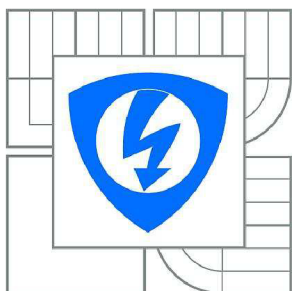


VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY



FAKULTA ELEKTROTECHNIKY A KOMUNIKAČNÍCH
TECHNOLGIÍ

ÚSTAV RADIOELEKTRONIKY

FACULTY OF ELECTRICAL ENGINEERING AND COMMUNICATION
DEPARTMENT OF RADIO ELECTRONICS

DIGITÁLNĚ ŘÍZENÝ ZDROJ GENERUJÍCÍ PROUDOVÉ IMPULZY NASTAVITELNÉHO NÁBĚHU A TRVÁNÍ

DIGITALLY CONTROLLABLE POWER-SUPPLY GENERATING CURRENT PULSES WITH
ADJUSTABLE RISING SLOPE AND DURATION

DIPLOMOVÁ PRÁCE

MASTER'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

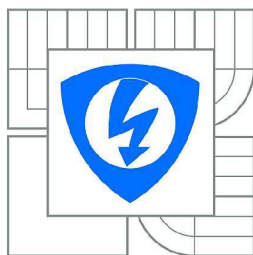
Bc. MARTIN DUJÍČEK

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

Ing. ROMAN ŠOTNER, Ph.D.

BRNO 2014



VYSOKÉ UČENÍ
TECHNICKÉ V BRNĚ

Fakulta elektrotechniky
a komunikačních technologií

Ústav radioelektroniky

Diplomová práce

magisterský navazující studijní obor
Elektronika a sdělovací technika

Student: Bc. Martin Dujíček

ID: 125408

Ročník: 2

Akademický rok: 2013/2014

NÁZEV TÉMATU:

Digitálně řízený zdroj generující proudové impulzy nastavitelného náběhu a trvání

POKYNY PRO VYPRACOVÁNÍ:

Prostudujte a doporučte obvodové koncepce zdrojů pro tvorbu silových proudových impulzů/rázů. U vhodně vybrané varianty navrhnete řízení (nastavení) velikosti proudu, doby náběhu (strmosti) na jmenovitou úroveň (jednotky A) a doby trvání impulzu. Zajistěte automatické snižování výkonové ztráty na aktivních prvcích v režimu proudového zdroje (velmi malá zátěž - prakticky zkrat). Funkčnost návrhu nejprve ověřte simulacemi. Připravte výrobní podklady.

Vyrobte, osadte a oživte zařízení. Řízení výše uvedených parametrů realizujte digitálně (ovládání uživatelským rozhraním z PC i jednočipem s displejem a klávesnicí). Očekávané chování ověřte měřením, proveďte finální úpravy parametrů. Zhodnoťte vliv charakteru zátěže na průběh proudu zátěží a negativní jevy a případně navrhnete protiopatření. Zpracujte a zhodnoťte výsledky.

DOPORUČENÁ LITERATURA:

[1] NOVOTNÝ, V., VOREL, P., PATOČKA, M. Napájení elektronických zařízení. Elektronické skriptum. Brno: FEKT VUT v Brně, 2004.

[2] MATOUŠEK, D. Práce s mikrokontroléry Atmel AVR. Praha: BEN-technická literatura, 2006.

Termín zadání: 10.2.2014

Termín odevzdání: 23.5.2014

Vedoucí práce: Ing. Roman Šotner, Ph.D.

Konzultanti diplomové práce:

doc. Ing. Tomáš Kratochvíl, Ph.D.

Předseda oborové rady

UPOZORNĚNÍ:

Autor diplomové práce nesmí při vytváření diplomové 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

Diplomová práce se věnuje návrhu digitálně řízeného zdroje pro tvorbu proudových impulzů o jmenovité úrovni v řádu jednotek ampér s nastavitelnou dobou náběhu a délkou trvání impulzu. Zařízení je realizováno pomocí zdroje proudu řízeného napětím. Řídící napětí je vytvářeno využitím digitálně analogového převodníku. Pro navržený elektronický obvod jsou provedeny počítačové simulace a provedeno měření na zhotoveném prototypu.

KLÍČOVÁ SLOVA

Řízený zdroj, proudový impuls, napětím řízený proudový zdroj, DAC, maticová klávesnice.

ABSTRACT

Master's thesis is focused on design of digitally controllable power-supply for generating current pulses with nominal level (few amperes), adjustable rising slope and time of duration. Device uses voltage controlled current source. Control voltage is generated by digital to analog converter. Computer simulations are accomplished for designed electronic circuit and measurement of prototype is done as well.

KEYWORDS

Controllable power-supply, current pulse, voltage controlled current source, DAC, matrix keyboard.

DUJÍČEK, M. *Digitálně řízený zdroj generující proudové impulzy nastavitelného náběhu a trvání*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, 2014. 46 s., 14 s. příloha Vedoucí diplomové práce Ing. Roman Šotner, Ph.D..

PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že svou diplomovou práci na téma Digitálně řízený zdroj generující proudové impulzy nastavitelného náběhu a trvání jsem vypracoval samostatně pod vedením vedoucího diplomové 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 diplomové práce dále prohlašuji, že v souvislosti s vytvořením této diplomové práce jsem neporušil autorská práva třetích osob, zejména jsem nezasáhl nedovoleným způsobem do cizích autorských práv osobnostních a/nebo majetkových a jsem si plně vědom následků porušení ustanovení § 11 a následujících zákona č. 121/2000 Sb., o právu autorském, o právech souvisejících s právem autorským a o změně některých zákonů (autorský zákon), ve znění pozdějších předpisů, včetně možných trestněprávních důsledků vyplývajících z ustanovení části druhé, hlavy VI. díl 4 Trestního zákoníku č. 40/2009 Sb.

V Brně dne

.....

(podpis autora)

PODĚKOVÁNÍ

Děkuji vedoucímu diplomové práce Ing. Romanu Šotnerovi, Ph.D. za účinnou metodickou, pedagogickou a odbornou pomoc a další cenné rady při zpracování mé diplomové práce.

V Brně dne

.....

(podpis autora)

Výzkum popsany v této diplomové práci byl realizován v laboratořích podpořených z projektu SIX; registrační číslo CZ.1.05/2.1.00/03.0072, operační program Výzkum a vývoj pro inovace.

OBSAH

Seznam obrázků	viii
Seznam tabulek	x
Úvod	1
1 Zdroje proudu	2
1.1 Ideální a reálný zdroj proudu	2
1.2 Možné varianty zdrojů proudu.....	3
1.3 Zdroj proudu řízený napětím	4
2 Návrh zařízení	7
2.1 Návrh bloku zdroje proudu řízeného napětím	8
2.1.1 Návrh výkonové části proudového zdroje	8
2.1.2 Snížení výkonové ztráty na aktivním prvku	9
2.1.3 Nároky na chlazení aktivních prvků	11
2.2 Digitální řízení, tvorba řídicího napětí.....	13
2.2.1 Určení hodnoty referenčního napětí pro DAC převodník	14
2.2.2 Komunikace s DAC převodníkem TLV5636	15
2.3 Řídicí procesorová část.....	16
2.3.1 LCD displej.....	16
2.3.2 Klávesnice.....	16
2.3.3 Připojení k PC.....	17
3 Softwarová část	18
3.1 Program mikroprocesoru	18
3.1.1 Zadávání hodnot pomocí klávesnice.....	19
3.1.2 Generování dat pro DAC, řídicího napětí.....	20
3.1.3 Příjem dat z PC pomocí jednotky USART	21
3.2 Aplikace pro ovládání z PC	21
4 Zapojení jednotlivých částí řízeného proudového zdroje	23
4.1 Zapojení bloku napětím řízeného zdroje proudu	23
4.2 Zapojení DAC převodníku.....	24

4.3	Řídící obvod.....	25
4.4	Napájecí zdroje	26
4.4.1	Pomocný zdroj	26
4.4.2	Zdroj výkonové části	27
5	Simulace obvodu zdroje proudu	29
5.1	Stejnoseměrná analýza (DC sweep)	29
5.2	Simulace v časové oblasti (Time Domain).....	32
6	Naměřené výsledky	36
	Závěr	41
	Literatura	42
	Seznam symbolů, veličin a zkratk	44
	Seznam příloh	47

SEZNAM OBRÁZKŮ

Obrázek 1.1:	Náhradní zapojení pro a) ideální, b) reálný napěťový zdroj; c) příklady zatěžovacích charakteristik [1].	2
Obrázek 1.2:	Náhradní zapojení pro a) ideální, b) reálný proudový zdroj; c) příklady zatěžovacích charakteristik [1].	3
Obrázek 1.3:	Schématické znázornění zdroje proudu řízeného napětím [2].	4
Obrázek 1.4:	Základní zapojení zdroje proudu řízeného napětím s OZ [1].	4
Obrázek 1.5:	Modifikované zapojení zdroje proudu řízeného napětím s tranzistorem MOSFET.	5
Obrázek 2.1:	Časový průběh proudového impulsu s vyznačenými parametry.	7
Obrázek 2.2:	Blokové schéma navrhovaného řízeného zdroje proudových impulsů.	7
Obrázek 2.3:	Zjednodušené schéma výkonové části.	8
Obrázek 2.4:	Zjednodušené schéma zdvojené výkonové části řízeného zdroje proudu	10
Obrázek 2.5:	a) Tepelné schéma zdvojené výkonové části, b) zjednodušené tepelné schéma výk. části.	12
Obrázek 2.6:	Znázornění komunikace s DAC převodníkem TLV5636 [6].	15
Obrázek 2.7:	Ilustrační obrázek, použitá maticová klávesnice [10].	16
Obrázek 2.8:	Principiální schéma zapojení maticové klávesnice.	17
Obrázek 2.9:	Převodník USB – UART s obvodem FTDI232RL [11].	17
Obrázek 3.1:	Vývojový diagram programu mikroprocesoru.	18
Obrázek 3.2:	Příklad položky menu na LCD displeji.	19
Obrázek 3.3:	Průběh řídicího napětí, při t_{rise} 100 μs , t_{puls} 0 a I_{puls} 6 A (tzn. $U_{řídící}$ 3 V).	21
Obrázek 3.4:	Okno aplikace pro ovládání zařízení z PC.	22
Obrázek 3.5:	Příklady chybového hlášení, při špatné hodnotě zadaného parametru. ..	22
Obrázek 4.1:	Obvod řízeného proudového zdroje.	23
Obrázek 4.2:	Obvody pro spínání relé.	24
Obrázek 4.3:	Obvodové zapojení DAC převodníku.	25
Obrázek 4.4:	Zapojení oddělovacího obvodu ISO7640.	25
Obrázek 4.5:	Schéma zapojení pomocného napájecího zdroje.	27
Obrázek 4.6:	Schéma zapojení zdroje výkonové části.	27

Obrázek 5.1:	Simulovaný obvod – stejnosměrná analýza (DC sweep).....	29
Obrázek 5.2:	DC analýza – závislost proudu na velikosti zátěže.....	30
Obrázek 5.3:	DC analýza – převodní charakteristika proud. zdroje.....	31
Obrázek 5.4:	Simulovaný obvod – časová analýza (Time Domain).	32
Obrázek 5.5:	Proudové impulzy s různou dobou náběhu.	33
Obrázek 5.6:	Detail nástupných hran impulzu pro různou zátěž.....	34
Obrázek 5.7:	Detail překmitu na nástupné hraně impulzu.	35
Obrázek 6.1:	Průběh řídicího napětí, při t_{rise} 500 ms, t_{puls} 500 ms a I_{puls} 6 A (tzn. $U_{řídící}$ 3 V).....	36
Obrázek 6.2:	Průběhy odpovídající proudu snímacími rezistory, kmitání.....	36
Obrázek 6.3:	Detaily náběžných hran pro různé připojené kapacity, 400 nF (nahore), 660 nF (dole).....	37
Obrázek 6.4:	Detail náběžné hrany průběhu proudu jednotlivých větví (modrá, červená) a celkový zátěží, jejich součet (hnědá), nastaveno 6 A.....	38
Obrázek 6.5:	Průběh proudového impulsu 6 A, t_{rise} 5 ms, t_{puls} 5 ms.	38
Obrázek 6.6:	Průběh náběžné hrany proud. impulsu 6 A, t_{rise} 500 μ s.	38
Obrázek 6.7:	Průběh proudového impulsu 6 A, t_{puls} 100 μ s.	39
Obrázek 6.8:	Průběh proudového impulsu 6 A, t_{rise} 100 μ s.....	39
Obrázek 6.9:	Nejkratší dosažený proudový impuls při max. proudu 6 A.	40

SEZNAM TABULEK

Tabulka 2.1:	Vybrané parametry výkonového MOSFET tranzistoru IRF640 [4].	9
Tabulka 2.2:	Parametry pro výpočet z tepelného schématu výkonové části.	12
Tabulka 2.3:	Zapisovaná datová hodnota pro převodník TLV5636.	15
Tabulka 3.1:	Parametry impulsu.	19
Tabulka 3.2:	Formát zasílaných dat z PC.	21
Tabulka 5.1:	Srovnání zadaných a získaných hodnot proudu při stejnosměrné analýze	30
Tabulka 6.1:	Dosažené parametry prototypu zdroje generujícího proudové impulsy definovaného náběhu a trvání.	40

ÚVOD

Cílem této práce je návrh digitálně řízeného zdroje pro tvorbu proudových impulzů o jmenovité úrovni v řádu jednotek ampér, nastavitelné doby náběhu (strmosti) a dobou trvání impulzu do jedné sekundy. Tyto parametry má být možné měnit pomocí vhodného uživatelského rozhraní. A to jak přímo na zařízení, tak i pomocí aplikace v PC.

Nejprve jsou shrnuty možné varianty proudových zdrojů s přihlédnutím k možnosti ovlivnění parametrů generovaného proudu. Jako nejvhodnější varianta z pohledu tvarování proudového impulzu se jeví zdroj proudu řízený napětím. Této variantě se poté práce dále věnuje.

Vybráno je konkrétní obvodové zapojení řízeného proudového zdroje. Zajištěna je možnost digitálního řízení parametrů generovaných proudových impulzů. O tvorbu číslicového řídicího signálu se stará připojený modul s mikroprocesorem. Ten k sobě má připojen také displej s klávesnicí, vytvářející rozhraní mezi uživatelem a přístrojem a zajišťuje také komunikaci s uživatelským rozhraním v PC. Pozornost je věnována značné výkonové ztrátě, která vzniká na aktivních prvcích řízeného proudového zdroje a naznačena je možnost snižování.

Nastíněna je podoba řídicího programu pro mikroprocesor a podrobněji popsána jeho činnost. Popsán je i program pro počítač, který díky grafickému rozhraní umožňuje pohodlné ovládání přístroje. Připraveny jsou výrobní podklady částí řízeného proudového zdroje.

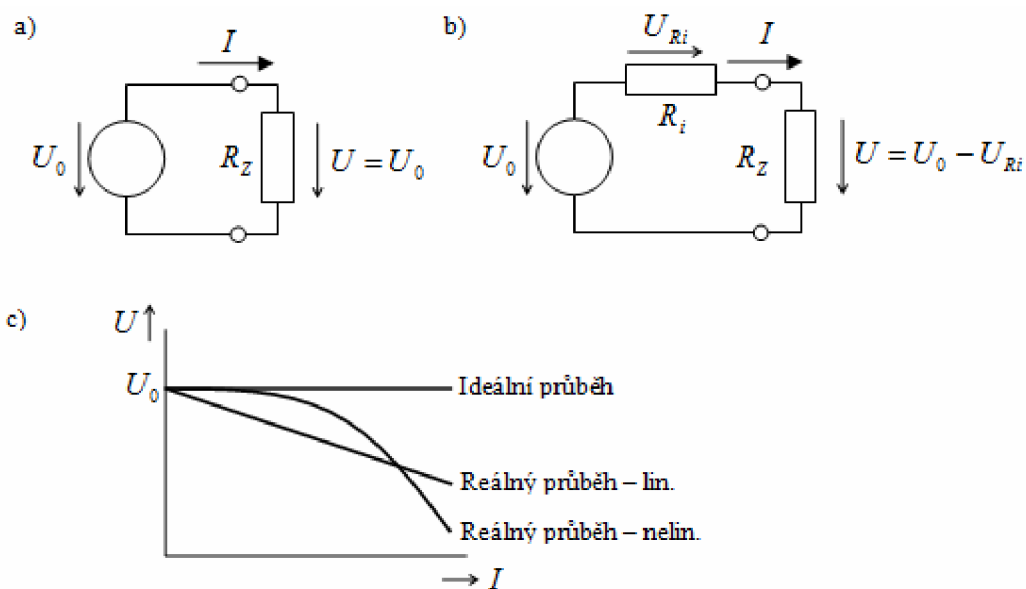
Funkčnost navrženého obvodu řízeného proudového zdroje je ověřena analýzami a simulacemi v programu PSpice. Poté jsou provedena měření na zhotoveném prototypu řízeného proudového zdroje.

1 ZDROJE PROUDU

Následující text pojednává o zdrojích proudu. Zaměřen je na jejich vlastnosti a různé možnosti jejich realizace, ať už se jedná o zdroje pevné hodnoty proudu, či řízené. V této kapitole je převážně čerpáno z literatury [1] a [2].

1.1 Ideální a reálný zdroj proudu

Ideální proudový zdroj je duálním obvodem k ideálnímu zdroji napětí. Pro ideální napěťový zdroj, který je vyobrazen na obrázku 1.1 a), platí, že je schopen pro jakoukoli hodnotu elektrického odporu zátěže R_Z zajistit potřebný proudový odběr I a přitom udržovat na svých výstupních svorkách konstantní hodnotu napětí U rovno U_0 . Takovýto zdroj by byl schopen při zkratovaných výstupních svorkách dodat nekonečně veliký proud. Reálný zdroj napětí, na obrázku 1.1 b), se od toho ideálního liší tím, že obsahuje vnitřní odpor R_i , který je nenulový. Průchodem proudu do zátěže vzniká na tomto odporu úbytek napětí U_{Ri} a o tento úbytek je poté menší napětí na výstupních svorkách zdroje. Tento úbytek je tím větší, čím je větší proudový odběr, a tedy se vzrůstajícím odběrem proudu napětí zdroje klesá. Na obrázku 1.1 c) jsou znázorněny průběhy zatěžovacích charakteristik. Tyto charakteristiky nemusí být obecně lineární, [1].

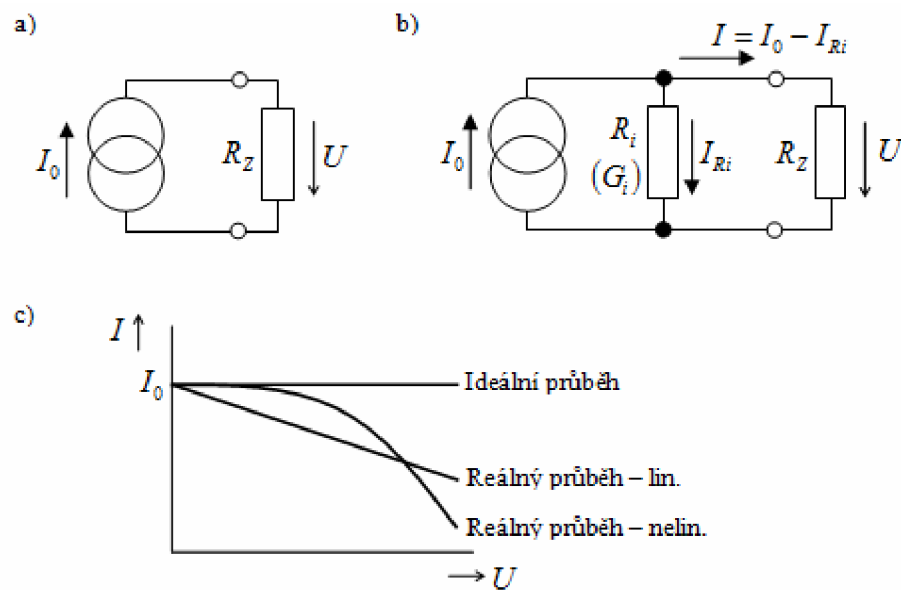


Obrázek 1.1: Náhradní zapojení pro a) ideální, b) reálný napěťový zdroj; c) příklady zatěžovacích charakteristik [1].

U zdroje proudu je situace obdobná, na obrázku 1.2 a) - c). Po něm je požadováno, aby dodával na výstupu konstantní hodnotu proudu I rovno I_0 bez ohledu na to, jakou

hodnotou odporu zátěže R_Z je zatížen a vytvářet na něm libovolný úbytek napětí. Vnitřní odpor R_i tohoto zdroje musí být nekonečný, resp. vodivost G_i nulová. U reálného zdroje tomu opět tak není a část proudu, který by měl téct do zátěže, protéká právě vnitřním odporem. Při zvyšování odporu zátěže klesá hodnota dodávaného proudu.

Skutečný zdroj proudu je realizován elektronicky pomocí zdroje napětí s využitím zpětnovazebních obvodů [2]. Tímto napětím je poté omezena maximální velikost zatěžovacího odporu R_Z , do které je tento zdroj schopen dodat požadovaný proud.



Obrázek 1.2: Náhradní zapojení pro a) ideální, b) reálný proudový zdroj; c) příklady zatěžovacích charakteristik [1].

1.2 Možné varianty zdrojů proudu

V této kapitole následuje výčet možných variant zdrojů proudu. Použité rozdělení je převzato z literatury [1]. Toto rozdělení je provedeno z pohledu možnosti nastavení a změny velikosti hodnoty proudu. Vypadat může tedy takto:

- zdroje konstantního proudu, hodnota je nastavena pevnou, neměnnou konfigurací obvodových prvků;
- nastavitelné zdroje proudu, hodnota může být měněna hodnotou některého z obvodových prvků, např. proměnným odporem;
- zdroje proudu řízené proudem (zesilovače proudu), hodnota proudu závisí na velikosti řídicího proudu;
- zdroje proudu řízené napětím (převodník napětí/proud), podobně jako v předchozím bodě, jen zde závisí na velikosti řídicího napětí;
- zdroje napětí řízené proudem (převodník proud/napětí), podle [1] se i tato

skupina někdy řadí mezi zdroje proudu.

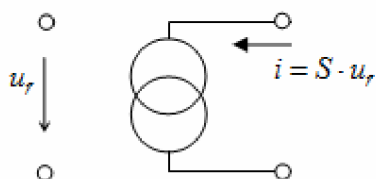
Zařízení, jehož návrh je cílem této práce musí mít možnost řídit tvar výstupního proudu do požadovaného proudového impulsu. Je tedy zapotřebí umožnit změnu velikosti proudu v čase. Využit musí být zdroj spadající mezi zdroje nastavitelné nebo řízené. Jako nejvhodnější varianta se jeví zdroj proudu řízený napětím. V případě této varianty se bude pomocí generovaného průběhu napětí, které bude přivedeno na vstup obvodu, vytvářet odpovídající tvar proudu na výstupu. Další text je proto věnován pouze této variantě.

1.3 Zdroj proudu řízený napětím

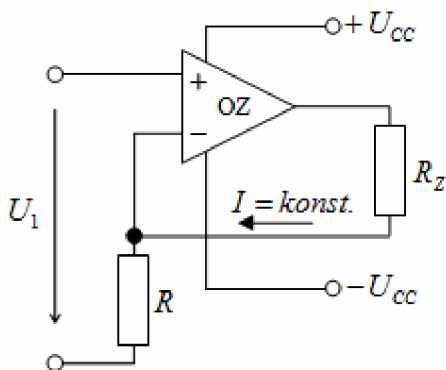
Schématické znázornění zdroje proudu řízeného napětím je na obrázku 1.3. Výstupní proud i je úměrný řídicímu napětí u_r podle vztahu:

$$i = S \cdot u_r, \quad (1.1)$$

kde konstantou úměrnosti je S , která má rozměr vodivosti. Nazývá se převodní vodivost zdroje [2].



Obrázek 1.3: Schématické znázornění zdroje proudu řízeného napětím [2].



Obrázek 1.4: Základní zapojení zdroje proudu řízeného napětím s OZ [1].

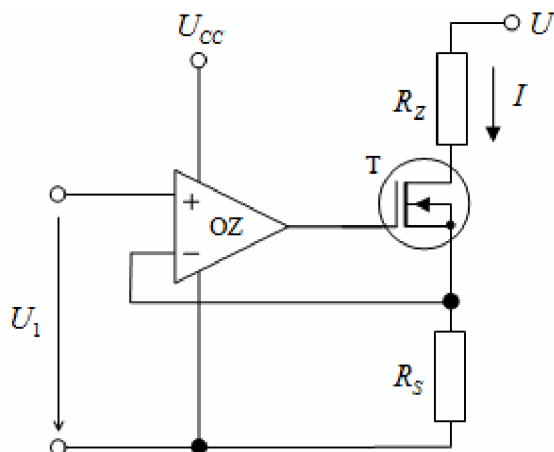
Možná realizace takového zdroje je pomocí zapojení s operačním zesilovačem (OZ), uvedeného v [1]. Základní zapojení zdroje proudu řízeného napětím je na obrázku 1.4. Velikost proudu I zátěží R_z je dána napětím U_1 a hodnotou odporu R . V případě zjednodušení, kdy je operační zesilovač ideální, napětí mezi invertujícím a

neinvertujícím vstupem nulové a vstupní proudy taktéž nulové platí, že napětí U_1 je rovno napětí na odporu R a velikost proudu I je dána vztahem:

$$I = \frac{U_1}{R}. \quad (1.2)$$

Tato velikost tedy není závislá na velikosti odporu zátěže R_z .

Zapojení z obrázku 1.4 je vhodné pouze pro malé proudy. Požadovaný proud je zde tvořen výstupním proudem operačního zesilovače a tím je dáno omezení pro jeho velikost. Modifikacemi předchozího zapojení, které jsou převzaty a upraveny z [1], se přejde k zapojení na obrázku 1.5. Díky tomu dojde k přesunutí zátěže na jednu svorku napájecího zdroje, tranzistorem T je posílen výstupní proud, tím je možné dosáhnout mnohem vyšších hodnot proudu, které jsou nyní omezeny velikostí napájení a omezeními tranzistoru T. Dále je použito nesymetrické napájení operačního zesilovače a samostatné napájení výkonové části.



Obrázek 1.5: Modifikované zapojení zdroje proudu řízeného napětím s tranzistorem MOSFET.

U tohoto zapojení je na rezistoru R_s (Sensing - snímací) snímán úbytek napětí způsobený průchodem proudu I . Toto napětí je přivedeno na invertující vstup operačního zesilovače a je porovnáváno s řídicím napětím U_1 , které je přivedeno na neinvertující vstup.

Následující popis činnosti zapojení je převzat z [1]. Vyjde-li se z počátečního stavu, kdy je na vstup obvodu přivedeno nulové napětí U_1 , tranzistor T je zavřený a rezistorem R_s neprochází žádný proud a není na něm žádný úbytek napětí. Po přiložení kladného řídicího napětí U_1 dojde díky nulovému napětí na invertujícímu vstupu operačního zesilovače z rezistoru R_s , kterým zatím neprotéká žádný proud, k přechodu OZ do kladné saturace. Tím dojde k plnému otevření tranzistoru T a začne protékat proud I . Tento proud způsobí úbytek napětí na rezistoru R_s , který když dosáhne hodnoty řídicího napětí U_1 , tak OZ přejde ze saturace do takového stavu, kdy dojde

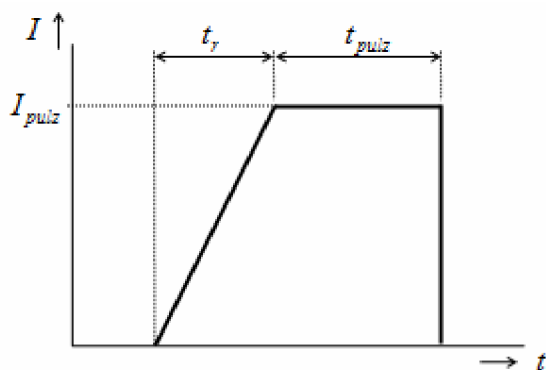
k ustálení parametrů. Pro velikost ustáleného proudu I platí vztah:

$$I = \frac{U_1}{R_s}. \quad (1.3)$$

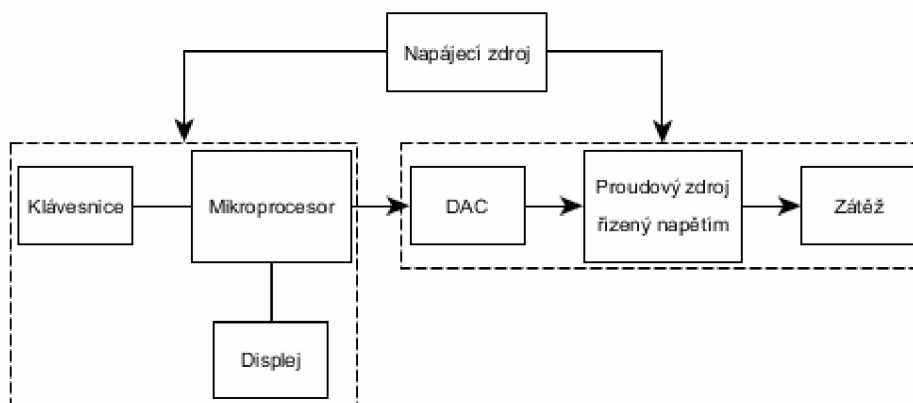
Použitím unipolárního tranzistoru MOSFET dojde k eliminaci vlivu řídicího proudu, který je prakticky nulový u tranzistoru řízeného polem a nebude se nijak podílet na velikosti regulovaného proudu I . Další neblahý vliv na přesnost nastaveného proudu má napěťová nesymetrie vstupů OZ, konečné napěťové zesílení a také nenulové vstupní proudy OZ, které se zanedbávali. Aby byl jejich vliv co nejmenší, měl by být použit kvalitnější operační zesilovač např. se vstupními JFET tranzistory, jejichž vstupní proud je v řádu jednotek nanoampér [1].

2 NÁVRH ZAŘÍZENÍ

Cílem tohoto projektu je navrhnout zdroj, který bude schopen generovat proudové impulzy s definovanou velikostí I_{pulz} , dobou náběžné hrany t_r a dobou trvání samotného pulzu t_{pulz} (Je pravdou, že toto označení by bylo vhodnější pro celkové trvání impulzu. V této práci je tak označena jen neměnná část impulzu. Celková doba trvání impulzu je pak označována jako t_{celk}), jak je ukázáno na obrázku 2.1. Tyto požadované parametry budou digitálně řízeny pomocí mikroprocesoru. Součástí rozhraní s mikroprocesorem bude klávesnice a displej. Kromě toho bude umožněno parametry impulzu nastavovat pomocí uživatelského rozhraní v PC.



Obrázek 2.1: Časový průběh proudového impulzu s vyznačenými parametry.



Obrázek 2.2: Blokové schéma navrhovaného řízeného zdroje proudových impulzů.

Nejjednodušší způsob řízení je zajištěn u zdroje proudu řízeného napětím. Takovému zdroji je proto věnována předchozí kapitola a tento bude pro navrhovaný systém použit. Potřebné napětí v číslicové podobě z mikroprocesoru odpovídající požadovanému proudu bude převedeno pomocí připojeného digitálně analogového

převodníku (DAC) na řídicí napěťový vstup zdroje. Toto napětí potom zajistí požadovaný průběh proudu do připojené zátěže. Díky tomuto řešení by případně nebyl problém dosáhnout téměř libovolného průběhu proudu.

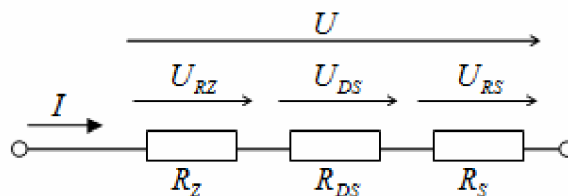
Podoba zařízení je naznačena na blokovém schématu znázorněném na obrázku 2.2. Díky zkušenostem s mikroprocesory od firmy Atmel, bude použit 8 bitový mikroprocesor z řady ATmega. V následujících částech bude pozornost věnována jednotlivým blokům.

2.1 Návrh bloku zdroje proudu řízeného napětím

K realizaci tohoto bloku bude použito zapojení z obrázku 1.5. Obvodové prvky bude nyní potřeba navrhnout pro požadované parametry zátěže a velikosti výstupního generovaného proudu. Velikost zátěže by se měla pohybovat v rozmezí 0 až 5 Ω . Hodnota maximálního proudu byla stanovena na 6 A. V tomto případě se vychází z parametrů komerčního zařízení, zdroje proudových impulzů, „9730 Current pulse generator,“ [3], od firmy Quantum Composers, Inc., pro testování airbagových a pyrotechnických rozbušek. Navrhované zařízení by mohlo sloužit k podobným účelům.

2.1.1 Návrh výkonové části proudového zdroje

Tento text bude zaměřen na výkonovou část navrhovaného řízeného zdroje proudu. Zjednodušené schéma výkonové části, kde je tranzistor nahrazen rezistorem R_{DS} je uvedeno na obrázku 2.3.



Obrázek 2.3: Zjednodušené schéma výkonové části.

Pro napájecí napětí výkonové části U platí:

$$U = U_{RZ} + U_{DS} + U_{RS}, \quad (2.1)$$

kde U_{RZ} je napětí na zátěži R_Z , U_{DS} je napětí mezi svorkami D (Drain) a S (Source) výkonového tranzistoru. U_{RS} je napětí na rezistoru $R_S = 1 \Omega$, které tvoří zpětnou vazbu k operačnímu zesilovači. Aby ve vztahu (2.1) byl reprezentován protékající proud I , lze jej upravit následovně:

$$U_{\min} = I_{\max} \cdot (R_{Z\max} + R_{DSon} + R_S) = 6 \cdot (5 + 0,15 + 1) = 36,9 \text{ V}. \quad (2.2)$$

Zároveň byl upraven do takové podoby, kdy vyjadřuje minimální potřebnou hodnotu

napájecího napětí pro výkonovou část U_{\min} , kdy je požadovaná maximální hodnota proudu I_{\max} , tj. 6 A, pro maximální velikost zátěže $R_{Z\max} = 5 \Omega$. R_{DSon} je odpor mezi svorkami DS tranzistoru v saturaci, kdy je plně otevřen. Jako výkonový MOSFET tranzistor byl vybrán IRF640 v pouzdře TO-220AB. Jeho důležité parametry jsou uvedeny v následující tabulce.

Tabulka 2.1: Vybrané parametry výkonového MOSFET tranzistoru IRF640 [4].

Parametr	Hodnota	Popis
V_{DDs}	200 V	maximální napětí mezi svorkami DS
R_{DSon}	0,15 Ω	odpor mezi svorkami DS v plně otevřeném stavu
I_D	18 A	maximální průchozí proud
P_D	150 W	maximální ztrátový výkon

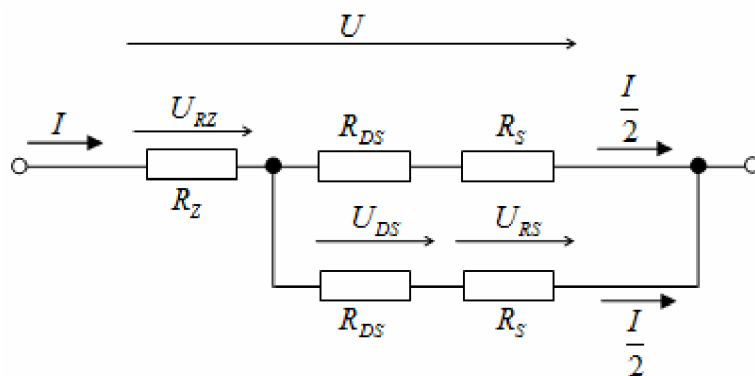
Po dosazení výše uvedených parametrů do vztahu (2.2) je určena velikost potřebného napájecího napětí na 36,9 V. Tato hodnota napětí zajišťuje maximální proud do maximální zátěže, tranzistor je plně otevřen a vzniká na něm minimální výkonová ztráta. Pro hodnotu ztrátového výkonu na tranzistoru platí:

$$P_{DS} = I \cdot U_{DS} = I \cdot (U - U_{RZ} + U_{RS}) = I \cdot (U - I \cdot R_Z - I \cdot R_S). \quad (2.3)$$

V tomto případě je tedy ztráta $P_{DS}(R_Z = 5 \Omega, I = 6 A) = 5,4 W$. Ale v situaci, kdy je zátěž zkrat, $R_Z \rightarrow 0 \Omega$, se úbytek napětí ze zátěže přesune na tranzistor a téměř celé napájecí napětí je nyní na tranzistoru. Výkonová ztráta na něm je potom $P_{DS}(R_Z \rightarrow 0 \Omega, I = 6 A) = 185,4 W$. Takto velká hodnota je nepřijatelná, přesahuje maximální povolený ztrátový výkon vybraného tranzistoru a je potřeba učinit opatření k jejímu snížení.

2.1.2 Snížení výkonové ztráty na aktivním prvku

Krokem pro snížení výkonové ztráty na aktivním prvku, v tomto případě na použitém tranzistoru MOSFET, bude zdvojení obvodu proudového zdroje. Proudový zdroj se tedy bude skládat ze dvou samostatných obvodů, které budou připojeny paralelně ke společné zátěži. Každou výkonovou větví nyní poteče poloviční proud a výrazně se tím zmenší výkonová ztráta připadající na jednotlivé tranzistory.



Obrázek 2.4: Zjednodušené schéma zdvojené výkonové části řízeného zdroje proudu.

Zjednodušené schéma takto upraveného obvodu je na obrázku 2.4.

Po této úpravě je potřeba pozměnit i vztah (2.2) pro výpočet minimálního potřebného napájecího napětí, který přejde do tvaru:

$$U_{\min} = I_{\max} \cdot \left(R_{Z_{\max}} + \frac{R_{DSon} + R_S}{2} \right) = 6 \cdot \left(5 + \frac{0,15+1}{2} \right) = 33,45 \text{ V}. \quad (2.4)$$

Zde je vidět, že se nepatrně sníží i požadavek na hodnotu napájecího napětí. Upraven musí být i vztah pro výpočet ztrátového výkonu na tranzistoru:

$$P_{DS} = \frac{I}{2} \cdot U_{DS} = \frac{I}{2} \cdot (U - U_{RZ} + U_{RS}) = \frac{I}{2} \cdot \left(U - I \cdot R_Z - \frac{I}{2} \cdot R_S \right). \quad (2.5)$$

Největší hodnota této ztráty při zkratu na místě zátěže a maximálním nastaveném proudu je nyní $P_{DS}(R_Z \rightarrow 0 \Omega, I = 6 \text{ A}) = 91,35 \text{ W}$.

Oproti 185 W je nyní ztráta asi poloviční, přesto je její hodnota stále příliš velká a uchládit by se ji nepodařilo. To by platilo, pokud by se jednalo o kontinuální ztrátový výkon. Ale tato ztráta bude nastávat jen po krátkou dobu trvání generovaného proudového impulsu, do 1 sekundy. Může se tedy počítat s tím, že tak krátká doba nebude stačit na výrazné ohřátí součástky a nároky na chlazení nebudou příliš veliké.

Energie jednoho sekundového impulsu v nejhorším možném případě, kdy $R_Z \rightarrow 0 \Omega, I = 6 \text{ A}$, bude:

$$E_{pulz} = P_{DS} \cdot t = 91,35 \cdot 1 = 91,35 \text{ J}. \quad (2.6)$$

Za předpokladu generování pulzů například jednou za minutu bude hodnota středního, ztrátového, výkonu rozložená po tuto pomyslnou periodu, a to:

$$P_{stř} = P_{ztr} = \frac{E_{pulz}}{T} = \frac{91,35}{60} = 1,52 \text{ W}. \quad (2.7)$$

Tato perioda by se mohla ošetřit programově, kdy by mikroprocesor nedovolil

generovat impulzy častěji.

Největší vliv na velikost výkonové ztráty má napájecí napětí U . Kdyby se zajistila možnost jeho snižování, například použitím výkonové části s transformátorem s více vinutími, která by se dle potřeby připínala do série, došlo by k podstatnému snížení této ztráty. Zajištěno by bylo napájení jen takové, které by bylo nutné, a výkonová ztráta by se minimalizovala. U takovéto realizace je potřeba najít podmínky, podle kterých by docházelo k přepínání a nastavení potřebné velikosti napájení.

Jedna z možností je najít takové hodnoty proudu $I_{\max i}$, kterých je schopen zdroj dosáhnout právě při zvolené hodnotě kroku napájení U_i . Tím, že hodnota požadovaného proudu je známa, tak by bylo možné rozvrhnout, jaké bude potřeba napájení pro daný generovaný proud:

$$I_{\max i} = \frac{U_i}{\left(R_{Z \max} + \frac{R_S + R_{DSon}}{2} \right)_{konst.}} = \frac{U_i}{5 + \frac{1 + 0,15}{2}} = \frac{U_i}{5,575}. \quad (2.8)$$

Bohužel tento způsob neřeší případ, kdy se sice požaduje veliký proud, ale do malé zátěže a musí být zvoleno i jiné kritérium pro přepínání. Takovou možností by mohlo být zohlednění velikosti zátěže. Zadána by byla předpokládaná hodnota zátěže a pomocí známého generovaného proudu se zjistí, podle mírně upraveného vztahu (2.8) na tvar:

$$U = I \cdot \left(R_Z + \frac{R_S + R_{DSon}}{2} \right) = I \cdot \left(R_Z + \frac{1 + 0,15}{2} \right) = I \cdot (R_Z + 0,575), \quad (2.9)$$

potřebné napájecí napětí, které se nastaví před samotným impulsem.

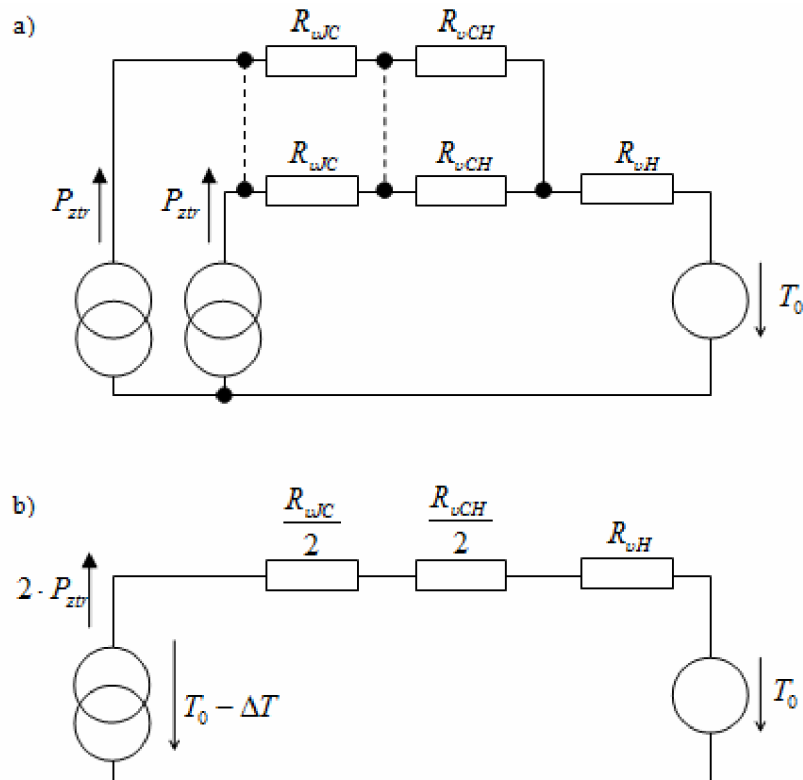
Naposledy jmenovaný způsob ovšem naráží na problém, že hodnota zátěže nemusí být vždy známá. Řešením by mohla být možnost hodnotu zátěže změřit pomocí úbytku napětí, který na něm vznikne při průchodu známého proudu. Ve zdroji pro výkonovou část bude využito nejpravděpodobněji transformátoru se dvěma vinutími. Nemusela by být změřena ani přesná hodnota, ale stačilo by například pomocí komparátoru rozhodnout, zda bude postačující nižší, nebo bude potřeba vyšší napájecí napětí.

Vzhledem k tomu, že zátěží má být pyrotechnická rozbuška, musí být tento známý měřicí proud bezpečně malý, aby nemohlo dojít k nechtěné iniciaci. Tato možnost je zde uvedena jen jako návrh. Využito je předchozího jmenovaného způsobu, kdy se předpokládá, že hodnota odporu zátěže, např. testovaného palníku, je známá a ručně zadána uživatelem.

2.1.3 Nároky na chlazení aktivních prvků

K určení tepelného odporu chladiče R_{oh} (Heat-sink) a míry jeho schopnosti odvést teplo z chlazené součástky bude sloužit tepelné schéma na obrázku 2.5 a). Jak je uvedeno výše, tak se obvod zdroje proudu bude skládat ze dvou stejných částí. Chlazeny tedy budou dva výkonové tranzistory, které budou umístěny na jednom chladiči, aby byly pro oba zajištěny co nejbližší teplotní podmínky. Protože jsou teploty

odpovídajících si uzlů stejné, lze je zkratovat [5] (naznačeno čárkovaně) a schéma se zjednoduší do podoby na obrázku 2.5 b). P_{ztr} zde vyjadřuje ztrátový výkon, který vzniká v polovodičové struktuře tranzistoru. R_{wJC} vyjadřuje, jak dobře dochází k odvodu tepla z této polovodičové struktury, čipu (Junction), na pouzdro (Case) tranzistoru a R_{vCH} vyjadřuje odvod tepla z pouzdra na připojený chladič. Čím menší je tato hodnota tepelného odporu, tím jsou zajištěny lepší podmínky pro odvod ztrátového tepla a je docíleno účinnějšího chlazení.



Obrázek 2.5: a) Tepelné schéma zdvojené výkonové části, b) zjednodušené tepelné schéma výk. části.

Parametry a jejich hodnoty nutných k výpočtu jsou pro použitý tranzistor IRF640 vyznačeny v následující tabulce, Tabulka 2.1. Maximální teplota čipu při proudu tranzistorem $I_D = 6 A$ je sice udávána $T_{jmax} \approx 150 \text{ }^\circ\text{C}$, [4], ale pro získání rezervy je tato hodnota zvolena na $80 \text{ }^\circ\text{C}$.

Tabulka 2.2: Parametry pro výpočet z tepelného schématu výkonové části.

Parametr	Hodnota	Popis
R_{wJC}	1 K/W	tepelný odpor čip-pouzdro (junction-case), [4]
R_{vCH}	0,5 K/W	tepelný odpor pouzdro-chladič (case-heat sink), [4]
T_0	40 $^\circ\text{C}$	teplota okolí, voleno podle normy, nejhorší případ, [5]
ΔT	40 $^\circ\text{C}$	povolené oteplení čipu oproti T_0 , zvoleno
T_{jmax}	80 $^\circ\text{C}$	maximální povolená teplota čipu, $T_0 + \Delta T$, podle [4] cca. 150 $^\circ\text{C}$ při 6 A

Pro celkový tepelný odpor ve smyčce na obrázku 2.5 b) platí:

$$R_{vH} + \frac{R_{wC}}{2} + \frac{R_{vCH}}{2} = \frac{T_{j\max} - T_0}{2 \cdot P_{ztr}} = \frac{\Delta T}{2 \cdot P_{ztr}}. \quad (2.10)$$

Odtud lze vyjádřit vztah pro tepelný odpor chladiče:

$$R_{vH} = \frac{\Delta T}{2 \cdot P_{ztr}} - \frac{R_{wC}}{2} - \frac{R_{vCH}}{2} = \frac{40}{2 \cdot 1,52} - \frac{1}{2} - \frac{0,5}{2} = 12,4 \text{ K/W}. \quad (2.11)$$

Dosažený ztrátový výkon odpovídá nepříznivé situaci, kdy uživatel zadal maximální hodnotu odporu, ale ve skutečnosti byl zátěží zkrat a interval mezi impulzy 60 s, (2.7). Chladič byl vybrán hliníkový s označením CHL255Y ze sortimentu GM electronic, spol. s r. o. Jeho rozměry jsou 90 x 25 x 40 mm a hodnota tepelného odporu je 4,4 K/W. Vybrán by sice mohl být i chladič menších rozměrů, ty ale nejsou v tomto případě překážkou a zároveň poskytuje rezervu. Při zpětném dosažení tepelného odporu vybraného chladiče vychází ze vztahů (2.11) a (2.7) možná prodleva mezi pulzy téměř 24 s, když je výkonová ztráta nejvyšší možná.

2.2 Digitální řízení, tvorba řídicího napětí

Pro tvorbu řídicího napětí pro zdroj proudu bude využito digitálně-analogového převodníku (DAC). Nyní je potřeba zjistit, jaké bude potřeba jeho bitové rozlišení. Vyjde se z požadavku, aby se generovaný proud dal nastavovat s přesností na jednotky mA. Tento parametr je opět převzat z [3]. Řídicí napětí musí být možné měnit v takovém rozmezí, aby se proud obou zdrojů mohl regulovat od 0 do 3 A (výsledný tedy 0 až 6 A). Tomu podle vztahu (1.3) odpovídá rozsah napětí 0 až 3 V, $R_S = 1 \Omega$. Na 1 V tedy připadá 1 A na každý ze zdrojů. Výsledný proud I je součtem obou větví, a tedy 1 V řídicího napětí odpovídá proudu 2 A protékajících zátěží:

$$I = 2 \cdot \frac{I}{2} = 2 \cdot \frac{U_{\text{řídící}}}{R_S}. \quad (2.12)$$

Pro rozlišení proudu na 1 mA, nejmenší krok, v každé větvi je potřeba řídicí napětí 3 V rozdělit na 3000 úrovní. Bitové rozlišení převodníku se poté určí následovně:

$$\begin{aligned} 2^n &= 3000 \\ \log 2^n &= \log 3000 \\ n &= \frac{\log 3000}{\log 2} = 11,55 \Rightarrow 12 \text{ b}. \end{aligned} \quad (2.13)$$

2.2.1 Určení hodnoty referenčního napětí pro DAC převodník

Vybrán bude 12 bitový. Jeho rozlišení $n = 12$ b odpovídá 4096 napěťových hladin, viz. (2.14):

$$2^n = 2^{12} = 4096. \quad (2.14)$$

Pro výstupní napětí obvodu DAC U_{OUT} platí:

$$U_{OUT} = \frac{U_{REF} \cdot N}{2^n} = \frac{U_{REF} \cdot N}{4096}, \quad (2.15)$$

kde U_{REF} je vstupní referenční napětí, N vstupní číslicová hodnota pro převod (v dekadickém vyjádření) a n je bitové rozlišení převodníku.

Pro hodnotu U_{REF} jsou dvě možnosti, kdy každá z nich má své klady i zápory. První možností je $U_{REF} = 3$ V. V takovém případě je omezena maximální hodnota proudu v případě plného rozsahu výstupního napětí převodníku. Nevýhodou je neceločíselná hodnota napěťového kroku odpovídající 1 LSB bitu (nejméně významný bit) vstupního čísla:

$$U_{OUT_LSB} = \frac{3 \cdot 1}{4096} = 0,732 \text{ mV}. \quad (2.16)$$

Tomu odpovídá výstupní proud podle (2.12) do zátěže 1,464 mA.

Druhou možností je $U_{REF} = 4,096$ V. Nyní je výhodou celočíselná hodnota napětí odpovídající 1 LSB bitu vstupního čísla, viz. (2.17), a tomu odpovídající velikost výstupního proudu 2 mA:

$$U_{OUT_LSB} = \frac{4,096 \cdot 1}{4096} = 1 \text{ mV}. \quad (2.17)$$

Nevýhodou této možnosti ale je, že již není omezena maximální hodnota výstupního napětí na 3 V a tím výstupního proudu jedné větve 3 A použitou referencí. Toto omezení by se nyní muselo zajistit pouze softwarově a nedovolit, aby vstupní číselná hodnota do převodníku nepřekročila $N = 3000$. Jistá ochrana se může zajistit omezením výstupní hodnoty napětí převodníku například obvodem se Zenerovou diodou. I přes tuto nevýhodu bude požitá tato možnost, kdy referenční napětí bude mít hodnotu $U_{REF} = 4,096$ V.

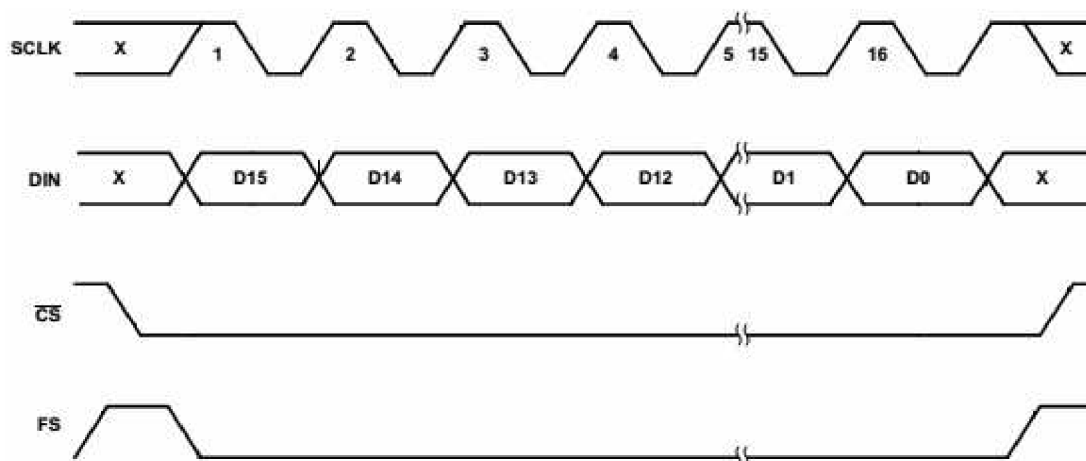
Vybrán byl 12 bitový převodník TLV5636 [6] od firmy Texas Instruments, využívající rezistorovou síť. V režimu „Fast mode“ je doba nastavení výstupu $1 \mu\text{s}$. Tento obvod obsahuje vnitřní referenci $1,024$ V a $2,048$ V. Výstupní hodnota napětí vybraného převodníku je dána vztahem [6]:

$$U_{OUT} = 2 \cdot U_{REF} \cdot \frac{N}{2^n} = 2 \cdot 2,048 \cdot \frac{N}{2^{12}} \quad (2.18)$$

To, že je vnitřní referenční napětí U_{REF} poloviční, než je potřeba, je kompenzováno ziskem výstupního bufferu převodníku.

2.2.2 Komunikace s DAC převodníkem TLV5636

Komunikace s převodníkem TLV5636 je zajištěna pomocí sériové sběrnice kompatibilní s SPI (Serial Peripheral Interface). Průběh přenosu dat je znázorněn na obrázku 2.6. Výběr zařízení na sběrnici je zajištěno nízkou úrovní signálu \overline{CS} (Chip Select). Přenos dat do převodníku je zahájen sestupnou hranou signálu FS. Poté je s každou aktivní hranou hodinového signálu SCLK (Serial Clock Input) přijat jeden bit z linky vstupních dat DIN (Data Input) od nejvýznamnějšího bitu MSB po nejméně významný bit LSB. Výstup převodníku je automaticky obnoven při nástupné hraně hodinového signálu SCLK, která následuje po šestnácté aktivní hraně SCLK. Je tedy nutné zajistit správnou podobu tohoto signálu v řídicím (Master) obvodu.



Obrázek 2.6: Znáznornění komunikace s DAC převodníkem TLV5636 [6].

Zapíše se 16 bitová hodnota, kde ke 12 bitům datovým jsou přidány další řídicí. Toto znázorňuje následující tabulka:

Tabulka 2.3: Zapisovaná datová hodnota pro převodník TLV5636.

D15	D14	D13	D12	D11..D0
R1	SPD	PWR	R0	12 bit. data

Bity R1, R0 slouží k výběru, zda bude zapisováno do datového nebo řídicího registru, bit SPD vybírá režim Fast/Slow mode a bit PWR umožňuje nastavit úsporný režim převodníku. V případě, kdy je zvolen zápis do řídicího registru určují dva nejnižší bity použitou referenci (1,024 V; 2,048 V; externí). Pro účely tohoto zařízení je tedy zvolen režim „Fast mode“ a vybrána vnitřní reference 2,048 V. Při zvolení vnitřní reference je toto napětí přítomno na jednom z pinů převodníku a může být využito ve zbytku

obvodu, v tomto případě ale tato možnost nebude potřeba a nebude tedy využita.

2.3 Řídící procesorová část

O požadovanou činnost zařízení se stará 8 bitový mikroprocesor ATmega1284P, [7]. Nabízí štědrých 128kB programové paměti, systémové hodiny jsou provozovány na 20 MHz a obsahuje potřebné periferie pro činnost zařízení a komunikaci s okolím. Jsou to především sběrnice SPI pro komunikaci s DA převodníkem a zároveň pro ISP programování (In-System Programming), sloužící pro nahrání programu. Pro spojení s uživatelskou aplikací v PC je využito jednotky USART (Universal Synchronous and Asynchronous serial Receiver and Transmitter). K dispozici je potom dostatečné množství vstupně výstupních pinů pro ovládání relé, obsluhu klávesnice a LCD displeje.

2.3.1 LCD displej

Prostředkem k interakci s uživatelem slouží velmi rozšířený znakový 16x2 LCD displej se standardním řadičem HD44780 od firmy Hitachi. Pro jeho obsluhu jsou využity upravené knihovny doc. Ing. Tomášem Frýzou, Ph.D. pro účely počítačových cvičení z předmětu BMPT (Mikroprocesorová technika a embedded systémy) [8], jejichž původním autorem je Peter Fleury [9]. Používá se zde 4 bitová komunikace, kdy včetně řídicích signálů je potřeba k ovládání displeje 7 pinů procesoru. V tomto případě to jsou piny PA1 až PA7.

2.3.2 Klávesnice

Potřebné hodnoty jsou zařízení předávány prostřednictvím maticové klávesnice 4x4, vyobrazené na obrázku 2.7. Klávesy 0 až 9 slouží k zadávání číselných hodnot, A a B pro pohyb v menu, C jako Cancel a jako D potvrzovací klávesa OK. „*“ a „#“ nejsou využity.

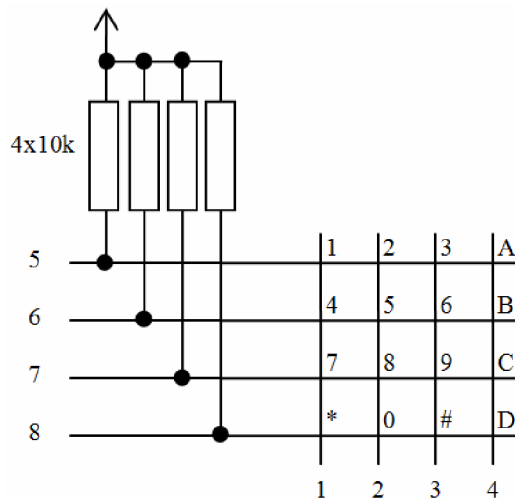


Obrázek 2.7: Ilustrační obrázek, použitá maticová klávesnice [10].

Principiální schéma maticové klávesnice je uvedeno na obrázku 2.8. Klávesnice je připojena na všech 8 pinů portu C. Linky 5 až 8 (řádky matice) jsou připojeny na piny portu PC0 až PC3. Ty jsou nastaveny jako vstupní a jsou ve stavu vysoké impedance HiZ. Pull-up rezistory zajišťují na těchto linkách v klidové stavu logickou úroveň H. Sloupce, linky 1 až 4, jsou připojeny na PC4 až PC7, nastavené jako výstupní a v klidovém stavu je na nich úroveň H. K vyčítání dochází způsobem, kdy je vždy aktivován jeden sloupec, přejde do stavu L a dojde k přečtení stavů na vstupních pinech.

Poté je aktivován druhý sloupec a opět dojde k přečtení řádků matice, atd. Pokud není stisknuta žádná klávesa, je díky pull-up rezistorům přečtena hodnota H na všech řádcích.

V situaci, kdy je zmáčknuta například klávesa „A“ dojde k propojení linek 5 a 4. V okamžiku aktivování posledního sloupce, tedy na linku 4 je přivedena úroveň L, bude na prvním řádku taktéž přečtena hodnota L. Vyhodnocením přečtené hodnoty v okamžiku právě aktivního sloupce je zjištěna konkrétní stisknutá klávesa. Tento princip čtení umožňuje i vyhodnocení zmáčknutých více kláves najednou.



Obrázek 2.8: Principiální schéma zapojení maticové klávesnice.

2.3.3 Připojení k PC

Jak je již zmíněno výše, tak k připojení k PC na straně mikroprocesoru je využito jednotky USART. Pro připojení k počítači je nevhodnější volbou použití universální sériové sběrnice USB. K propojení těchto dvou různých standardů je zvolen obvod s čipem FTDI232RL, [11], obrázek 2.9. Ten se po připojení k PC hlásí jako virtuální sériový COM port a stejně tak se s ním potom pracuje.



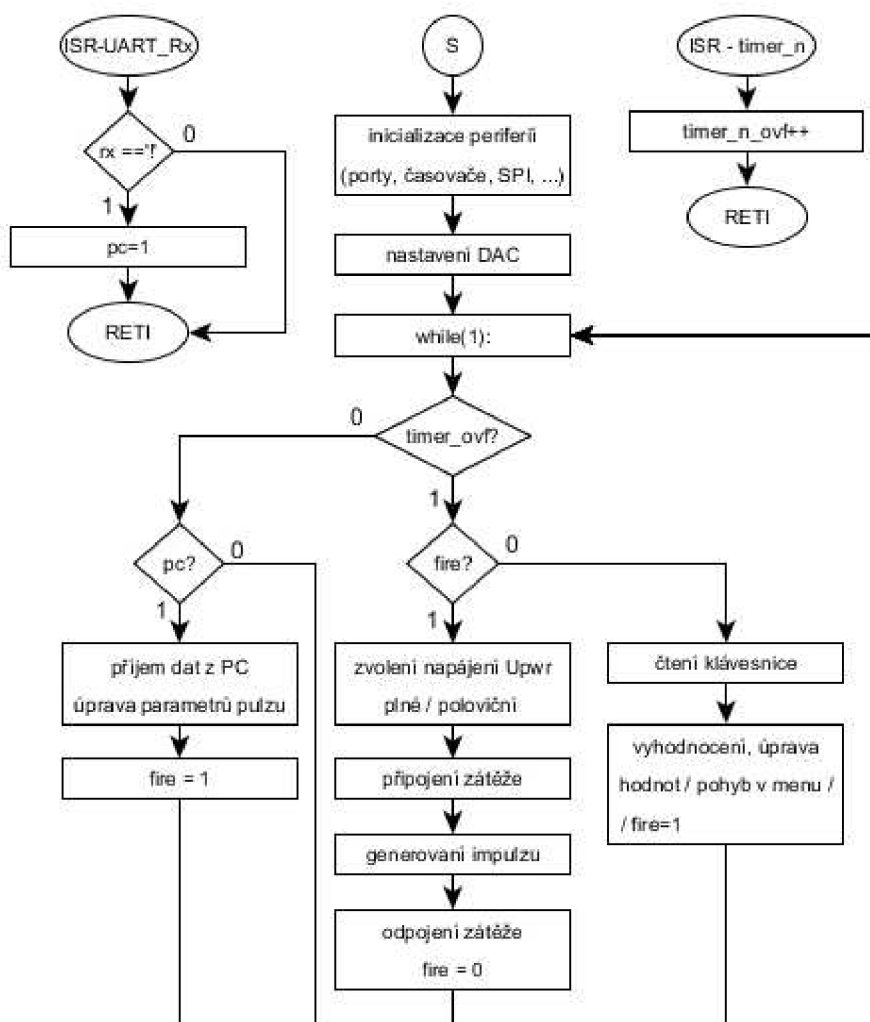
Obrázek 2.9: Převodník USB – UART s obvodem FTDI232RL [11].

3 SOFTWAREVÁ ČÁST

V této kapitole bude popsán návrh a fungování programu v použitém mikroprocesoru a uživatelská aplikace pro PC. Zdrojové kódy budou přiloženy na disku, připojeném k této práci.

3.1 Program mikroprocesoru

Program pro mikroprocesor byl vytvářen ve vývojovém prostředí AtmelStudio6, který je volně dostupný na stránkách výrobce, [12]. Činnost tohoto programu je zjednodušeně znázorněna vývojovým digramem na obrázku 3.1.



Obrázek 3.1: Vývojový diagram programu mikroprocesoru.

Při zahájení činnosti (S) dojde k inicializaci nejprve vnitřních periférií procesoru, vstupně/výstupních portů, komunikačních rozhraní USART, SPI a použitých časovačů 1 a 2. Do připojeného DAC převodníku, v řízeném proudovém zdroji, je po sběrnici SPI nahrán obsah řídicího registru a převodník je nastaven do požadovaného režimu. Poté program přechází do nekonečné smyčky, která se uvnitř větví podle aktuálních požadavků a okolností. Jednotlivé větve programu jsou popsány dále.

3.1.1 Zadávání hodnot pomocí klávesnice

Časovač 0 je nakonfigurován tak, aby každých 10 ms generoval přerušení. V jeho obsluze je pouze inkrementována globální proměnná, která v hlavním těle programu indikuje, že byl odměřen zadaný interval. S touto periodou dochází v „klidovém“ stavu ke čtení stavu klávesnice. Zde je vyhodnocena případná zmáčknutá klávesa. Ta je vyhodnocena jako platná po jejím puštění. Způsob indikace stavu klávesnice v principu umožňuje vyhodnocení více zmáčknutých kláves najednou, zde se ale počítá pouze s jednou klávesou.



Obrázek 3.2: Příklad položky menu na LCD displeji.

Klávesy „A“ (↑), „B“ (↓) slouží k pohybu v menu mezi jednotlivými zadávanými parametry impulsu. Ty jsou zobrazovány na LCD displeji, obrázek 3.2. Když je zmáčknuta klávesa „D“ (OK) u některého z parametrů je na druhém řádku zobrazen blikající kurzor a zobrazována nová hodnota parametru, zadávaná klávesami „0“ až „9.“ S každou další zadanou číslicí je předchozí obsah nové hodnoty posunut o řád výš a je přičtena na místo jednotek. Klávesa „C“ (Cancel) zruší novou hodnotu a je ponechána původní. OK ukončí zadávání, potvrzuje novou hodnotu a ukládá ji na místo původní. Proud impulsu je zadáván v mA s krokem 2 mA, v případě časových parametrů jsou hodnoty zadávány v μs s krokem 100 μs . Hodnota zátěže je v jednotkách Ω . Nová hodnota je tedy vždy zaokrouhlena s ohledem na velikost kroku, vždy na nižší hodnotu.

Jednotlivé parametry impulsu jsou uvedeny spolu se svými nároky na paměťový prostor uvedeny v následující tabulce.

Tabulka 3.1: Parametry impulsu.

Parametr	Rozsah hodnot	n-bitový datový typ
I_{puls} [mA]	0 - 6000	16 (uint16_t)
t_{puls}	0 – 1000000	32 (uint32_t)
t_{rise} [μs]		
t_{celk}		
R [Ω]	0 - 5	8 (uint8_t)

Pokud je zadána hodnota větší než je rozsah zadávaného parametru je nová hodnota omezena na její horní mez. V případě časových parametrů je hodnota omezena tak, aby součet $t_{puls} + t_{rise}$, tedy t_{celk} nepřesáhl hodnotu 1000000 μs . Parametr t_{celk} se nezadá a je vždy dopočítán jako součet časů $t_{puls} + t_{rise}$.

3.1.2 Generování dat pro DAC, řídicího napětí

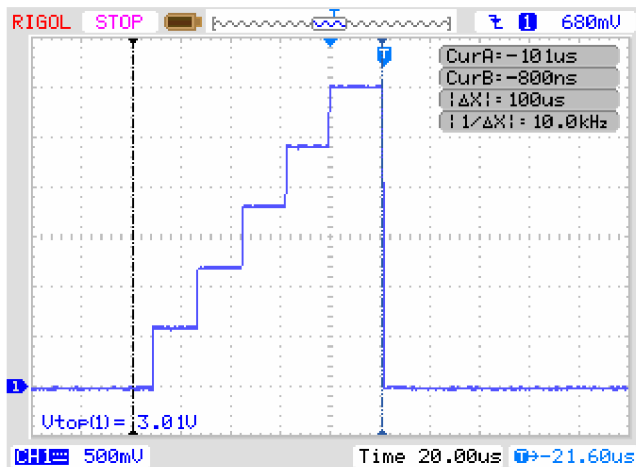
V položce menu nazvané „FIRE!“ je pomocí „OK“ zahájeno generování dat pro DAC a tím zahájení impulsu zadaných parametrů. To začne při následujícím přerušení časovače 0. Ze zadaného proudu a předpokládané zátěže je rozhodnuto o hodnotě napájecího napětí výkonové části, podle (2.9) a je podle toho patřičně přepnuto relé REL2. Po dalších asi 200 ms je připojena zátěž pomocí sepnutí relé REL1 a v dalších 2 s začne samotný impuls. Ten je rozdělen do dvou částí, první, kdy je generována náběžná hrana s dobou trvání t_{rise} a druhá kontinuální do ukončení celého impulsu, doba t_{puls} .

Hrana impulsu je generována v krocích. V každém kroku je k předchozí hodnotě řídicího napětí přičten přírůstek I_{plus} připadající právě na jeden časový krok a získá se pomocí následujícího vztahu:

$$I_{plus} = \frac{\text{kroků } I}{\text{kroků } t} = \frac{\frac{1}{2} \cdot I_{puls}}{\frac{5}{100} \cdot t_{rise}}. \quad (3.1)$$

Čitatel ($\text{kroků } I$) vyjadřuje interval hodnot zasílaných do DAC převodníku v rámci generovaného impulsu. Jmenovatel ($\text{kroků } t$) potom počet časových kroků, mezi které je tento interval nutno rovnoměrně rozdělit. Aby nevznikala velká chyba a generovaný impuls měl požadovaný tvar je tento přírůstek I_{plus} datového typu float, číslo s plovoucí řádovou čárkou a jeho přičítání, které probíhá v každém kroku je pro použitý 8 bitový mikroprocesor časově náročnější. Časového intervalu mezi jednotlivými kroky bylo dosaženo 20 μs . Do 100 μs , tj. s jakým rozlišením se hodnoty časů mohou zadávat, připadá 5 vzorků (5/100 ve jmenovateli výpočtu (3.1)). To je dobře patrné z obrázku 3.3. Jedná se o průběh řídicího napětí, kdy je zvolen nejkratší čas t_{rise} 100 μs a maximální proud I_{puls} 6 A.

Kontinuální část impulsu s dobou trvání t_{puls} je odměřena pomocí časovače 1, který je nastaven tak, aby generoval přerušení každých 100 μs . Zde je opět využita indikace pomocí globální proměnné, která je inkrementována v obsluze tohoto přerušení a čeká se, až je dosaženo požadovaného intervalu. Poté je DAC převodníku poslána nulová hodnota a dojde k odpojení zátěže rozepnutím relé REL1.



Obrázek 3.3: Průběh řídicího napětí, při t_{rise} 100 μ s, t_{puls} 0 a I_{puls} 6 A (tzn. $U_{řidící}$ 3 V).

3.1.3 Příjem dat z PC pomocí jednotky USART

Kromě možnosti zadávat parametry a spouštět impuls pomocí klávesnice připojené k mikroprocesoru je toto umožněno i aplikací z počítače. Hodnoty z PC jsou přijaty mikroprocesorem pomocí jednotky USART. Přenosová rychlost je nastavena na 9600 Bd a formát dat je 8N1, tedy 8 datových bitů, bez paritního bitu a jedním stop bitem.

Tabulka 3.2: Formát zasílaných dat z PC.

Zahájení 0x21 ~ '!	I_{puls}		t_{puls}				t_{rise}				R
	LSB	MSB	LSB			MSB	LSB			MSB	
x	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
n-tý Byte											

→ t

Ve výše uvedené tabulce je znázorněn přenášený datový rámeček, tak jak je přijat v čase, zleva doprava. Přenos hodnot z PC začíná vždy symbolem 0x21 (v ASCII vyjádření pro „!“). Přijetí prvního symbolu vyvolá přerušení. V jeho obsluze je vyhodnoceno, zda přijatým znakem je právě 0x21. Pokud ano, je zastaveno generování přerušení časovačem 0 a přerušení vyvolané při dokončení příjmu pomocí USART. Pomocí proměnné „pc“ je indikováno poté v těle programu, že budou přicházet data s 200 ms zpožděním. Ta jsou uložena v tabulce a později jsou z nich sestaveny přijaté parametry. Po dokončení příjmu je opět povoleno přerušení časovače 0 a zahájen impuls právě přijatých parametrů stejným způsobem uvedeného v kapitole 3.1.2.

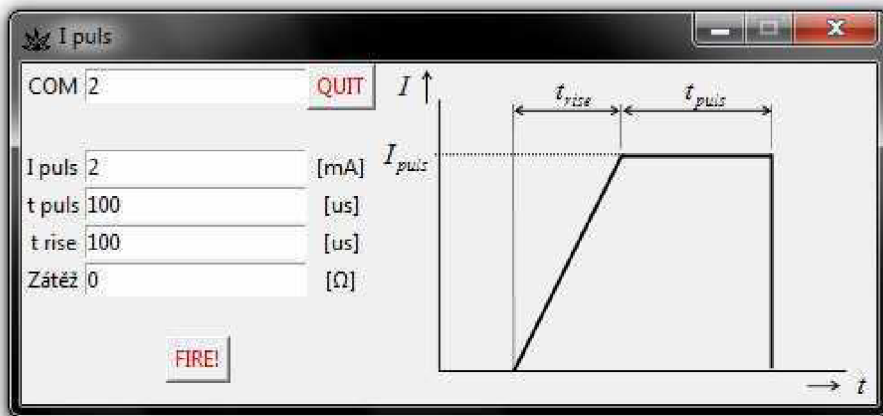
3.2 Aplikace pro ovládání z PC

Jak je již uvedeno výše, tak ovládat zařízení je umožněno i pomocí aplikace v počítači, ke kterému je zařízení připojeno pomocí universální sériové sběrnice USB prostřednictvím převodníku, který se v počítači jeví jako sériový port COM. Pro pohodlné ovládání, je tato aplikace vytvořena s grafickým uživatelským rozhraním

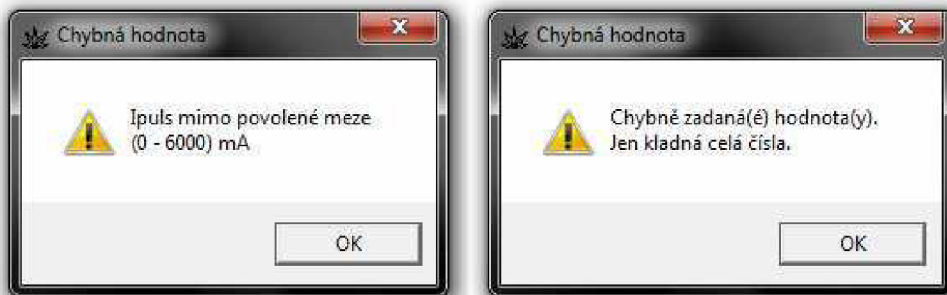
(GUI – Graphical User Interface). Vybrána musela být taková platforma, kde by bylo umožněno právě vytvořit GUI a zároveň byla možnost přistupovat a pracovat se sériovým portem.

Pro výše uvedené požadavky byl vybrán jazyk Python 3, [13]. Aby bylo aplikaci možné pustit, musí být v počítači Python 3 nainstalován. Pro vytvoření grafického prostředí je využito modulu „Tkinter,“ který je již v jazyce Python 3 obsažen. Pro přístup a práci se sériovým portem je využito modulu „pySerial,“ který je nutno doinstalovat a je volně k dispozici na [14]. Při vytváření aplikace byl využit Python ve verzi 3.4, modul pySerial v2.7, spouštěna a testována byla ve 32 bitovém systému Windows 7 Professional.

Vzhled okna aplikace je ukázán na obrázku 3.4. Při jejím vytváření bylo využito tutoriálů a příkladů dostupných z [15]. Vstupní políčka, do kterých jsou zadávány hodnoty, jsou objekty „Entry.“ Při stisku tlačítka „FIRE!“ je z nich pomocí metody „get()“ získán obsah jako řetězec, který je následně převeden na číslo typu int. Zde se projeví chyba, kdy je do políček zadáno něco jiného než číslo nebo jsou hodnoty zadány mimo povolený rozsah. V takovém případě je zobrazeno chybové hlášení pomocí dialogového okna. Příklady takového hlášení jsou uvedeny na obrázku 3.5. Pokud jsou všechny hodnoty v pořádku a správně zadán port, na kterém je zařízení připojeno, dojde k odeslání parametrů impulsu do zařízení, kde jsou přepsány stávající hodnoty a generován impuls.



Obrázek 3.4: Okno aplikace pro ovládání zařízení z PC.



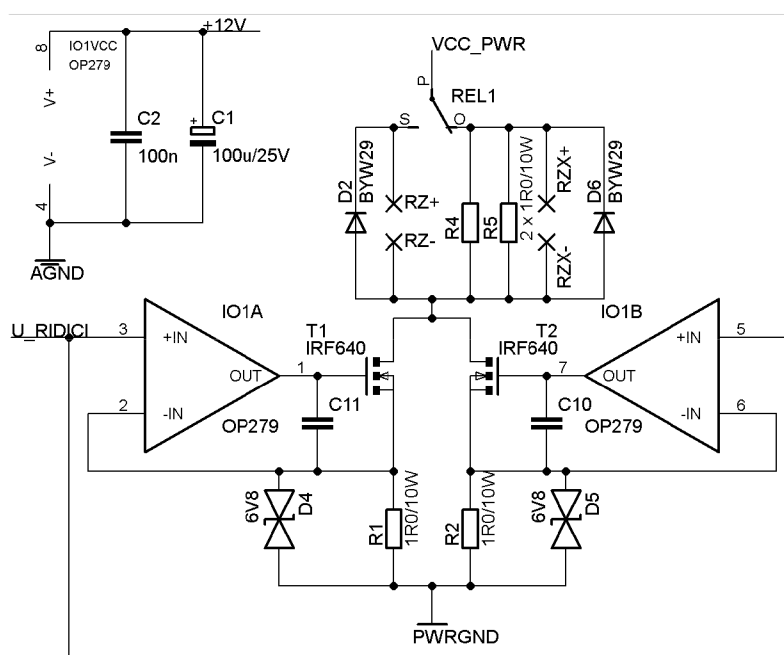
Obrázek 3.5: Příklady chybového hlášení, při špatné hodnotě zadaného parametru.

4 ZAPOJENÍ JEDNOTLIVÝCH ČÁSTÍ ŘÍZENÉHO PROUDOVÉHO ZDROJE

V této kapitole budou uvedena konkrétní zapojení použitých bloků s jejich stručným popisem. Celková obvodová řešení budou pak uvedena v příloze práce.

4.1 Zapojení bloku napětím řízeného zdroje proudu

Jak již je zmíněno dříve, zapojení tohoto bloku vychází z obvodu na obrázku 1.5. Skládá se ze dvou samostatných řízených proudových zdrojů připojených ke společné zátěži. Popisované zapojení je uvedeno na obrázku 4.1.



Obrázek 4.1: Obvod řízeného proudového zdroje.

Na místě výkonových tranzistorů T_1 a T_2 jsou použity unipolární MOSFET tranzistory IRF640, jejichž parametry jsou zmíněny výše.

Tyto tranzistory jsou buzeny operačními zesilovači IO_{1A} a IO_{1B} . Zde je použit obvod OP279, od firmy Analog Devices, [7], který obsahuje právě dva potřebné zesilovače. Ve svých specifikacích má uvedeno, že je vhodný pro řízení FET, polem řízených, tranzistorů. Tranzistory IRF640 potřebují do plného otevření napětí $U_{GS} = 10\text{ V}$. Tento obvod je typu Rail-to-Rail, napětí na jeho výstupu se může pohybovat téměř až k hodnotám na jeho napájecích svorkách. Při napájení operačních zesilovačů 12 V by tuto hodnotu neměl být problém dosáhnout. Toto napájení je blokováno kondenzátory C_1 a C_2 .

Snímací rezistory R_1 a R_2 pro zpětnou vazbu jsou dimenzovány na procházející proud 3 A, kdy na nich vzniká výkonová ztráta:

$$P_{R1} = I^2 \cdot R_1 = 9 \cdot 1 = 9 \text{ W} . \quad (4.1)$$

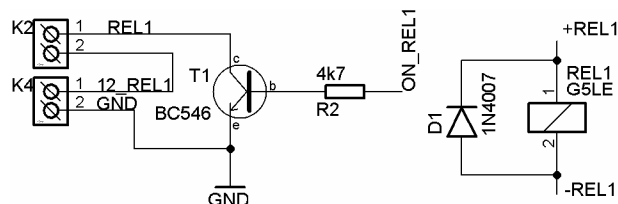
Jejich hodnota je zvolena na 1Ω . Při této hodnotě je na nich sice značná výkonová ztráta, ale při simulacích obvodu bylo dosaženo výrazně menších překmitů na nástupné hraně generovaného proudového impulsu než při použití rezistorů menší hodnoty. Protože jsou použity výkonové drátové rezistory, které vykazují parazitní indukčnost, jsou k nim paralelně zařazeny transily D4 a D5. Ty by měly ochránit vstup operačního zesilovače před vlivem přechodových jevů.

Během oživování tohoto obvodu docházelo při strmé náběžné hraně generovaného proudu ke kmitání, které se během simulací neprojevovalo. Pomocí kondenzátorů C10 a C11 tomu bylo zabráněno.

Zátěž je připojena ke svorkám RZ+ a RZ-. K nim je paralelně připojena ochranná dioda D₂, která ochrání tranzistory před případnou parazitní indukčností připojené zátěže, tedy proudem, který by se snažila zachovat po skončení impulsu.

Pomocí relé REL1 dojde k připojení napájecího napětí výkonové části k zátěži až před samotným generovaným impulzem. V druhé větvi je připojena pomocná zátěž tvořená rezistory R₄ a R₅, opět s ochrannou diodou D₆. Ty nemusí být nakonec osazeny, použití bylo myšleno čistě k testovacím účelům a napájecí zdroj bude v této poloze relé zcela odpojen od obvodu. Relé je dimenzováno na proud 10 A.

Obvod pro spínání relé REL1 je vyobrazen na obrázku 4.2. Ten je rozdělen na dvě části. První část (vlevo) se nachází na desce řídicího obvodu a druhá část (vpravo) na desce zdroje. Sepnutí bude ovládáno pomocí procesoru, který přes spínací tranzistor T₁ zajistí průchod proudu cívkou relé. K této cívce je zapojena paralelně ochranná dioda D₁.

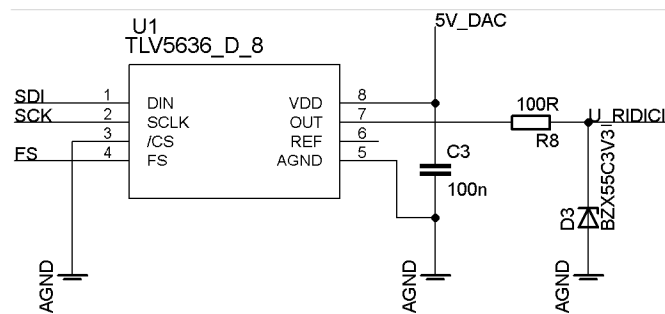


Obrázek 4.2: Obvody pro spínání relé.

4.2 Zapojení DAC převodníku

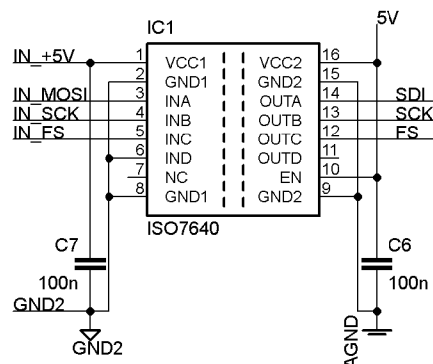
Obvodové zapojení DAC převodníku znázorňuje obrázek 4.3. Napájení je 5 V, to je blokováno pomocí kondenzátoru C₃. Datové a řídicí signály pro komunikaci s převodníkem (FS, SCK, SDI) jsou vyvedeny pro připojení přes oddělovací obvod, uvedeného dále, k mikroprocesoru. \overline{CS} je připojen na nízkou úroveň. Více zařízení se na sběrnici vyskytovat nebude, může tedy převodník být stále aktivní. Na výstupní svorce OUT je zařazen omezovací obvod realizovaný rezistorem R₈ a Zenerovou diodou 3,3 V. Ten slouží jako ochrana před tím, kdyby vstupní číslo do převodníku přesáhlo omezení, které bylo zmíněno výše. Ve stavu běžného provozu nepřesáhne výstupní napětí převodníku 3 V a vliv omezujícího obvodu se neuplatní.

Referenční napětí pro DAC převodník je získáno z vnitřní reference, vstupně/výstupní pin REF tedy zůstává nezapojen.



Obrázek 4.3: Obvodové zapojení DAC převodníku.

Obvod řízeného zdroje a mikroprocesorový obvod je galvanicky oddělen využitím isolačního oddělovacího obvodu ISO7640 [16] od firmy Texas Instruments. Na obrázku 4.4 je použité zapojení, které je převzato z jeho dokumentace. Přenosová rychlost, které je schopen dosáhnout je uvedena 150 Mb/s což je více než dostačující. Využitá bitová rychlost je 10 Mb/s, kmitočet hodinového signálu použité sběrnice SPI je 10 MHz. Každý kanál má logický vstupní a výstupní buffer oddělen izolační vrstvou oxidu křemíku SiO₂. Tím je vytvořen kondenzátor, který v kombinaci s dalšími obvodovými stupni, RC integrační článek, komparátor, klopný obvod, se stará o přenos a získání logického signálu, [17].



Obrázek 4.4: Zapojení oddělovacího obvodu ISO7640.

4.3 Řídicí obvod

Celkové zapojení řídicí desky je uvedeno v příloze B. To je koncipováno co nejvíce universálně. Kromě konektorů pro připojení dosud uvedených obvodů a periférií jsou pomocí konektorových lišt vyvedeny všechny porty, aby je bylo možné případně dále využít. Mikroprocesor jako takový je zapojen podle doporučení, uvedených ve své dokumentaci, [7].

Nachází se zde obvody pro spínání relé, ty jsou uvedeny výše. REL1 je ovládáno pomocí pinu portu PB0 a REL2 pomocí PB1.

Z portu B jsou dále vyvedeny signály sběrnice SPI. Ty slouží kromě připojení k DAC převodníku (spolu s PB3, kde je vyveden signál FS, viz. výše) také k nahrání programu do procesoru pomocí ISP programátoru, konektor MLW10 s předepsaným zapojením.

LCD displej je připojen pomocí konektoru MLW14. Na něj jsou přivedeny signály z procesoru (PA1 až PA7), trimr R4 pro regulaci kontrastu a rezistor R5 nastavuje proud pro podsvícení displeje na 20 mA, hodnota rezistoru je volena nejbližší z řady.

Celý port C je použit pro obsluhu maticové klávesnice. Na spodní polovinu (PC0 až PC3) jsou připojeny pull-up rezistory k nastavení úrovně H pro řádky matice. Klávesnice se připojuje opět pomocí kon. MLW10.

Z portu D jsou pouze vyvedeny signály obvodu USART, RxD a TxD, sloužící ke komunikaci s PC.

4.4 Napájecí zdroje

Pro kompletní zařízení jsou navrženy dva zdroje. Jeden pro napájení výkonové části a druhý menší pomocný pro zbylé obvody. Kompletní podklady jsou uvedeny opět v příloze.

4.4.1 Pomocný zdroj

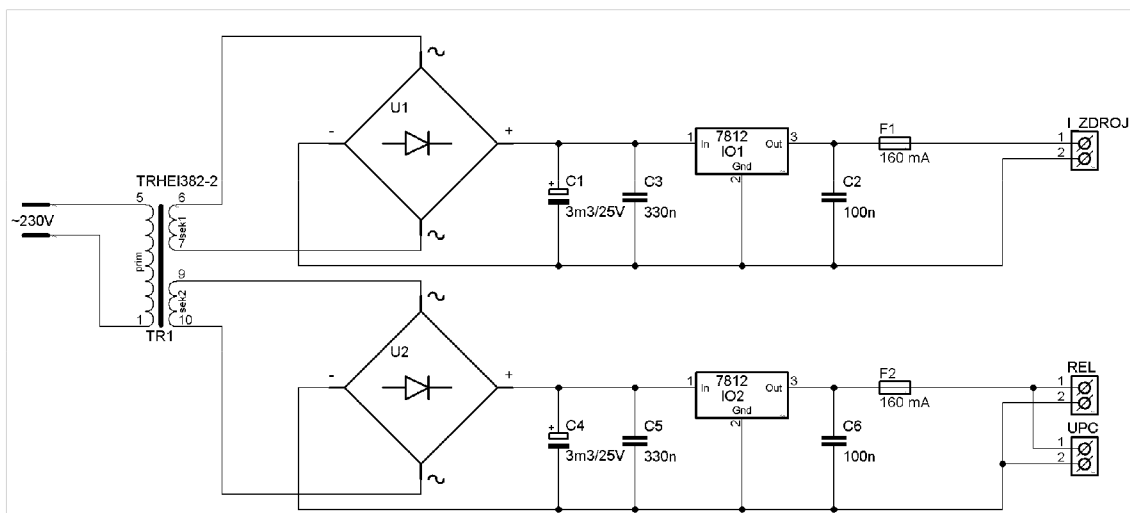
Pomocný zdroj, obrázek 4.5, se skládá ze dvou 12 V větví, které jsou na dvou samostatných sekundárních vinutích 2x12 V (AC) transformátoru TR1. Tím je zajištěno, aby řídicí procesorový obvod mohl být galvanicky oddělen od obvodů proudového zdroje (svorky I_ZDROJ). Oba zdroje jsou lineární a využívá se zde obvodu 7812 v pouzdře TO-220. Proudový odběr první větve, napájející procesorový obvod (svorky UPC) a obě relé (svorky REL), je cca 120 mA. Ztrátový výkon potom činí:

$$P_{ZTR7812} = \left((U_{AC} \cdot \sqrt{2} - U_f) - U_o \right) \cdot I = \left((12 \cdot \sqrt{2} - 1) - 12 \right) \cdot 0,120 = 0,5 \text{ W}, \quad (4.2)$$

kde U_{AC} je efektivní hodnota napětí jednoho sekundárního vinutí transformátoru TR1, U_f je úbytek napětí na usměrňovači U_2 , U_o výstupní napětí stabilizátoru a I proudový odběr. Nároky na chlazení této ztráty nebudou příliš velké a jsou spočítány podobně jako v případě (2.11), tentokrát je ale pouze jedna součástka na chladiči:

$$R_{vH} = \frac{\Delta T}{P_{ZTR7812}} - R_{wC} - R_{vCH} = \frac{40}{0,5} - 5 - 1 = 74 \text{ K/W}. \quad (4.3)$$

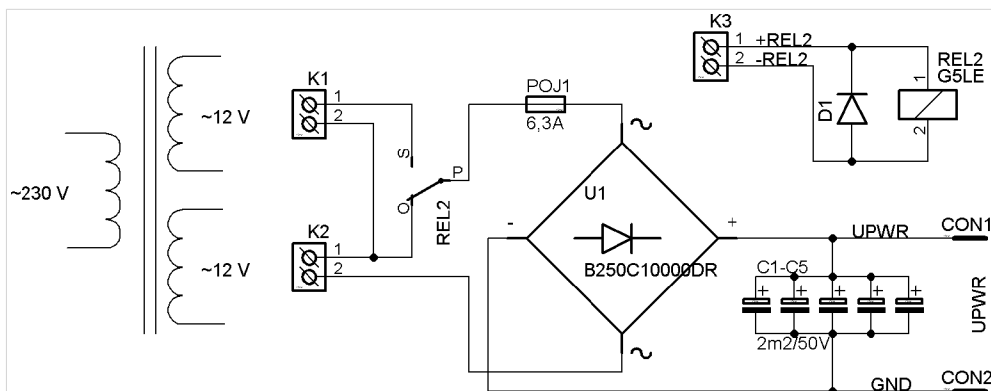
Proudový odběr druhé větve dosahuje pouze asi 20 mA, a tím jsou nároky na chlazení mnohem nižší. V obou případech bude použit chladič V 5074A s tepelným odporem 20 K/W ze sortimentu GES-ELECTRONICS, a.s.



Obrázek 4.5: Schéma zapojení pomocného napájecího zdroje.

4.4.2 Zdroj výkonové části

Zdroj výkonové části, obrázek 4.6, je navržen tak, aby bylo možné přepínat mezi dvěma úrovněmi napětí pomocí relé REL2. Na svorkovnice K1 a K2 jsou přivedena sekundární vinutí transformátoru 2x12 V/6,25 A. Pomocí relé jsou tato vinutí zapojená buďto do série, nebo je využito jen jednoho z nich. Pomocí můstkového usměrňovače U_1 , dimenzovaného na proud 10 A, je vybrané napětí dvoucestně usměrněno. Na výstupu filtraci zajišťují kondenzátory C_1 až C_5 s nízkým ekvivalentní sériovým odporem (Low ESR). Není zde použita žádná napěťová stabilizace, důležitý je odebíraný proud a o jeho průběh se stará připojený řízený zdroj.



Obrázek 4.6: Schéma zapojení zdroje výkonové části.

S ohledem na plánovaný transformátor je zjištěna a opravena hodnota maximální zátěže při maximálním proudu 6 A. Na výstupu můstkového usměrňovače je hodnota napětí U_{DC} :

$$U_{DC} = 2 \cdot U_{AC} \sqrt{2} - U_{usm} = 2 \cdot 12 \cdot \sqrt{2} - 1,1 = 32,8 \text{ V}, \quad (4.4)$$

kde U_{AC} je efektivní hodnota napětí sekundárního vinutí a U_{usm} úbytek vznikající na můstkovém usměrňovači, hodnota je převzata z jeho dokumentace, [18]. Hodnota zvlnění p napětí U_{DC} se zjistí podle následujícího vztahu [19]:

$$p = \frac{300 \cdot I_{\max}}{C \cdot U_{DC}} [\%; mA, \mu F, V] = \frac{300 \cdot 6000}{5 \cdot 2200 \cdot 32,8} = 5 \%. \quad (4.5)$$

I_{\max} představuje maximální odebíraný proud a C kapacitu filtračních kondenzátorů. Pokud napětí zdroje klesne o těchto 5 % na hodnotu:

$$U_{\min} = U_{DC} \cdot \left(1 - \frac{p}{100}\right) = 33,8 \cdot \left(1 - \frac{5}{100}\right) = 31,2 V, \quad (4.6)$$

bude maximální hodnota zátěže, do které bude možno dodat proud 6 A:

$$R_{Z\max} = \frac{U_{\min}}{I_{\max}} - \frac{R_{DSon} + R_S}{2} = \frac{31,2}{6} - \frac{0,15 + 1}{2} = 4,6 \Omega. \quad (4.7)$$

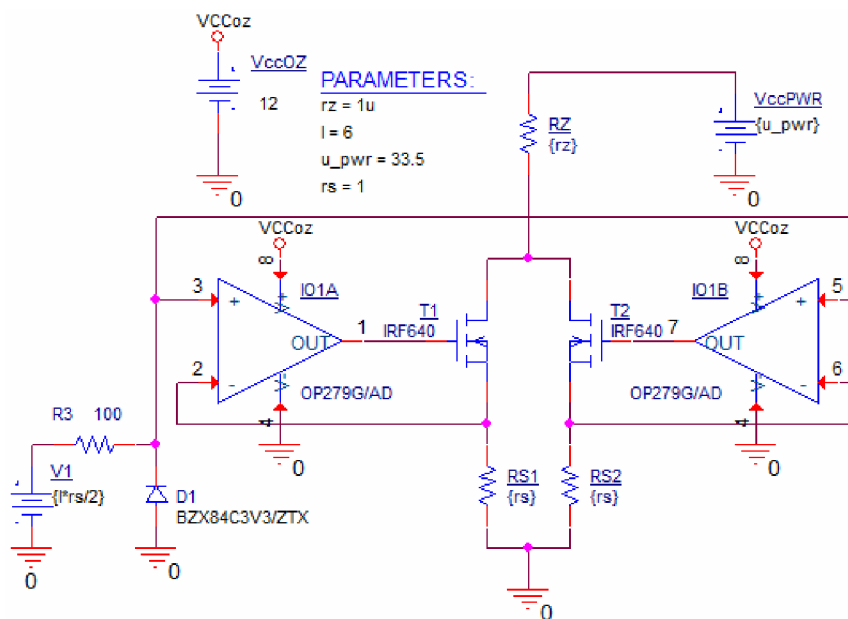
Maximální hodnota zátěže je tedy o něco menší, než se pracovalo v rámci návrhu. Podle výše uvedených vztahů, (4.4) až (4.6) při uvážení jen 12 V vstupních efektivní hodnoty napětí k usměrnění, je minimální hodnota při sepnutém pouze jednom sekundárním vinutí 14,2 V. Tato hodnota bude potom sloužit jako práh při rozhodování, o velikosti napájecího napětí výkonové části podle zadaného proudu a předpokládané zátěže.

5 SIMULACE OBVODU ZDROJE PROUDU

Pro navržené obvodové zapojení z předchozí kapitoly byly provedeny simulace v programu OrCAD PSpice v16.6 (dále jen PSpice). Obvodové prvky byly také vybírány i s ohledem na to, aby jejich modely byly obsaženy v knihovnách tohoto simulačního softwaru. V rámci kapitoly jsou uvedeny různé obměny zapojení obvodu pro jednotlivé analýzy, výsledné závislosti a v následujících odstavcích je uveden stručný popis k jednotlivým analýzám.

5.1 Stejnoseměrná analýza (DC sweep)

Simulovaný obvod je uveden na obrázku 5.1. Většina hodnot pro obvodové prvky je zadána parametricky. Stejnoseměrný napěťový zdroj V_1 vytváří řídicí napětí pro řízený proudový zdroj. Ten nahrazuje výstupní napětí z DAC převodníku řízeného mikroprocesorem. Rezistor R_3 a dioda D_1 tvoří omezující obvod pro řídicí napětí do 3,3 V. Hodnota napájení výkonové části zdrojem V_{ccPWR} je nastavena podle (2.4) na 33,5 V.

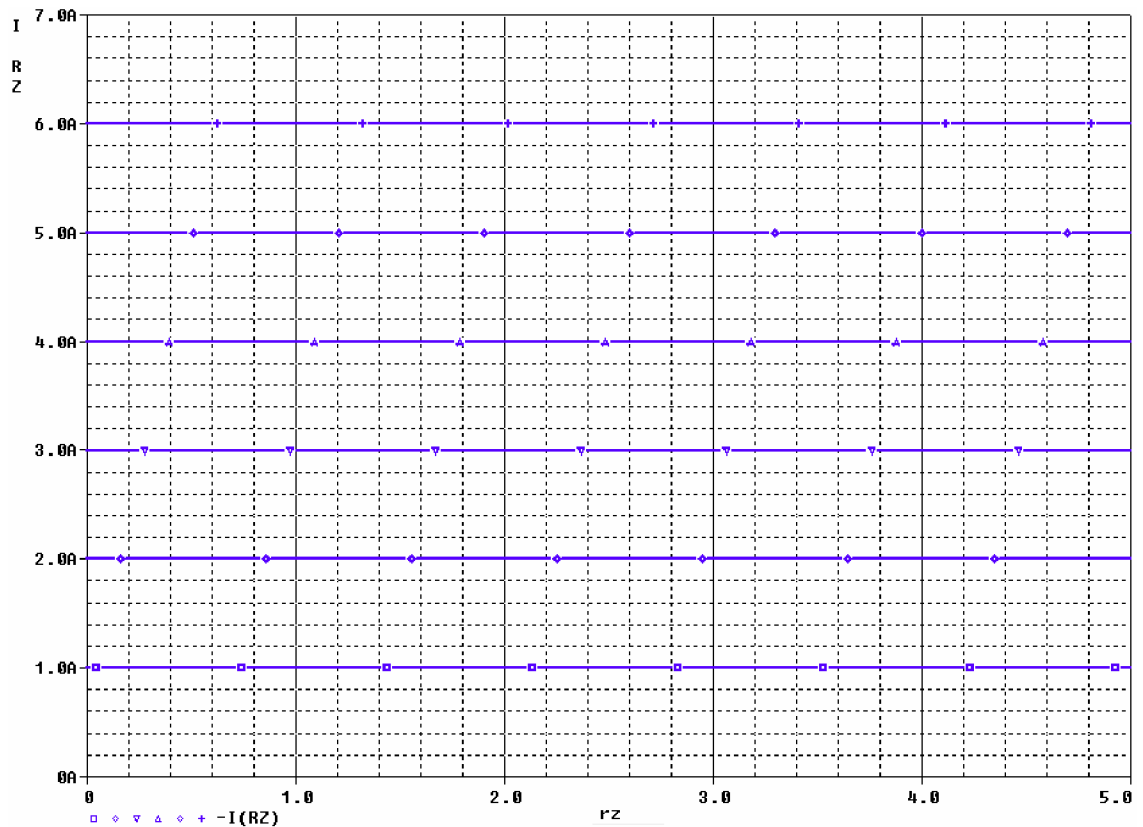


Obrázek 5.1: Simulovaný obvod – stejnosměrná analýza (DC sweep).

Jako první výsledek simulace, obrázek 5.2, je uvedena závislost proudu procházející zátěží $I(R_Z)$ na hodnotě R_Z . Velikost zátěže je rozmitána od $1 \mu\Omega$ představujícího zkrat po maximální velikost 5Ω . Křivek je více, pro různé nastavené velikosti proudu od 1 do 6 A s krokem 1 A. Jedná se vlastně o zatěžovací charakteristiky proudového zdroje, kde ale na vodorovné ose není velikost napětí na výstupních svorkách, ale velikost zatěžovacího odporu, který je této velikosti napětí přímo úměrný. Hodnoty proudu nastavené a hodnoty odečtené po simulaci se liší pouze v jednotkách mA. Srovnání je uvedeno v následující tabulce.

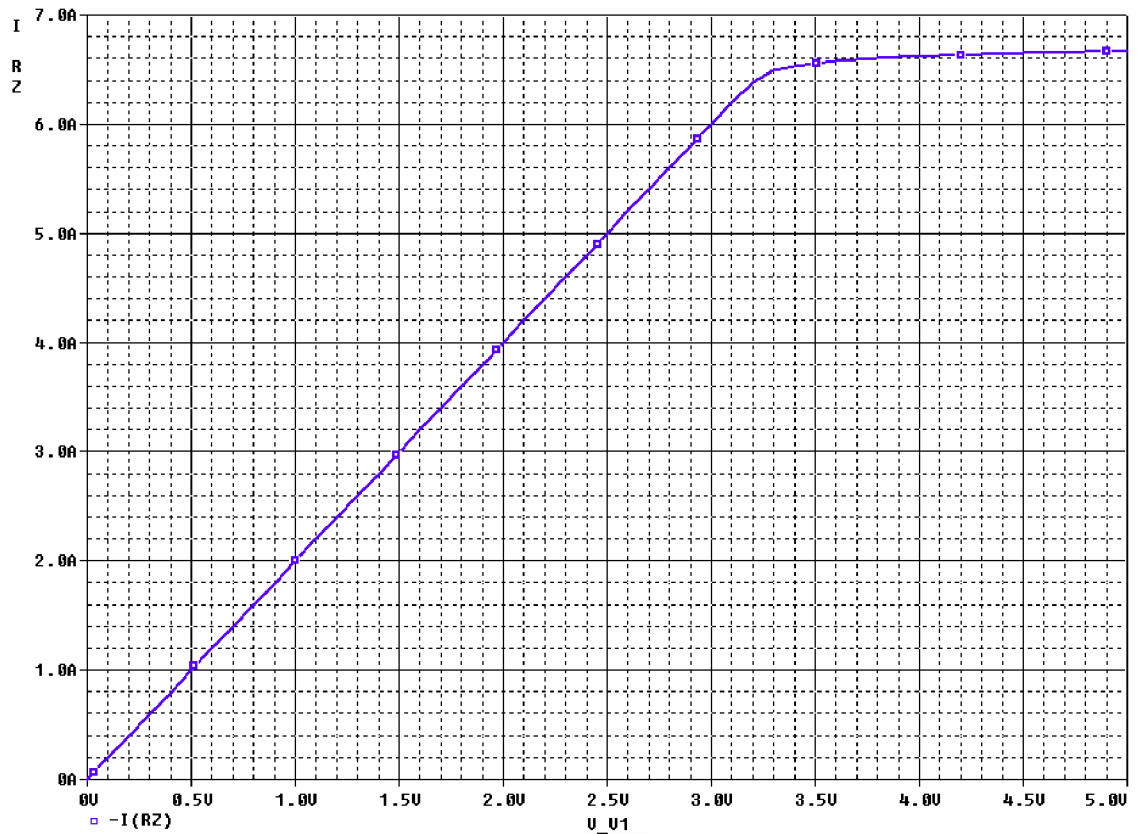
Tabulka 5.1: Srovnání zadaných a získaných hodnot proudu při stejnosměrné analýze.

nastavený proud [A]	1,000	2,000	3,000	4,000	5,000	6,000
získaný proud [A]	0,997	1,998	2,999	4,000	5,001	6,002



Obrázek 5.2: DC analýza – závislost proudu na velikosti zátěže.

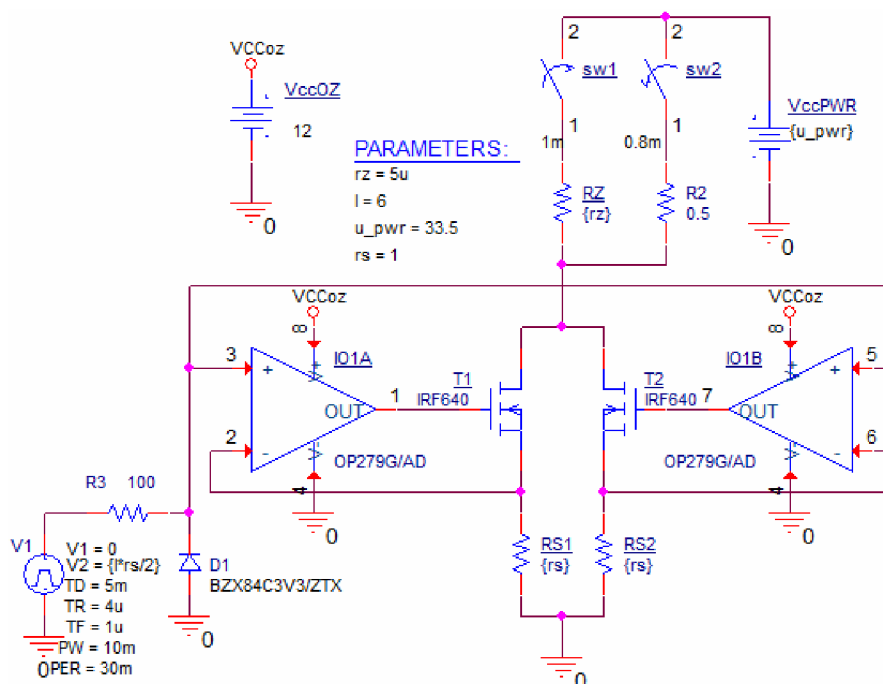
Další simulací byla ověřena funkčnost omezovacího obvodu pro vstupní řídicí napětí ze zdroje V_1 a tím i maximální velikost generovaného proudu $I(RZ)$. Jedná se vlastně o převodní charakteristiku simulovaného napětím řízeného proudového zdroje. Výsledná závislost je uvedena na obrázku 5.3.



Obrázek 5.3: DC analýza – převodní charakteristika proud. zdroje.

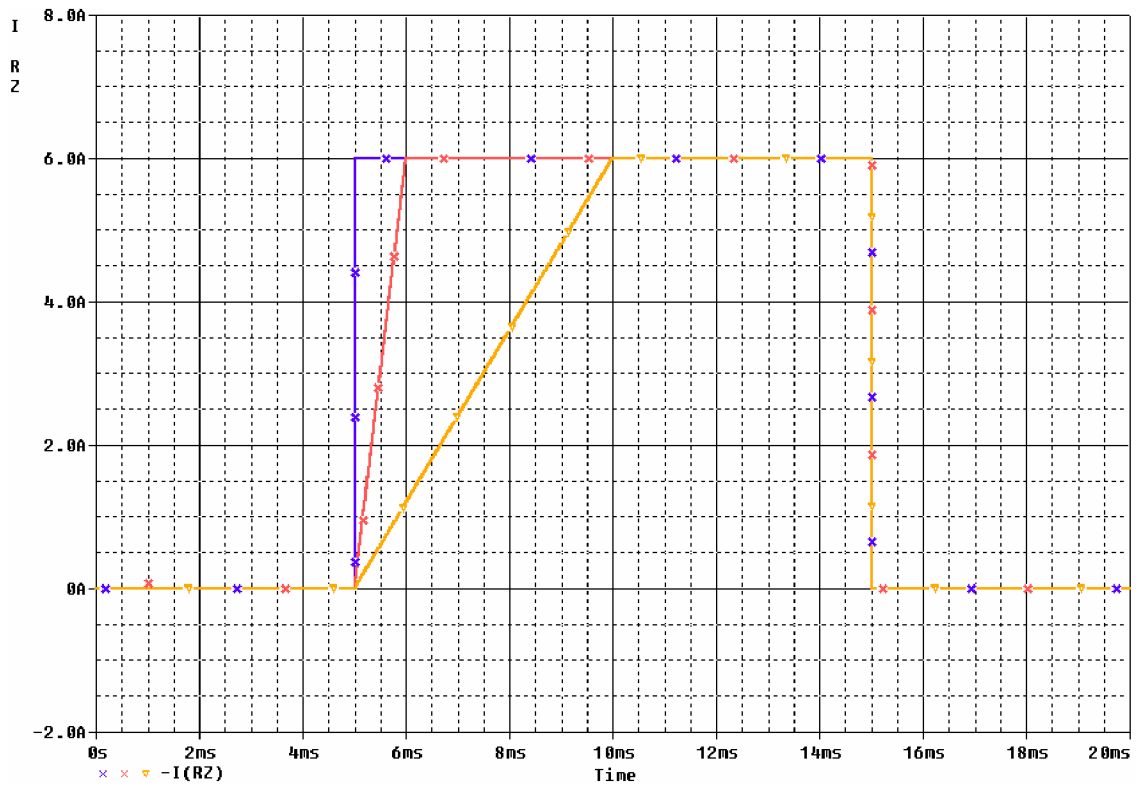
5.2 Simulace v časové oblasti (Time Domain)

Simulovaný obvod je uveden na obrázku 5.4. Jedná se o obměnu předchozího zapojení, které je nyní uzpůsobeno pro analýzu v časové oblasti. Zdroj generující řídicí napětí V_1 je nyní realizován pomocí prvku VPULSE, který zde zastoupí funkci DAC převodníku, který bude použit u reálného zapojení. Tento zdroj umožňuje vytvarovat impulzy s potřebnou dobou trvání, dobou náběhu a velikostí. Přepínače SW_1 a SW_2 zde plní funkci relé REL1 ve skutečném zapojení.



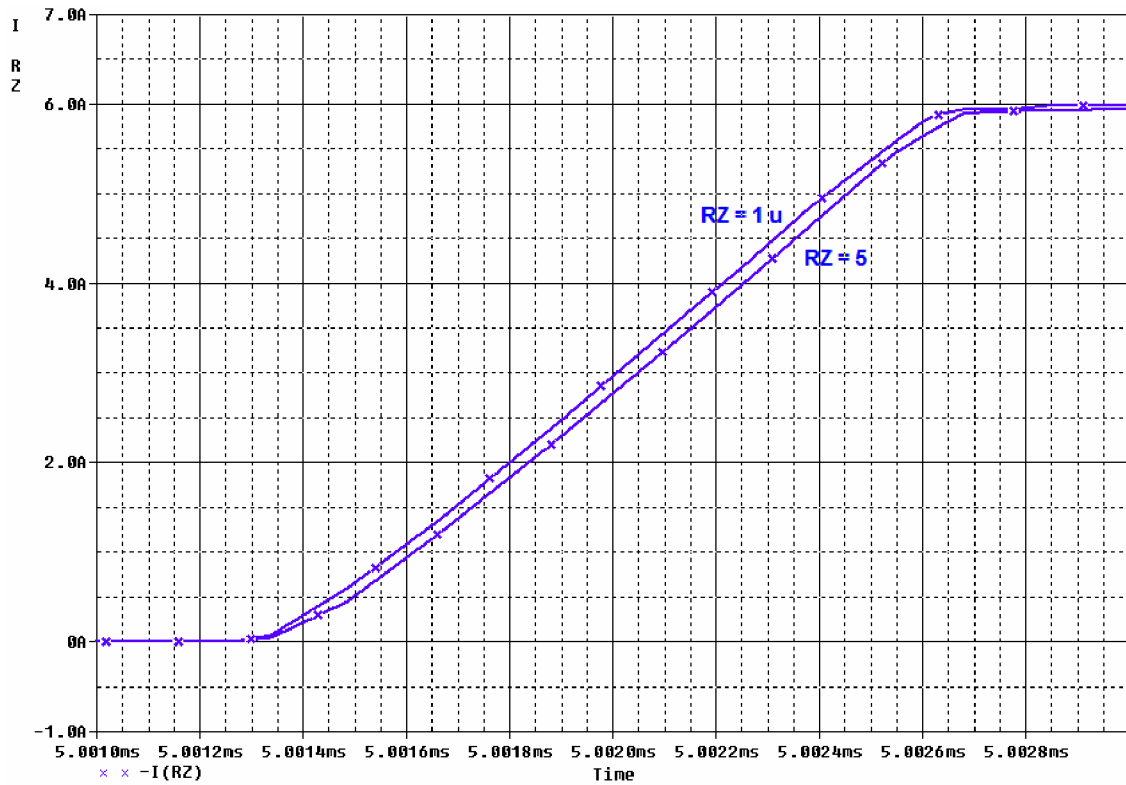
Obrázek 5.4: Simulovaný obvod – časová analýza (Time Domain).

První průběh, obrázek 5.5, znázorňuje generovaný impulz délky trvání 10 ms pro různé nastavené doby náběhu (1 μ s, 2 ms a 5 ms). Velikost proudového impulzu je nastavena na maximálních 6 A. Zátěží byl v tomto případě zkrat.



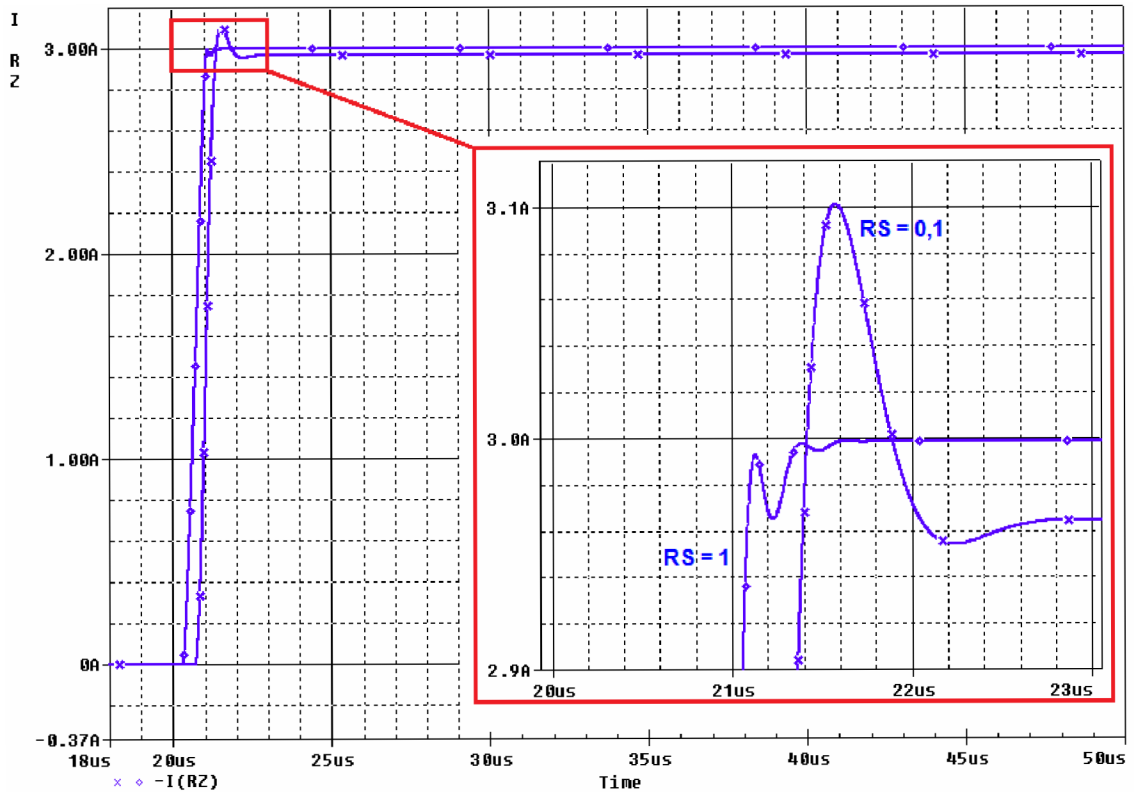
Obrázek 5.5: Proudové impulzy s různou dobou náběhu.

Na dalším průběhu, obrázek 5.6, je znázorněn detail nástupné hrany pulzu pro případ, kdy je zátěží zkrat nebo maximální zátěž 5Ω . Doba náběhu řídicího napětí byla nastavena na $1 \mu\text{s}$. Doba náběhu odečtená potom z výsledků simulace je pro zátěž 5Ω $1,005 \mu\text{s}$ a pro zkrat $1,007 \mu\text{s}$ (pomocí zabudované funkce měření „Evaluate Measurement“ – „Risetime_StepResponse...“). Došlo tedy k prodloužení náběhu o desetiny procenta. Proud byl opět nastaven na maximální hodnotu 6 A .



Obrázek 5.6: Detail nástupných hran impulzu pro různou zátěž.

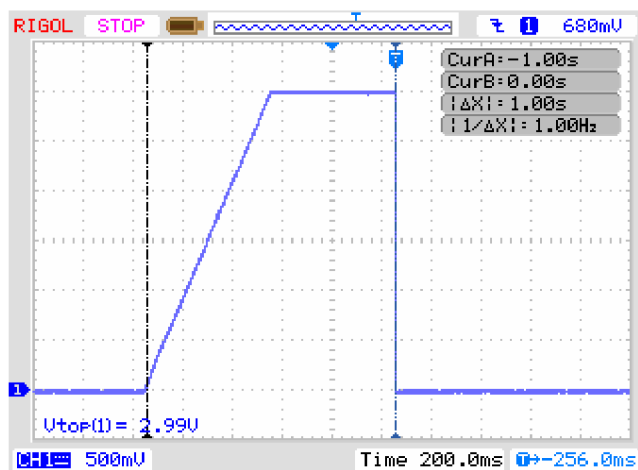
Na průběhu na obrázku 5.7 je znázorněn překmit, který vzniká na nástupné hraně pulzu pro dvě různé velikosti snímacího rezistoru R_S ($0,1 \Omega$ a 1Ω). Doba náběhu řídicího napětí byla nastavena opět na $1 \mu\text{s}$, proud byl nastaven na hodnotu 3 A , zátěž 5Ω . Překmit, který vzniká při $R_S 1 \Omega$ je výrazně menší, z tohoto důvodu byla zvolena právě tato hodnota i přes mnohem vyšší výkonovou ztrátu, která na tomto rezistoru vzniká.



Obrázek 5.7: Detail překmitu na nástupné hraně impulzu.

6 NAMĚŘENÉ VÝSLEDKY

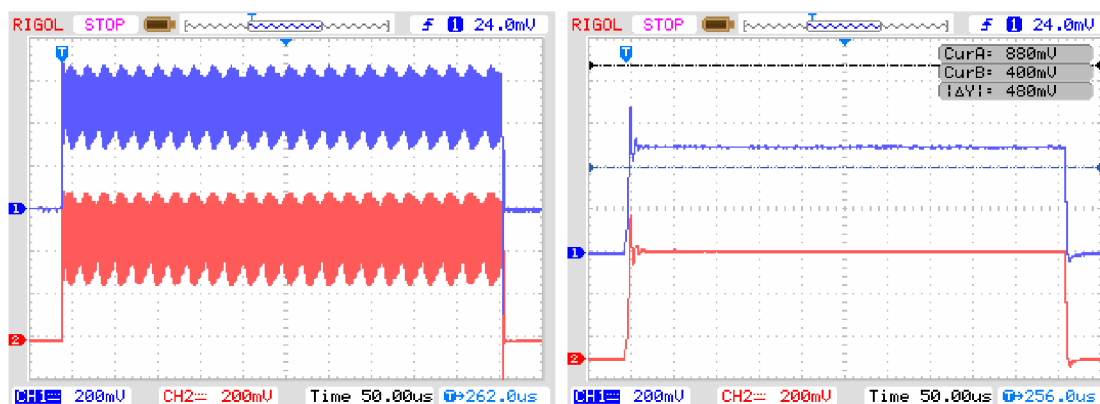
V této kapitole jsou uvedeny naměřené průběhy, získané pomocí měření osciloskopem na prototypu zařízení. Již dříve byl uveden jako příklad průběh řídicího napětí z DAC převodníku, obrázek 3.3, pro ilustraci „schodovitého“ průběhu, jako důsledek nízkého časového rozlišení tvorby řídicího napětí. Při delších časech náběžné hrany již tento problém není patrný, obrázek 6.1.



Obrázek 6.1: Průběh řídicího napětí, při t_{rise} 500 ms, t_{puls} 500 ms a I_{puls} 6 A (tzn. $U_{řidici}$ 3 V).

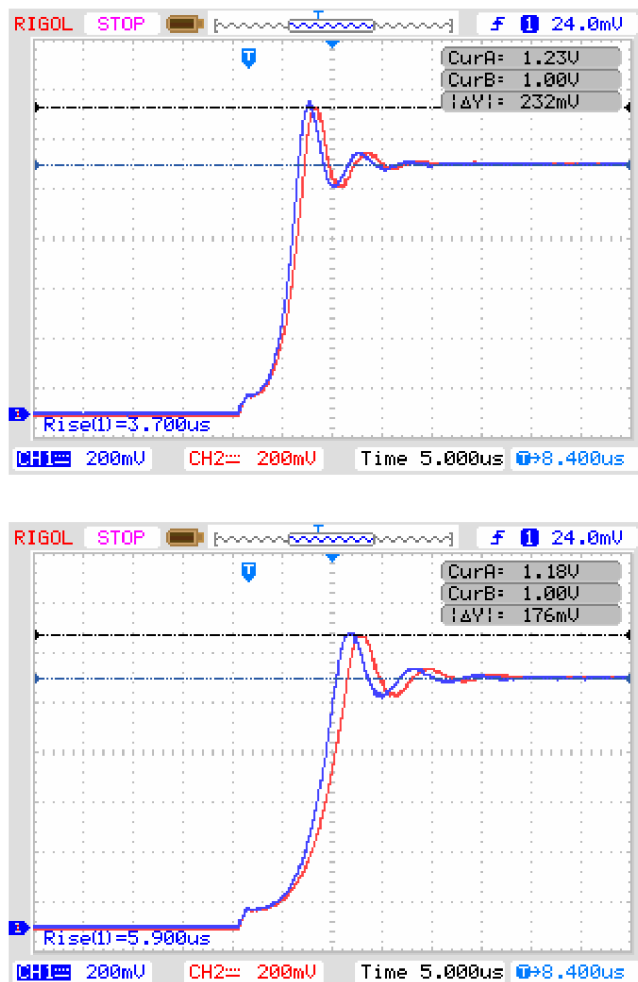
Na následujících obrázcích jsou uvedeny průběhy napětí na snímacích rezistorech výkonové části (modrý a červený průběh). Ty jsou přímo úměrné procházejícímu proudu a jejich součet (hnědý průběh) prochází připojenou zátěží. Zátěž tvořila paralelní kombinace dvou výkonových rezistorů 1 Ω .

Na obrázku 6.2 vlevo je ukázáno kmitání, které vznikalo v případě nastavení strmé náběžné hrany. Jak je již uvedeno dříve, to bylo potlačeno připojením kondenzátoru, mezi svorky GS výkonových tranzistorů, obrázek 6.2 vpravo.



Obrázek 6.2: Průběhy odpovídající proudu snímacími rezistory, kmitání.

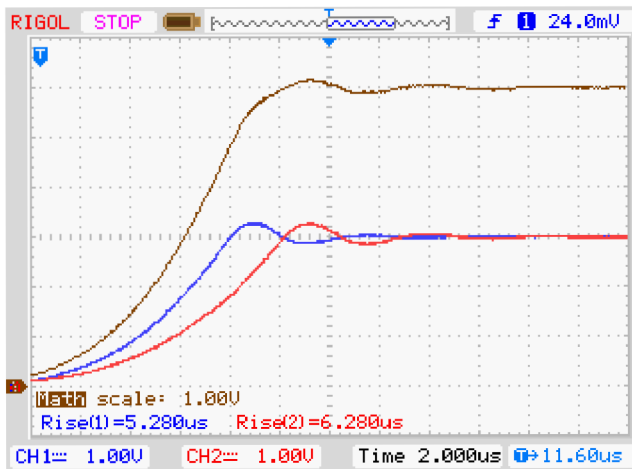
Na náběžné hraně vzniká překmit, který se s větší přidanou kapacitou zmenšuje. Zároveň s tím ovšem dochází k prodlužování náběžné hrany signálu. Detaily náběžných hran při různé velikosti připojené kapacity ukazuje obrázek 6.3. Nastaven byl proud 2 A.



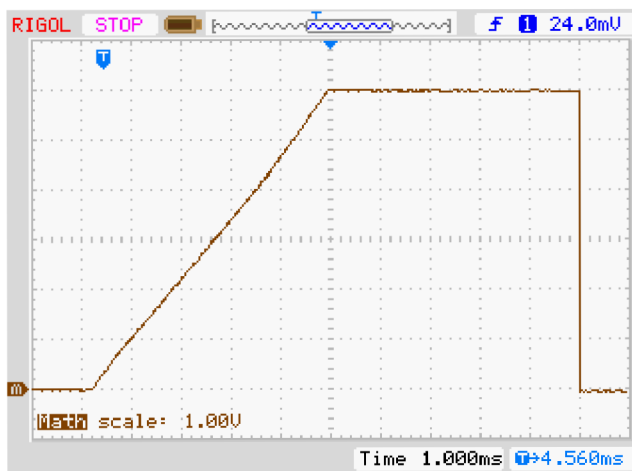
Obrázek 6.3: Detaily náběžných hran pro různé připojené kapacity, 400 nF (nahore), 660 nF (dole).

Na dalších průbězích je již nastaven maximální proud 6 A a různé časy náběžné hrany, kdy připojená kapacita zůstala 660 nF. Na obrázku 6.4 je nejvíce patrné, že díky různé kapacitě připojených kondenzátorů je zpoždění hran obou větví různé. To se může obrátit i ve výhodu, kdy se maxima překmitů jednotlivých větví „nepotkávají“ a výsledný překmit jejich součtu, tedy proudu, který prochází zátěží, není tak výrazný. V tomto případě se dokonce téměř setkávají maxima jednoho průběhu s minimy druhého.

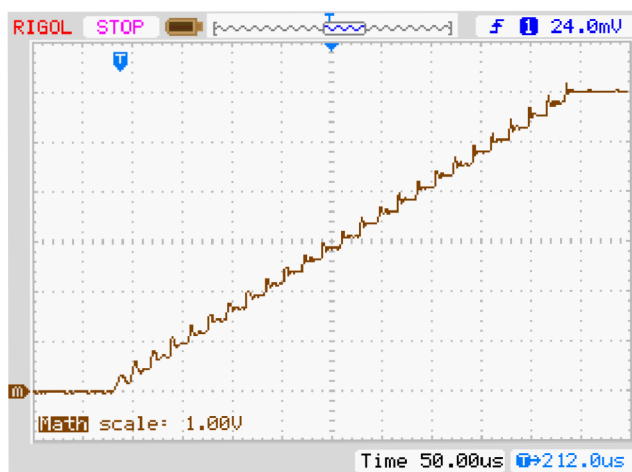
Na obrázcích 6.5 a 6.6 jsou pouze zobrazeny impulsy různých parametrů. Ty jsou uvedeny v titulku.



Obrázek 6.4: Detail náběžné hrany průběhu proudu jednotlivých větví (modrá, červená) a celkový zátěží, jejich součet (hnědá), nastaveno 6 A.

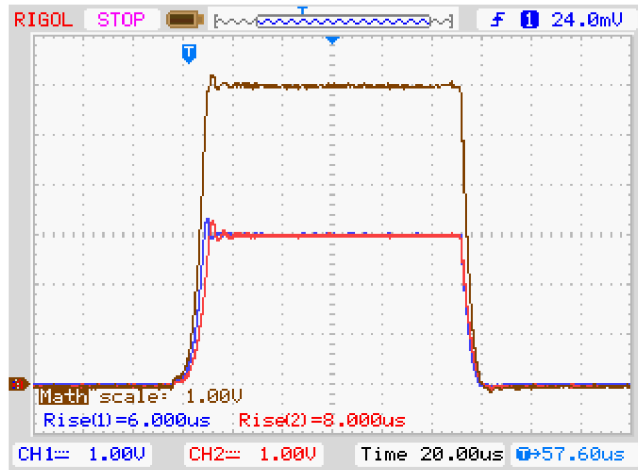


Obrázek 6.5: Průběh proudového impulsu 6 A, t_{rise} 5 ms, t_{puls} 5 ms.



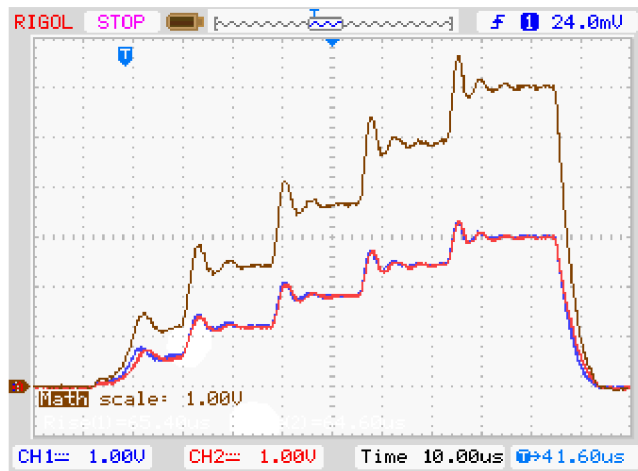
Obrázek 6.6: Průběh náběžné hrany proud. impulsu 6 A, t_{rise} 500 μ s.

Poslední obrázky vyobrazují průběhy maximálního proudu 6 A a minimální nastavitelné hodnoty doby trvání impulsu $t_{\text{puls}} 100 \mu\text{s}$, obrázek 6.7, a minimální nastavitelné doby trvání náběhu $t_{\text{rise}} 100 \mu\text{s}$, obrázek 6.8.



Obrázek 6.7: Průběh proudového impulsu 6 A, $t_{\text{puls}} 100 \mu\text{s}$.

U tohoto obdélníkového průběhu je doba náběžné hrany $7,6 \mu\text{s}$. U reálného obvodu došlo tedy proti simulacím k nárůstu. V simulaci tento čas dosáhl nepatrně přes $1 \mu\text{s}$.



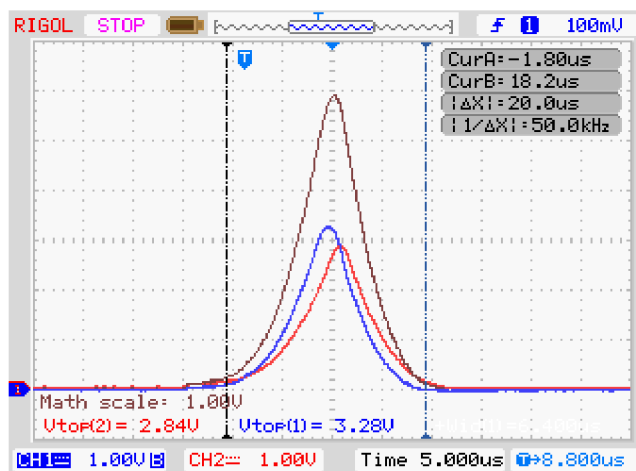
Obrázek 6.8: Průběh proudového impulsu 6 A, $t_{\text{rise}} 100 \mu\text{s}$.

Schodovitý průběh signálu by bylo možné zmírnit vyhlazením řídicího napětí pomocí integračního článku s časovou konstantou odpovídající jednomu kroku, tedy $20 \mu\text{s}$. To by ale mělo za následek i prodloužení náběhu signálu v případech, kdy to není žádoucí. Pomalé vybíjení, by navíc způsobilo prodloužení sestupné hrany impulsu. Po skončení impulsu ovšem dochází k odpojení zátěže pomocí relé, takže prodloužení sestupné hrany by až takový problém nepředstavovalo.

Další zmírnění schodovitého průběhu by mohlo být dosaženo, pokud by mikroprocesor zvládal hodnoty vzorků počítat rychleji a dosaženo by bylo lepšího časového rozlišení, využitím procesoru, který je uzpůsoben k výpočtům s čísly typu

float (s plovoucí řádovou čárkou). Použitý DAC převodník dovoluje obnovovat hodnotu na svém výstupu s periodou 1 μ s. Ve stávající situaci dokáže být vygenerováno řídicí napětí v podobě impulsu s dobou trvání 8,4 μ s, toto je omezeno rychlostí odeslání hodnot do převodníku. Ovšem nejkratšího proudového impulsu pro maximální nastavený proud bylo dosaženo asi 20 μ s, jak je ukázáno na obrázku 6.9.

Kromě zmírnění schodovitého průběhu by zároveň došlo s rychlejší vzorkovací frekvencí ke zmenšení překmitů na nástupných hranách těchto schodů, zvláště krátkých časů náběhu impulsu. V průběhu na obrázku 6.8 je překmit na jednotlivých vzorcích téměř 400 mV, tedy 400 mA. V průběhu na obrázku 6.6 je tento překmit již jen 120 mV (120 mA). Díky rychlejší vzorkovací frekvenci by nebyl mezi jednotlivými vzorky příliš velký rozdíl v hodnotě úrovně, změna by byla pozvolnější a tím docíleno mírnějších překmitů.



Obrázek 6.9: Nejkratší dosažený proudový impuls při max. proudu 6 A.

Následující tabulka má nakonec za úkol shrnout jakých bylo dosaženo parametrů prototypu vytvořeného zařízení, tedy zdroje generujícího proudové impulsy definovaného náběhu a trvání:

Tabulka 6.1: Dosažené parametry prototypu zdroje generujícího proudové impulsy definovaného náběhu a trvání.

Parametr	Hodnota	
Proudový rozsah	2 mA - 6 A	
Doba	impulsu t_{celk}	100 μ s - 1 s
	náběhu impulsu t_{rise} *	100 μ s - 1 s
	neměnné části impulsu t_{puls} *	100 μ s - 1 s
Zátěž **	0 - 4,6 Ω	
Doba	nejkratšího dosažitelného impulsu ***	20 μ s
	náběžné hrany při $t_{\text{rise}} = 0$ a $I = 6$ A	7,6 μ s

* Maximální hodnota $t_{\text{celk}} = t_{\text{rise}} + t_{\text{puls}}$ je omezena na 1 s

** Může být i vyšší pro menší zvolený proud, viz. Příloha G, ale pro tento rozsah je zajištěn maximální proud

*** Při proudu $I_{\text{max}} 6$ A

ZÁVĚR

V této práci bylo vybráno obvodové zapojení pro zařízení určeného ke generování proudového impulsu zadaných parametrů. Je jím napětím řízený proudový zdroj. Obvod je navrhnut tak, že generovaný impuls může dosáhnout úrovně 0 až 6 A s krokem 2 mA. Předpokládáno bylo, že pulzy nebudou dobou trvání přesahovat 1 s. Časové parametry impulsu je možné zadávat s krokem 100 μ s. Zdroj je dimenzován tak, aby celý uvedený rozsah proudů byl schopen dodat do zátěže tvořené elektrickým odporem 0 až téměř 5 Ω (4,6 Ω). V případě, že je zvolen menší proud než je maximum, mohla by být hodnota zátěže vyšší s nepatrnou úpravou firmawaru (viz. Příloha G). U uvedeného rozpětí je však zajištěn celý proudový rozsah.

Řešeno je snižování značné výkonové ztráty na aktivních prvcích zapojení. Jedním řešením je znásobení počtu větví výkonové části zdroje, kterými prochází generovaný proud, v tomto případě došlo ke zdvojení. Jako další možnost je navržena snižování napájecího napětí, které má na tuto ztrátu největší vliv, pomocí použití transformátoru s dvěma vinutími, která se přepínají podle zadané předpokládané zátěže a požadovaného proudu.

Řízení proudového zdroje, tedy tvorbu řídicího napětí, zajišťuje digitálně analogový převodník. Data pro něj obstarává 8 bitový mikroprocesor ATmega1284P, který se zároveň stará o chod celého zařízení. Aby tvar impulsu splňoval zadané parametry je pro přesnější výpočet vzorků řídicího napětí v čase počítán s datovým typem float. I přes vysokou pracovní frekvenci procesoru 20 MHz je tento výpočet bohužel časově náročný a vzorkovací perioda je potom 20 μ s. To se projevuje značným schodovitým průběhem, který je více patrný u časově kratších náběžných hran. Proto byl časový krok zadávaných hodnot zvolen na 100 μ s. Takto obsahuje 5 celých vzorků. Použitý převodník dovoluje hodnotu na svém výstupu obnovovat po 1 μ s. Ovšem nejkratší impuls o maximální velikosti proudu, kterého bylo dosaženo měl dobu trvání asi 20 μ s.

Zařízení je ovládáno pomocí uživatelského rozhraní tvořeného maticovou klávesnicí a LCD displejem připojených k použitému mikroprocesoru. Je zde vytvořeno jednoduché menu, kde se zadávají požadované parametry impulsu. Kromě toho je možné ovládání i pomocí aplikace běžící v PC. Spojení je zajištěno díky převodníku s obvodem FTDI pomocí USB sběrnice. Aplikace má grafické prostředí a dovoluje pohodlnější ovládání zařízení.

Fungování navrženého řízeného proudového zdroje bylo nejprve ověřeno počítačovými simulacemi v programu PSpice.

Vyrobena byl prototyp mikroprocesorového obvodu a obvod řízeného proudového zdroje. Na nich bylo ověřeno fungování a zaznamenány měření pomocí osciloskopu průběhy generovaných proudových impulsů různých parametrů.

Navrženy jsou také napájecí zdroje, které by byly součástí případného kompletního zařízení. Jedná se o zdroj pro výkonovou část proudového zdroje a pomocný zdroj pro mikroprocesorový obvod a obvod řízeného proudového zdroje. Všechny tyto moduly by se nakonec případně umístily do přístrojové krabice.

LITERATURA

- [1] KREJČÍŘÍK, A. *Zdroje proudu* : BEN-technická literatura, Praha 1999, 112 s. 1.vydání ISBN 80-86056-84-8.
- [2] BRANČÍK, L. *Elektrotechnika 1*. Brno: FEKT VUT v Brně, 2004. ISBN: 80-214-2607- 1.
- [3] Quantum Composers, Inc., [online], [cit.11-2013], *9730 Series Digital Delay Current Generator*. Datasheet, 4 s., 2012, dostupné z WWW: <http://www.QuantumComposers.com>
- [4] International rectifier, [online], [cit. 11-2013], Katalogový list IRF640, dostupné z WWW: <http://www.irf.com/product-info/datasheets/data/irf640npbf.pdf>
- [5] PATOČKA, M. *Vybrané statě z výkonové elektroniky, Svazek I., Tepelné jevy a činný výkon*. Skriptum VUT Brno, FEKT, Brno 2002, vydání druhé.
- [6] Texas instruments Inc., [online], [cit. 2-2014], Katalogový list TLV5636, dostupné z WWW: <http://www.ti.com/product/tlv5636>.
- [7] Atmel corporation, [online], [cit. 3-2014], Katalogový list ATmega1284P, dostupné z WWW: <http://www.atmel.com/devices/ATMEGA1284P.aspx>.
- [8] FRÝZA, T. [online], [cit. 4-2014] Stránky předmětu Mikroprocesorová technika a embedded systémy, dostupné z WWW: http://www.urel.feec.vutbr.cz/~fryza/?Mikroprocesorov%26aacute%3B_technika_a%26nb sp%3Bembedded_syst%26aacute%3Bmy.
- [9] FLEURY, P. LCD Library for HD44870 based LCD's [online]. 2006 . Dostupné na WWW: <http://homepage.hispeed.ch/peterfleury/avr-software.html>.
- [10] GM electronic, spol. s r. o. [online], [cit. 2-2014], Maticová klávesnice 4x4, dostupné z WWW: <http://www.gme.cz/f-kv16key-black-p637-091>.
- [11] DX.com [online], [cit. 3-2014], Převodník USB na TTL s FTDI, dostupné z WWW: <http://www.dx.com/p/ftdi-basic-breakout-arduino-usb-to-ttl-upload-tool-for-mwc-black-142041>.
- [12] Atmel corporation, [online], [cit. 3-2014], Vývojové prostředí AtmelStudio6, dostupné z WWW: http://www.atmel.com/microsite/atmel_studio6/
- [13] Python Software Foundation, [online], [cit. 4-2014], Stránky programovacího jazyka Python, dostupné z WWW: <https://www.python.org/>.
- [14] LIECHTI, C., [online], [cit. 4-2014], PySerial, modul pro jazyk Python k ovládní sériového portu, dostupné z WWW: <http://pyserial.sourceforge.net/pyserial.html>.
- [15] Python py.cz, [online], [cit. 4-2014], Stránky s tutoriály a návody k modulu Tkinter jazyka Python, dostupné z WWW: <http://www.py.cz/Tkinter>.
- [16] Texas instruments Inc., [online], [cit. 2-2014], Katalogový list ISO7640, dostupné z WWW: <http://www.ti.com/product/iso7640fm>.
- [17] SIEGEL, E. Isolation navigation frustration cessation education: The basics-Part 1[online]. EDN Network [cit. 4-2014], dostupné z WWW:<http://www.edn.com/design/sensors/4423281/Isolation-navigation-frustration-cessation-education--The-basics-Part-1>.
- [18] GM electronic, spol. s r. o. [online], [cit. 2-2014], Usměrňovací můstek, dostupné z WWW: <http://www.gme.cz/b250c10000dr-p227-051>.

[19] KREJČÍŘÍK, A. Lineární napájecí zdroje. 1. Praha: BEN, 2005. ISBN 80-7300-002-4.

SEZNAM SYMBOLŮ, VELIČIN A ZKRATEK

Kapitola 1

R_Z	Velikost odporu zátěže
U	Napětí na výstupních svorkách zdroje
U_{Ri}	Napětí na vnitřním odporu zdroje
U_0	Napětí ideálního zdroje napětí
R_i, G_i	Vnitřní odpor, vodivost zdroje
I_0	Proud ideálního zdroje proudu
i	Proud řízeného zdroje proudu
S	Převodní vodivost řízeného zdroje proudu
u_f, U_1	Řídící napětí řízeného zdroje proudu
U_{CC}	Napájecí napětí
OZ	Operační zesilovač
JFET	Junction Field Effect Transistor - tranzistor řízený elektrickým polem
MOSFET	Metal Oxide Semiconductor Field Effect Transistor - tranzistor řízený elektrickým polem s vodivostním kanálem ve struktuře kov-oxid-polovodič

Kapitola 2

I_{pulz}	Jmenovitá velikost proudového impulsu
t_r	Doba trvání náběžné hrany impulsu
t_{pulz}	Doba trvání impulsu
I	Velikost generovaného proudu
U_{RZ}	Napětí na zátěži
U_{DS}	Napětí mezi svorkami DS tranzistoru
U_{RS}	Napětí na snímacím rezistoru
R_{DSon}	Hodnota odporu mezi svorkami tranzistoru DS v saturaci

P_{DS}	Výkonová ztráta na tranzistoru
E_{puls}	Energie jednoho proudového impulsu
$P_{stř} , P_{ztr}$	Střední hodnota ztrátového výkonu
R_{vH}	Tepelný odpor chladiče
R_{wC}	Tepelný odpor přechodu čip - pouzdro
R_{vCH}	Tepelný odpor přechodu pouzdro – chladič
T_0	Teplota okolí
ΔT	Oteplení oproti teplotě okolí
T_{jmax}	Maximální dovolená teplota čipu
n	Počet bitů rozlišení DAC převodníku
U_{REF}	Referenční napětí DAC převodníku
N	Vstupní číslo pro převod DAC převodníku
U_{OUT_LSB}	Hodnota výstupního napětí DAC převodníku, připadající na nejméně významný bit vstupní hodnoty

DAC	Digital to Analog Converter – digitálně analogový převodník
D, S	Drain, Source – označení svorek unipolárního tranzistoru
LSB	Least Significant Bit – nejméně významný bit binárního čísla
SPI	Serial Peripheral Interface – jeden ze standardů sériové komunikační sběrnice
ADC	Analog to Digital Converter – analogově digitální převodník

Kapitola 3

t_{puls}	Doba trvání neměnné části proudového impulsu
t_{rise}	Doba náběžné hrany proudového impulsu
t_{celk}	Celková doba trvání proudového impulsu
I_{plus}	Přírůstek proudu, připadající na jeden časový vzorek
$kruků I$	Interval hodnot zasílaných do DAC převodníku v rámci generovaného impulsu
$kruků t$	Počet časových kroků, mezi které je rozsah proudu v rámci generovaného impulsu nutno rovnoměrně rozdělit

Kapitola 4

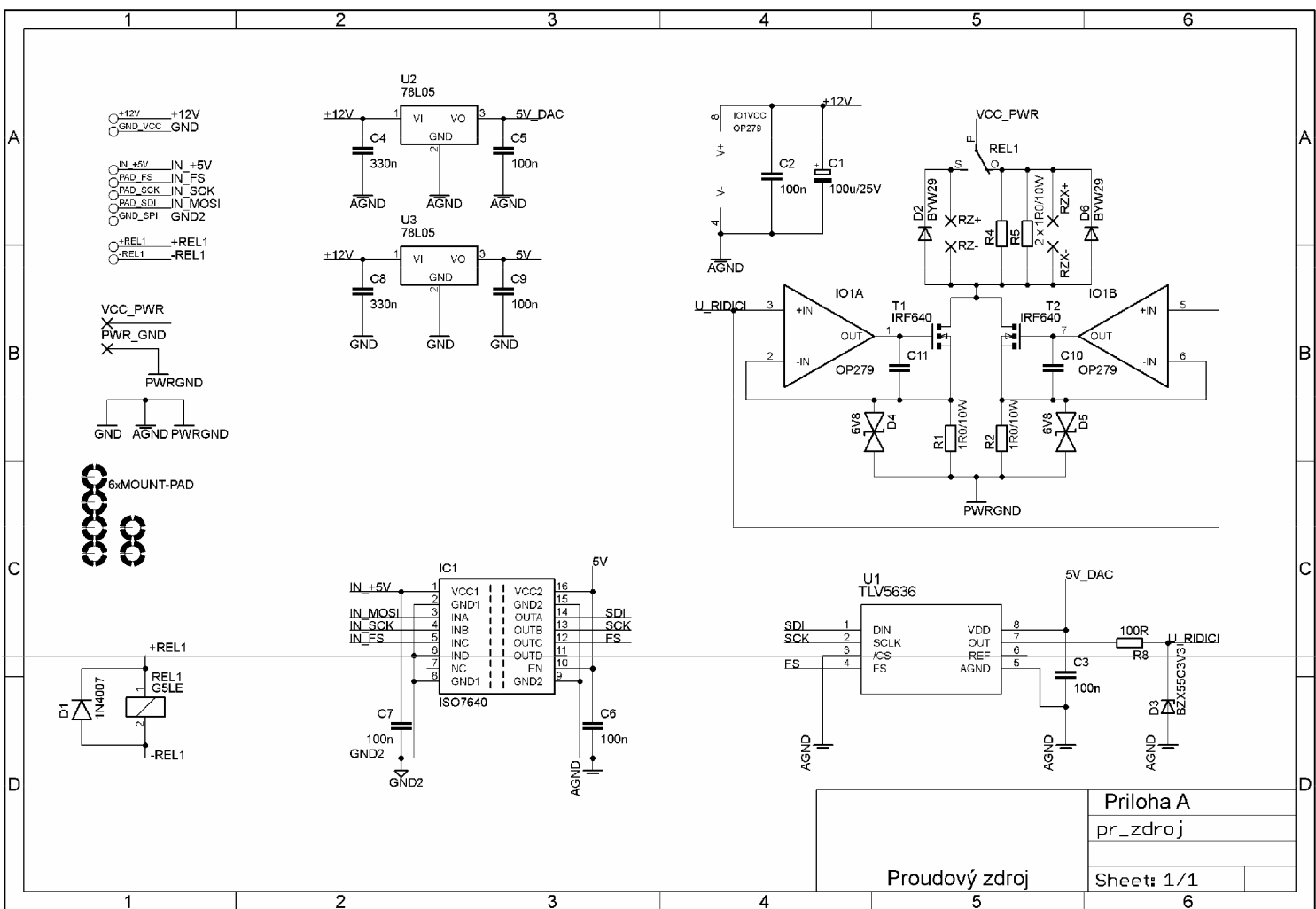
$P_{ZTR7812}$	Ztrátový výkon na lineárním stabilizátoru
U_{AC}	Efektivní hodnota napětí sekundárního vinutí transformátoru
U_f, U_{usm}	Úbytek napětí na můstkovém usměrňovači
U_o	Výstupní hodnota napětí lin. stabilizátoru
I	Proud stabilizátorem
R_{vH}	Tepelný odpor chladiče
R_{wC}	Tepelný odpor přechodu polovodič pouzdro
R_{vCH}	Tepelný odpor přechodu pouzdro chladič
ΔT	Povolené oteplení chlazené součástky

SEZNAM PŘÍLOH

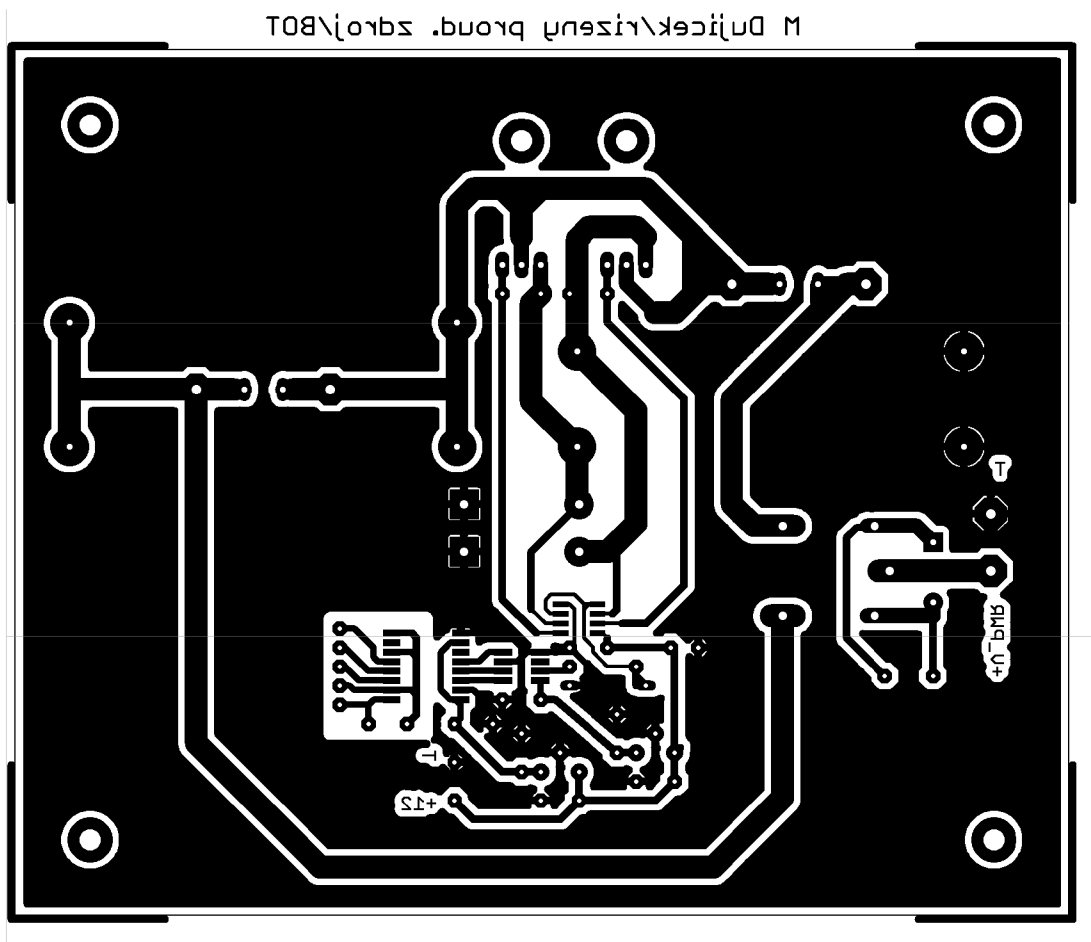
A	Řízený proudový zdroj	48
A.1	Obvodové zapojení	48
A.2	Deska plošného spoje.....	49
A.3	Osazovací plánec	50
B	Řídící procesorový obvod	51
B.1	Obvodové zapojení	51
B.2	Deska plošného spoje.....	52
B.3	Osazovací plánec	53
C	Pomocný zdroj	54
C.1	Obvodové zapojení	54
C.2	Deska plošného spoje.....	55
C.3	Osazovací plánec	55
D	Zdroj výkonové části	56
D.1	Obvodové zapojení	56
D.2	Deska plošného spoje.....	57
D.3	Osazovací plánec	57
E	Seznam součástek	58
F	Snímek prototypu zařízení	60
G	Závislost maximální zátěže na nastaveném proudu	61

A ŘÍZENÝ PROUDOVÝ ZDROJ

A.1 Obvodové zapojení

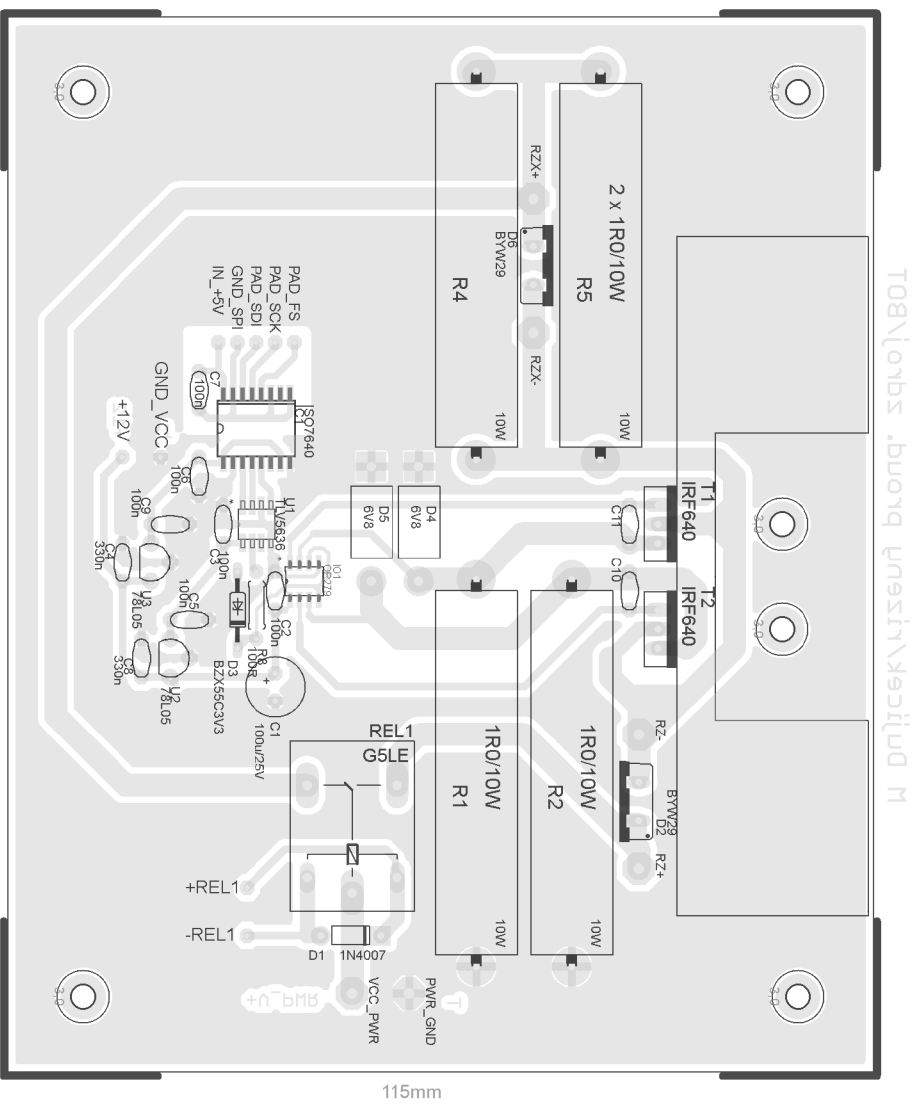


A.2 Deska plošného spoje



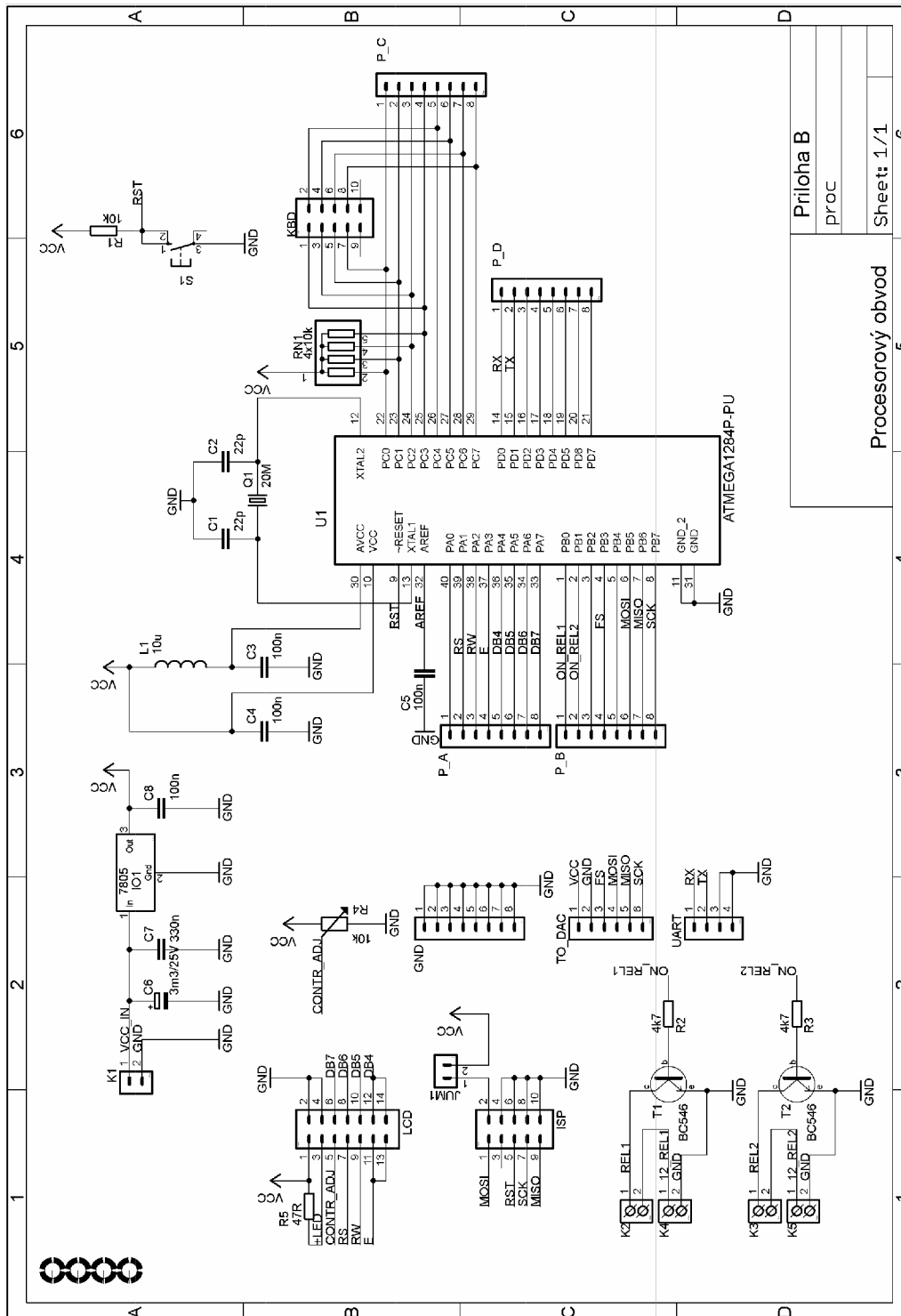
Rozměr desky 140 x 115 [mm]

A.3 Osazovací plánek

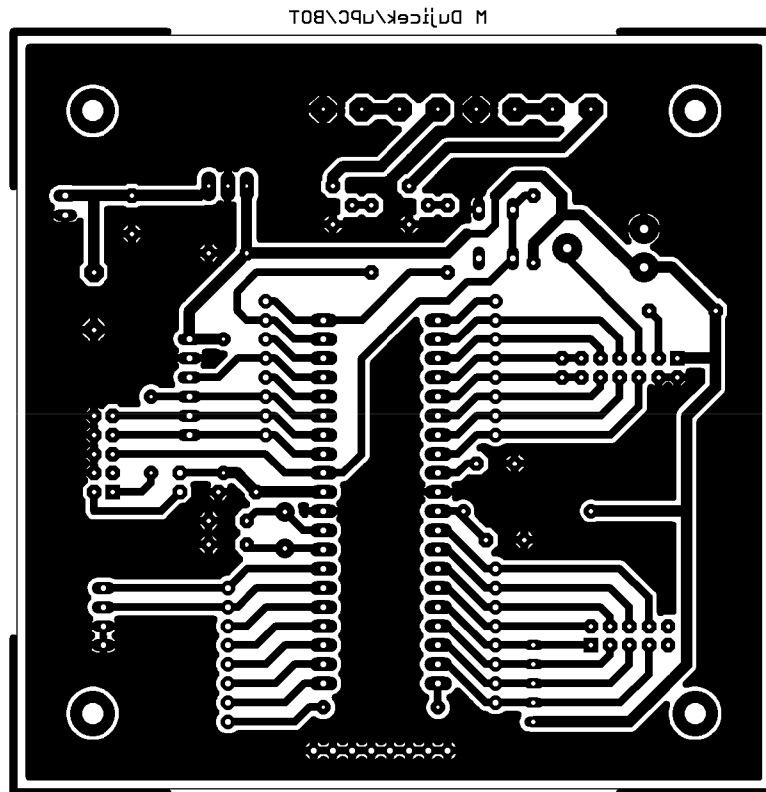


B ŘÍDÍCÍ PROCESOROVÝ OBVOD

B.1 Obvodové zapojení

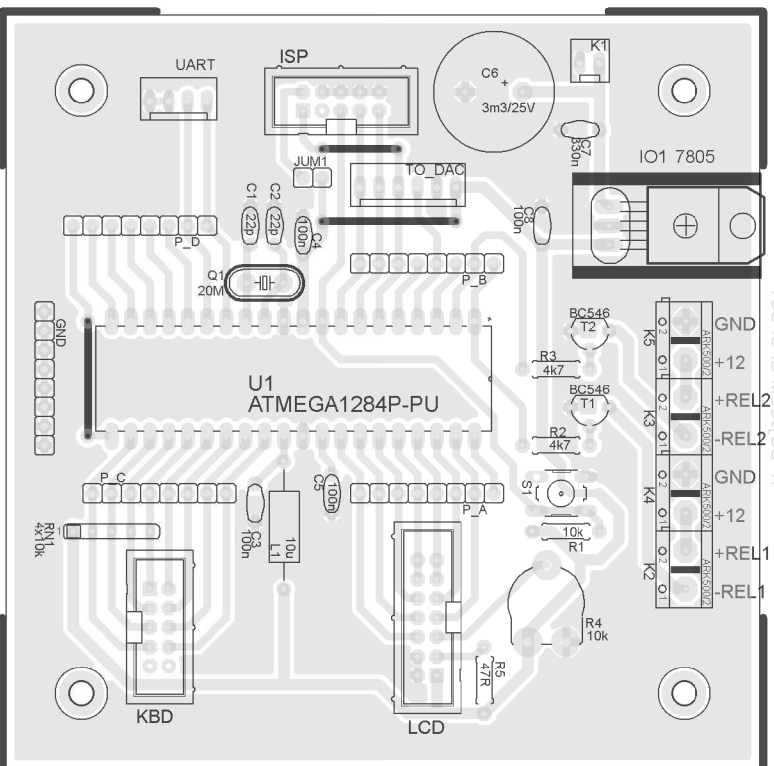


B.2 Deska plošného spoje



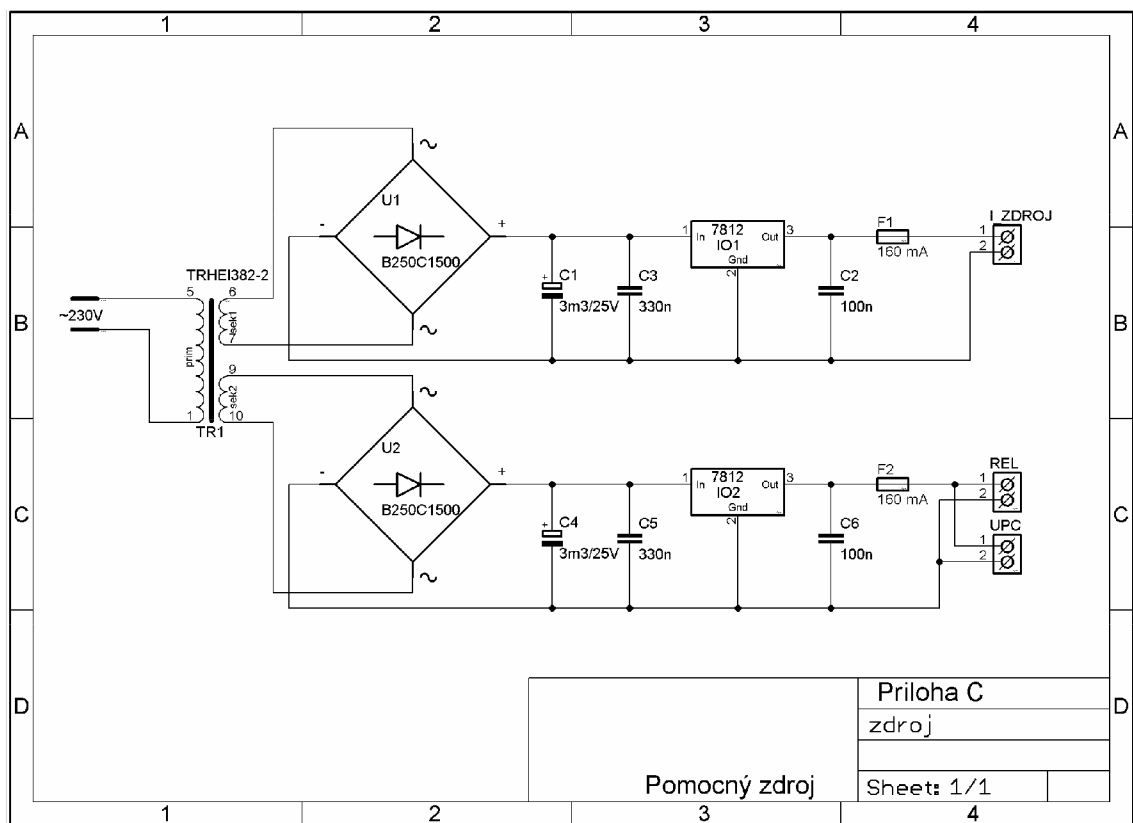
Rozměr desky 100 x 100 [mm]

B.3 Osazovací plánek

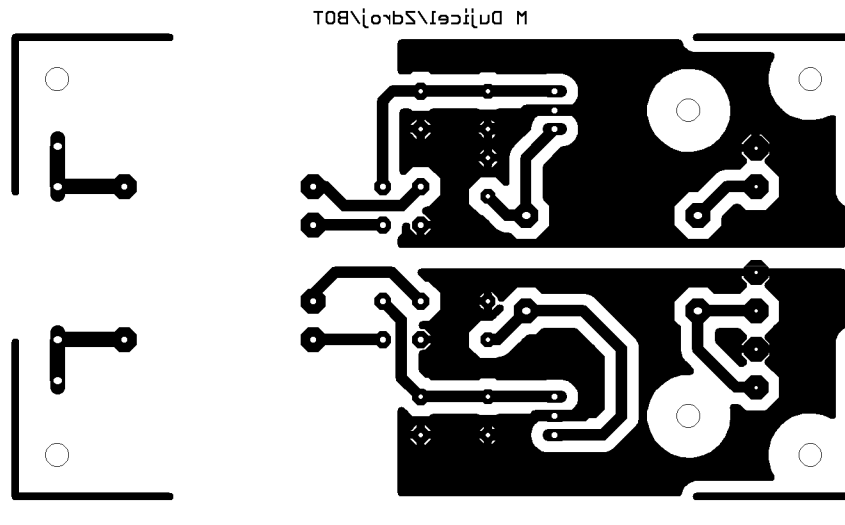


C POMOCNÝ ZDROJ

C.1 Obvodové zapojení

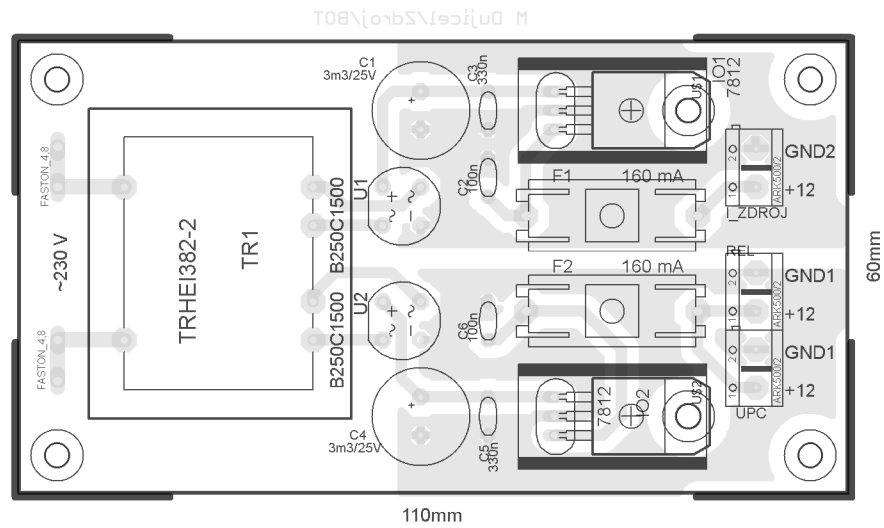


C.2 Deska plošného spoje



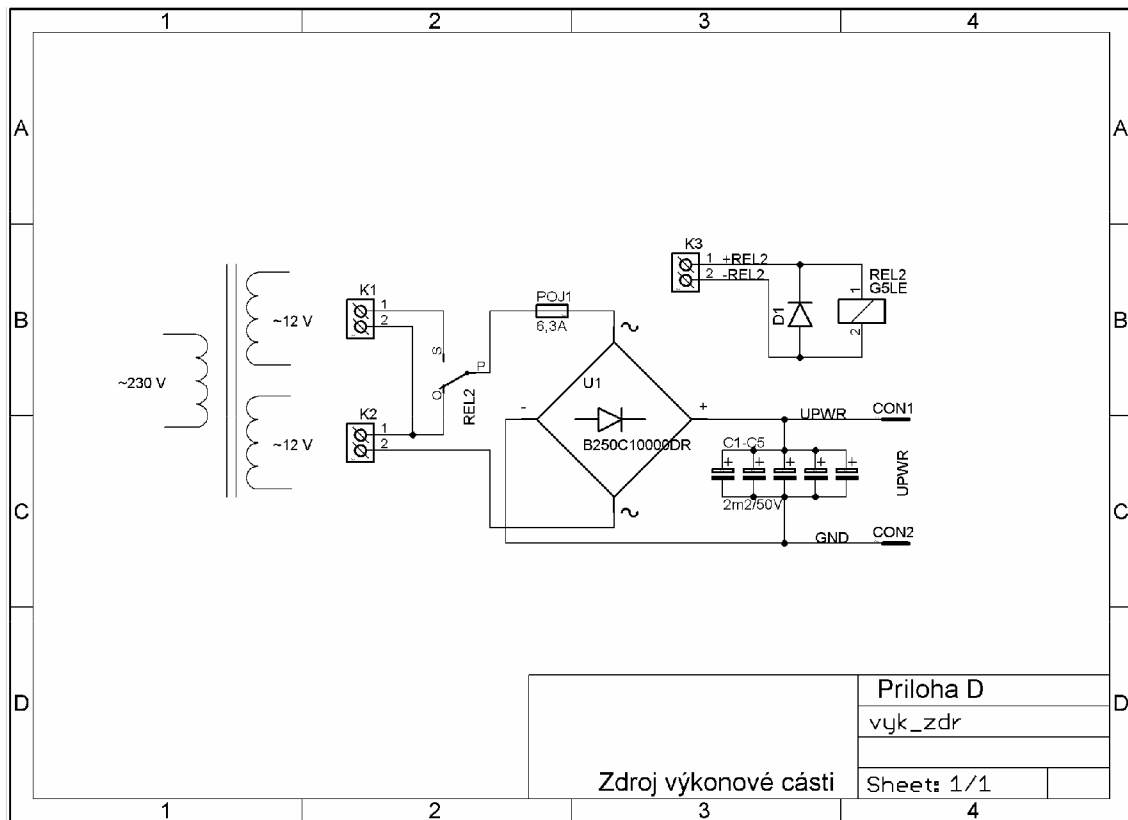
Rozměr desky 110 x 60 [mm]

C.3 Osazovací plánek

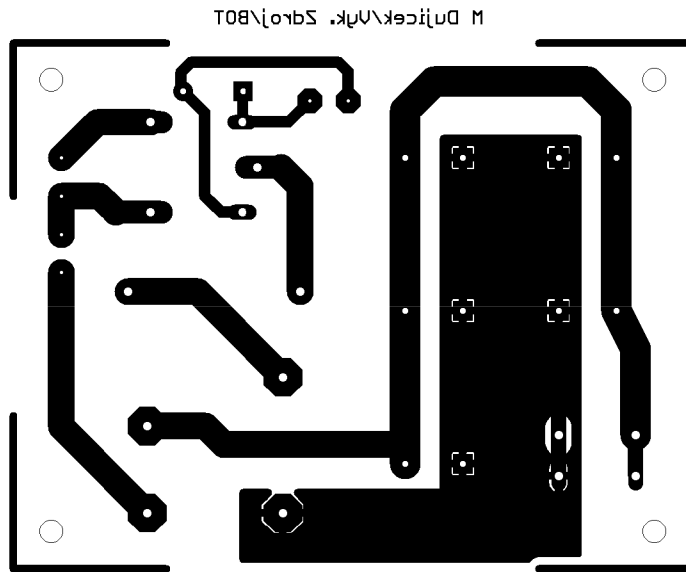


D ZDROJ VÝKONOVÉ ČÁSTI

D.1 Obvodové zapojení

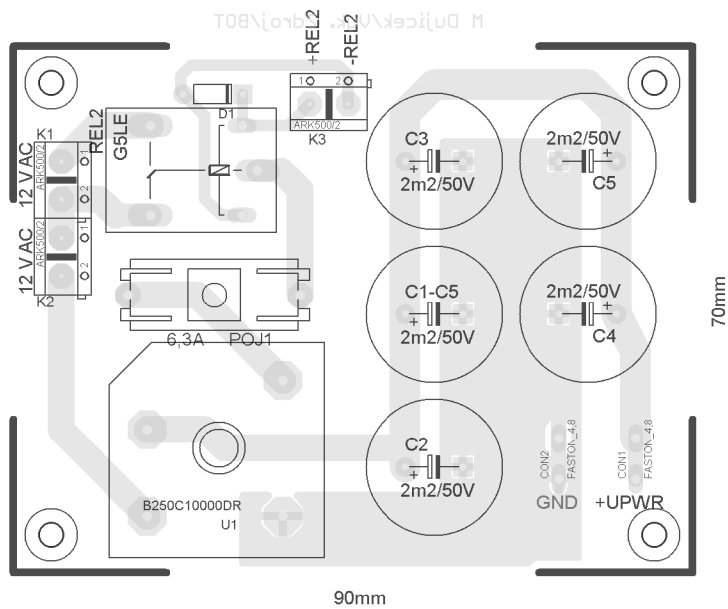


D.2 Deska plošného spoje



Rozměr desky 90 x 70 [mm]

D.3 Osazovací plánek



E SEZNAM SOUČÁSTEK

Řízený proudový zdroj

Označení	Hodnota	Pouzdro	Popis
C1	100u/25V	RM3,5-8	Elektrolytický kond.
C2, C3, C5-C7, C9-C11	100n	RM5	Keramický kond.
C4, C8	330n	RM5	Keramický kond.
D1	1N4007	DO41	Dioda
D2, D6*	BYW29	DO220S	Dioda
D3	BZX55C3V3	DO35Z10	Zenerova dioda 3,3 V
D4, D5	6V8	DO201AEB	Transil 6,8 V
IC1	ISO7640	SO-16DW	Polovod. Isolátor
IO1	OP279	SOIC	Operační zesilovač
R1-R3, R4*, R5*	1R0/10W	R_10W	Výkonový rezistor
R8	100R	0207	Rezistor metalizovaný
REL1	G5LE	G5LE	Relé
T1, T2	IRF640	TO-220S	Výkonový MOSFET tranzistor
U1	TLV5636	SOIC	DA převodník
U2, U3	78L05	TO-92C	Lin. stabilizátor
* Není třeba osazovat, pouze k testovacím účelům			

Napájecí zdroj výkonové části

Označení	Hodnota	Pouzdro	Popis
C1-C5	2m2/50V	RM7,5-18	Elektrolytický kond.
D1	1N4007	DO41	Dioda
K1-K3	ARK500/2	ARK500/2	Svorkovnice
POJ1	6,3A	POJ_KS20	Tavná pojistka + držák
REL2	G5LE	G5LE	Relé
U1	B250C10000DR	DB2	Usměrňovací můstek
2x	FASTON_4,8		Faston konektor

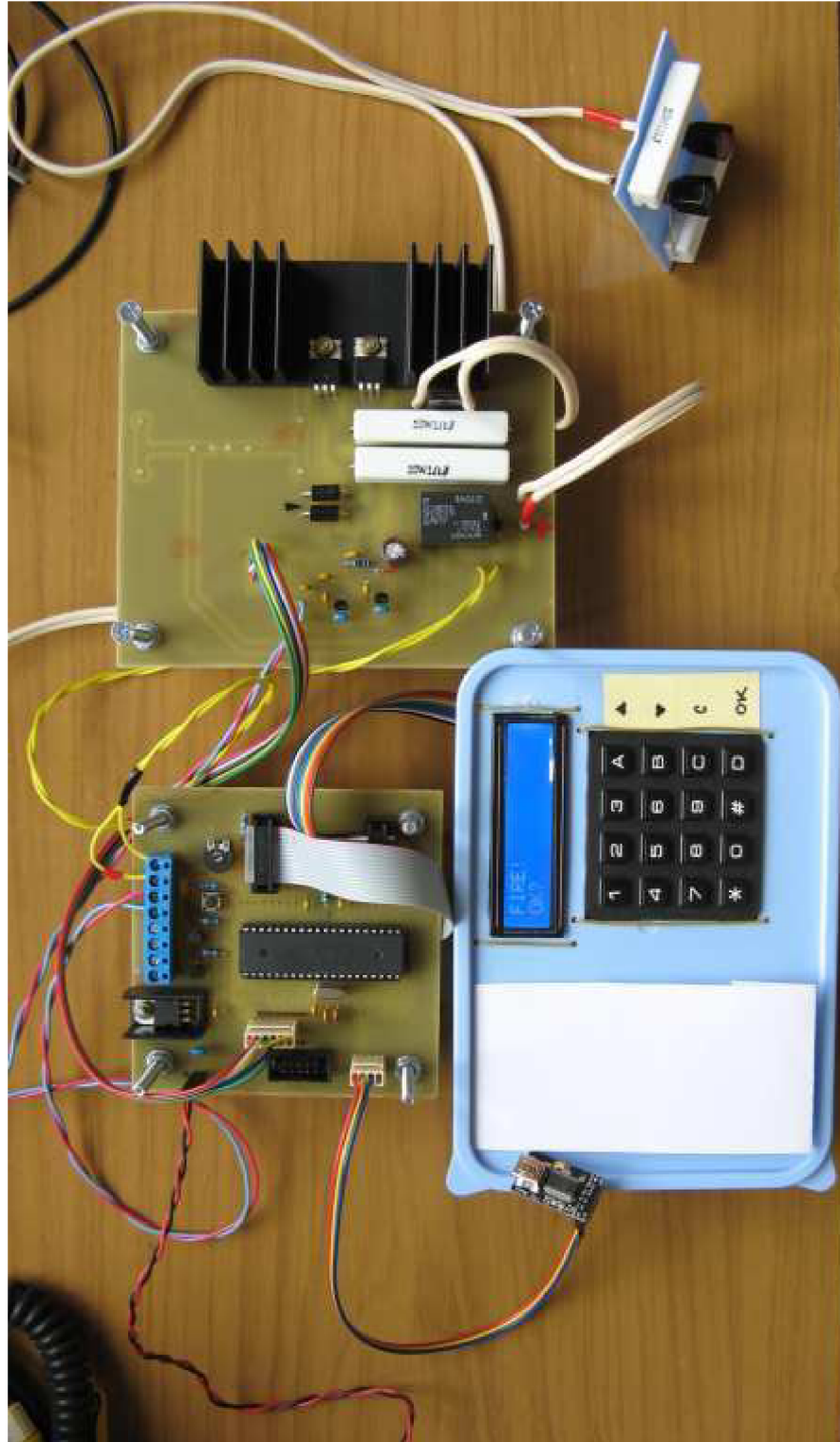
Řídicí obvod

Označení	Hodnota	Pouzdro	Popis
C1, C2	22p	RM5	Keramický kond.
C3-C5, C8	100n	RM5	Keramický kond.
C6	3m3/25V	RM7,5-16	Elektrolytický kond.
C7	330n	RM5	Keramický kond.
IO1	7805	TO-220	Lin. stabilizátor
ISP, KBD		MLW10G	Konektor
JUM1			Lišta 1 řadá 2 piny
K1		PSH02-02P	Konektor se zámkem
K2-K5	ARK500/2	ARK500/2	Svorkovnice
L1	10u	TL	Tlumivka
LCD	MLW14	MLW14G	Konektor
P_A-P_D			Kon. Lišta 1ř 8 pinů
Q1	20M	HC49U-V	Krystal
R1	10k	0207	Metalizovaný rezistor
R2, R3	4k7	0207	Metalizovaný rezistor
R4	10k	PT10V	Trimr
R5	47R	0207	Metalizovaný rezistor
RN1	4x10k	SIL5	Rezistorová síť
S1		B3F-10XX	Tlačítko
T1, T2	BC546	TO-92	NPN tranzistor
TO_DAC		PSH02-06P	Konektor se zámkem
U1	ATMEGA1284P-PU	DIP40	Mikroprocesor
UART		PSH02-04P	Konektor se zámkem
PATICE		DIP40	Patice

Pomocný napájecí zdroj

Označení	Hodnota	Pouzdro	Popis
C1, C4	3m3/25V	RM7,5-16	Elektrolytický kond.
C2, C6	100n	RM5	Keramický kond.
C3, C5	330n	RM6	Keramický kond.
F1, F2	160 mA	POJ_KS20	Tavná pojistka + držák
IO1, IO2	7812	TO-220	Lin. stabilizátor
I_ZDROJ, REL, UPC	ARK500/2	ARK500/2	Svorkovnice
TR1	2x12V, 180mA	TRHEI382	Transformátor
U1, U2	B250C1500	DB1	Usměrňovací můstek
2x	FASTON_4,8		Faston konektor

F SNÍMEK PROTOTYPU ZAŘÍZENÍ



G ZÁVISLOST MAXIMÁLNÍ ZÁTĚŽE NA NASTAVENÉM PROUDU

