmenšení veľkosti nabíjacieho prúdu pod určitú minimálnu hranicu je nabíjanie ukončené alebo nabíjacie napätie obmedzené na menovitú veľkosť. Pri rýchlom nabíjaní konštantným prúdom je nutné sledovať napätie na batérii a detekovať jeho výrazné zväčšenie, ktoré sa prejaví pri nabití batérie približne 75 %. Po uplynutí určitej doby by malo nastať odpojenie. [3]

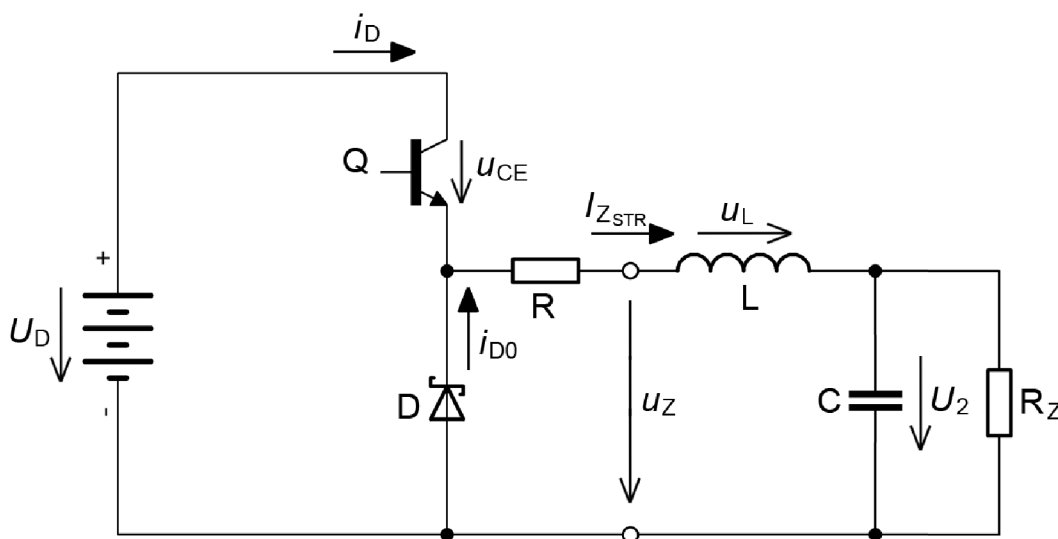
Tab. 2.2: Nabíjacie charakteristiky

Štandardné nabíjanie	
Nabíjací prúd	0,25 C
Napätie na článku [V]	2,27
Doba nabíjania [hodín]	24
Rozsah teplôt [°C]	0/45
Ukončenie nabíjania	žiadne
Rýchle nabíjanie	
Nabíjací prúd [C]	$\geq 1,5$
Napätie na článku [V]	2,45
Doba nabíjania [hodín]	$\leq 1,5$
Rozsah teplôt [°C]	0/30
Základné metódy pre ukončenie nabíjania (viz pozn.)	A
Doplnkové metódy pre ukončenie nabíjania	časovač ΔTCO
Pozn.: A = I_{MIN} , delta ΔTCO , B = dT/dt	

3 ZNIŽUJÚCI STEP-DOWN MENIČ

Spínané meniče nielen znižovacie ale aj zvyšovacie sú dnes v praxi veľmi používané. Stretneme sa s nimi od nabíjačiek mobilných telefónov, napájacie zdroje v počítačoch a notebookoch až po výkonové meniče v priemysle. Ich výhodou je, že pracujú s vysokou účinnosťou. Tým, že pracujú na relatívne vysokých frekvenciách oproti sieťovému kmitočtu umožňuje použiť malé rozmery tlmivky, ktorá je potom ľahšia a lacnejšia. U jednoduchého step-down meniča stačí použiť jednu tlmivku, jednu diódu, tranzistor, niekoľko kondenzátorov, čo je aj ekonomickejšie napríklad oproti meniču Čukovmu¹. Znamená to teda aj menej strát. Ďalšia výhoda je v tom, že je jednoduchší jeho návrh, rozmery DPS sú menšie vzhľadom na menší počet súčiastok. To prináša ďalšiu úsporu pri realizácii zariadenia. Dôvodom použitia je aj to, že nepotrebuje otáčať polaritu výstupného napätia. Pre nás je takýto typ meniča vhodný a preto ho použijeme.

3.1 Princíp činnosti znižujúceho meniča

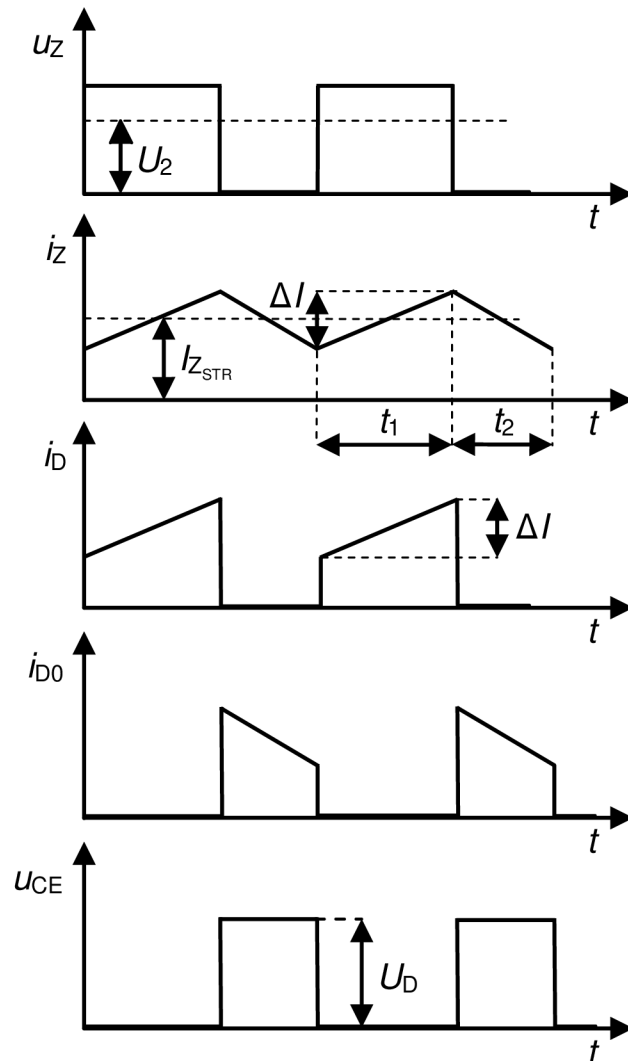


Obr. 3.1: Základné zapojenie znižujúceho meniča

Na obr. 3.1 je jednokvadrantový, jednosmerný menič pracujúci v prvom kvadrante. Napätie aj prúd má kladnú polaritu. Indukčnosť je tu zapojená ako časť integračného LC článku. Na výstupných svorkách meniča je impulzné napätie u_Z so strednou hodnotou U_2 . Z meniča odoberáme prúd i_Z so strednou hodnotou I_{ZSTR} . Obecné platí, že čím je väčšia indukčnosť L a pracovná frekvencia meniča, tým je

¹Čukov menič využíva dve tlmivky a kondenzátor

zvlnenie prúdu menšie. Pri kmitočtoch od 2 KHz až 20 kHz je už zvlnenie tak malé, že nieje treba uvažovať exponenciálne priebehy. Analýza meniča bude stále veľmi presná aj pri nahradení exponenciálnych priebehov šikmými priamkami. To znamená, že predpokladáme $R = 0$. Na obr. 3.2 sú zobrazené linearizované priebehy na jednotlivých prvkoch meniča platné pre $R = 0$.



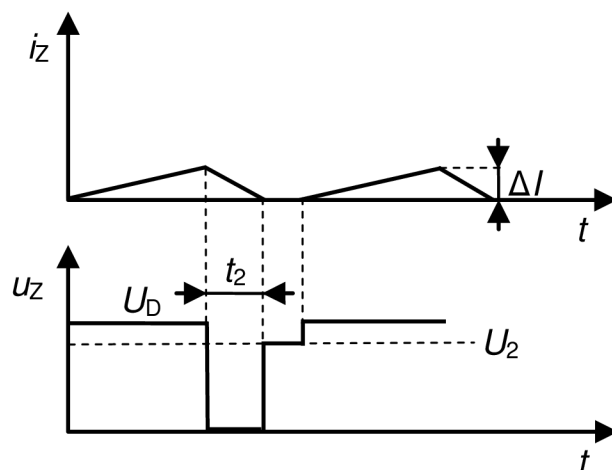
Obr. 3.2: Priebehy na jednotlivých prvkoch meniča

Princíp činnosti môžeme jednoducho popísať takto: Tranzistor Q ako spínací prvok môže byť buď v zopnutom alebo rozopnutom stave. V prvom prípade je napájací zdroj pripojený k obvodu a prúd i_Z preteká cez cievku L do záťaže. Na cievke vznikne úbytok napätia u_L , a chová sa ako spotrebič. Výstupný kondenzátor C je dobíjaný prúdom i_Z a rastie na ňom napätie a to tým pomalšie, čím je väčšia jeho kapacita C a indukčnosť cievky L . Ak je tranzistor rozopnutý, tak je zdroj napätia odpojený. Tlmivka L sa začne chovať ako zdroj, čo má za následok zmenu polarít

napätia u_L . Snaží sa udržať smer a veľkosť prúdu i_Z . Energia akumulovaná v dobe zopnutého tranzistora sa mení na dobíjací prúd i_Z kondenzátoru C. Aby však bol obvod uzavretý, musí byť obvod doplnený diódou D. Z daného popisu plynie, že počas doby kedy je tranzistor Q zopnutý napätie na výstupe rastie a keď je tranzistor rozopnutý, výstupné napätie klesá. Výstupné napätie na kondenzátore môže maximálne dosiahnuť hodnotu U_D . Ak budeme predlžovať dobu, kedy je tranzistor zopnutý (T_A), porastie výstupné napätie rovnako ako keď skrátime dobu, kedy je tranzistor rozopnutý (T_B). Ak chceme výstupné napätie znížiť, skrátime dobu (T_A), poprípade predlžime dobu (T_B).

Nevýhodou tohoto zapojenia je plávajúci spínací prvok, pozmenením zapojenia sa dá tento problém vyriešiť. [1], [8], [13]

3.1.1 Režim prerušovaných prúdov



Obr. 3.3: Priebehy napätia a prúdu na záťaži

Princíp činnosti je rovnaký ako v režime spojitéch prúdov. Počas činnosti meniča sa preferuje spojitý režim, pretože umožňuje najvyšší výstupný výkon pre daný integrovaný obvod regulátoru. Spojitý režim je taký, že prúd tlmivkou L počas poklesu neklesne na nulu a nezotrúva nulový. Pri malom zaťažení meniča sa väčšina konštrukcií spínaných zdrojov stane nespojitými. Ako sa mení zaťažovací prúd, tak sa automaticky prepínajú z jedného režimu do druhého, mení sa tvar zvlnenia. [14]

4 NÁVRH ZNIŽUJÚCEHO MENIČA

4.1 Požiadavky na menič

Na úplnom začiatku je nutné stanoviť parametre, pre aké menič navrhujeme a pre akú aplikáciu. To sú základné poznatky, ktorých sa musíme držať pri návrhu:

- Vstupné napätie v rozsahu od 17–20 V
- Výstupné napätie približne 15 V pre šesťčlánkový akumulátor, 7,5 V pre trojčlánkový
- Maximálny nabíjací prúd približne 3 A
- Zvolíme si maximálne zvlnenie výstupného prúdu 10 % maximálneho zaťažovacieho prúdu, teda približne 300 mA
- Zvlnenie výstupného napätia určíme maximálne 100 mV
- Pracovná frekvencia $f = 30$ kHz
- Riadenie mikroprocesorom

4.2 Kritéria pre výber jednotlivých súčiastok

4.2.1 Vstupný kondenzátor

Cez kondenzátory s väčšími rozmermi môžu pretekať väčšie prúdy, majú aj nižšie hodnoty ekvivalentného sériového odporu². Jeho hodnota sa volí najmenej 1,4 násobok maximálneho vstupného napätia. Vyššie napätie vedie ku kondenzátoru s nižšou kapacitou. Zvolením kondenzátora malých rozmerov môže viesť ku predčasnemu zlyhaniu zariadenia. [9]

4.2.2 Rekuperačná dióda

Pri volbe diódy sa používa záverné napätie diódy a hodnota výstupného prúdu a prúdu spínacieho tranzistora. Pre zdroj znižujúci napätie sa v najnepriaznivejšom stave rovná záverné napätie maximálnemu vstupnému napätiu U_D . Pokiaľ je požadované, aby dióda zniesla spojité skraty je treba zvoliť takú diódu, aby sa jej menovitý prúd rovnal skratovému prúdu. Ak zaťažovací prúd prekročí menovitý prúd diódy iba na malý okamih, je možné použiť poddimenzovanú diódu, ktorá je však preťažovaná behom tohoto skratu. Pripustný úbytok napätia na dióde je závislý na teplote. Z katalógu sa môže použiť hodnota pre maximálnu prevádzkovú teplotu, inak môže byť nárast teploty prechodu príliš veľký. Pre spínané zdroje je vhodnejšie použiť

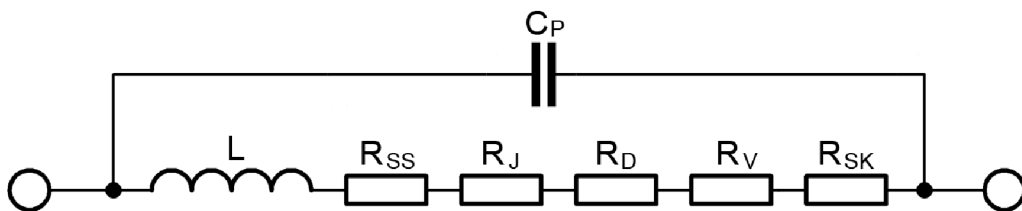
²Ekvivalentný sériový odpor alebo ESR je popísaný v 4.2.4

schottky alebo ultra rýchle typy kremíkových diód s postačujúcim nadimenzovaním. [9]

4.2.3 Tlmivka

Kritérium, ktoré treba dodržať sú aj maximálne straty v jadre. Tie sú vyjadrené v percentách výkonu a ich následkom môže byť aj to, že treba použiť väčšiu hodnotu indukčnosti, než sme určili pre daný spínaný prúd. Najhorší prípad nastáva v prípade maximálneho vstupného napätia. Straty sú rôzne od 5 % pre 1 W a menej, až do 2 % pre 10 W a viac. Strata v jadre je určená zo známych hodnôt vstupného a výstupného napätia, frekvencie, indukčnosti a materiálu jadra. Ak navrhujeme cievku čo najmenšieho objemu, môže sa stať to, že prevádzkové podmienky zapríčinia jej poruchovosť zapríčinenú hlavne vysokou teplotou. [9]

Náhradná schéma reálnej cievky je nakreslená na obr. 6.5. Je popísaná pomocou stratových odporov, ktoré vplývajú na výsledné správanie tlmivky v obvode. Jej kapacita, kapacita medzi závitmi cievky, dielektrické straty, straty vyžarovaním, to všetko vplýva na jej činnosť. Odpor R_{SS} predstavuje straty nezávislé na frekvencii (odpor vinutia), R_J sú straty v jadre – hysterézne a straty vírivými prúdmi, R_D sú dielektrické straty v kostre cievky, R_V straty vyžarením, R_{SK} sú straty závislé na frekvencii. C_P je vzájomná kapacita závitov. Medzizávitová kapacita sa pohybuje rádovo jednotky pF. Stačí malá mechanická zmena tvaru cievky a môžu sa zmeniť parametre celého obvodu. Medzizávitová kapacita aj ohmický odpor vinutia sa značne líšia podľa prevedenia tlmivky. V katalógovom liste sa udáva sériový odpor (jednotky mΩ pre veľké výkonové cievky až po ohmy pre malé cievky) a rezonančná frekvencia, ktorá je kľúčová pre určenie medznejho kmitočtu na ktorom môže cievka pracovať. Táto hodnota priamo súvisí s medzizávitovou kapacitou.



Obr. 4.1: Náhradná schéma pre cievku

Prúd pretekajúci tlmivkou je zhodný so zaťažovacím prúdom. Zvlnený prúd sa zvyčajne určuje s indukčnosťou L a spínacieho kmitočtu f , ale k jeho zmenám dochádza aj pri zmene vstupného napätia U_D . Čím je tlmivka menšia, tým je zvlnenie väčšie a zvyšujú sa aj straty v jadre a výstupné zvlnené napätie. Použitím väčšej cievky tieto dôsledky eliminujeme, ale za cenu väčších rozmerov cievky.

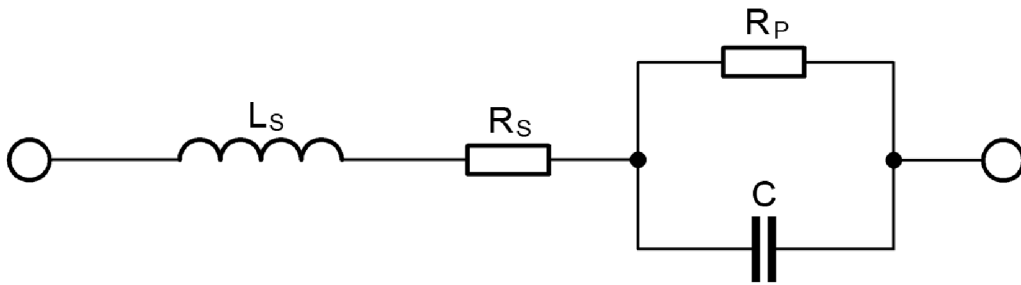
4.2.4 Výstupný kondenzátor

Na určenie výstupného filtračného kondenzátora je treba špecifikovať zvlnenie výstupného napätia a poznať zvlnenie výstupného prúdu. Najhorší prípad nastáva pri maxime vstupného napätia. Zvlnenie výstupného napätia závisí na hodnote sériového odporu kondenzátora a zvlnení prúdu. Kondenzátor s dostatočne nízkym sériovým odporom dostatočne vyrovnáva zvlnenie napätia. Kondenzátor je treba realizovať pomocou výkonového impulzného kondenzátora s malým sériovým vnútorným odporom R_S (malý činiteľ $\text{tg}\delta$) a paralelne zapojeným impulzným zvitkovým kondenzátorom. Je možné použiť aj sadu elektrolytických kondenzátorov spojených paralelne. Tým sa minimalizuje sériový odpor a sériová indukčnosť. Tá degraduje filtráciu, hlavne pri vysokých kmitočtoch. Sériový odpor je aj príčinou tepelných strát. Použitie jedného obyčajného elektrolytického kondenzátora môže byť aj nebezpečné (explózia po prehriatí). Sériový odpor R_S za označuje aj ako ESR (ekvivalentný sériový odpor). Kvalitné impulzné kondenzátory majú hodnotu ESR rádovo jednotky až desiatky $\text{m}\Omega$. Pre výpočet stratového činiteľa $\text{tg}\delta$ resp. ESR platia vzťahy:

$$\text{tg}\delta = 2\pi \cdot f \cdot C \cdot ESR, \quad (4.1)$$

$$ESR = \text{tg}\delta / 2\pi \cdot f \cdot C. \quad (4.2)$$

Z uvedených vzťahov vyplýva, že čím je vyššia pracovná frekvencia, tým je stratový činiteľ väčší. Naopak, čím je jeho hodnota nižšia, tým je kondenzátor kvalitnejší a vhodnejší pre prácu v impulzných alebo vysokofrekvenčných obvodoch. Výstupný kondenzátor absorbuje zvlnený prúd cievky. Jeho efektívna hodnota je približne 0,3 násobkom vrcholovej hodnoty zaťažovacieho prúdu. Najčastejšie sa kapacita výstupného kondenzátora určuje pomocou zvlnenia napätia. [9]



Obr. 4.2: Náhradná schéma pre kondenzátor

Ako vidieť na obrázku 4.2, skutočný alebo reálny kondenzátor má narozdiel od ideálneho niekoľko ďalších vlastností. Pri vysokých frekvenciách sa okrem sériového odporu prejavuje aj ďalšia vlastnosť, takzvaná zbytková vlastná indukčnosť kondenzátora L_S . Odpor R_P predstavuje konečnú hodnotu izolačného odporu dielektrika.

4.2.5 Výstupný LC filter

Dynamické zaťažovanie s rýchlou a veľkou amplitúdou je problémom hlavne hodnoty sériového odporu kondenzátora, ktorý zapríčiňuje poklesy výstupného napätia. Napríklad 1 A zmeny hodnoty zaťažovacieho prúdu pri kondenzátore so sériovým odporom $ESR = 0,3 \Omega$ bude mať za následok pokles výstupného napätia o 300 mV. Je treba voliť kondenzátory s malým ESR . [9]

4.3 Dimenzovanie jednotlivých prvkov

Striedu určíme s pomeru výstupného napätia ku vstupnému. Najväčšia strieda bude v prípade, že napájacie napätie bude $U_D = 17 \text{ V}$. Pre výstupné napätie $U_Z = 15 \text{ V}$ teda platí:

$$U_Z = U_D \cdot s \Rightarrow s = \frac{U_Z}{U_D}. \quad [14] \quad (4.3)$$

Aby sme dosiahli požadovaného výstupného napätia aj pri najmenšom vstupnom napätí, strieda musí mať hodnotu:

$$s = \frac{15}{17},$$
$$s = 0,88.$$

Pre $U_Z = 7,5 \text{ V}$:

$$s = \frac{U_Z}{U_D},$$
$$s = \frac{7,5}{17},$$
$$s = 0,44.$$

Pre vyššie vstupné napätie bude strieda menšia. Pri dimenzovaní prvkov musíme brať do úvahy najnepriaznivejšie prípady striedy.

4.4 Napäťové dimenzovanie polovodičov

Tranzistor Q je namáhaný vstupným napätím ak je rozopnutý. Dióda tiež, v prípade zopnutého tranzistora. Pri procese zániku prúdu tranzistorom (jeho vypínaní) vzniká prídavný napäťový impulz na parazitnej indukčnosti slučky tvorenej napájacím zdrojom, rekuperačnou diódou a spínacím tranzistorom. Závisí na veľkosti prúdu a rýchlosti vypínania a spomínanej indukčnosti. Dôsledkom toho je, že obidva prvky je treba dimenzovať radšej aspoň na dvojnásobok napájacieho napätia. Aby sa parazitná indukčnosť čo najviac zmenšila je treba spomínanú slučku čo najviac zmenšiť,

teda tranzistor, diódu umiestniť čo najbližšie k sebe. V praxi to znamená použitie kvalitného, tzv. výkonového impulzného bezindukčného kondenzátoru umiestneného paralelne k prívodom napájacieho napätia zároveň čo najtesnejšie k tranzistoru a dióde. [14]

4.5 Prúdové dimenzovanie polovodičov

4.5.1 Spínací tranzistor

Tranzistor je viac namáhaný pri veľkej striede, dióda naopak pri malej. Tranzistor musí byť dimenzovaný tak, aby maximálny špičkový prúd tranzistorom neprekročil jeho katalógovú hodnotu. Najväčší prúd bude pretekať tranzistorom pri napájacom napätí $U_D = 17\text{ V}$, striede $s = 0,88$ a maximálnom zatažovacom prúde $I_Z = 3\text{ A}$. Strednú hodnotu prúdu pretekajúcu tranzistorom určíme:

$$\begin{aligned} I_{\text{STR}} &= I_{Z_{\text{STR}}} \cdot s, \\ I_{\text{STR}} &= 3 \cdot 0,88, \\ I_{\text{STR}} &= 2,64\text{ A}. \end{aligned} \tag{4.4}$$

Efektívna hodnota sa určí nasledovne:

$$\begin{aligned} I_{\text{EF}} &= I_{Z_{\text{STR}}} \cdot \sqrt{s}, \\ I_{\text{EF}} &= 3 \cdot \sqrt{0,88}, \\ I_{\text{EF}} &= 2,81\text{ A}. \end{aligned} \tag{4.5} \quad [13]$$

Možno vidieť, že pri menšej striede a menšom zatažovacom prúde bude prúd tranzistorom menší.

4.5.2 Rekuperačná dióda

Diódu dimenzujeme na prúd stredný. U diódy nastane najnepriaznivejší prípad, ak bude $U_D = 20\text{ V}$, teda strieda asi 0,38 pri výstupnom napätí $U_Z = 7,5\text{ V}$. Predpokladáme prípad, že sa s meniča odoberá maximálny zatažovací prúd $I_Z = 3\text{ A}$. Tranzistor a dióda sa spínajú striedavo. To znamená, že keď je tranzistor zopnutý, dióda je zatvorená a naopak. Doba kedy je otvorená dióda je teda rozdiel celkového času periódy a času kedy je otvorený tranzistor.

$$\begin{aligned} I_{D0_{\text{STR}}} &= I_{Z_{\text{STR}}} \cdot (1 - 0,38), \\ I_{D0_{\text{STR}}} &= 3 \cdot (1 - 0,38), \\ I_{D0_{\text{STR}}} &= 1,86\text{ A}. \end{aligned} \tag{4.6}$$

Efektívna hodnota prúdu diódou:

$$\begin{aligned} I_{D0_{EF}} &= I_{Z_{STR}} \cdot \sqrt{1-s}, \\ I_{D0_{EF}} &= 3 \cdot \sqrt{1-0,38}, \\ I_{D0_{EF}} &= 2,36 \text{ A. [13]} \end{aligned} \quad (4.7)$$

Čím bude strieda väčšia a menší zatažovací prúd, tým potečie diódou menší prúd.

4.5.3 Výpočet indukčnosti tlmivky a zvlnenia prúdu

Pre určenie výslednej indukčnosti tlmivky je treba určiť zvlnenie prúdu. Hodnotu zvlnenia je stanovená ako 10 % z celkového zatažovacieho prúdu, viz obr. 3.2. Ak je teda maximálny odoberaný prúd asi 3 A, maximálne zvlnenie je $\Delta I = 0,3 \text{ A}$. Pre výpočet indukčnosti použijeme vzťah pre výpočet zvlnenia:

$$\Delta I = \frac{U_D \cdot s \cdot (1-s)}{L \cdot f} \Rightarrow L = \frac{U_D \cdot s \cdot (1-s)}{f \cdot \Delta I}. \quad (4.8)$$

Vidíme, že zvlnenie závisí na striede. Hľadáme maximum tohoto zvlnenia. Zderivujeme rovnicu (4.8) podľa s :

$$\frac{d(\Delta I)}{ds} = \frac{U_D}{f \cdot L} (1-2s) = 0. \quad [14] \quad (4.9)$$

Z rovnice vidieť, že maximum nastane pri $s = 0,5$. Dosadením striedy 0,5 dostaneme maximálnu hodnotu indukčnosti tlmivky.

$$\begin{aligned} L &= \frac{20 \cdot 0,5 \cdot (1-0,5)}{30\,000 \cdot 0,3}, \\ L &= 555 \mu\text{H}. \end{aligned}$$

4.5.4 Výpočet hodnoty kapacity a zvlnenia výstupného napätia

Pre výpočet hodnoty kapacity výstupného kondenzátora platí:

$$C = \frac{U_D \cdot s \cdot (1-s)}{8L \cdot f^2 \cdot \Delta U}. \quad [14] \quad (4.10)$$

Opäť si treba stanoviť výsledné maximálne zvlnenie výstupného napätia. Hodnotu zvlnenia je zvolená $\Delta U = 100 \text{ mV}$.

$$\begin{aligned} C &= \frac{20 \cdot 0,5 \cdot (1-0,5)}{8 \cdot 555 \cdot 10^{-6} \cdot 30\,000^2 \cdot 0,1}, \\ C &= 12,5 \mu\text{F}. \end{aligned}$$

4.6 Straty na meniči

4.6.1 Straty vedením

Tranzistor

Aby sme mohli určiť straty, je treba z katalógového listu tranzistora [6] zistiť hodnotu $R_{DS_{ON}}$. Pre tranzistor IRFR2405 je $R_{DS_{ON}} = 0,016 \Omega$.

$$P_{ZTR} = R_{DS_{ON}} \cdot I_{EF}^2, \quad (4.11)$$

$$P_{ZTR} = 0,016 \cdot 2,81^2,$$

$$P_{ZTR} = 0,13 \text{ W}.$$

Napätie medzi D a S v zopnutom stave vypočítame zo vzťahu:

$$U_{DS_{ON}} = R_{DS_{ON}} \cdot I_{Z_{MAX}}, \quad (4.12)$$

$$U_{DS_{ON}} = 0,016 \cdot 3,$$

$$U_{DS_{ON}} = 0,048 \text{ V}.$$

Dióda

Schottky dióda 50WQ04FN má podľa katalógového listu [4] $R_D = 0,0267 \Omega$ a prahové napätie $U_P = 0,27 \text{ V}$.

$$P_{\check{C}} = U_P \cdot I_{D0_{STR}} + R_D \cdot I_{D0_{EF}}^2, \quad (4.13)$$

$$P_{\check{C}} = 0,27 \cdot 1,86 + 0,0267 \cdot 2,36^2,$$

$$P_{\check{C}} = 0,65 \text{ W}.$$

4.6.2 Prepínacie straty

Proces spínania a vypínania tranzistora nieje nekonečne rýchly. To znamená, že určitý okamih je tranzistor v aktívnej oblasti, kedy na ňom vzniká stratový výkon. Pri zapnutí sa vytvorí energia W_{ON} pri vypnutí W_{OFF} . Prepínacie straty vznikajú aj na dióde vplyvom jej nenulovej zotavovacej doby t_{tr} . Pri spínaní tranzistoru postupne preberá prúd diódy. Ak už preteká celý prúd tranzistorom, malo by to znamenať, že dióda je uzavretá a skokový vzrast výstupného napätia z nuly na napájacie napätie U_D . Dióda je však schopná po určitú dobu zotavovacej doby viesť aj prúd opačného smeru, ak je záverné napájacie napätie príliš prudko vnútené zopnutím tranzistoru. Vzniká tzv. komutačný skrat. Prúd tečie zo zdroja cez tranzistor a nezotavenou diódou. Tým dióda zvyšuje straty a navyše v nej vzniká vypínací stratový výkon. [14]

Prepínacie straty závisia na pracovnej frekvencii a na dobe zopnutia a vypnutia tranzistora. V našom prípade uvažujeme spínacie doby tranzistora, pretože sú dlhšie ako spínacie doby budiča tranzistora IR2125³. Najväčšie straty sú pri najväčšom vstupnom napätí a maximálnom zatažovacom prúde. Podľa katalógového listu tranzistora [6] je doba $t_{\text{ON}} = 130 \text{ ns}$, doba $t_{\text{OFF}} = 78 \text{ ns}$.

Energia vzniknutá pri spínaní a vypínaní tranzistora:

$$W_{\text{ON}} = \frac{1}{4} \cdot U_{\text{D}} \cdot I_{\text{Z}} \cdot t_{\text{ON}}, \quad (4.14)$$

$$W_{\text{ON}} = \frac{1}{4} \cdot 20 \cdot 3 \cdot 130 \cdot 10^{-9},$$

$$W_{\text{ON}} = 1,95 \mu\text{J}.$$

$$W_{\text{OFF}} = \frac{1}{4} \cdot U_{\text{D}} \cdot I_{\text{Z}} \cdot t_{\text{OFF}}, \quad (4.15)$$

$$W_{\text{OFF}} = \frac{1}{4} \cdot 20 \cdot 3 \cdot 78 \cdot 10^{-9},$$

$$W_{\text{OFF}} = 1,17 \mu\text{J}.$$

Celkové prepínacie straty sú dané vzťahom:

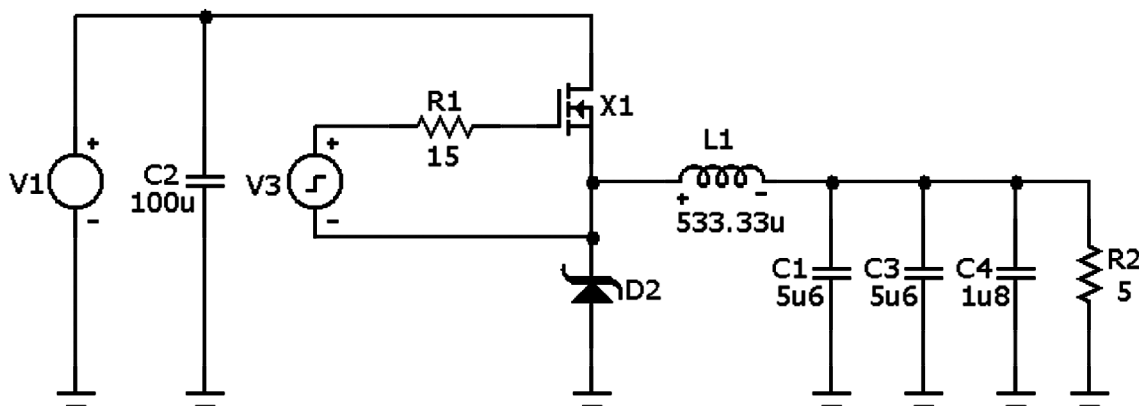
$$P_{\text{PR}} = f \cdot (W_{\text{ON}} + W_{\text{OFF}}), \quad (4.16)$$

$$P_{\text{PR}} = 30\,000 \cdot (1,95 \cdot 10^{-6} + 1,17 \cdot 10^{-6}),$$

$$P_{\text{PR}} = 0,09 \text{ W}. [14]$$

³Obvod je popísaný v kapitole 6

5 SIMULÁCIA V PROGRAME MICRO-CAP 9



Obr. 5.1: Schéma obvodu simulovaného v programe Micro-Cap

Potvrdenie správnosti návrhu meniča, výpočtu parametrov a správanie sa celého obvodu pred samotnou realizáciou na dosku plošného spoja je možné pomocou počítačového programu a simulácie daného obvodu. Veľkou výhodou je to, že umožňuje priamo meniť hodnoty súčiastok a množstvo ďalších parametrov obvodu bez toho, aby sme komplikovane testovali rôzne varianty priamo na DPS. Nepotrebujeme k tomu žiadne meracie prístroje, analýza v podstate umožňuje zobrazíť všetky veličiny obvodu na ktorejkoľvek súčiastke či jej časti a to aj na viacerých súčasne. Na objektívne zobrazenie priebehov simulácie je nutné nebrať súčiastky ako ideálne, ale treba počítať s ich parazitnými vlastnosťami, ktoré sa prejavujú hlavne pri obvodoch, ktoré pracujú na vysokých frekvenciách.

Na simuláciu našej aplikácie je použitý obvod podľa obr. 5.1. Zdroj pulzov V3, ktorý má výstupné napätie 15 V riadi spínanie a vypínanie tranzistora. Vytvára obdĺžnikové impulzy s nábežnou a zostupnou hranou 130 a 78 ns. Obvod je napájaný jednosmerným zdrojom V1, ktorého výstupné napätie je v rozsahu od 17 V do 20 V. Tranzistor mosfet s kanálom N je typu IRFR2405_IR s knižnice programu. Dióda je schottky 50WQ06FN. Výstupný kondenzátor je zložený z troch paralelne zapojených, aby sa minimalizoval *ESR* a súčet ich kapacity dával približne vypočítanú hodnotu. Zatažovací odpor R2 má odpor $R = 5 \Omega$, teda pre výstupné napätie 15 V je zatažovací prúd 3 A. Analýza celého obvodu je na obr. 5.6.

5.0.3 Zvlnenie prúdu na tlmivke

Výsledok simulácie ukazuje, že zvlnenie prúdu na tlmivke je okolo 300 mA pri napájanom napätí 20V, obrázok 5.2. Tlmivka má teda správnu indukčnosť a dosahujeme

požadovaného zvlnenia pri určenej pracovnej frekvencií. Napätie na tlmivke má rovnaký priebeh ako výstupné napätie meniča. Jeho rozsah sa pohybuje od -10 V do 10 V a je to vlastne rozdiel napájacieho napätia a napätia výstupného, to je v prípade 50% striedy 1/2 vstupného. Napätie na cievke skutočne mení polaritu podľa toho ako sa spínajú dióda a tranzistor. Ak je zopnutý tranzistor, napätie je kladné. Ak sa otvorí dióda, napätie zmení polaritu a uzavrie sa obvod cez diódu. Simulácia prebiehala pri maximálnom vstupnom napätí a striede 0,5, viz rovnica (4.8) a (4.9). Výstupné napätie dosahuje približne polovicu vstupného (9,7 V) a výstupný prúd asi 1,950 A.

5.0.4 Vplyv kondenzátora na výstupné napätie

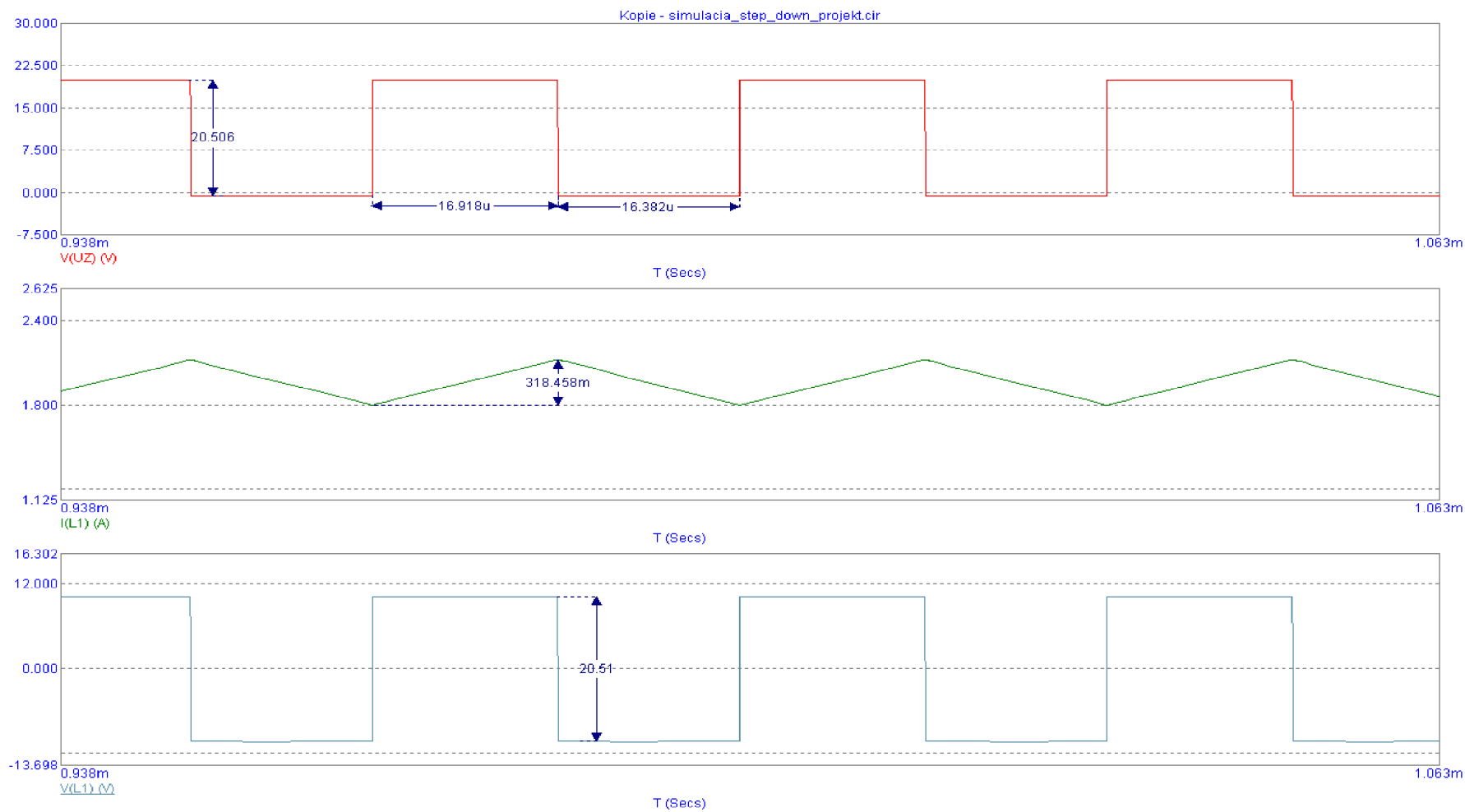
Stredná hodnota prúdu kondenzátorom je nulová, viz obr. 5.3. Maximálne zvlnenie napätia bude opäť pri striede $s = 0,5$. Výsledné výstupné zvlnené napätie kondenzátora má rozkmit 100 mV. Jeho stredná hodnota by mala mať 10 V ale je o niekoľko desiatín menšia. Je to zapríčinené stratami v obvode. Hodnota kapacity, ktorú sme vypočítali podľa rovnice (4.10) je správna.

5.0.5 Priebeh prúdu na tranzistore a dióde

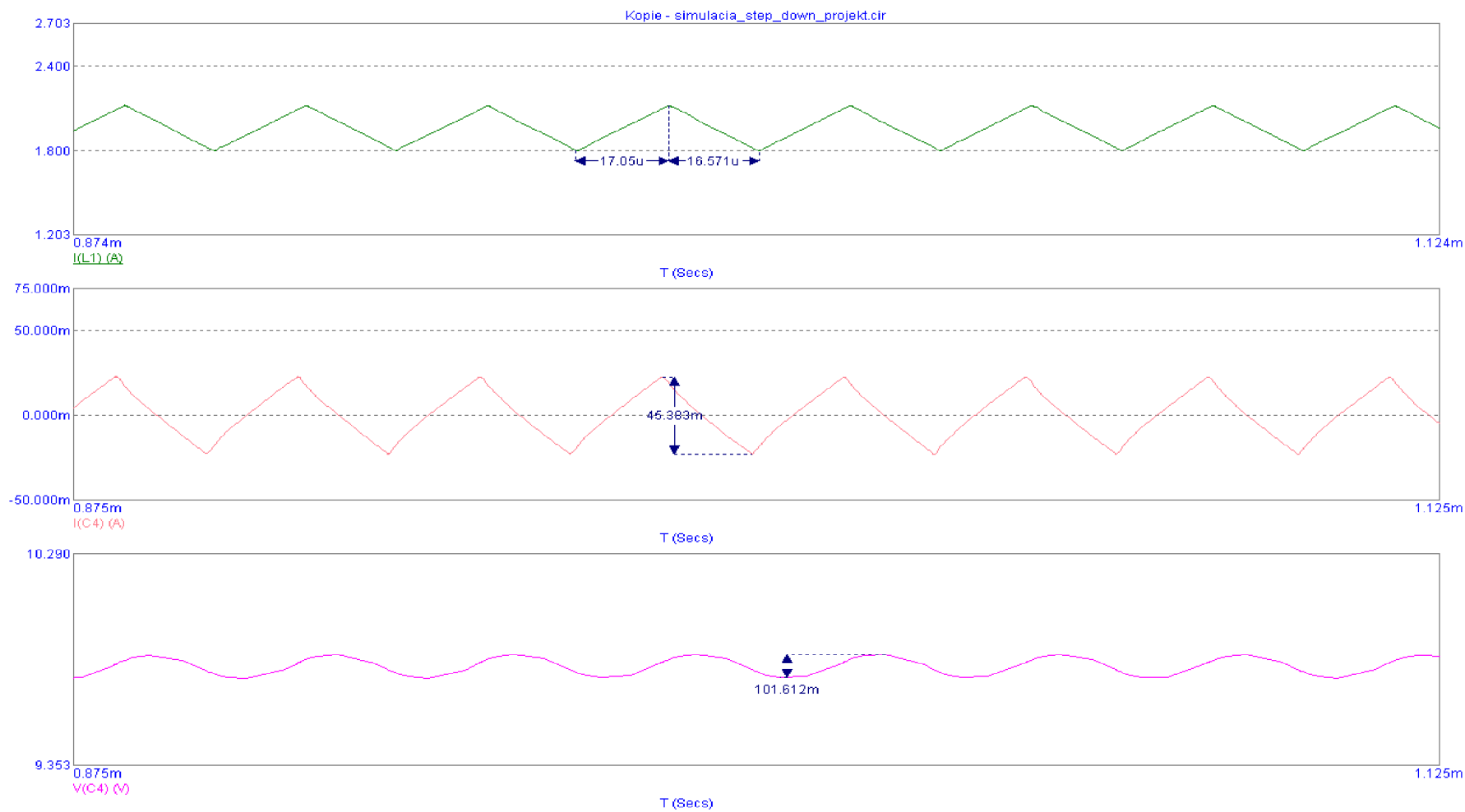
Výstup simulácie na obr. 5.4 dokazuje, že pri veľkej striede je tranzistor namáhaný okamžitým zaťažovacím prúdom väčšinu doby periódy. Napätovo sú prvky namáhané na veľkosť vstupného napätia. Impulzy, ktoré vznikajú pri zapínaní a vypínaní polovodičov sú spôsobené nežiadúcimi parazitným vlastnosťami, hlavne indukčnosťami. Preto je potrebné ich dimenzovať dostatočne ako napätovo, tak prúdovo. Priebehy sú platné pre tieto hodnoty: $U_D = 17\text{ V}$, $s = 0,88$, pretože pri týchto parametroch sú súčiastky najviac namáhané, viz podkapitola 4.5.

5.0.6 Napätie budiaceho obvodu a prúd na G tranzistoru

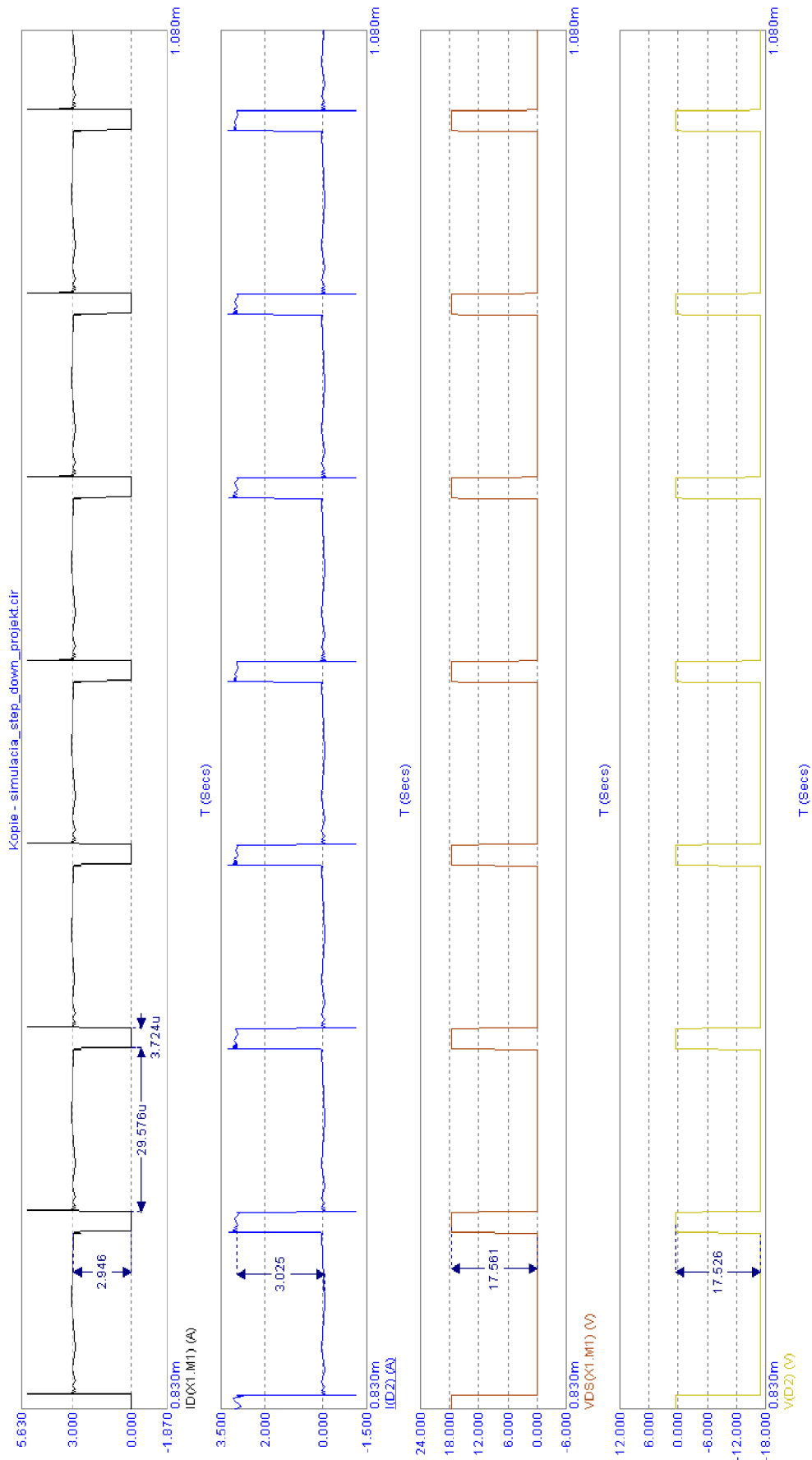
Výstupné napätie budiča tranzistora má tvar obdĺžnikových impulzov s amplitúdou 15 V. Vstupný budiaci prúd tranzistoru má impulzný charakter. Je to dané nabíjaním a vybíjaním vstupnej kapacity tranzistora, ich konkrétny tvar závisí od jej hodnoty. Pri zapnutí tranzistora je impulz kladný – kapacita sa nabíja, pri vypnutí je záporný – vybíja sa, viz obr.5.5.



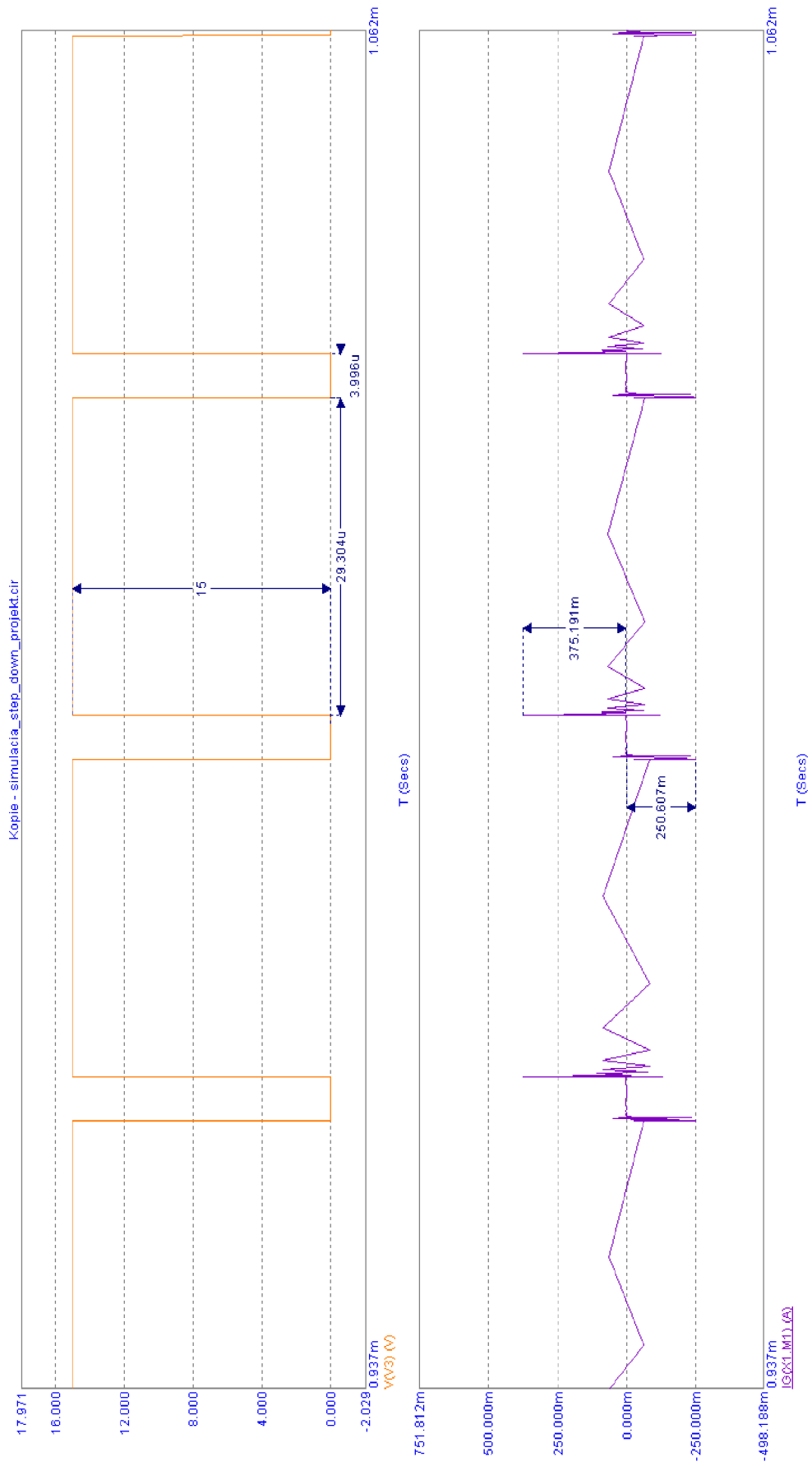
Obr. 5.2: Priebeh zvlneného prúdu a napätia na výstupnej tlmivke



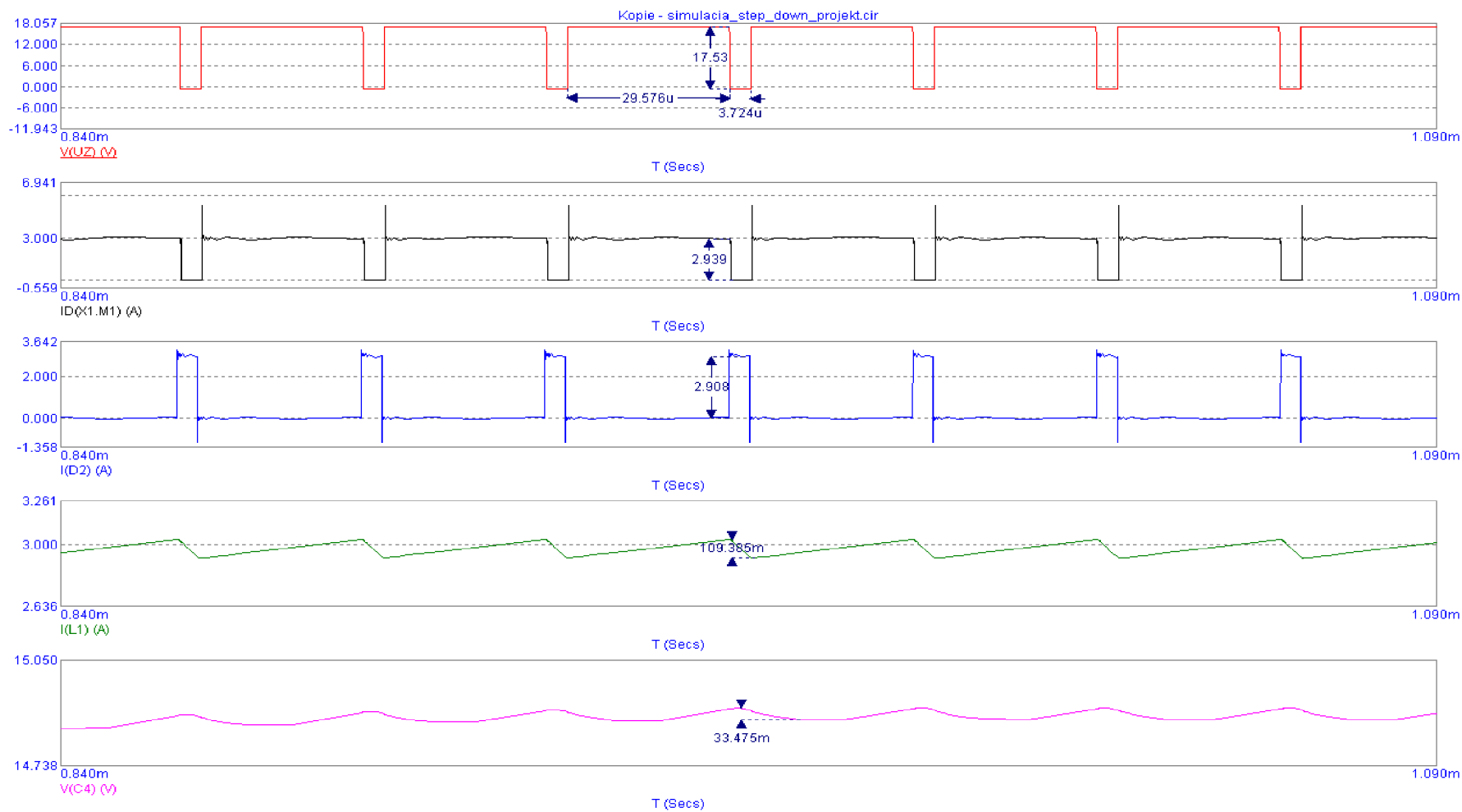
Obr. 5.3: Priebeh prúdu a napätia na výstupnom kondenzátore



Obr. 5.4: Priebehy prúdu a napätia na polovodičových prvkoch



Obr. 5.5: Výstupné napätie budiča a priebeh budiaceho prúdu tranzistoru



Obr. 5.6: Priebehy na meniči s výstupným napätím 15 V a zaťažovacím prúdom 3 A

6 NÁVRH ZAPOJENIA NABÍJAČA

6.1 Napájací systém

Vstupné pripájané napájacie napätie je filtrované a vyhladené pomocou kondenzátorov C2, C3, C4, C5. Vstupné filtračné kondenzátory je nutné použiť, pretože absorbujú prúdové impulzy vznikajúce v tomto type zdroja. Tento zvlnený prúd a vodivé cesty plošného spoja a ich indukčnosti môžu byť príčinou nepravidelných funkčných porúch. [9]

Stabilizáciu vstupného napätia obvodom IC2 (7805) získame napájacie napätie 5 V pre mikrokontrolér a MAX232CWE. To je zablokované blokovacími kondenzátormi C16, C18 v tesnej blízkosti mikrokontroléra a C12 v tesnej blízkosti obvodu MAX. Budiaci obvod požaduje napájacie napätie 15 V, ktoré získame stabilizáciou vstupného napätia obvodom IC1 (MC78M15BDTG). Oba stabilizátory sú zapojené podľa doporučených katalógových zapojení [12].

LED1 a jej predradný odpor R12 indikuje prítomnosť napájacieho napätia.

6.2 Výkonová časť

Základom je menič s horným spínačom pracujúcim v prvom kvadrante. Je zložený zo spínacieho unipolárneho tranistoru Q2 s kanálom N (IRFR2405), diódy D2 (50WQ04FN), výstupných kondenzátorov C23, C24, C25, C26 a tlmivky. Na výstupe meniča môže byť použitý kondenzátor s menšou kapacitou ako na vstupe vzhľadom k tomu, že zvlnenie výstupného prúdu je malé. Väčšia kapacita môže byť potrebná pre redukciu zvlnenia výstupného napätia. [9]

Obvod U1 (IR2125) je budič spínacieho tranzistoru. Jeho použitie je nutné z toho dôvodu, že mikrokontrolér nieje schopný priamo dodať požadovanú veľkosť napätia na budenie spínacieho tranzistora. Jeho zapojenie je prevzaté z katalógového zapojenia [5]. Vstup je pripojený na výstup PWM kanálu mikroprocesoru, ktorého frekvencia určuje spínací kmitočet meniča. Výstup budiča sa pripája na G spínacieho tranzistoru cez odpor RG, ktorý obmedzuje maximálny výstupný prúd a tlmí zapínací a vypínací dej.

6.3 Riadiaca časť

Riadenie meniča je zabezpečené mikroprocesorom ATmega32. Kryštál Q1 s kondenzátormi C6, C9 poskytuje externý zdroj hodín 16 MHz. Napájacie napätie A/D prevodníka je vyfiltrované LC filtrom doporučeným s datasheetu na redukciu šumu

do vstupu. Vývod na referenciu A/D prevodníka je cez kondenzátor C10 uzemnený. Toto je zapojenie ak využívame internú referenciu A/D prevodníka. Dióda D2 (1N5408) s poistkou slúžia ako ochrana voči prepólovaniu batérie.

Obvod resetu je tvorený rezistorom R1, tlačítkom S1 a kondenztorom C1. V prípade stlačenia tlačítka sa vývod pripojí na zem a mikrokontrolér sa vyresetuje, inak je na vývode trvalo 5 V.

Tlačítko S2 slúži ako nastavovacie tlačítko pre ovládací panel. Komunikácia s počítačom je zabezpečená obvodom IC4 (MAX232CWE) s doporučeným katalogovým zapojením [19] a konektorom D-Sub 9. Slúži na prispôsobenie napätových úrovní medzi štandardom RS232 (viz kapitola 8) a úrovňami mikrokontroléra. Konektor JP1 slúži ako programovací konektor SPI.

6.3.1 Nastavenie RC filtru A/D prevodníku

Výstupné napätia s meracieho deliča a operačného zosilňovača nesú na vstup A/D prevodníka privedené priamo ale cez RC filter. Je to vlastne filter typu dolná priepusť, ktorý má zabrániť aby sa vyššie frekvencie ako polovica vzorkovacieho kmitočtu (f_{vz}) nedostali do prevodníka a tým sa zabránilo efektu zvanému aliasing, ktorý by mohol viesť k tomu, že A/D prevodník meria nezmysly. Ideálne by bolo použiť filter 2. rádu, ale v našej aplikácii je použitý jednoduchý RC filter. Správne navrhnutý filter ovplyvňuje meraný signál minimálne. Pre medzný kmitočet RC filtru platí:

$$f_{medz} = \frac{1}{2\pi\tau}, \quad (6.1)$$

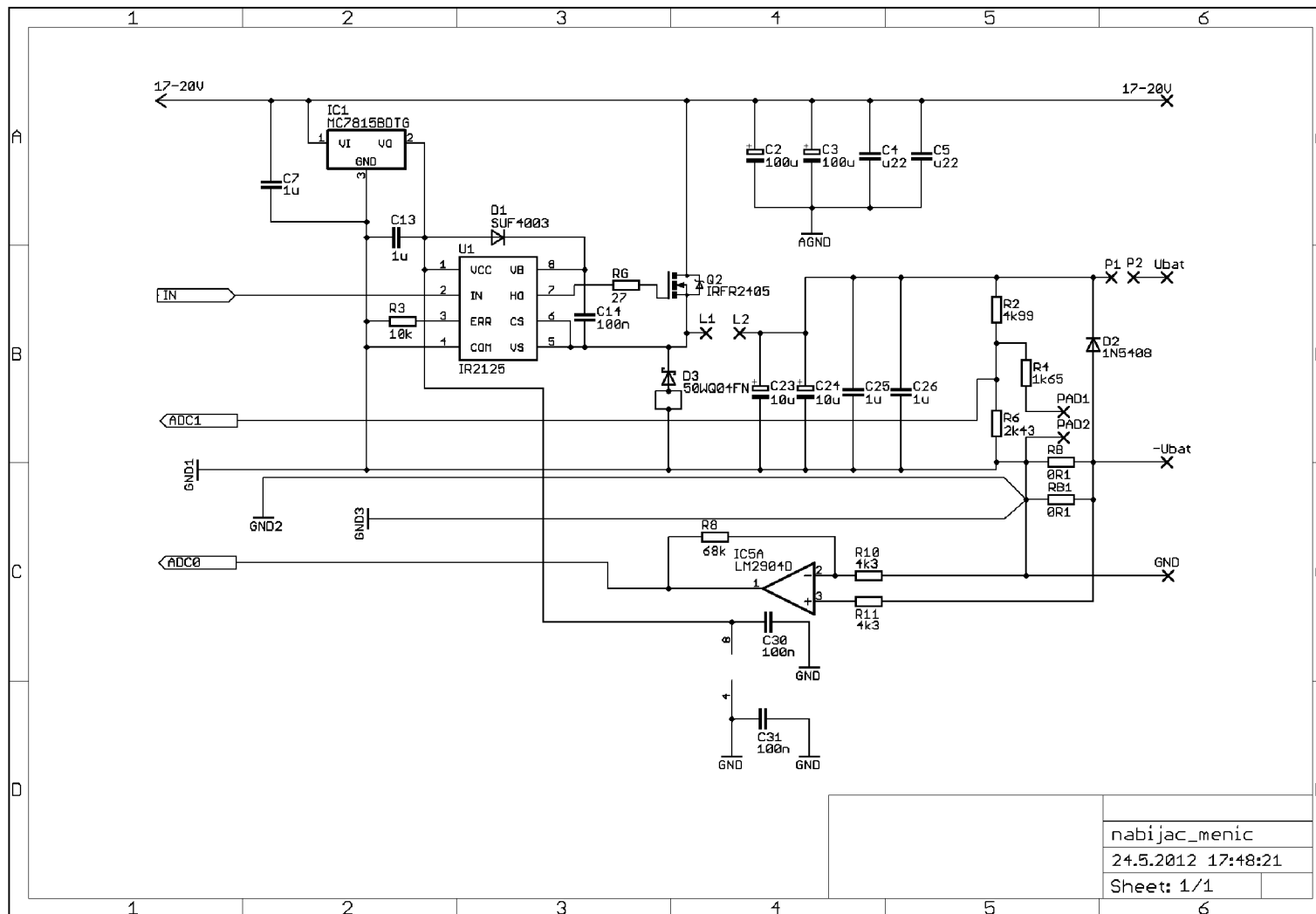
kde τ je časová konštanta:

$$\tau = RC. \quad (6.2)$$

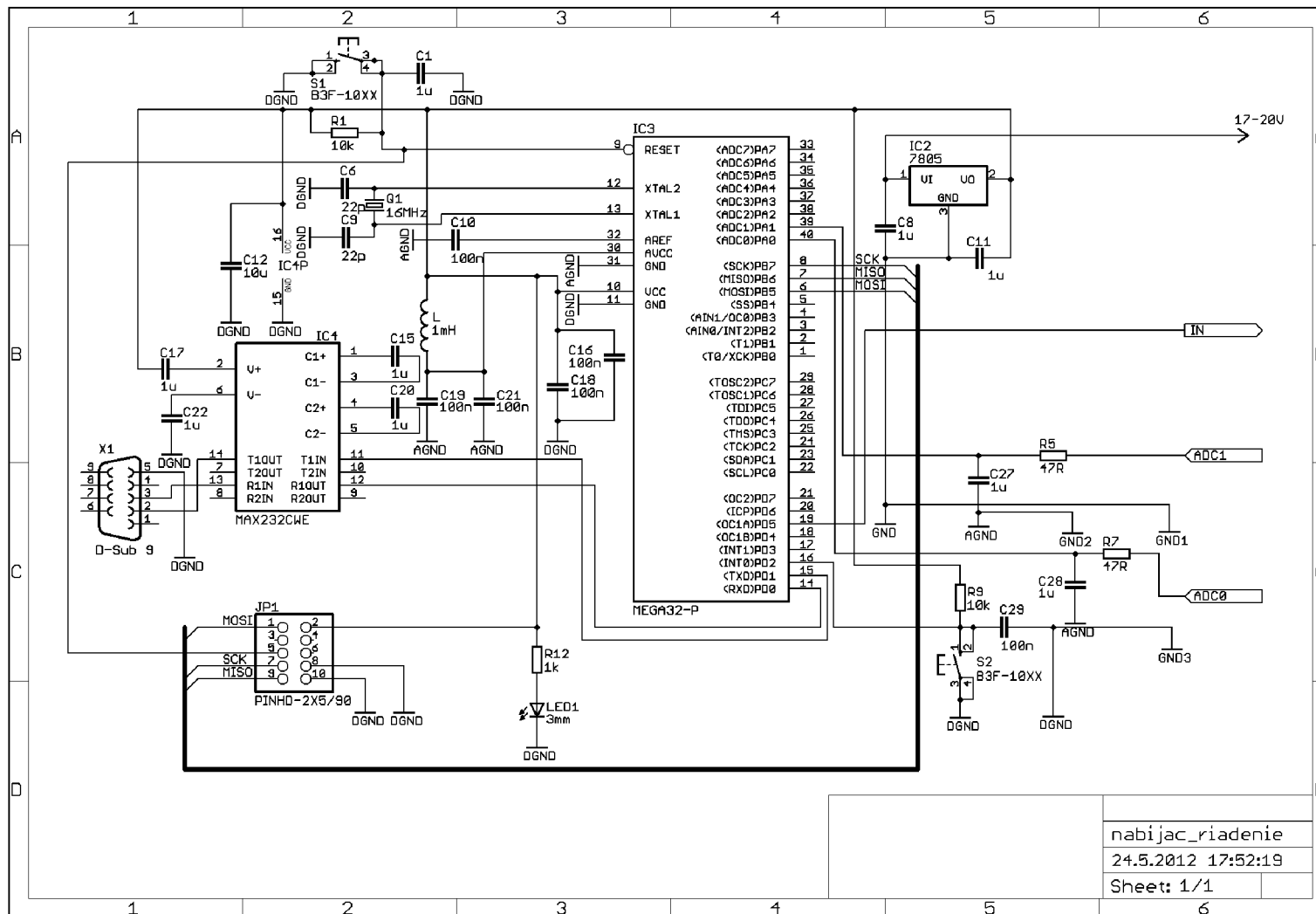
Kmitočet filtru by mal byť približne desatina spínacieho kmitočtu – teda 3 KHz. τ sa volí tak aby $f = 1/\tau$ bol pod $1/f_{vz}$. Ak napríklad zvolíme hodnotu $C = 1 \mu\text{F}$ a $R = 47 \Omega$ dostaneme:

$$f_{medz} = \frac{1}{2\pi \cdot 47 \cdot 1 \cdot 10^{-6}},$$

$$f_{medz} = 3386 \text{ Hz.}$$



Obr. 6.1: Schéma zapojenia nabíjača, výkonová časť

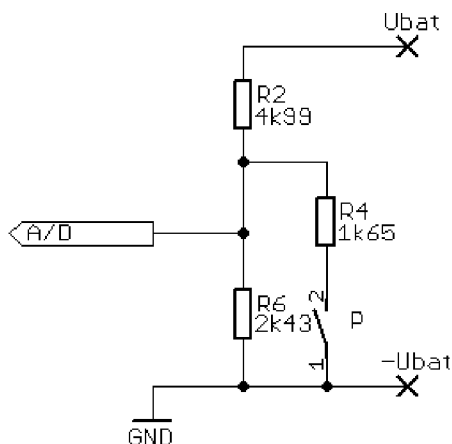


Obr. 6.2: Schéma zapojenia nabíjača, riadiaca časť

6.4 Metódy merania výstupných veličín

6.4.1 Meranie napätia

Napätie nabíjaného akumulátora 6 alebo 12 V nie je možné merať priamo, keďže je použitá referencia 2,56 V. S toho dôvodu musí byť pred vstup A/D prevodu zaradený odporový delič R2, R6, R4 na výstupných svorkách meniča s možnosťou prepínania rozsahu podľa nabíjacieho napätia batérie. Jeho výstupné napätie sa privádza na vstup mikrokontroléra – na vstup jeho A/D prevodníka. V prípade, že výstupné napätie bude iné ako požadujeme, mikrokontrolér zabezpečí upravenie aktuálnej hodnoty striedy. Dôležité je ale zmenu robiť postupne, nie skokovo, aby nedošlo k rozkmitaniu systému. Je to klasický spätnoväzobný systém. Výstupné napätie deliča musí byť také, aby odpovedalo použitej referencií A/D prevodníka s ohľadom na jeho nepresnosti alebo menšie.



Obr. 6.3: Princíp merania napätia na batérii

Pre výstupné napätie meracieho deliča napätia pre akumulátor 6 V platí:

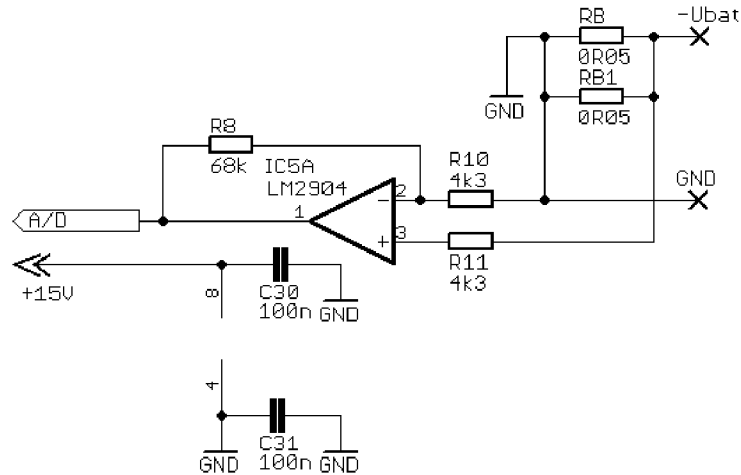
$$\begin{aligned} U_{A/D} &= U_6 \cdot \frac{R_6}{R_6 + R_2}, \\ U_{A/D} &= 7,5 \cdot \frac{2430}{2430 + 4990}, \\ U_{A/D} &= 2,46 \text{ V}. \end{aligned} \quad (6.3)$$

Pre akumulátor 12 V sa zapojí paralelne ďalší rezistor s takou hodnotou, aby vytvoril rovnaké výstupné napätie pri dvojnásobnom vstupnom napätí:

$$U_{A/D} = U_{12} \cdot \frac{\frac{R_6 \cdot R_4}{R_6 + R_4}}{\frac{R_6 \cdot R_2}{R_6 + R_2} + R_2}. \quad (6.4)$$

Použité sú odpory s rady E96 až s 1 % presnosťou.

6.4.2 Meranie prúdu



Obr. 6.4: Princíp merania prúdu

Snímanie prúdu dodávaného do nabíjaného akumulátora sa realizuje pomocou malého odporu, bočníku zapojenom ako dva paralelné rezistory RB a RB1 na ktorom sa meria úbytok napätia. Tento snímaný úbytok je zosilnený pomocou zapojenia neinvertujúceho zosilňovača LM2904. Niektoré mikroprocesory majú prepínateľné zosilnenie na vstupe, potom nieje treba použiť externé zosilnenie pomocou OZ. Toto však prináša aj nevýhodu, spomalí sa A/D prevod. Hodnota odporu bočníku musí byť čo najmenšia, aby na ňom nevznikali veľké straty. Jeho hodnota je rádovo mΩ, avšak čím menšia hodnota, tým lepšie. Vhodným nastavením zosilnenia rezistormi R8 a R10 dosiahneme úroveň napätia odpovedajúcu referencií A/D prevodníka alebo menšiu. Pre zosilnenie OZ platí:

$$A_v = 1 + \frac{R_8}{R_{10}}. \quad (6.5)$$

Aby sme zosilnili úbytok 150 mV na hodnotu približnú referencii 2,56 V, je treba nastaviť zosilnenie maximálne $2,56/0,15 = 17$. Použili sme rezistory s hodnotami 68 kΩ a 4,3 kΩ.

$$A_v = 1 + \frac{68000}{4300},$$

$$A_v = 1 + 15,81,$$

$$A_v = 16,81.$$

6.5 Použité súčiastky

6.5.1 Tranzistor

Ako spínací tranzistor je zvolený MOSFET s kanálom N IRFR2405 v púzdre DPAK od výrobcu International Rectifier. Jeho základné parametre sú:

- $V_{DSS} = 55 \text{ V}$
- $R_{DSOn} = 0,016 \Omega$
- $I_D = 56 \text{ A}$ [6]

6.5.2 Dióda

Na naše účely je potrebná rýchla schottky dióda realizovaná typom 50WQ04FN od rovnakého výrobcu. Parametre diódy:

- $I_{F(AV)} = 5,5 \text{ A}$
- $V_R = 40 \text{ V}$
- Púzdro DPAK [4]

6.5.3 Tlmivka

Na správnu realizáciu tlmivky nám nestačí iba hodnota zvlnenia. Musíme poznať niekoľko ďalších parametrov.

Výpočet tlmivky je realizovaný pomocou počítačového programu Trafa, ktorého tvorcom je Ing. Jozef Floch. Umožňuje spočítať tlmivky bez js. zložky, s js. zložkou pre rôzne typy plechových a feritových jadier, nielen pre meniče typu buck ale aj boost, buck-boost.

Vstupné parametre pre výpočet sú:

- **Požadovaný výkon:** 45 W
- **Predpokladaná účinnosť:** 95 %
- **Maximálne sýtenie:** 0,14 T
- **Pracovná frekvencia:** 30 kHz
- **Maximálne vstupné napätie:** 20 V
- **Minimálne výstupné napätie:** 7,5 V
- **Maximálne výstupné napätie:** 15 V
- **Činiteľ plnenia okna:** 0,9
- **Pomerné zvlnenie prúdu:** 0,1
- **Hrúbka vodičov:**
- **Úbytok na usmerňovači:** 0,3 V
- **Oteplenie vinutia:** 10 K

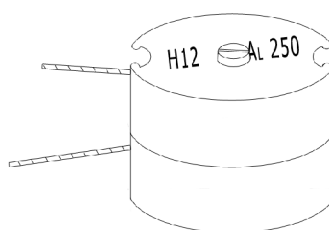
S týchto hodnôt program určí výstupné hodnoty pre tlmivku. Dôležité sú:

- **Rozmer jadra:** 42x29 mm
- **Počet závitov:** 47
- **Efektívny prúd:** 3,001 A
- **Prierez vodiča:** 1,8 mm²
- **Priemer vodiča:** 1,6 mm
- **Indukčná konštanta Al :** 250 H/z²
- **Odpor vinutia:** 50,79 mΩ

Na základe výsledkov sme použili hrnčekové feritové jadro o rozmeroch 42x29 mm s $Al = 250 \text{ H/z}^2$. Namiesto obyčajného plného vodiča s vypočítaným priemerom sme použili vinutie s vf. lanka s priemerom 1,7 mm s dôvodu skin efektu, kedy je elektrický prúd vytlačovaný k povrchu vodiča. Tlmivka má 47 závitov a jej hmotnosť je približne 175 g.

Tab. 6.1: Parametre tlmivky.

Druh jadra	feritové, hrnčekové
Rozmery jadra [mm]	42x29
Indukčná konštanta [250 H/z ²]	250
Efektívny prúd [A]	3,001
Počet závitov [z]	47
Priemer vodiča [mm]	1,7
Druh vodiča	vf. lanko
Odpor vinutia [Ω]	0,051
Hmotnosť [g]	175



Obr. 6.5: Prevedenie tlmivky

6.6 Voľba riadiaceho mikrokontroléra

Po návrhu a simulácii výkonovej časti je treba zvoliť riadiaci mikrokontrolér, ktorý nám zabezpečí riadenie celého meniča. Stará sa o generovanie PWM pre budič výkonového tranzistoru, meranie výstupného napätia a prúdu A/D prevodníkom či

komunikáciu s počítačom pomocou sériovej linky. Má zabezpečiť správny priebeh nabíjacieho cyklu a zistené parametre ďalej vyhodnotiť a spracovať ich. Na to potrebujeme mikrokontrolér, ktorý obsahuje potrebné periférie, má dostatočne veľkú pamäť a v konečnom dôsledku nie veľmi drahý. Mikrokontrolér je na základe požiadavku zvolený od známeho výrobcu Atmel, konkrétne typ ATmega32. Obsahuje všetky potrebné periférie, ktoré sú nutné pri konštrukcii nabíjača. Sú to A/D prevodník, USART, čítač/časovač. Obsahuje aj dostatočne veľkú pamäť, ktorá umožňuje riadiť aj relatívne zložitejšie aplikácie.

6.7 Mikrokontrolér Atmel ATmega32

Jedná sa o nízokopríkonový 8bitový mikrokontrolér založený na rozšírenej architektúre RISC.

Základné vlastnosti ATmega32:

- **Programová pamäť tvorená zabudovanou 32 kB Flash**
Umožňuje 10000 preprogramovaní.
- **1024 B EEPROM**
Možných až 100000 preprogramovaní.
- **2 kB vnútorná SRAM**
- **2 8bitové čítače/časovače**
- **1 16bitový čítač/časovač**
- **4 PWM kanály**
- **10bitový A/D prevodník, 8 kanálov**
- **Analógový komparátor**
- **Jednotka USART, SPI, TWI**
- **Watchdog timer, power-on reset**
- **Interný RC oscilátor**
- **Púzdra PDIP, TQFP, QFN/MLF**
- **Cena asi 150Kč (PDIP) [2]**

6.7.1 Popis použitých periférii

A/D prevodník

Mikrokontrolér obsahuje vstavaný 10bitový A/D prevodník s ôsmimi vstupnými kanálmi ADC0 až ADC7. 10bitový prevodník umožňuje merať $2^{10} = 1024$ hladín. Umožňuje nám namerané veličiny premeniť do digitálnej formy a ďalej ich pomocou programu spracovávať. S A/D prevodníkom súvisí aj voľba referencie. Od nej potom závisí merací rozsah prevodníka. V našom zapojení je využitá interná referencia a

využívame dva kanály. Nultý kanál pre meranie prúdu a prvý pre meranie napätia. Pre správnu funkčnosť prevodu je nutné nastaviť aj ďalšie parametre, ktoré budú popísané v kapitole 9.4.

Čítač/časovač

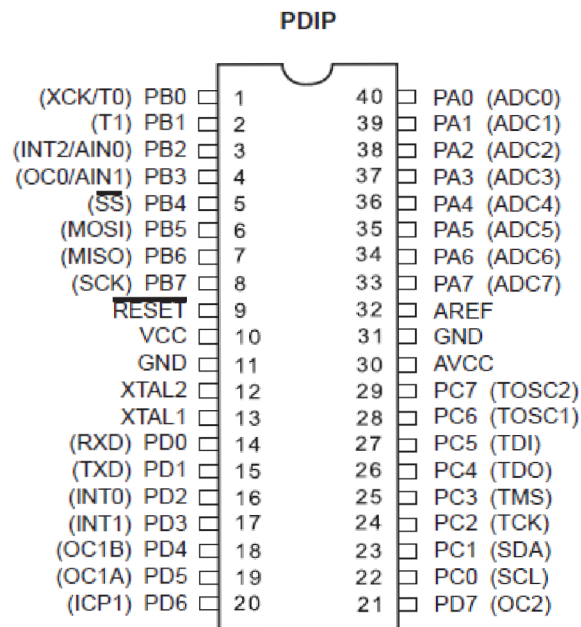
ATmega32 nám poskytuje celkovo 3 časovače. Dva sú osembitové (čítač/časovač0 a čítač/časovač2) a jeden je 16bitový (čítač/časovač1). Časovač nám umožňuje generovať PWM signál pre budenie výkonového tranzistora. Osembitové čítače môžu pracovať v štyroch režimoch, a 16bitový v piatich režimoch. Ich nastavením uvedieme činnosť čítača a časovača do stavu aký požadujeme. V tejto aplikácii je podstatný režim rýchlej PWM, ktorý umožňuje dosiahnuť vysokej spínacej frekvencie meniča.

USART

Univerzálny synchronný a asynchronný prijímač a vysielač je jednotka, ktorá umožňuje komunikáciu s počítačom. Tu je využitý pre prenos dát medzi počítačom a nabíjačom pomocou rozhrania RS232. Umožňuje synchronný aj asynchronný prenos a užívateľ si nastaví aj parametre ako je prenosová rýchlosť, formát rámca, parita. Pre správnu funkčnosť je nutná konverzia úrovni RS232-TTL, ktorá je zabezpečená obvodom MAX232. Celok tak poskytuje možnosť pripojiť zariadenie nielen ku konektoru RS232, ale aj k USB ak sa ešte použije prevodník RS232/USB. [10]

SPI

Poskytuje vysokorýchlostný synchronný prenos medzi mikrokontrolérom a periférnym zariadením alebo druhým mikrokontrolérom, ktorý musí taktiež obsahovať zbernicu SPI. Pomocou tejto zbernice je zabezpečené nahrávanie ovládacieho programu do mikrokontroléra za použitia vhodného programátora. [10]



Obr. 6.6: Púzdro a značenie vývodov mikrokontroléru ATmega32 [2]

- **PA0–PA7:**
Vstupy A/D prevodníka (v normálnom režime vstupné/výstupné porty), využívame ADC0, ADC1.
- **PB0–PB7:**
Port B, MISO, MOSI, SCK využívame na programovanie mikrokontroléra.
- **PC0–PC7:**
Port C.
- **PD0–PD7:**
Port D, využívame OC1A ako výstup PWM, INT0 vstup od tlačítka.
- **VCC:**
Napájanie.
- **AVCC:**
Napájanie A/D prevodníka.
- **AREF:**
Referencia A/D prevodníka, nepoužitá (uzemnený cez kondenzátor).
- **GND:**
Zem.
- **RESET:**
Resetovací vstup.
- **XTAL1, XTAL2:**
Pripojenie externého zdroja hodín. [2]

7 PREVEDENIE DOSKY PLOŠNÉHO SPOJA

Schéma a doska plošného spoja je realizovaná v programe EAGLE. Obojstranný plošný spoj má rozmery 136x86 mm. Programovací konektor a konektor sériovej linky sú vyvedené zo zadnej strany dosky. Ovládací panel s reset a nastavovacím tlačítkom prúdu je na prednej strane spolu so signalizáciou napájania a prepínačom rozsahu. Z bočnej strany sú vyvedené svorky pre napájací zdroj a svorky pre nabíjaný akumulátor s puzdrom pre poistku.

Riadiaci mikrokontrolér je realizovaný v klasickom DIP púzdre z dôvodu ľahšej výmeny. Väčšina pasívnych súčiastok je realizovaných v púzdre 1206. Obvod MAX232 je realizovaný v širšom púzdre SMD (MAX232CWE). Operačný zosilňovač je tiež v púzdre SMD SO-8 (LM2904D). Budič tranzistoru je prevedený v klasickom púzdre PDIP. Vstupné a výstupné filtračné elektrolytické kondenzátory sú klasickej montáže. Ostatné kondenzátory sú prevažne keramické. Ochrana proti prepólovaniu je realizovaná ako bezstrátová ale deštruktívna. Blokovacie kondenzátory sú umiestnené v tesnej blízkosti príslušného púzdra obvodu. Chladienie stabilizátorov je zabezpečené medenou plochou na DPS a pripájkovaním medeného plechu pre odvod tepla. Nutné je chladienie stabilizátora 5 V, keďže na ňom vzniká väčšia výkonová strata. Obidva sú v SMD púzdre (DPAK).

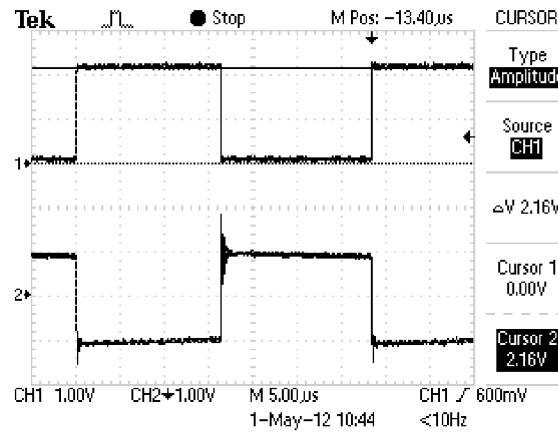
Celé zapojenie má tri oddelené zemniace vodiče spojené v jednom bode – zem zdroja. Svoju zem AGND majú vývody A/D prevodníka. Podľa doporučenia v katalógu je v okolí vývodov A/D prevodníka rozvedená zemniaca plocha. Výkonová časť zapojenia – menič má svoju zem GND. Samostatná zem je pre celé riadenie DGND. Všetky sú prepojené v jednom bode na DPS. Týmto sa má predísť zemným úbytkom a obmedzeniu rušivých vplyvov jednotlivých častí zariadenia. Zemný vodič na DPS má čo najväčšiu šírku aby mal čo najmenšiu rezistivitu.

Napätie na spoji diódy a cievky je hlavným zdrojom vyžarovaného elektrického poľa, takže by nemal byť umiestňovaný blízko citlivých vstupov integrovaného obvodu. Šírky vodivých plôch na plošnom spoji ku tranzistoru, dióde a tlmivke musia byť dostatočné široké aby spoje mohli spracovať vysoké prúdy, ale zároveň musia byť čo najužšie, aby nevytvárali nadmerné kapacitné väzby a vyžarovanie. Prúd spínacieho tranzistora veľmi rýchlo narastá, takže spoje medzi ním a ďalšími prvkami susedných obvodov musia byť krátke, aby sa zabránilo nežiadúcim indukovaným ihlovým impulzom a parazitným rezonanciam. [9] Doska plošného spoja je na obr. A.1 a A.2. Osadzovací výkres je na obrázku A.3 a A.4.

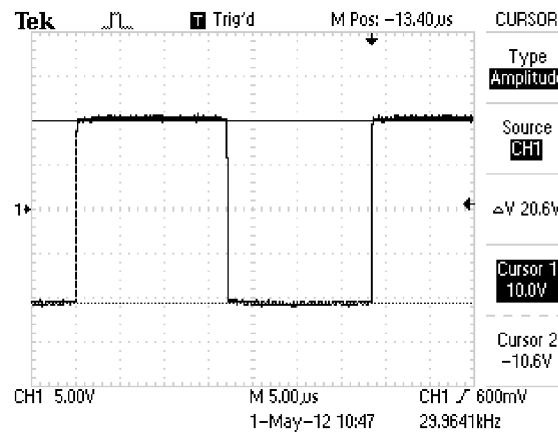
7.1 Merania na hotovom výrobku

Na obrázku obr. 7.1 sú priebehy napätí na spínacom tranzistore a dióde. Napájacie napätie približne 20 V, spínacia frekvencia 30 kHz a strieda $s = 0,5$. Vidieť, že v dobe, kedy je prvok zopnutý je na jednotlivých prvkoch hodnota vstupného napätia.

Pozn.: osciloskop ukazuje $\Delta V = 2,16\text{ V}$, v skutočnosti je to ale 21,6 V a je to dané nastavením sondy osciloskopu.

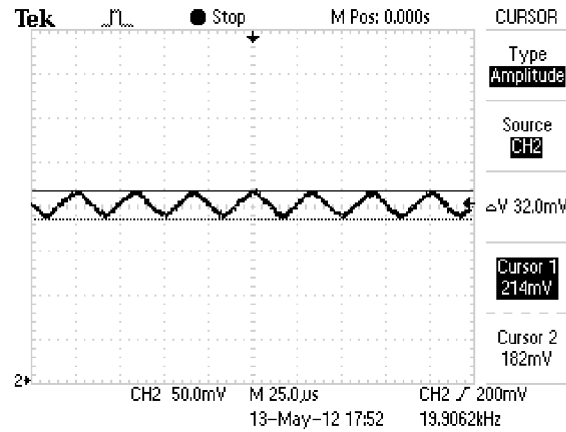


Obr. 7.1: Priebehy napätí na polovodičových prvkoch meniča



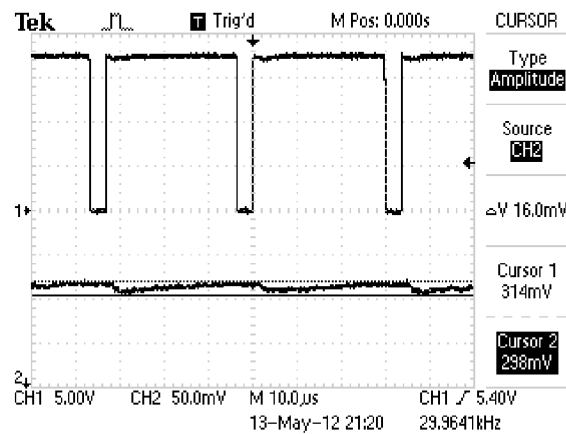
Obr. 7.2: Napätie na tlmivke

Pri vstupnom napätí 17 V, striede 0,5 zvlzenie dosahuje vypočítanej hodnoty, teda približne 310 mA, obr. 7.3.



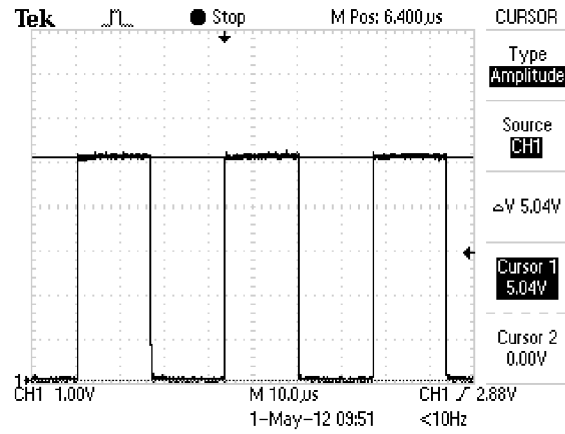
Obr. 7.3: Zvlnenie prúdu na tlmivke pri $s = 0,5$

Pri nastavenej striede $s = 0,88$ bol výstupný prúd 3 A a jeho zvlnenie približne 160 mA, viz obr. 7.4. V oboch prípadoch bolo použité nastavenie prúdovej sondy 100 mV/A.



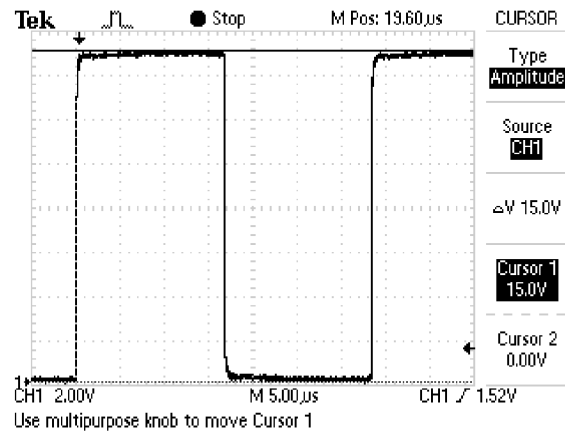
Obr. 7.4: Zvlnenie prúdu na tlmivke pri $s = 0,88$

Na obr. 7.5 sú PWM impulzy merané priamo na vývode mikrokontroléra. Majú amplitúdu 5 V, striedu $s = 0,5$ a frekvenciu 30 kHz.



Obr. 7.5: Výstupné impulzy PWM na vývode mikrokontroléra

Výstupné impulzy budiča majú amplitúdu 15 V, obr. 7.6.



Obr. 7.6: Výstupné impulzy budiča

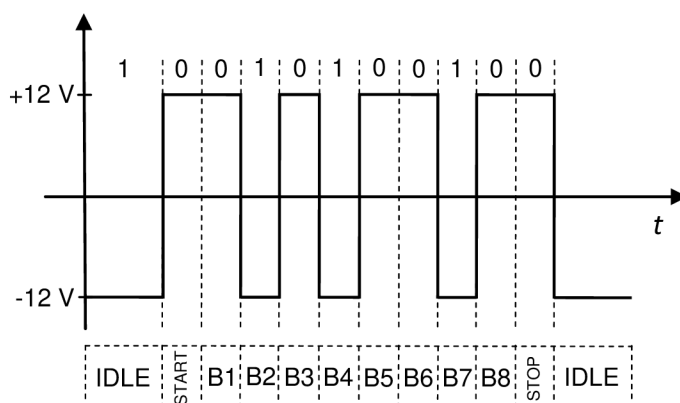
8 ŠTANDARD RS232

Je využívaný ako komunikačné rozhranie osobných počítačov a ďalšej elektroniky. Umožňuje prepojenie a sériový prenos dát medzi dvoma zariadeniami, t.z., že jednotlivé bity prenosu sú prenášané za sebou.

Na počítačoch býva sériová linka vyvedená ako konektor D-Sub typu DE-9M (u starších počítačov DB-25M, doporučuje staršia norma).

Poradie prenosu je od najmenej významného bitu LSB po bit najvýznamnejší MSB. Počet datových bitov je od 7 až do 9, obvykle sa používa 8. Jednotlivé logické úrovne sú reprezentované dvoma úrovňami napätí, ktoré sú bipolárne a môžu byť $\pm 5\text{ V}$, $\pm 10\text{ V}$, $\pm 12\text{ V}$ alebo $\pm 15\text{ V}$. Najčastejšie sa používa -12 V pre log.1 a 12 V pre log.0.

Základné vodiče rozhrania sú RxD a TxD a zem GND. Tie sú doplnené ďalšími (vstupy DCD, DSR, RI, výstupy DTR, RTS), ktoré slúžia k riadeniu prenosu. Môžu a nemusia byť pripojené.



Obr. 8.1: Prenos písmena J cez RS232 [16]

Skôr, než sa začnú data prenášať musí prebehnúť synchronizácia. Vysielač pošle po datovom vodiči definované dáta na základe ktorých sa potom prijímač zasynchronizuje. U RS232 sa pred vlastnými datovými bitmi pošle startbit, ktorým sa logická hodnota na linke prepne do opačného stavu. Po niekoľkých datových bitoch nasleduje paritný bit a jeden alebo dva stopbity, behom ktorých je linka opäť v kludovom stave.

Prenosová rýchlosť štandardu RS232 je maximálne 115200 bd. Ostatné prenosové rýchlosti sa získajú jej delením. Najčastejšie používané rýchlosti sú 115200 bd, 57600 bd, 38400 bd, 19200 bd, 9600 bd, 4800 bd, 2400 bd. Prenosová rýchlosť je vždy menšia než baudová, pretože sa prenáša aj startbit a stopbity, poprípade paritný bit. [16]

9 PROGRAMOVANIE MIKROKONTROLÉRU

K programovaniu riadiaceho mikrokontroléru je nutné vývojové prostredie v ktorom píšeme ovládací program. Ten sa musí pomocou kompilátora preložiť do formátu, aký vyžaduje mikrokontrolér. Na tento účel slúži WinAVR. Výstupný súbor sa potom pomocou jednoduchej aplikácie a programátora napáli do mikrokontroléra. Na to je použitá jednoduchá aplikácia AVR Burn-O-Mat spolu s programátorom USBasp.

9.1 Možnosti programovania

- Paralelné programovanie
- Rozhranie JTAG
- Sériový download pomocou zbernice SPI

Zamerali sme sa na sériový download. Neumožňuje síce také možnosti ladenia ako JTAG, ani nedosahuje takú rýchlosť ako paralelné programovanie, ale je to jednoduchšie a lacnejšie riešenie. [10]

9.1.1 Sériový download pomocou zbernice SPI

Je to veľmi užitočná programovacia metóda, ktorá umožňuje programovať mikrokontrolér priamo v aplikácií. Tým sa celý proces vývoja veľmi zrýchli. Odpadá niekoľkonásobné vyberanie a vkladanie z resp. do vývojovej dosky či aplikačnej dosky. Týmto rozhraním disponujú všetky mikroprocesory AVR. [10]

9.2 Programovací jazyk C

Dôležitý je aj programovací jazyk, v ktorom program píšeme. Na základe požiadavku je program písaný v jazyku C. Jedná sa o veľmi populárny programovací jazyk, ktorý je veľmi rozšírený pre písanie systémového softwaru, ale aj pre aplikácie. Oproti assembleru je C omnoho čitateľnejší, píše sa jednoduchšie a je prenositeľnejší.

9.2.1 Vývojové prostredie

Ako vývojové prostredie je použitý program AVR Studio 4. Je to program od výrobcu použitého mikrokontroléru ATmega32. Je zdarma a umožňuje písať program v jazyku symbolických adries aj v jazyku C. Umožňuje krokovanie a simuláciu, čím sa dajú vyhľadať chyby v programe a odskúšať jeho funkčnosť.

9.3 Nastavenie prepojok

Mikroprocesor Atmega32 obsahuje dvojicu bajtov prepojok. Pri nastavení prepojok treba byť obzvlášť opatrný, zlým nastavením prepojok môže dôjsť k zablokovaniu prístupu na mikroprocesor. V tomto prípade je nutné mikroprocesor programovať iným spôsobom, paralelne.

Použité nastavenie:

JTAGEN – povoľuje (0) alebo zakazuje (1) použitie JTAG

SPIEN – povoľuje (0) alebo zakazuje (1) sériový download

CKOPT – voľba spojená s nastavením synchronizačného zdroja

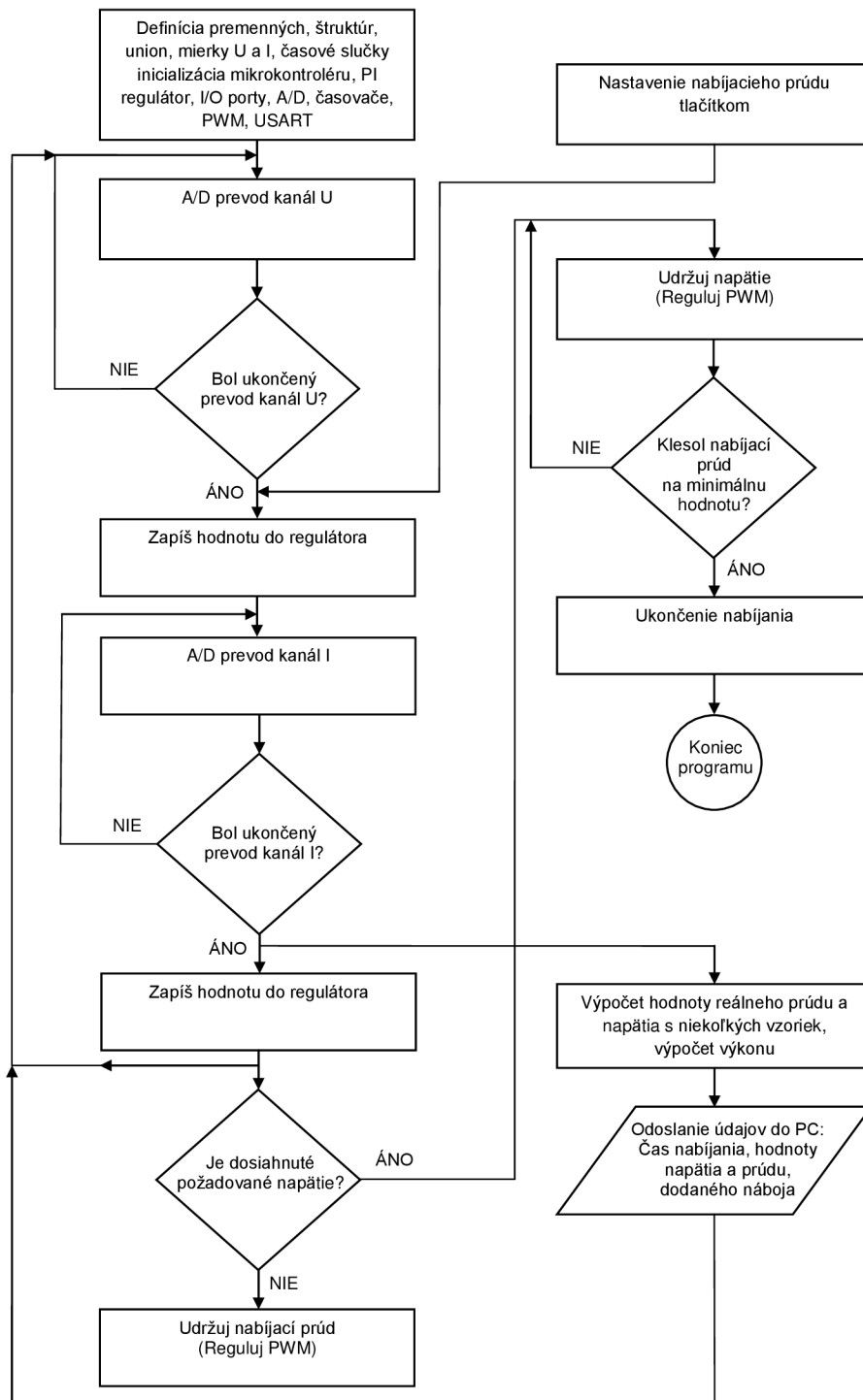
BOOTSZ0, BOOTSZ1 – veľkosť boot loader sekcie

9.4 Obslužné programy

Na obr. 9.1 je znázornený vývojový diagram riadiaceho programu. Na začiatku zdrojového kódu sú vložené potrebné knižnice. Za nimi sú definované premenné, ktoré sa budú neskôr používať. Nasledujú funkcie, ktoré inicializujú jednotlivé periférie mikrokontroléru s ktorými pracujeme. Inicializovaná je funkcia PI regulátora, ktorá je potrebná pre obsluhovanie regulačnej slučky. Ďalej sme inicializovali stav portov, aby boli jednoznačne definované ich stavy, A/D prevodník, ktorým meriame výstupné napätie a nabíjací prúd, prerušenia od nastavovacieho tlačítka, časovač na spúšťanie A/D prevodu, časovač na tvorbu PWM, ktorá reguluje šírku spínacích impulzov tranzistoru meniča, USART na posielanie dát do počítača. Presný popis použitého nastavenia je popísaný priamo v programe.

Po spustení A/D prevodu sa multiplexujú jednotlivé kanály v závislosti na tom, či bol aktuálny prevod ukončený. A/D prevod sa spúšťa nastaveným časovačom. Tieto hodnoty sú potom zapísané do PI regulátora, ktorý zabezpečuje reguláciu výstupných veličín. Hodnoty prevedené do digitálnej podoby sa potom prepočítajú na reálne napätie a prúd a údaje sa pošlú do PC, kde sa zobrazia pomocou terminálu (Realterm) vo formáte float – teda s desatinnými miestami. Výpočet hodnoty sa uskutočňuje s niekoľkými vzoriek, tým sa dosiahne väčšej presnosti. S hodnoty nabíjacieho prúdu a napätia sa vypočíta výkon a aj dodaný náboj. Počítanie náboja je realizované ako suma nabíjacieho prúdu za celkový čas nabíjania. Problém pri meraní s A/D prevodníkom je v tom, že niekedy zmerá napätovú špičku a zobrazí nám nesprávny údaj. Toto je možné vyriešiť softwarovým filtrom, ktorý tomu zabráni.

Regulačná slučka funguje tak, že regulátor vyhodnocuje namerané údaje z A/D prevodníka a podľa toho neustále upravuje triedu PWM tak, aby sa dosiahli požadované parametre. Čiže, ak požadujeme určitý nabíjací prúd a nabíjacie napätie



Obr. 9.1: Vývojový diagram programu

ešte nieje dosiahnuté, tento prúd je dodávaný do batérie. Ak sa dosiahne požadované napätie, tak sa začne udržiavať a nabíjací prúd sa začne znižovať až do úplného nabitia batérie a skončenia nabíjania ak prúd klesne pod určitú minimálnu hodnotu. Správanie regulátora je možné nastaviť rôznymi hodnotami v premenných (referenčných hodnôt napätia a prúdu, proporcionálnym, integračným zosilnením, regulačnou odchylkou a podobne).

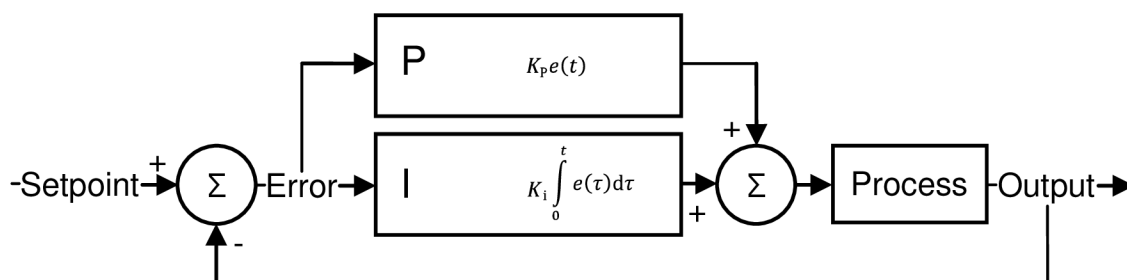
Hodnota nabíjacieho prúdu sa dá nastaviť tlačítkom. Ak sa tlačítko stlačí viackrát za sebou, nabíjací prúd sa inkrementuje nastaveným krokom. Po prekročení maximálnej hodnoty sa cyklus opakuje. So zadanou hodnotou potom regulátor pracuje.

9.4.1 Regulátor PI

Je to spojitý regulátor zložený s proporcionálnej zložky P a integračnej zložky I. Do regulátoru vstupuje regulačná odchylka a vystupuje akčná veličina. Proporcionálna zložka regulátora je jednoducho zosilňovač. Regulačná odchylka je priamo úmerná akčnej veličine. Samotný P regulátor nedokáže odstrániť chybu v podobe trvalej regulačnej odchylky. Zosilnenie je popísané parametrom proporcionálne zosilnenie K_p .

Integračná zložka je taká, kedy je akčná veličina priamo úmerná integrálu regulačnej odchylky. Dokáže úplne eliminovať regulačnú odchylku ale spomaľuje reguláciu a zhoršuje stabilitu. Integračné zosilnenie je definované konštantou K_i . [15]

V tejto práci je PI regulátor využitý ako regulácia napätia a prúdu pri nabíjaní pripojeného akumulátora.



Obr. 9.2: PI regulátor

10 ZÁVER

Návrh mikroprocesorom riadeného zdroja pre nabíjačku olovených akumulátorov bola pre mňa veľmi zaujímavá téma z teoretického aj praktického hľadiska. Problematika mi priniesla veľa nových teoretických informácií a poznatkov z oblasti elektroniky, spínaných napájacích zdrojov, ich činnosti, pracovnom princípe, použití. Nové poznatky o olovených akumulátoroch, správnych metódach ich nabíjania sú tiež dôležité pre návrh obvodu. Načerpал som nielen teoretické poznatky ale aj praktické skúsenosti s návrhom elektronických obvodov, výberu vhodných súčiastok, určeníu ich hodnôt a realizácií dosky plošného spoja. Realizoval som simuláciu znižujúceho meniča v programe Micro-Cap. Na tomto druhu meniča je založený princíp nabíjača. Simuláciou sa potvrdili vypočítané parametre meniča – zvlnenie výstupného prúdu, výstupného napätia, zaťažovací prúd ale aj napäťové a prúdové dimenzovanie súčiastok. Táto skúsenosť je veľmi užitočná pre prax, pretože spínané zdroje založené tomto druhu meniča sa používajú v množstve elektronických systémov.

Podstatou práce bol návrh zapojenia zdroja so spínaným meničom a jeho realizácia. Pri tom som sa zdokonalil v práci s programom EAGLE, návrhovými pravidlami, či tvorbou nových knižníc. Oboznámil som sa so správnymi zásadami návrhu pre optimálnu funkčnosť zariadenia, či minimalizáciou parazitných javov a pod. Pri návrhu DPS som musel okrem optimálneho návrhu riešiť aj oddelenie zemí, ktoré bolo asi najväčším úskalím návrhu. Oživovanie prebiehalo na skúšobnom vzorku a nebol problém, všetko fungovalo správne.

Veľmi cenné teoretické aj praktické znalosti som získal aj s oblasti mikrokontrolérov, ich zapojenia a programovania. Realizoval som ovládací program pre mikrokontrolér ATmega32 napísaný v jazyku C, ktorý je dnes veľmi rozšírený. Nastali dva väčšie problémy, pri konvertovaní datových typov – problém bol s datovým typom float a pri meraní A/D prevodníkom, ktorý neposielal správne hodnoty.

Testovanie a funkčnosť programu bolo realizované na prvom vzorku a program ešte nebol implementovaný do výslednej dosky plošného spoja. Tá je už realizovaná ale jej stav a funkčnosť bude vyskúšaná následne.

Zariadenie je použiteľné pre nabíjanie olovených akumulátorov 6 a 12 V. Skutočné hodnoty zvlnenia výstupného napätia sú priaznivejšie vzhľadom k výpočtu, pretože sú použité výstupné kondenzátory s väčšou kapacitou, čo nieje na škodu. Nabíjací prúd je približne 3 A. Vstupné napätie je v rozsahu 17–20 V.

LITERATÚRA

- [1] ADÁMEK, Petr. *Klasické i moderní řízení spínaných měničů*, Praha: České vysoké učení technické v Praze, Fakulta elektrotechnická, 2011. 56 s. Vedoucí bakalářské práce Ing. Zdeněk Hurák, Ph.D.
- [2] ATMEL CORPORATION , *ATmega32* [online datasheet]. Posledná aktualizácia 26.02.2011 [cit. 2012-14-05]. Dostupné z: <<http://www.atmel.com/Images/doc2503.pdf>>
- [3] BARTOŇ, K. Obvody pro napájecí zdroje. *KONSTRUKČNÍ ELEKTRONIKA A RADIO*. 1998, roč. 47, č. 2, s. 58–60, ISSN: 1211-3557.
- [4] INTERNATIONAL RECTIFIER , *50WQ04FN* [online datasheet]. Posledná aktualizácia 3.05.2006 [cit. 2011-12-12]. Dostupné z: <<http://www.irf.com/product-info/datasheets/data/50wq04fn.pdf>>
- [5] INTERNATIONAL RECTIFIER , *IR2125* [online datasheet]. Posledná aktualizácia 20.09.2004 [cit. 2011-12-13]. Dostupné z: <<http://www.irf.com/product-info/datasheets/data/ir2125.pdf>>
- [6] INTERNATIONAL RECTIFIER , *IRFR2405* [online datasheet]. Posledná aktualizácia 18.08.2007 [cit. 2011-12-12]. Dostupné z: <<http://www.irf.com/product-info/datasheets/data/irfr2405.pdf>>
- [7] KREJČIŘÍK, Alexandr. *DC/DC měniče*. Praha: BEN – Technická literatura, 2001. 112 s. ISBN 80-7300-045-8
- [8] KREJČIŘÍK, Alexandr. *Napájecí zdroje I: Základní zapojení analogových a spínaných napájecích zdrojů*. 2. vyd. Praha: BEN – Technická literatura, 1997. 352 s. ISBN 80-86056-02-3
- [9] KREJČIŘÍK, Alexandr. *Napájecí zdroje II: Integrované obvody ve spínaných zdrojích*. 2. vyd. Praha: BEN – Technická literatura, 1997. 352 s. ISBN 80-86056-03-1
- [10] MATOUŠEK, David. *Práce s mikrokontroléry Atmel ATmega16 4. díl*. 1. vyd. Praha: BEN – Technická literatura, 2006. 320 s. ISBN 80-7300-174-8
- [11] *Olověný akumulátor – Wikipedie* [online]. 23.9.2007, posledná revízia 09.11.2011 [cit. 2011-11-18]. Dostupné z: <http://cs.wikipedia.org/wiki/Olověný_akumulátor>

- [12] ON SEMICONDUCTOR , *MC7800* [online datasheet]. Posledná aktualizácia 25.04.2012 [cit. 2012-5-22]. Dostupné z: <http://www.onsemi.com/pub_link/Collateral/MC7800-D.PDF>
- [13] PATOČKA, Miroslav. *Vybrané statě z výkonové elektroniky svazek II – pulsní měniče bez transformátoru* [online]. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, Ústav výkonové elektrotechniky a elektroniky. 2005 [cit. 2011-11-22]. Dostupné z: <https://www.vutbr.cz/www_base/priloha.php?dpid=34773>
- [14] PATOČKA, M. VOREL, P. NOVOTNÝ, V. *Napájení elektronických zařízení – přednášky* [online]. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, Ústav radioelektroniky. 15.11.2002 [cit. 2011-12-08] Dostupné z: <<https://www.vutbr.cz/elearning/mod/resource/view.php?id=142847>>
- [15] *PID regulátor – Wikipedie* [online]. 11.9.2009, posledná revízia 25.03.2012 [cit. 2012-05-25]. Dostupné z: <http://cs.wikipedia.org/wiki/PID_regulátor>
- [16] *RS232 – Wikipedie* [online]. 25.8.2006, posledná revízia 5.01.2012 [cit. 2012-05-14]. Dostupné z: <<http://cs.wikipedia.org/wiki/RS-232>>
- [17] ST MICROELECTRONICS/THOMSON , *LM2904* [online datasheet]. Posledná aktualizácia 24.01.2012 [cit. 2012-5-22]. Dostupné z: <http://www.st.com/internet/com/TECHNICAL_RESOURCES/TECHNICAL_LITERATURE/DATASHEET/CD00000535.pdf>
- [18] ŠKUNDA, M. *Spínaný zdroj 12/19V pro napájení notebooku v automobilu*, Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, 2008. 50 s. Vedoucí bakalářské práce Ing. Dalibor Červinka, Ph.D.
- [19] TEXAS INSTRUMENTS , *MAX232* [online datasheet]. Posledná aktualizácia 16.03.2012 [cit. 2012-5-21]. Dostupné z: <<http://www.ti.com/lit/ds/symlink/max232.pdf>>

ZOZNAM SYMBOLOV, VELIČÍN A SKRATIEK

AC	striedavý prúd/napätie
A/D	analógovo digitálny
AGND	analogová zem
Al	indukčná konštanta
A_V	napätové zosilnenie
C_P	vzájomná kapacita závitov cievky
DC	jednosmerný prúd/napätie
ΔI	zvlnenie prúdu
ΔTCO	časovač
ΔU	zvlnenie napätia
DCD	Data Carrier Detect
DGND	digitálna zem
DPS	doska plošného spoja
DSR	Data Set Ready
DTR	Data Terminal Ready
D-Sub	D-subminiature
ESR	ekvivalentný sériový odpor
EEPROM	Electrically Erasable Programmable Read-Only Memory – elektricky mazateľná pamäť
f	pracovná frekvencia
f_{medz}	medzný kmitočet
f_{vz}	vzorkovací kmitočet
G	gate spínacieho tranzistora
GND	výkonová zem

I	integračná zložka
i_D	kolektorový prúd tranzistora
i_{D0}	prúd pretekajúci nulovou diódou
I_{D0EF}	stredná hodnota prúdu nulovou diódou
I_{D0STR}	efektívna hodnota prúdu nulovou diódou
I_{EF}	efektívna hodnota prúdu cez tranzistor
$I_{F(AV)}$	max. average forward current
I_{MIN}	minimálny prúd
I_{STR}	stredná hodnota prúdu cez tranzistor
i_Z	výstupný, zatažovací prúd
I_{ZMAX}	maximálna stredná hodnota výstupného prúdu
I_{ZSTR}	stredná hodnota výstupného prúdu
js	jednosmerná
JTAG	Joint Test Action Group
Ki	integračné zosilnenie
Kp	proporcionálne zosilnenie
LED	Light-Emitting Diode
log.	logický
L_S	vlastná indukčnosť kondenzátora
LSB	najmenej významný bit
Mosfet	unipolárny tranzistor s vodivým kanálom
MSB	najvýznamnejší bit
OZ	operačný zosilňovač
P	proporcionálna zložka
PC	Personal Computer – osobný počítač

P_{ξ} stratový výkon

P_{PR} prepínacie straty

P_{ZTR} stratový výkon

PWM Pulse Wide Modulation – pulzne šírková modulácia

\in prvok množiny

R_D odpor v zopnutom stave

R_D dielektrické straty cievky

$R_{DS_{ON}}$ odpor v zopnutom stave

RI Ring Indicator

R_J straty v jadre cievky

R_P izolačný odpor dielektrika

R_S sériový odpor kapacitoru

RS232 Recommended Standard 232

R_{SK} straty cievky závislé na frekvencii

R_{SS} straty cievky nezávislé na frekvencii

RTS Request to Send

R_V odpor vinutia cievky

RxD Receive Data

s strieda

SLA olovené batérie

SMD Surface Mount device – súčiastka pre povrchovú montáž

SPI Serial Peripheral Interface

SLA olovené batérie

SRAM Static Random Access Memory

t_1 doba nárastu prúdu na tlmivke

t_2	doba poklesu prúdu na tlmivke
T	perióda
T_A	doba, počas ktorej je spínací prvok zopnutý
T_B	doba, počas ktorej je spínací prvok rozopnutý
t_{ON}	doba zopnutia
t_{OFF}	doba vypnutia
t_{rr}	zotavovacia doba diódy
TTL	Tranzistorovo-Tranzistorová Logika
TWI	Two-Wire Interface
TxD	Transmit Data
τ	časová konštanta
$tg\delta$	stratový činiteľ
U_2	stredná hodnota výstupného napätia
U_6	vstupné napätie meracieho deliča pre rozsah 6 V
U_{12}	vstupné napätie meracieho deliča pre rozsah 12 V
$U_{A/D}$	výstupné napätie meracieho deliča
u_{CE}	napätie medzi emitorom a kolektorom tranzistora
U_D	napájacie napätie
$U_{DS_{ON}}$	napätie medzi D a S v zopnutom stave
u_L	napätie na cievke
u_{OSC}	trojuholníkový nosný signál
U_P	prahové napätie
u_{PWM}	pulzne šírko modulovaný signál
u_{REF}	modulačný signál
USART	Universal Synchronous/Asynchronous Receiver and Transmitter – univerzálny synchronný a asynchronný prijímač a vysielač

USB Universal Serial Bus – univerzálna sériová zbernica

u_z výstupné napätie

V-A volt-ampérova

V_{DSS} Drain-to-Source Breakdown Voltage

vf vysokofrekvenčné

W_{ON} energia, ktorá vznikne pri spínaní

W_{OFF} energia, ktorá vznikne pri vypínaní

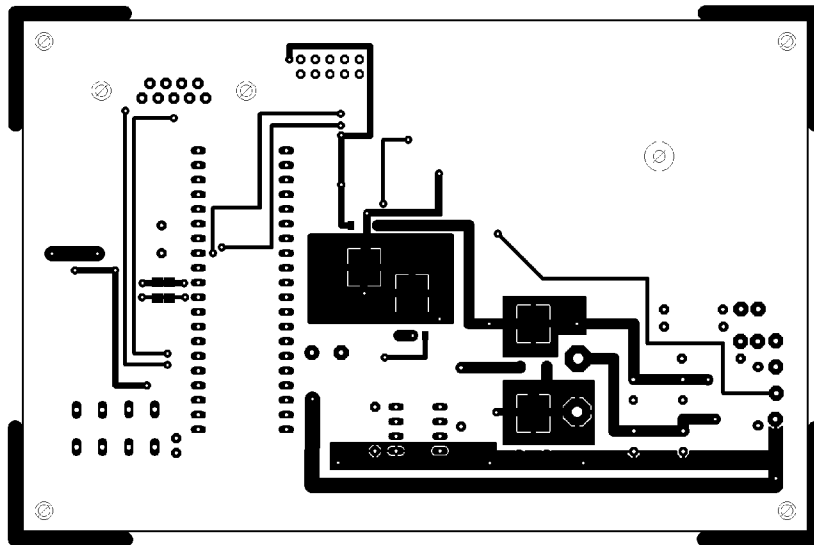
V_R max. DC reverse voltage

ZOZNAM PRÍLOH

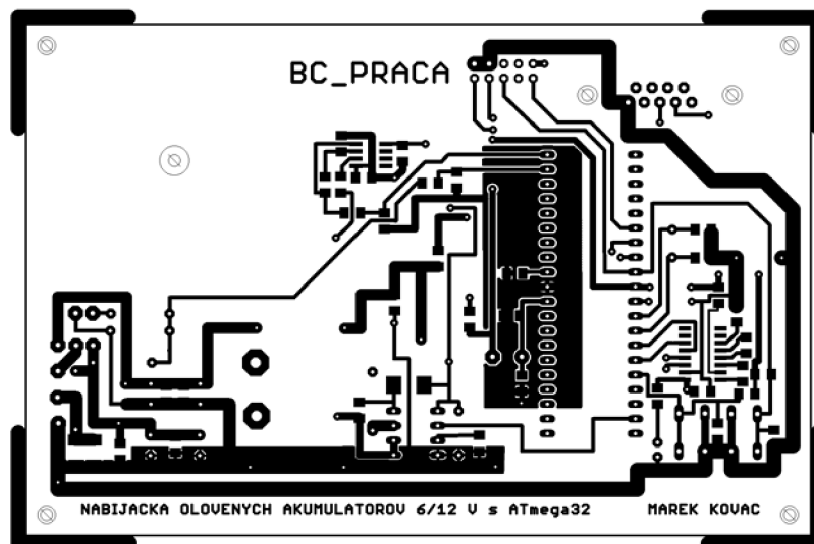
A	Výkresová dokumentácia	65
A.1	Doska plošného spoja	65
A.2	Osadzovací výkres	66
A.3	Fotodokumentácia	67
B	Zoznam použitých prístrojov a pomôcok	68
C	Zoznam príloh na priloženom DVD	69

A VÝKRESOVÁ DOKUMENTÁCIA

A.1 Doska plošného spoja

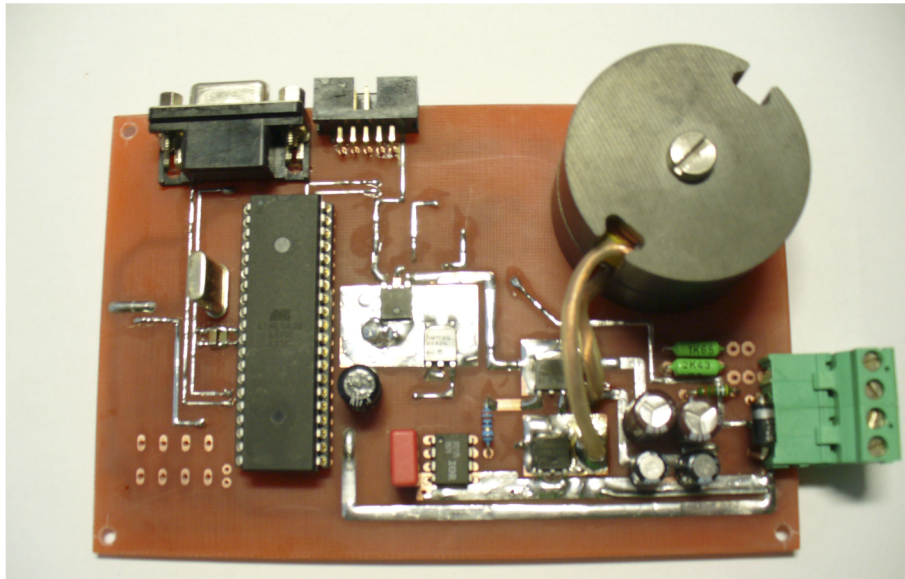


Obr. A.1: Pohľad zo strany súčiastok (TOP), skutočný rozmer 136×86 mm

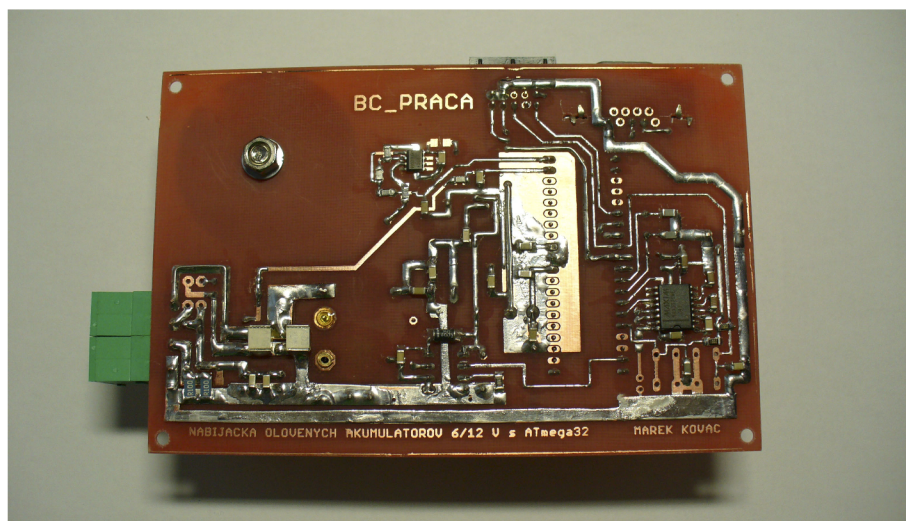


Obr. A.2: Pohľad zo strany spojov (BOTTOM), skutočný rozmer 136×86 mm

A.3 Fotodokumentácia



Obr. A.5: Realizovaný plošný spoj, pohľad zo strany súčiastok (TOP)



Obr. A.6: Realizovaný plošný spoj, pohľad zo strany spojov (BOTTOM)

B ZOZNAM POUŽITÝCH PRÍSTROJOV A POMÔCOK

1. Osciloskop Tektronix TDS 1001B
2. Prúdová sonda FLUKE 80i 110s

C ZOZNAM PRÍLOH NA PRILOŽENOM DVD

Elektronická verzia bakalárskej práce v adresári /thesis

Katalógové listy vybraných elektronických komponentov v adresári /datasheets

Zdrojové kódy pre ovládací program písané v AVR Studio 4 v zložke /source

Schéma zapojenia a doska plošného spoja v programe EAGLE v zložke /Eagle

Fotodokumentácia v zložke /photos