

VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA ELEKTROTECHNIKY A KOMUNIKAČNÍCH TECHNOLOGIÍ
ÚSTAV RADIOTELEKTRONIKY

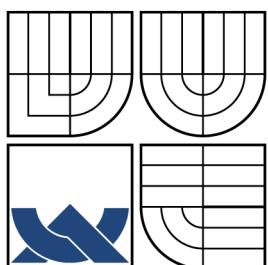
FACULTY OF ELECTRICAL ENGINEERING AND COMMUNICATION
DEPARTMENT OF RADIO ELECTRONICS

LABORATORNÍ IMPULZNÍ ZDROJ ŘÍZENÝ PROCESOREM

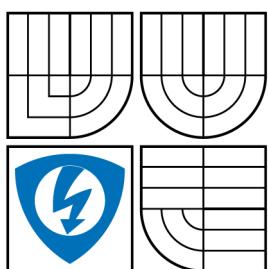
BAKALÁŘSKÁ PRÁCE
BACHELOR'S THESIS

AUTOR PRÁCE
AUTHOR

JIŘÍ CHYTIL



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ
BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY



FAKULTA ELEKTROTECHNIKY A KOMUNIKAČNÍCH
TECHNOLOGIÍ
ÚSTAV RADIOELEKTRONIKY
FACULTY OF ELECTRICAL ENGINEERING AND
COMMUNICATION
DEPARTMENT OF RADIO ELECTRONICS

LABORATORNÍ IMPULZNÍ ZDROJ ŘÍZENÝ PROCESOREM
LABORATORY PULSE POWER SUPPLY CONTROLLED BY MICROCONTROLLER

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE
BACHELOR'S THESIS

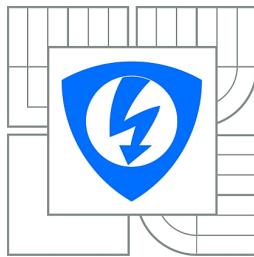
AUTOR PRÁCE
AUTHOR

JIŘÍ CHYTIL

VEDOUCÍ PRÁCE
SUPERVISOR

doc. Ing. JIŘÍ ŠEBESTA, PhD.

BRNO 2011



VYSOKÉ UČENÍ
TECHNICKÉ V BRNĚ

Fakulta elektrotechniky
a komunikačních technologií

Ústav radioelektroniky

Bakalářská práce

bakalářský studijní obor
Elektronika a sdělovací technika

Student: Jiří Chytíl

ID: 120598

Ročník: 3

Akademický rok: 2010/2011

NÁZEV TÉMATU:

Laboratorní impulsní zdroj řízený procesorem

POKYNY PRO VYPRACOVÁNÍ:

Proveďte systémový rozbor řešení dvojhadinového impulsního laboratorního zdroje s řízením napětí a proudového omezení pro rozsah 0-20 V/ 0-1 A. Pro řízení využijte mikrokontrolér řady PIC18 s aplikací USB rozhraní pro komunikaci s PC. Navrhněte kompletní zapojení zdroje. Navrhněte desky plošných spojů zdroje, osaďte je a proveďte test základní funkčnosti systému. Sestavte řídící program mikrokontroléra zdroje a odladěte jeho funkčnost. Sestavte aplikaci pro PC pro dálkové ovládání napájecího zdroje. Proveďte komplexní měření parametrů navrženého a realizovaného zdroje.

DOPORUČENÁ LITERATURA:

[1] MATOUŠEK, D. USB prakticky. BEN - technická literatura, Praha, 2003.

[2] KREJČIŘÍK, A. Napájecí zdroje I. -III. BEN - technická literatura, Praha, 1997.

Termín zadání: 7.2.2011

Termín odevzdání: 27.5.2011

Vedoucí práce: doc. Ing. Jiří Šebesta, Ph.D.

prof. Dr. Ing. Zbyněk Raida
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

Tato práce se zabývá návrhem impulzního laboratorního zdroje řízeného mikroprocesorem. Je složena ze třech modulů: řídící jednotky a dvojice stejných výkonových modulů. Každý z modulů je řízen mikrokontrolérem PIC řady 18. Zařízení má být schopno pracovat jak samostatně tak ve spojení s PC přes rozhraní USB. Výstupní parametry 0 – 20 V, 0 – 1 A. Při návrhu byl kladen důraz na nízkou spotřebu zařízení.

KLÍČOVÁ SLOVA

Spínaný zdroj, obvody TOPSwitch, impulzní transformátor, rekuperační obvod, zpětná vazba, lineární regulace, DAC, ADC, SPI, I2C, režim konstantního napětí, režim konstantního proudu, display s řadičem HD44780, rozhraní USB, síťové filtry, ESD ochrana, optické oddělení, bistabilní relé, ICSP

ABSTRACT

This project deals with design of switching laboratory supply controled by PIC microcontroller. It consist of three modules: control unit and couple of power modules. Each of the modul is controled by PIC18 microcontroller. Device should work autonomically or it can be connected with PC via USB. Output parameters 0 – 20 V, 0 – 1 A. The device has been designed with regard to minimal power consumption.

KEYWORDS

Switching Power Supply, TOPSwitch circuits, pulse transformator, clamp circuit, feedback, linear regulation, DAC, ADC, SPI, I2C, constatn voltage mode, constant current mode, display with controller HD44780, interface USB, AC filters, ESD protection, optical communication, bistable relay, ICSP

PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že svou bakalářskou práci na téma „Laboratorní impulzní zdroj řízený procesorem“ jsem vypracoval samostatně pod vedením vedoucího bakalářské práce a s použitím odborné literatury a dalších informačních zdrojů, které jsou všechny citovány v práci a uvedeny v seznamu literatury na konci práce.

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

BRNO
.....
(podpis autora)

OBSAH

Úvod	13
1 Stanovení požadavků a základní koncepce	14
1.1 Stanovení požadavků na zdroj jako na celek	14
1.2 Požadavky na napájecí zdroj pro řídící modul	14
1.3 Požadavky na napájecí zdroj pro výkonový modul	14
1.4 Požadavky na řídící modul	15
1.5 Požadavky na výkonové moduly	15
1.6 Požadavky na modul ovládacího panelu	15
1.7 Software	15
1.8 Základní koncepce	16
2 Návrh zdroje	17
2.1 Zdroj řídícího modulu	17
2.1.1 Obvody zpětné vazby	18
2.1.2 Obvody primární strany zdroje	18
2.1.3 Obvody na sekundární strany zdroje	20
2.1.4 Síťový filtr pro spínaný zdroj	20
2.2 Napájení výkonových modulů	21
2.2.1 Návrh Obvodů zpětné vazby	22
2.2.2 Návrh obvodu na primární straně zdroje	22
2.2.3 Návrh obvodu na sekundární straně zdroje	23
2.2.4 Návrh filtrů pro spínaný zdroj	24
2.3 Řídící modul	25
2.3.1 Obvody napájení a obvody zajišťující funkci MCU	26
2.3.2 Obvody pro USB	27
2.3.3 Obvody opticky odděleného USARTu	28
2.3.4 Obvody ovládání relé a spínání zdrojů výkonových jednotek	28
2.4 Výkonový modul	30
2.4.1 Obvody napájení	31
2.4.2 Obvody zajišťující funkci MCU	32
2.4.3 Obvody výkonové části	33
2.4.4 Obvody ovládání relé	35
2.4.5 Měřicí obvody	37
2.4.6 Chyby v návrhu	38
2.4.7 Nový obvodový návrh regulační části	39
2.5 Ovládací modul	40

3 Firmware	42
3.1 Firmware řídícího modulu	42
3.2 Firmware výkonového modulu	46
4 Komunikace mezi moduly	47
5 Software	48
5.1 Testovací software	48
5.2 Řídící software	49
6 Měření	52
6.1 Měření na zdroji pro řídící modul	52
6.1.1 Měření výstupních parametrů	52
6.1.2 Měření vyzařování rušení do sítě	54
6.1.3 Měření reakce na rychlé odpojení a připojení zátěže.	63
6.2 Měření na zdroji pro výkonový modul	65
6.2.1 Měření výstupních parametrů - extrémy zatížení	65
6.2.2 Měření reakce na rychlé odpojení a připojení zátěže.	65
6.3 Měření na výkonovém modulu	68
6.3.1 Chování lineární části v závislosti na připojené zátěži	68
6.3.2 Měření reakce proudové pojistky v závislosti na připojení zátěže . .	72
6.3.3 Měření reakce výstupu na připojení a odpojení napájení	73
6.3.4 Měření rušivého napětí na výstupu	75
7 Závěr	76
Literatura	77
Seznam symbolů, veličin a zkratek	80
Seznam příloh	82
A Seznamy součástek	84
A.1 Seznam součástek pro napájecí zdroj řídícího modulu	84
A.2 Seznam součástek pro napájecí zdroj výkonového modulu	85
A.3 Seznam součástek pro řídící modul	87
A.4 Seznam součástek pro ovládací a zobrazovací panel	89
A.5 Seznam součástek pro výkonový modul	90
B Obvodová schémata bloků	94
B.1 Zdroj řídícího modulu	94
B.2 Zdroj výkonového modulu	95
B.3 Řídícího modulu	96

C Podklady pro výrobu DPS	97
C.1 Podklady pro výrobu zdroje řídícího modulu (+5 V)	97
C.1.1 Předloha pro DPS (BOTTOM)	97
C.1.2 Osazovací plán (TOP)	97
C.1.3 Osazovací plán (BOTTOM)	97
C.2 Podklady pro výrobu zdroje výkonového modulu (+5 V)	98
C.2.1 Předloha pro DPS (BOTTOM)	98
C.2.2 Osazovací plán (TOP)	99
C.2.3 Osazovací plán (BOTTOM)	99
C.3 Podklady pro výrobu Řídící jednotky	100
C.3.1 Předloha pro DPS (BOTTOM)	100
C.3.2 Osazovací plán (TOP)	101
C.3.3 Osazovací plán (BOTTOM)	101
C.4 Podklady pro výrobu výkonového modulu	102
C.4.1 Předloha pro DPS (TOP)	102
C.4.2 Předloha pro DPS (BOTTOM)	102
C.4.3 Osazovací plán (TOP)	103
C.4.4 Osazovací plán (BOTTOM)	103
C.5 Podklady pro výrobu měřící desky výkonového modulu	104
C.5.1 Předloha pro DPS (TOP)	104
C.5.2 Předloha pro DPS (BOTTOM)	104
C.5.3 Osazovací plán (TOP)	105
C.5.4 Osazovací plán (BOTTOM)	105
C.6 Podklady pro výrobu ovládacího a zobrazovacího panelu	106
C.6.1 Předloha pro DPS (BOTTOM)	106
C.6.2 Osazovací plán (TOP)	107
C.6.3 Osazovací plán (BOTTOM)	107
D Pouzdra mikrokontrolerů	108
D.1 Pouzdro mikrokontroleru PIC18F47J13	108
D.2 Pouzdro mikrokontroleru PIC18F46J50	109
E Zapojení vývodů mikrokontrolerů	110
E.1 Zapojení vývodů mikrokontroleru PIC18F47J13 ve výkonovém modulu . .	110
E.2 Zapojení vývodů mikrokontroleru PIC18F46J50 ve výkonovém modulu . .	112
F Bloková schémata integrovaných obvodů	114
F.1 TOP242	114
F.2 TOP244	115

G Mechanické parametry součástek	116
G.1 Transformátor pro impulzní zdroje 74001	116
G.2 Transformátor pro impulzní zdroje 74030	117

SEZNAM OBRÁZKŮ

1.1	Blokové schéma zdroje	16
2.1	Zapojení impulzního zdroje (převzato z [9] - americké normy)	19
2.2	Schéma zapojení síťového filtru	24
2.3	Blokové schéma řídicí jednotky	25
2.4	Obvody zajišťující činnost MCU a napájecí obvody	26
2.5	Zapojení obvodů USB	27
2.6	Zapojení optického oddělení	28
2.7	Blokové schéma výkonové jednotky	30
2.8	Napájení desky	31
2.9	Procesor, obvody zajišťující jeho činnost a připojení jeho vývodů	32
2.10	Výkonová (analogová část) zdroje	33
2.11	Výkonová (Blokování napájení výkonové části)	34
2.12	Výkonová část(Děliče)	35
2.13	Měřící vstupy (přepínání rozsahů, stejnosměrný posuv, ochrany)	36
2.14	Měřící vstupy (přepínání rozsahů, stejnosměrný posuv, ochrany)	37
2.15	Výkonová (analogová část) zdroje - nový návrh	39
2.16	Konektor pro připojení k řídicí desce	40
2.17	Signály pro display	41
2.18	Zapojení tlačítek a konektor pro připojení rotačního n-kodéru a tlačítka Fine	41
3.1	Stručný vývojový diagram: Inicializace, Autodiagnostika, Zobrazení hlavní nabídky	42
3.2	Stručný vývojový diagram: Inicializace, Autodiagnostika (detail)	43
3.3	Stručný vývojový diagram: Nabídka nastavení	43
3.4	Stručný vývojový diagram: Nabídka kanálu	44
3.5	Stručný vývojový diagram: Přerušení	45
3.6	Stručný vývojový diagram: Nabídka kanálu	45
3.7	Stručný vývojový diagram: Hlavní program	46
3.8	Stručný vývojový diagram: Přerušení od USARTu	46
5.1	Formulář simulačního softwaru pro komunikaci	48
5.2	Mód směru surových dat	49
5.3	Mód zobrazení dat do grafů	50
5.4	Mód zobrazení dat do grafů	50
5.5	Nová verze Softwaru	51
6.1	Zapojení měřícího pracoviště	52
6.2	Závislost velikosti střední hodnoty výstupního napětí na vstupním napětí .	53
6.3	Závislost velikosti rozkmitu výstupního napětí na vstupním napětí	53
6.4	Závislost velikosti rozkmitu výstupního napětí na vstupním napětí (maximum)	54
6.5	Zapojení měřícího pracoviště	55

6.6	Zdroj s filtrem: kondenzátor X C=100 nF	55
6.7	Zdroj s filtrem: varistor, proudově kompenzovaná tlumivka, kondenzátorem X C=100 nF	56
6.8	Zdroj s filtrem: varistor, proudově kompenzovaná tlumivka, 2x kondenzátor X C=100 nF	56
6.9	Zdroj s filtrem: varistor, proudově kompenzovaná tlumivka, 2x kondenzátor X C=100 nF, uzemněný záporný výstup	57
6.10	Zdroj s filtrem: varistor, proudově kompenzovaná tlumivka, 2x kondenzátor X C=100 nF, 2x kondenzátor Y C= 3,3 nF	57
6.11	Zdroj s filtrem: varistor, proudově kompenzovaná tlumivka, 2x kondenzátor X C=100 nF, 2x kondenzátor Y C= 3,3 nF, uzemněný záporný výstup . . .	58
6.12	Zdroj s filtrem: kondenzátor X C=100 nF	58
6.13	Zdroj s filtrem: varistor, proudově kompenzovaná tlumivka, kondenzátorem X C=100 nF	59
6.14	Zdroj s filtrem: varistor, proudově kompenzovaná tlumivka, 2x kondenzátor X C=100 nF	59
6.15	Zdroj s filtrem: varistor, proudově kompenzovaná tlumivka, 2x kondenzátor X C=100 nF, 2x kondenzátor Y C= 3,3 nF	60
6.16	Zdroj s filtrem: varistor, proudově kompenzovaná tlumivka, 2x kondenzátor X C=100 nF, 2x kondenzátor Y C= 3,3 nF, uzemněný záporný výstup . . .	60
6.17	Zdroj bez filtru	61
6.18	Zdroj s filtrem: varistor, proudově kompenzovaná tlumivka, 2x kondenzátor X C=100 nF	61
6.19	Zdroj s filtrem: varistor, proudově kompenzovaná tlumivka, 2x kondenzátor X C=100 nF, 2x kondenzátor Y C= 3,3 nF, uzemněný záporný výstup . . .	62
6.20	Zapojení měřícího pracoviště	63
6.21	Snímek z osciloskopu při rychlém připojení zátěže	64
6.22	Snímek z osciloskopu při rychlém odpojení zátěže	64
6.23	Zapojení měřícího pracoviště	65
6.24	Výstupní napětí trojúrovňového zdroje při nesymetrickém zatížení (regulace v 5-ti voltové věti)	66
6.25	Výstupní napětí trojúrovňového zdroje při nesymetrickém zatížení (regulace v 12-ti voltové věti)	66
6.26	Výstupní napětí trojúrovňového zdroje při nesymetrickém zatížení (regulace rovnoměrně rozdělena do 12-ti a 5-ti voltové větve)	66
6.27	Operační oblast zdroje	67
6.28	Zapojení měřícího pracoviště	68
6.29	Připojení zátěž: $R_z = 5 \Omega$, $U_{out0} = 5 \text{ V}$, Proudová pojistka: Vypnuta ($I_{max} \gg 1.2 \text{ A}$)	69
6.30	Připojení zátěž: $C = 2.2 \text{ mH}$, $U_{out0} = 24 \text{ V}$, Proudová pojistka: Vypnuta ($I_{max} \gg 1.2 \text{ A}$)	70

6.31	Připojení zátěž: Indukčnost $L = 50 \text{ mH}$, $R_s = 3.5 \Omega + R = 20 \Omega$, $U_{out0} = 24 \text{ V}$, Proudová pojistka: Vypnuta ($I_{max} \gg 1.2 \text{ A}$)	70
6.32	Motor $U = 12 \text{ V}$, $P = 3 \text{ W}$ - sepnutí nezatíženého motoru, $U_{out0} = 12 \text{ V}$, Proudová pojistka: Vypnuta ($I_{max} \gg 1.2 \text{ A}$)	71
6.33	Motor $U = 12 \text{ V}$, $P = 3 \text{ W}$ - sepnutí i rozepnutí zabrzděného motoru, $U_{out0} = 12 \text{ V}$, Proudová pojistka: Vypnuta ($I_{max} \gg 1.2 \text{ A}$)	71
6.34	Test proudové pojistky: $R_z = 1 \Omega$ - sepnutí i rozepnutí zátěže $U_{out0} = 3 \text{ V}$, Proudová pojistka: $I_{max} = 500 \text{ mA}$	72
6.35	Test proudové pojistky: $R_z = 1 \Omega$ - sepnutí zátěže (časový detail) $U_{out0} = 5 \text{ V}$, Proudová pojistka: $I_{max} = 500 \text{ mA}$	72
6.36	Reakce výstupu na připojení napájení: $R_z = \infty \Omega$, $U_{out0} = 5 \text{ V}$, Proudová pojistka: Vypnuta ($I_{max} \gg 1.2 \text{ A}$)	73
6.37	Reakce výstupu na odpojení napájení: $R_z = 20 \Omega$, $U_{out0} = 5 \text{ V}$, Proudová pojistka: Vypnuta ($I_{max} \gg 1.2 \text{ A}$)	73
6.38	Reakce výstupu na odpojení napájení - (časová detail 1): $R_z = 20 \Omega$, $U_{out0} = 5 \text{ V}$, Proudová pojistka: Vypnuta ($I_{max} \gg 1.2 \text{ A}$)	74
6.39	Reakce výstupu na odpojení napájení - (časová detail 2): $R_z = 20 \Omega$, $U_{out0} = 5 \text{ V}$, Proudová pojistka: Vypnuta ($I_{max} \gg 1.2 \text{ A}$)	74
B.1	Zdroj řídícího modulu - obvodové schéma	94
B.2	Zdroj výkonového modulu - obvodové schéma	95
B.3	Řídící modul - obvodové schéma	96
D.1	Pouzdro mikrokontroleru PIC18F47J13 - převazato z [3]	108
D.2	Pouzdro mikrokontroleru PIC18F46J50 - převazato z [2]	109
F.1	Blokové schéma intagrovaného obvodu spínaného zdroje TOP242 - převzato z [10]	114
F.2	Blokové schéma intagrovaného obvodu spínaného zdroje TOP244 - převzato z [10]	115
G.1	Mechanické rozměry transformátoru pro impulzní zdroje 74001 - převzato z [8]	116
G.2	Zapojení vývodů transformátoru pro impulzní zdroje 74001 - převzato z [8]	116
G.3	Mechanické rozměry transformátoru pro impulzní zdroje 74030 - převzato z [8]	117
G.4	Zapojení vývodů transformátoru pro impulzní zdroje 74030 - převzato z [8]	117

SEZNAM TABULEK

2.1	Parametry vynutí transformátoru Myrra 74001 - převzato z [8]	17
2.2	Parametry pro návrh zdroje	18
2.3	Parametry jednotlivých návrhů zpětnovazební smyčky - převzato z [9] . . .	18
2.4	Parametry vynutí transformátoru Myrra 74001 - převzato z [8]	21
2.5	Parametry pro návrh zdroje	21
2.6	Parametry tlumivky 74311 - převzato z [8]	24
4.1	Datový rámec pro komunikační rychlosť 9600 Baudů	47
4.2	Datový rámec pro komunikační rychlosť 19200 a 38400 Baudů	47

ÚVOD

Laboratorní zdroj je zařízení sloužící pro vývoj, testování měření a oživování zařízení. Na laboratorní zdroje bývají podle jeho použití kladený rozdílné nároky. Mezi základní parametry patří: výstupní výkon, maximální výstupní napětí, maximální výstupní proud, počet zdrojů a možnost jejich spojení a napájecí napětí zdroje. Další velice důležité parametry jsou stabilita a přesnost výstupního napětí, případně i speciální mody a možnost využití oddělených měřících svorek pro eliminaci úbytků na napájecích kabelech. Dále také komunikace s PC nebo měřícím systémem. Při komunikaci s PC rozlišujeme, zda zdroj používá vlastní řídící software nebo je možné použít již existující prostředí pro automatizování měřících úloh, jako je Agilent VEE.

Tato práce se zabývá návrhem dvojitého malovýkonového zdroje pro obecné laboratorní použití. Zdroj bude disponovat napěťovým rozsahem 0 – 20 V a proudovým rozsahem 0 – 1 A. Komunikace s PC bude dostupná přes rozhraní USB. Zdroj bude dále schopen komunikovat s přípojnými moduly pomocí sběrnice I²C(nízkorychlostní sběrnice pro komunikaci IO mezi sebou – Inter-Integrated Circuit). Bude disponovat šestnácti měřicími vstupy, které budou rozděleny do dvou galvanicky oddělených skupin po osmi. Dva vstupy z každé skupiny budou navíc nabízet možnost vzdáleného snímání napětí, a tedy možnost eliminace úbytků na vodičích.

Důraz při řešení projektu bude kladen na využití moderních součástek, na nízkou hmotnost a malé rozměry. Dalším požadavkem, který na práci kladu, je EMC kompatibilita. Ta je protichůdná ke snižování rozměrů a hmotnosti, neboť budou použity impulzní zdroje, které mohou při nevhodné konstrukci značně vyzařovat do okolí.

Při snaze o konstrukci jediného zařízené (prototypu) bez pokračování v sériové výrobě je obtížné, aby se zaplatily celkové testy EMC kompatibility, spolehlivostní testy a zdlouhavá měření parametrů a především jejich opakovaní v případě nesplnění požadavků a norem u prvního návrhu zařízení. Zařízení musí být tedy již od počátečního návrhu řešeno robustněji a s nižším ohledem na cenu výsledné konstrukce, neboť zde většinový podíl ceny zařízení tvorí právě testy. Náklady na tyto testy není možné u kusové výroby rovnoměrně rozložit tak, jak se tomu děje u sériové výroby.

1 STANOVENÍ POŽADAVKŮ A ZÁKLADNÍ KONCEPCE

1.1 Stanovení požadavků na zdroj jako na celek

- Počet nezávislých zdrojů: 2
- Rozsah výstupních napětí: 0 – 20 V
- Rozsah výstupních proudů: 0 – 1 A
- Tolerance výstupních napětí: 1 %
- Tolerance výstupních proudů: 5 %
- Rozsah vstupních napětí: $\sim 230 \text{ V} \pm 10 \%$, 50 Hz
- Možnost vnitřního spřažení zdrojů
- Ovládání přímo na panelu
- Ovládání přes PC (USB)
- Další komunikace: I²C
- Nízká hmotnost
- Kompaktní rozměry
- Splnění EMC norem
- Nízká spotřeba
- Uživatelsky přátelské ovládání
- Přehledný řídící software

Omezujícím faktorem při návrhu je freewarová verze programu Eagle, které omezuje maximální rozměr desky na 100 x 80 mm. Z tohoto důvodu je volena modulární koncepce, která bude obsahovat celkem 7 modulů: napájecí zdroj pro řídící desku, řídící desku, dva napájecí zdroje pro výkonové moduly, dva výkonové moduly a modul ovládacího panelu.

1.2 Požadavky na napájecí zdroj pro řídící modul

- Vstupní napětí: $\sim 230 \text{ V} \pm 10 \%$, 50 Hz
- Výstupní napětí: 5 V $\pm 5 \%$ a
- Výstupní proud: min. 1 A
- Další požadavky vyplývající z požadavků na celé zařízení

1.3 Požadavky na napájecí zdroj pro výkonový modul

- Vstupní napětí: $\sim 230 \text{ V} \pm 10 \%$, 50 Hz
- Výstupní napětí: 5 V $\pm 5 \%$, 2x 12 V -5 % +20 %
- Výstupní proud: min. 1 A pro každou větev.
- „Vzdálené“ spínaní zdroje
- Další požadavky vyplývající z požadavků na celé zařízení

1.4 Požadavky na řídící modul

- Komunikace přes USB
- Komunikace s výkonovými moduly (Galvanické oddělení)
- Snímání ovládacích prvků
- Obsluha displeje
- Spínání napájení výkonových modulů
- Spínání spřažení k zemní svorce
- Komunikace po sběrnici I²C a její fyzická realizace

1.5 Požadavky na výkonové moduly

- Komunikace s řídícím modulem (Galvanické oddělení)
- Řízení výstupních veličin v požadovaných rozsazích
- Ochrana před zkratováním výstupu
- Ochrana před připojením vyššího nebo opačného napětí na výstup
- Odpojení a připojení výstupu
- 8x měřicí vstup
- Přepínání rozsahů měřicích vstupů
- Dva měřicí vstupy jako vzdálené snímání
- Ochrana měřicích vstupů
- Spřažení zdrojů
- Diagnostika vnitřních napětí

1.6 Požadavky na modul ovládacího panelu

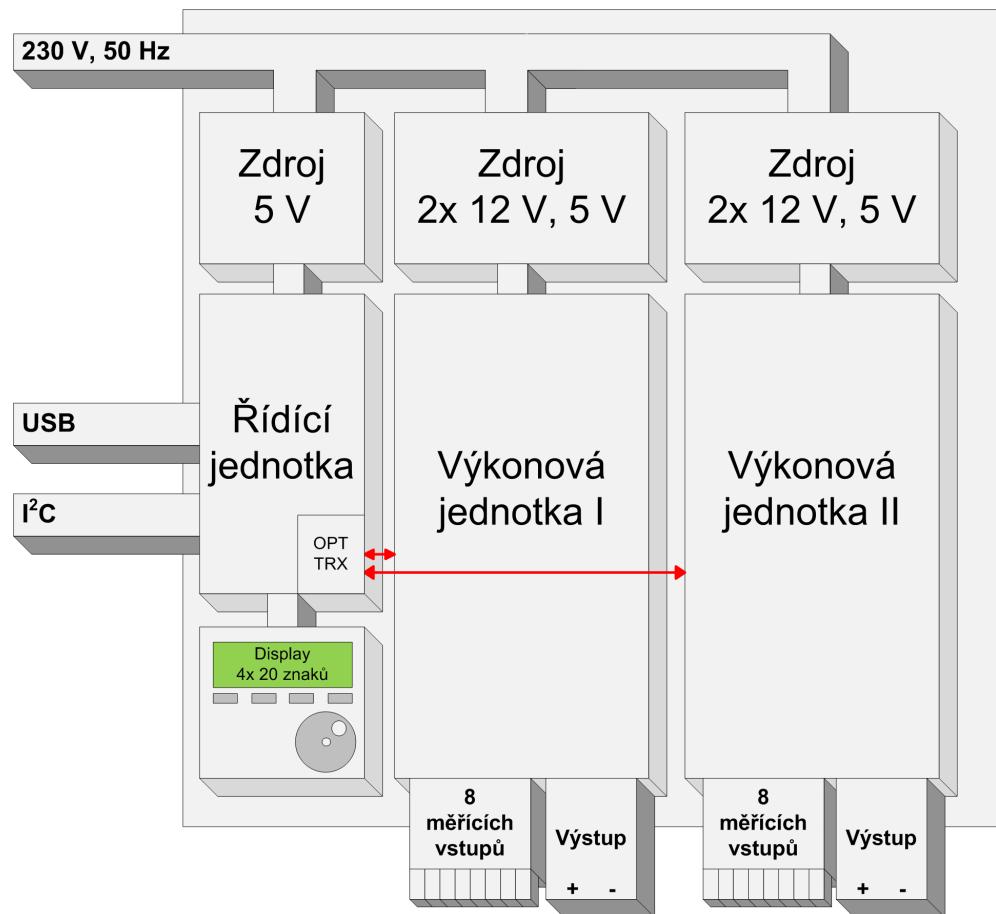
- Elektrické propojení prvků ovládacího panelu
- Mechanické upevnění prvků ovládacího panelu

1.7 Software

- Kompletní řízení zdroje
- Testovací módy
- Napěťové a proudové profily
- Možnost vykreslování grafů
- Zobrazení diagnostických dat
- Kalibrace

1.8 Základní koncepce

Napájení zdroje bude zajišťovat trojice impulzních zdrojů, jejichž sekundární strany budou galvanicky odděleny. O řízení celého zdroje se bude starat trojice mikrokontrolérů PIC řady 18F. Mikrokontrolér na řídící desce disponuje USB rozhraním. Výkonové moduly disponují procesory s 12 bitovými převodníky pro přesná měření. Moduly budou opticky odděleny a jejich spřažení budou obstarávat relé umístěná na každém z modulů.



Obr. 1.1: Blokové schéma zdroje

2 NÁVRH ZDROJE

2.1 Zdroj řídicího modulu

Tento modul slouží pro převod síťového napětí na napětí vhodné pro napájení řídicího zdroje. Požadovaná hodnota napětí na výstupu zdroje je 5 V a požadovaný proud je minimálně 1 A. Zdroj je realizován jako impulzní.

Napájení zdroje je realizováno jako impulzní zdroj. Navržený zdroj je kompromisem mezi požadavky na něj kladenými a komerční dostupností a s ní související cenou. Impulzní transformátor je součást, která je nejnáročnější na realizaci, a jeho zakázková výroba by konstrukci zdroje značně prodražila. Byl tedy vybrán sériově vyráběný transformátor od francouzské firmy Myrra[8]. K tomuto transformátoru byly navrženy okolní obvody. Z daných modelů byl vybrán transformátor 74001 s maximálním výstupním výkonem 6 W a parametry vinutí uvedenými v tabulce:

Vinutí	vývody	závity	napětí	max. proud	max. indukčnost
Pri	6, 4	138	60 – 120 V _{OR}	0,35 A	3000 μ H
Sec	2, 1	20	8 – 16 V	0,1 A	
Aux	9, 10	8	3 – 6 V	1,2 A	

Tab. 2.1: Parametry vynutí transformátoru Myrra 74001 - převzato z [8]

Návrh všech součástek v této kapitole se vztahuje ke schématu v příloze B.1.

K danému transformátoru byl vybrán obvod TOP242PN v pouzdře DIL8 z rodiny TOPSwitch-GX [10]. Při návrhu zdroje bylo postupováno dle aplikační příručky pro obvody TOPSwitch-GX [9].

Zdroj může podle návrhu pracovat jako univerzální, tedy s rozsahem napájení od 85 do 265 V střídavých nebo zdroj navržený pro napájení z 230 V střídavých, tedy s rozsahem 195 – 265 V. Rozdíl v návrhu je zde pouze v transisu rekuperačního obvodu a ve velikosti sběrného kondenzátoru. Ten je potřeba při návrhu univerzálního zdroje volit s cca 3x větší kapacitou. Výhodou je potom nejen schopnost pracovat na sítích 120 V/ 60 Hz, ale také vyšší odolnost vůči výpadkům a poklesům napětí v síti (black-out, brown-out). Deska bude dimenzována tak, aby bylo možno osadit oba kondenzátory.

Další parametry nutné pro návrh zdroje se týkají kmitočtu sítě, účinnosti zdroje, rozložení ztrát, výstupního napětí a výkonu.

Veličina	Označení	Hodnota
Vstupní napětí	V_{IN}	195 – 265 V
Frekvence sítě	f_{IN}	50 Hz
Účinnost	η	0,8
Poměr ztrát	Z	0,5
Výstupní napětí	V_{OUT}	5,0 V
Výstupní výkon	P_{OUT}	6,0 W

Tab. 2.2: Parametry pro návrh zdroje

2.1.1 Obvody zpětné vazby

Zásadní vliv na vlastnosti zdroje má výběr typu zpětné vazby. Pro dané zapojení se nám nabízejí 4 typy s různými parametry.

Zpětnovazební Obvod	Tolerance obvodu	Regulace v závislosti na zátěži	Linerita regulace	Celková přesnost
Pri./Basic	$\pm 10\%$	$\pm 5\%$	$\pm 1,5\%$	$\pm 16,5\%$
Pri./Enhan.	$\pm 5\%$	$\pm 2,5\%$	$\pm 1,5\%$	$\pm 9\%$
Opto/Zener	$\pm 5\%$	$\pm 1\%$	$\pm 0,5\%$	$\pm 6,5\%$
Opto/TL431	$\pm 1\%$	$\pm 0,2\%$	$\pm 0,2\%$	$\pm 1,4\%$

Tab. 2.3: Parametry jednotlivých návrhů zpětnovazební smyčky - převzato z [9]

Z nabízených možností i přes nejnáročnější obvodové řešení a nejvyšší cenu vyhovuje nejlépe obvod s napěťovou referencí TL431 [17].

Výpočet rezistoru R_4 k děliči pro vývod **R** reference TL431 schéma:

$$R_4 = \frac{V_{OUT} - 2,5}{2,5} \cdot 10 \text{ k}\Omega = \frac{5 - 2,5}{2,5} \cdot 10 \text{ k}\Omega = 10 \text{ k}\Omega \quad (2.1)$$

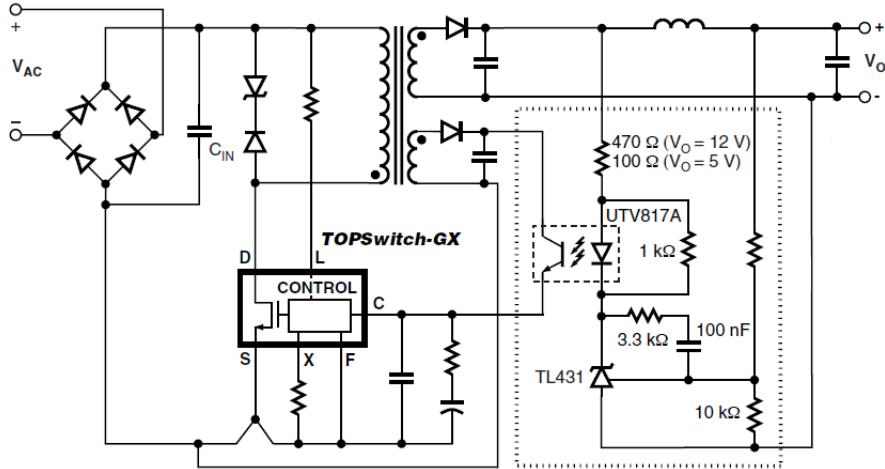
Optočlen byl vybrán z tabulky v aplikační příčce: LTV816A [15]. Ostatní součástky obvodů zpětné vazby jsou dány uvedeným schématem.

2.1.2 Obvody primární strany zdroje

Parametry vstupního napětí

$$U_{in_{min}} = U_{minADC} \cdot \sqrt{2} = 195 \cdot \sqrt{2} = 276 \text{ V} \quad (2.2)$$

$$U_{in_{max}} = U_{maxADC} \cdot \sqrt{2} = 265 \cdot \sqrt{2} = 375 \text{ V} \quad (2.3)$$



Obr. 2.1: Zapojení impulzního zdroje (převzato z [9] - americké normy)

Vstupní usměrňovač musí být navržen na závěrné napětí dané vztahem:

$$U_R = U_{in_{max}} \cdot 1,25 = 375 \cdot 1,25 = 469 \text{ V} \quad (2.4)$$

A na proud daný vztahy:

$$I_{AV} = \frac{P_{out}}{V_{in_{min}} \cdot \eta} = \frac{6 \text{ W}}{276 \cdot 0,8} = 27 \text{ mA} \quad (2.5)$$

$$I_D \geq 2I_{AV} I_D \geq 54 \text{ mA} \quad (2.6)$$

Vyhovující typ usměrňovače je pro dané použití například B380S[16], který svými parametry značně přesahuje parametry požadované.

Sběrný kondenzátor se volí podle požadovaného výstupního výkonu cca $1 \mu\text{F}$ na 1 W . Byla zvolena kapacita $10 \mu\text{F}$ na napětí 400 V .

Rekuperační (clamp) obvod se lze realizovat pomocí anti-sériového zapojení transistoru a rychlé diody nebo pomocí RCD kombinace. Kombinace RCD ale snižuje účinnost při nízkém zatížení a je náročnější na správný návrh. Proto je využito zapojení transilem. Pro toto zapojení s jediným výstupem a napájením sítí 230 V je doporučená hodnota napětí transistoru $U_T=180 \text{ V}$. Typ transistoru byl zvolen P6KE180[12]. Antisériová dioda k němu připojená je typu BYV26C[11].

Obvod TOP242PN je zapojen tak, že svůj vývod **M** používá jako Line-Sense, tedy detekci přepětí a podpětí. Tento vývod je přes rezistor $2M\Omega$ připojen na kladnou větev. Line-sense reaguje vypnutím obvodu při překročení hodnoty stejnosměrného napětí na sběrném kondenzátoru přes 450 V . Stejně reaguje i na podpětí, a to při poklesu snímaného

napětí pod 100 V při dané hodnotě rezistoru R_1 .

Usměrňovač pro obvody zpětné vazby na sekundární straně je složen s usměrňovací diody BAV21[13] a kondenzátoru C5 $2.2 \mu\text{F} / 50 \text{ V}$. Kondenzátor C4 připojený na vývod C je keramický s parametry $100 \text{ nF} / 50 \text{ V}$.

2.1.3 Obvody na sekundární strany zdroje

Návrh této části zdroje spočívá ve volbě usměrňovací diody, sběrného kondenzátoru a výstupního filtru. Usměrňovací dioda se pro malé napětí (5 V) volí schottkyho typu, a to z důvodu nižších ztrát v propustném směru $U_D \approx 0,2 \text{ V}$, a také proto, že není potřeba vysoké závěrné napětí U_{RR} , které u schottkyho diod zpravidla nepřesahuje 60 V. Ze seznamu byla vybrána dioda SB360[14]. Sběrný kondenzátor musí být s nízkou hodnotou ESR a hodnotou $330 \mu\text{F} / 16 \text{ V}$, která je v aplikačním listě doporučená pro výstupní proud 1 A. Obvody filtru se skládají z feritové perličky L_1 a filtračního kondenzátoru C_2 s parametry $330 \mu\text{F} / 16 \text{ V}$. Kondenzátoru filtru již nemusí být nízkoimpedanční.

2.1.4 Síťový filtr pro spínaný zdroj

Filtry pro zdroje takto nízkého výkonu nemusí být nikterak složité. Pro odfiltrování výstupních rušivých složek by měl dostačovat filtrační X Kondenzátor $100 \text{ nF} / 305 \text{ V}$ připojený na vstupní svorky (230 V) zdroje. Deska je ale navržena tak, aby ji bylo možné doplnit jednak o kvalitnější filtraci pomocí druhého X kondenzátoru pro odstranění protifázových složek, dále také o filtrační proudově kompenzované tlumivky pro potlačení soufázových složek. Případně lze připojit i varistorovou ochranu před přepětími a napěťovými špičkami či jevy v síti způsobenými rychlými přechodovými ději (EFT bursty).

Schéma a výrobní podklady celé realizace jsou dostupné v příloze.

2.2 Napájení výkonových modulů

Návrh a konstrukce zdroje pro napájení výkonových modulů probíhal podobným způsobem, jako konstrukce zdroje pro řídící část. Opět se zde vycházelo z nabídky transformátorů firmy Myrra[8]. Z katalogu byl vybrán model 74030 pro výkon 30 W, jež má následující parametry:

vinutí	vývody	závity	napětí	max. proud	max. indukčnost
Pri	3, 5	70	65 - 135 VOR	1,5 A	750 μ H
Aux	2, 1	8	7 - 14,5 V	1 A	
Sec1	7, 8	4	3,3 - 7 V	3 A	
Sec2	6, 8	9	8 - 16 V	1,5 A	
Sec3	9, 10	9	8 - 16 V	1,5 A	

Tab. 2.4: Parametry vynutí transformátoru Myrra 74001 - převzato z [8]

Návrh všech součástek v této kapitole se vztahuje ke schématu v příloze B.2.

Stejně jako v předchozím případě jsou i v tomto zdroji obvody spínaných zdrojů typu TOPSwitch-GX [9]. Pro tento zdroj svými parametry vyhovoval model TOP244Y v pouzdře TO220-7

I tento zdroj je volen pro vstupní napětí U_{in} 230 V / 50 Hz. Některé další parametry potřebné pro návrh jsou uvedeny v tabulce:2.2

Veličina	Označení	Hodnota
Vstupní napětí	V_{IN}	195 – 265 V
Frekvence sítě	f_{IN}	50 Hz
Účinnost	η	0,8
Poměr ztrát	Z	0,5
Výstupní napětí	V_{OUT}	5,0 V; 2x 12 V
Výstupní výkon	P_{OUT}	30 W

Tab. 2.5: Parametry pro návrh zdroje

2.2.1 Návrh Obvodů zpětné vazby

Stejně jako pro minulou konstrukci, i zde bude realizován obvod zpětné vazby s napěťovou referencí TL431[17].

Toto zapojení je upraveno tak, aby obvody zpětné vazby mohly být na závěr doladěny. Obvod může regulovat podle větve 5 V nebo podle větve 12 V. Vhodnou volbou rezistorů lze nastavit i regulaci pomocí obou větví s určitou vahou. Větev 12 V na odděleném vinutí je bez regulace, neboť se počítá s tím, že po připojení jí poteče zhruba stejný proud jako 12 V větví na regulovaném výstupu.

Výpočet rezistoru R_{4b} děliče pro reference TL431 pro regulaci 12 V větví:

$$R_{4b} = \frac{U_{out} - 2,5}{2,5} \cdot 10 \text{ k}\Omega = \frac{12 - 2,5}{2,5} \cdot 10 \text{ k}\Omega = 38 \text{ k}\Omega \quad (2.7)$$

Bude použita hodnota z řady E12 39 kΩ

Optočlen je opět typu LTV816A.

2.2.2 Návrh obvodu na primární straně zdroje

Parametry vstupního napětí

$$U_{in_{min}} = U_{minADC} \cdot \sqrt{2} = 195 \cdot \sqrt{2} = 276 \text{ V} \quad (2.8)$$

$$U_{in_{max}} = U_{maxADC} \cdot \sqrt{2} = 265 \cdot \sqrt{2} = 375 \text{ V} \quad (2.9)$$

Vstupní usměrňovač musí být navržen minimálně na závěrné napětí dané vztahem:

$$U_R = U_{in_{max}} \cdot 1,25 = 375 \cdot 1,25 = 469 \text{ V} \quad (2.10)$$

Dále také na proud daný vztahy:

$$I_{AV} = \frac{P_{out}}{V_{in_{min}} \cdot \eta} = \frac{30}{276 \cdot 0,8} = 136 \text{ mA} \quad (2.11)$$

$$I_D \geq 2I_{AV} \quad I_D \geq 272 \text{ mA} \quad (2.12)$$

Použijeme stejný typ usměrňovače B_1 jako u zdroje pro řídící část, tedy B380S

Sběrný kondenzátor C_3 se volí $1 \mu\text{F}$ na 1 W . Byla tedy zvolena kapacita $47 \mu\text{F}$ na napětí 450 V .

Upínací obvod budeme realizovat pomocí antisériového zapojení transilu D_{R2} a rychlé diody D_{R1} . Pro toto zapojení s více výstupy a napájením sítí 230 V je doporučená hodnota napětí transilu $U_T = 150 \text{ V}$.

Typ transilu D_{R2} byl zvolen P6KE150. Anti-sériová dioda D_{R1} připojená k němu je typu BYV26C.

Obvod TOP244Y je zapojen tak, že svůj vývod **L** používá jako Line-Sense, tedy detekci přepětí a podpětí. Vývod **F** je připojen k zemi a jeho funkce je tedy deaktivována. Vývod **X** je využit pro „vzdálené“ spínání obvodu. Funkce obvodu se sepne připojením vývodu **X** k zemi. Toho lze dosáhnout pomocí propoje na desce nebo optočlenem $OPTO_2$, který zajistí i galvanické oddělení obvodu, jež k sepnutí dává povel, od sítě.

Usměrňovač pro obvody zpětné vazby je realizován stejným způsobem jako v předchozím případě.

2.2.3 Návrh obvodu na sekundární straně straně zdroje

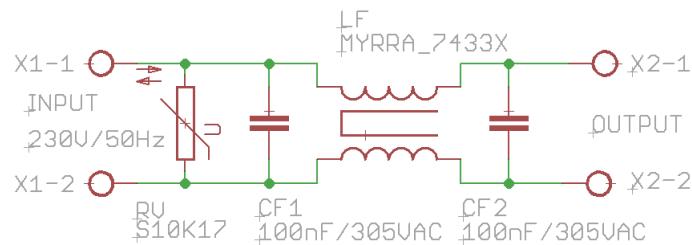
Obvody na sekundární straně transformátoru jsou tvořeny trojicí větví, z nichž každá se skládá z usměrňovače sběrného kondenzátoru a filtru. Pro usměrňovač v 5 V větvi se volí Schottkyho dioda typu SB360 (D_{1w}). Pro ostatní větve BYV27 (D_{1a}, D_{1b}). Sběrné kondenzátory (C_{1a}, C_{1b}, C_{1w}) jsou ve všech větvích zdroje shodné kapacity $330 \mu\text{F}$. Liší se ale maximálním napětím - pro 5 V větev je to 16 V a pro 12 V větev je to 35 V . Tyto kondenzátory musí mít nízký ESR. Tlumivky (L_{1a}, L_{1b}, L_{1w}) jsou shodné pro každou větve a jsou realizovány feritovou perlou na vodiči. Kondenzátory filtru (C_{2a}, C_{2b}, C_{2w}) mají pro jednotlivé větve stejné parametry jako sběrné kondenzátory, není od nich však vyžadována nízká ekvivalentní sériová rezistivita.

2.2.4 Návrh filtrů pro spínaný zdroj

Filtr je zde volen dle filtru pro zdroj stejného výkonu z katalogového listu obvodu TOP-Switch. Je složen z proudově kompenzované odrušovací tlumivky Myrra 74311 a dvojice kondenzátorů typu X2 ($CF1, CF2$) s kapacitou 100 nF na 305 V. Přidán je potom varistor R_V na 275 V střídavého napětí, opět jako ochrana zdroje.

Indukčnost (Soufázový mód)	15 – 25 mH
Střední hodnota proudu	0,9 A
Odpor vinutí	max. 0,75 Ω
Indukčnost (Protifázový mód)	min. 150 μH
Rezonanční frekvence	min. 210 kHz

Tab. 2.6: Parametry tlumivky 74311 - převzato z [8]

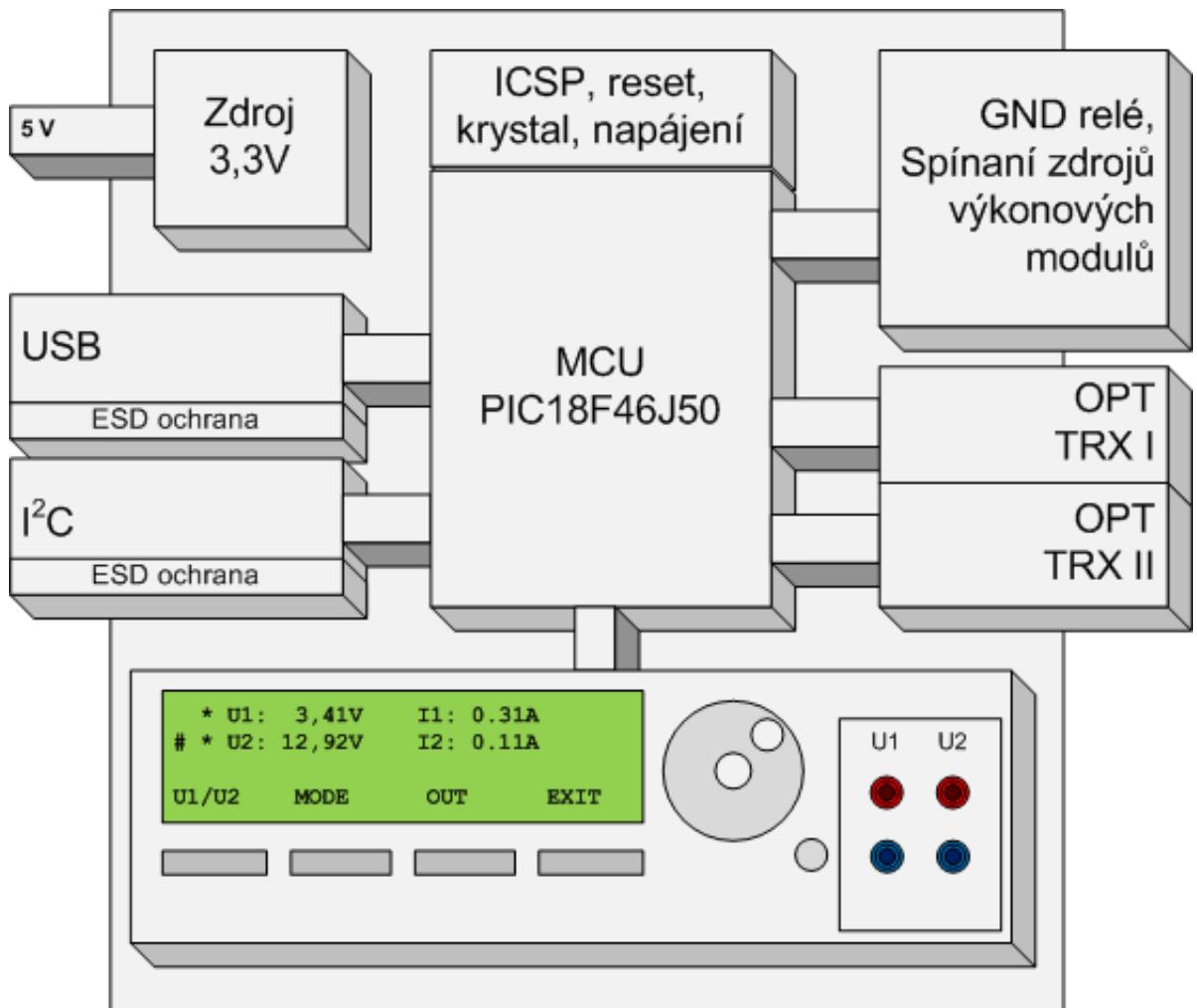


Obr. 2.2: Schéma zapojení síťového filtru

Schéma a výrobní podklady celé realizace jsou dostupné v příloze.

2.3 Řídicí modul

Řídicí modul zajišťuje komunikaci mezi jednotlivými komponentami uvnitř zdroje i mimo něj (komunikace s PC).



Obr. 2.3: Blokové schéma řídicí jednotky

Požadavky na MCU vyplývající z požadavků na řídicí desku:

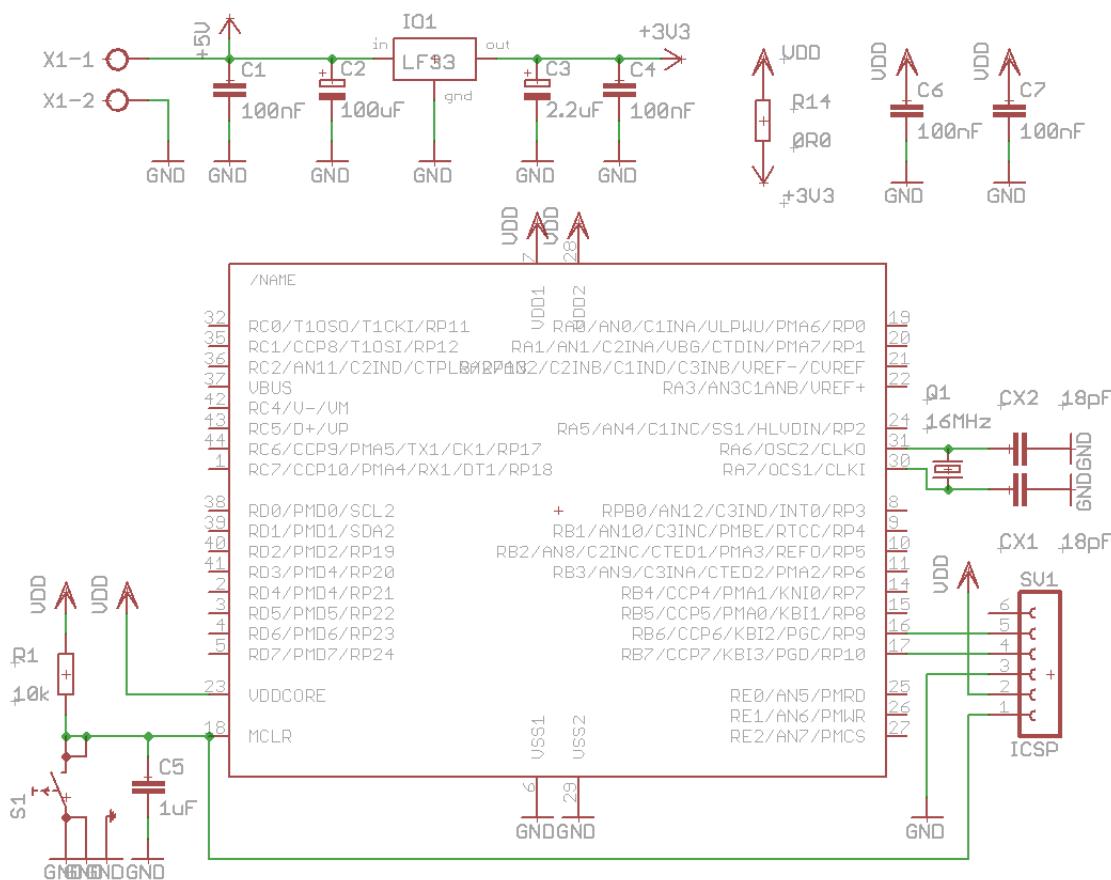
- Dostatečný počet vstupních a výstupních vývodů
- Vhodná velikost výstupního a vstupního proudu vývodů
- Dostatečná rychlosť
- Integrovaný převodník USB
- 2x USART
- Sběrnice I²C

Z MCU PIC řady 18F vyhovoval daným požadavkům PIC18F46J50 [2].

Návrh všech součástek v této kapitole se vztahuje ke schématu B.3.

2.3.1 Obvody napájení a obvody zajišťující funkci MCU

Řídící obvod je napájen jediným napětím 5 V připojeným na svorky X_1 . Z tohoto napětí potřebujeme získat napájecí napětí 3,3 V. Toho dosáhneme pomocí Low-Drop stabilizátoru $LF33$ a kondenzátorů C_1 , C_2 a C_5 . Kondenzátory C_3 a C_4 o hodnotách 100 nF musí být umístěny co nejblíž k MCU. Pracovní kmitočet MCU je dán krystalem X_1 s kmitočtem 16 MHz. K němu jsou přidány kondenzátory C_{1x} a C_{2x} o kapacitě 18 pF. Pro běh mikrokontroléru jako takového je nutný obvod reset složený z kondenzátoru C_5 a rezistoru R_1 . K tomuto obvodu je pro ladicí účely přidáno resetovací tlačítko S_1 . Z MCU je vyvedeno programovací rozhraní $ICSP$ na šestivývodový konektor MOLEX.



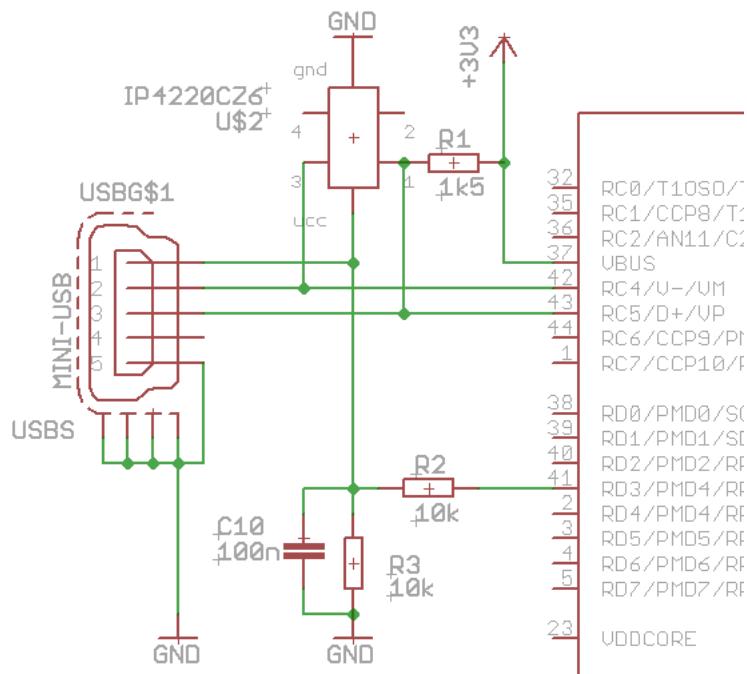
Obr. 2.4: Obvody zajišťující činnost MCU a napájecí obvody

2.3.2 Obvody pro USB

Komunikační rozhranní USB bylo zvoleno, protože je to dnes nejběžněji používané komunikační rozhraní a disponuje jím téměř každé PC. I některá zařízení a mikrokontroléry začínají obsahovat USB OTG.

Naopak nevýhodou rozhraní USB je náročnější galvanické oddělení, které by pro tuto aplikaci bylo vhodné. Ale vzhledem k nedostupnosti obvodu *ADUM4160* od něj muselo být upuštěno. Galvanické oddělení je provedeno optočleny na rozhraní UART, pomocí kterého mezi sebou komunikují jednotlivé desky.

Zařízení je koncipováno tak, aby nevyužívalo napájení z portu USB. Toto napětí bude sloužit pouze k detekci připojení k portu USB. Pomocí ochranného RC článku je připojeno na port **D**, R_{D1} (vývod 39)



Obr. 2.5: Zapojení obvodů USB

Datové linky $D+$, $D-$ jsou připojeny přímo na procesor. O jejich ochranu proti *ESD* se stará obvod IP4220CZ6 [1], který je volitelný a na desce je pro něj připraveno místo (pouzdro SOT457). Obvod je ke každé z datových linek připojen paralelně a chrání i 5 V linku sběrnice USB. Obvod mezi linkami USB a zemí vytváří jen velmi malou přidanou kapacitu, typicky 1 pF. Rychlosť USB je nastavena pull-up rezistorem R_1 na datové lince $D+$ na High-Speed.

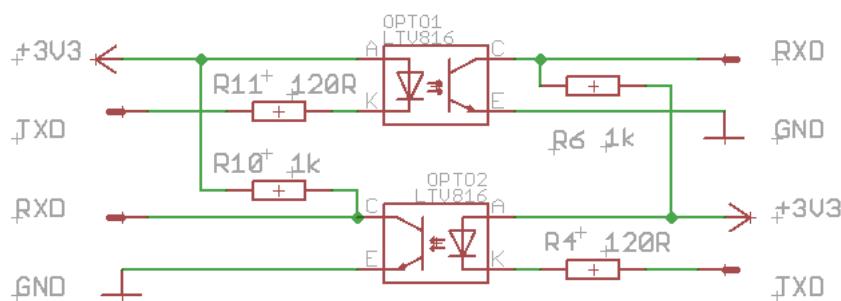
2.3.3 Obvody opticky oddeleného USARTu

Optické oddelení komunikace pro každou z jednotek je obousměrné a je realizováno dvojicí optočlenů, každý pro jeden směr. Optočleny ($OPTO_1 - OPTO_4$) jsou buzeny přímo z MCU proudem okolo 10 mA. Z tohoto důvodu mohou být využity pouze porty **B** a **C**, jelikož jsou schopné takový proud vývodem svést k zemi.

Rezistory na vstupní stranu optočlenu (R_4, R_5, R_9, R_{11}) jsou voleny dle následujícího vzorce:

$$R4 = \frac{U_{DD} - U_{LED}}{I_{LED}} = \frac{3,3 - 1,2}{0,01} = 110 \Omega \quad (2.13)$$

Rezistory (R_6, R_8, R_7, R_{10}) na výstupech optočlenu jsou zvoleny z grafu katalogového LTV816[15] listu hodnoty 1 kΩ tak, aby poskytovaly dostatečnou přenosovou rychlosť, ale nezvyšovaly zbytečně spotřebu zařízení.



Obr. 2.6: Zapojení optického oddelení

2.3.4 Obvody ovládání relé a spínání zdrojů výkonových jednotek

Obvody pro spínání relé jsou tvořeny tranzistorem pracujícím ve spínacím režimu a antiparalelně zapojenou diodou k proudu vinutí relé při sepnutém stavu. Tento obvod je zde však duplicitně, protože je použito bistabilní relé pro snížení spotřeby. K relé jsou do série s vinutími připojeny srážecí rezistory R_{12} a R_{13} , které jsou vypočteny ze vztahu pro odporový dělič:

$$R_{12} = R_{COIL} \left(\frac{U_{+5}}{U_{COIL}} - 1 \right) = 43 \left(\frac{5,0}{2,4} - 1 \right) = 46,6 \Omega \quad (2.14)$$

Z řady E12 volíme nejbližší nižší rezistor: 39 Ω.

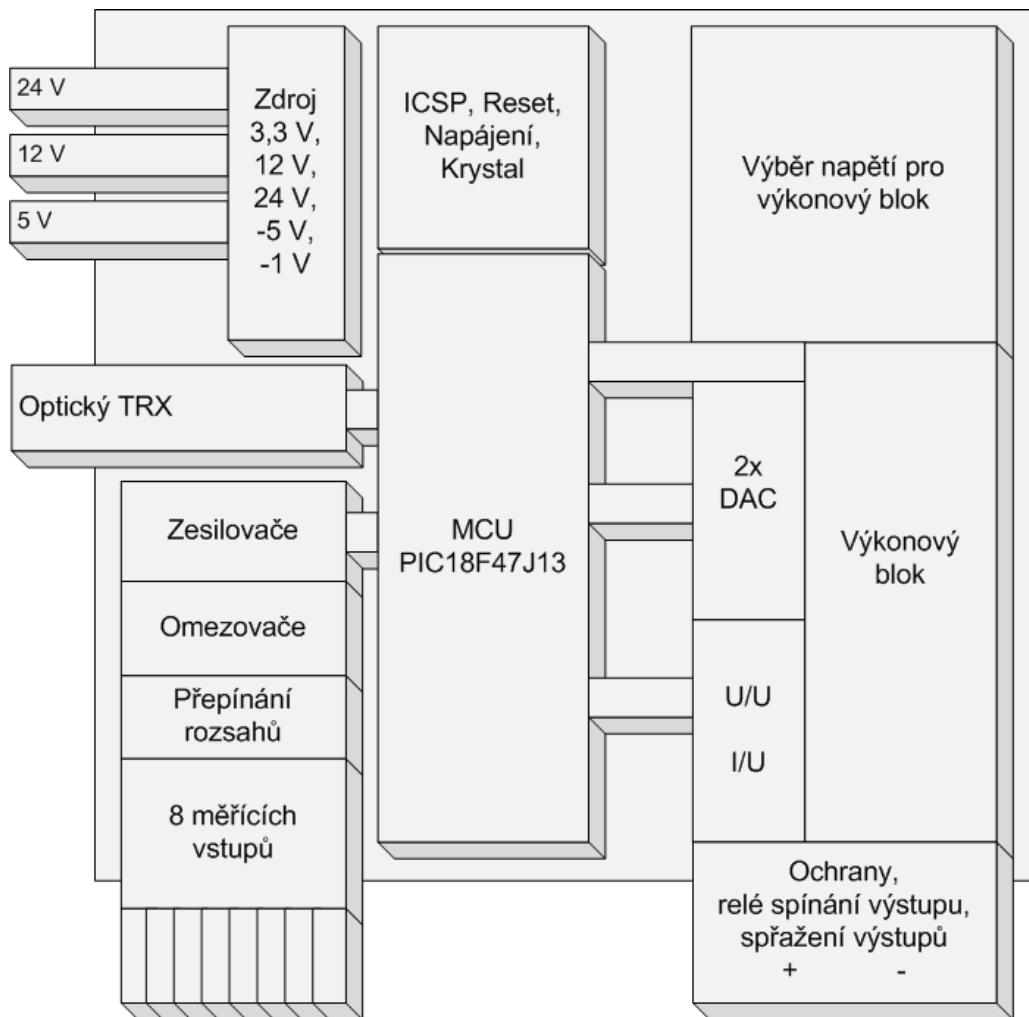
Obdobně i obvody spínání zdrojů jsou pouze spínací tranzistory. Pro všechny tyto aplikace postačující malovýkonové tranzistory NPN typu BC846 pro SMD montáž. Předřadné rezistory ($R_{15}, R_{16}, R_{17}, R_{18}$) do bází tranzistorů (T_1, T_2, T_3, T_4) vypočítáme ze vztahu:

$$R4 = \frac{U_{DD} - U_{BE}}{\frac{I_{CE}}{h_{21eMIN}}} = \frac{3,3 - 0,7}{\frac{0,06}{220}} = 9533 \Omega \quad (2.15)$$

Z řady E12 volíme nejbližší nižší rezistor: $8,2\text{ k}\Omega$.

2.4 Výkonový modul

Výkonový modul zajišťuje dodání požadovaného napětí a proudu na výstupní svorky, optickou komunikaci s řídící jednotkou a zpracování signálů z měřících vstupů.



Obr. 2.7: Blokové schéma výkonové jednotky

Požadavky na MCU vyplývající z požadavků na výkonový modul:

- Dostatečný počet vstupních a výstupních vývodů
- Vhodná velikost výstupního a vstupního proudu vývodů
- Dostatečná rychlosť
- AD převodníky s dostatečným rozlišením (12 bitů)
- Dostatečný počet kanálů AD převodníku
- 1x USART
- Sběrnice I²C

Těmto požadavkům vyhovuje model PIC18F47J13.

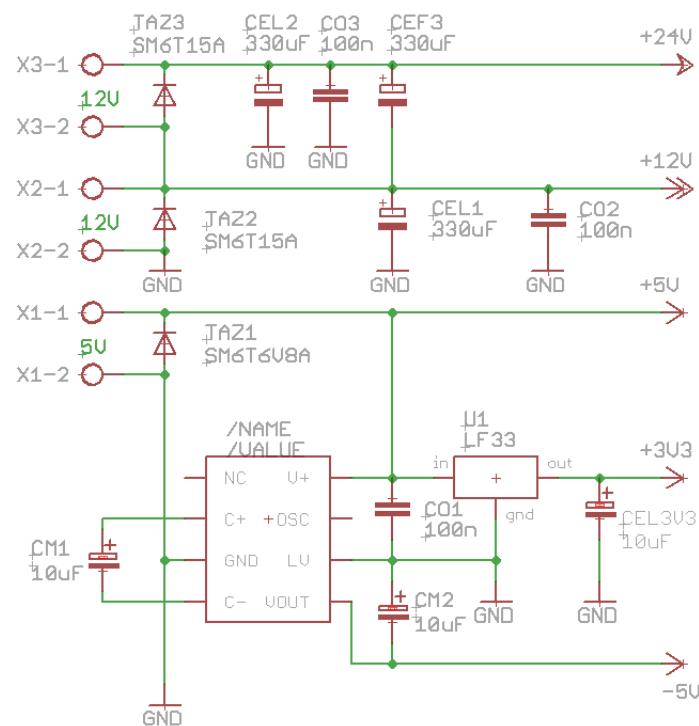
2.4.1 Obvody napájení

Na desku jsou přivedena napájecí napětí $+5 V$, $+12 V$ se společnou zemí a $12 V$, která jsou galvanicky oddělená. Záporná svorka tohoto plovoucího napětí je připojena na kladnou svorku druhé dvanáctivoltové větve. Napájecí obvody jsou tvořeny filtračními kondenzátory $CEL1$ a $CEL2$ v obou dvanáctivoltových větvích. Napětí $24 V$ vytvořené složením z dvojice $12 V$ zdrojů je filtrováno dalším kondenzátorem $CEL3$ k zemi. Kromě těchto filtračních elektrolytických kondenzátorů jsou připojeny keramické kondenzátory $CO2$, $CO3$ ve větvích $12 V$ a $CO1$ v $5V$ věti o hodnotě $100 nF$

Každá z větví je chráněna transilem. Pro $12 V$ větve jsou to transily $TAZ2$ a $TAZ3$ s $U_{br} = 15 V$. V $5 V$ věti je to transil $TAZ1$ s $U_{br} = 6.8 V$.

O vytvoření napájecího napětí pro procesor se stará integrovaný třísvorkový stabilizátor s nízkým úbytkem napětí LF33.

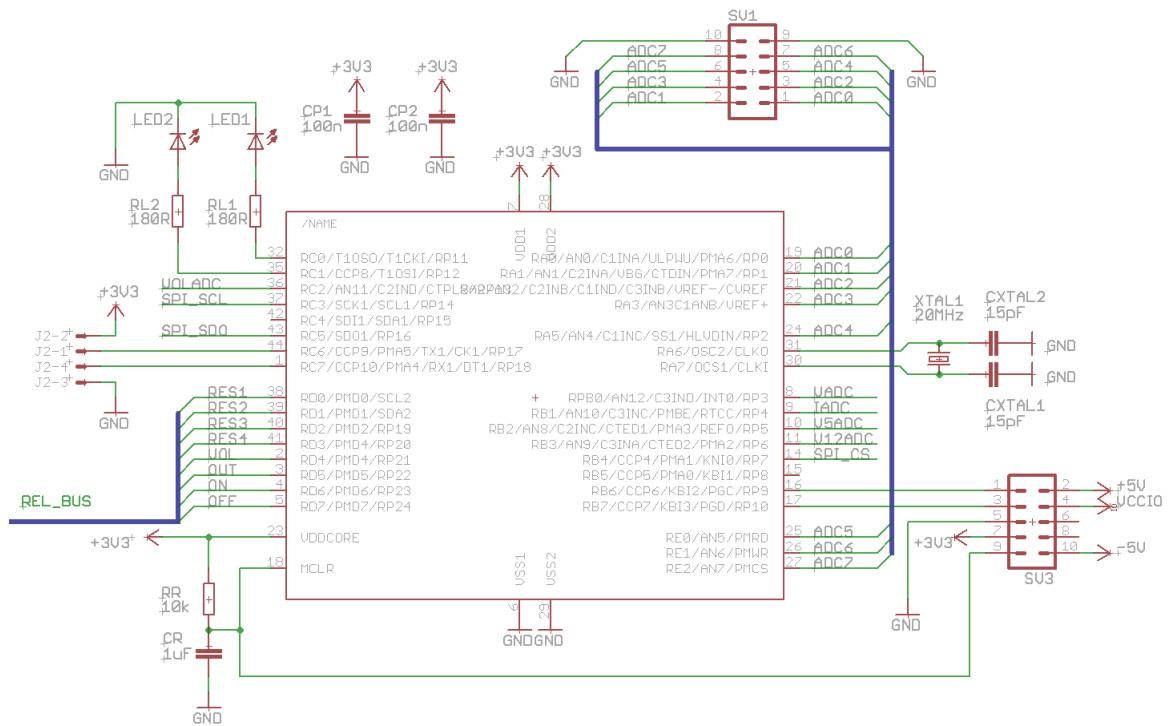
Záporné napětí je vytvářeno měničem TC7660 doplněným potřebnými kondenzátory $CM1$ a $CM2$.



Obr. 2.8: Napájení desky

2.4.2 Obvody zajišťující funkci MCU

Obvody zajišťující funkci procesoru se skládá z obvodu reset, filtračních kondenzátorů a obvodu oscilátoru složeného z krystalu *XTAL1* a kondenzátorů *CXTAL1* a *CXTAL2*. Obvod reset je tvořen RC článkem (rezistor *RR* a kondenzátor *CR*).



Obr. 2.9: Procesor, obvody zajišťující jeho činnost a připojení jeho vývodů

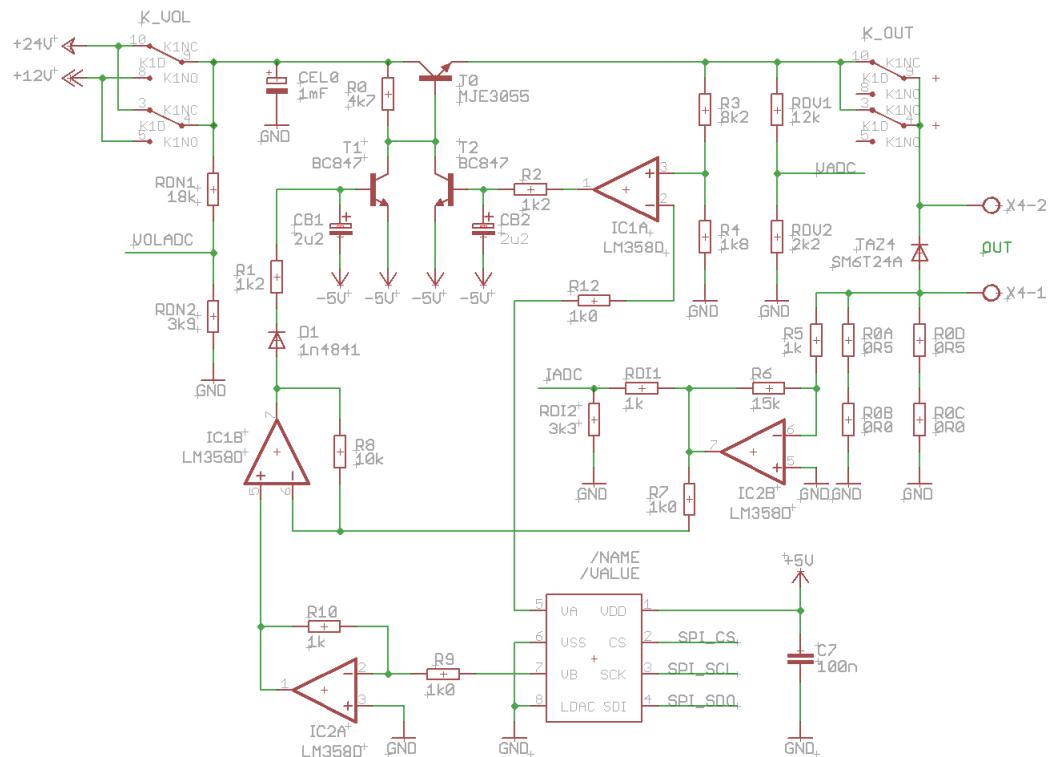
2.4.3 Obvody výkonové části

Výkonová část je stěžejní částí celého zdroj. Spolu s DA převodníkem určuje dosažitelné výstupní parametry zdroje

Požadavky na výkonovou část:

- Schopnost dodat výstupní výkon 20 W ($U = 20 \text{ V}$ $I = 1 \text{ A}$)
- Minimální kapacita výstupu
- Dostatečně jemná regulace výstupního napětí (krok 10 mV)
- Dostatečně velká regulace výstupního proudu (krok 1 mA)

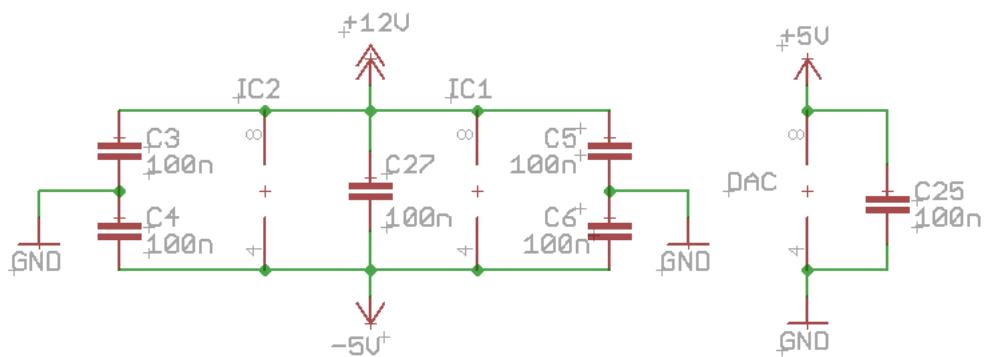
Jako reference velikosti maximálního výstupního napětí a proudu je DA převodník *MCP4822*. Za který jsou umístěny operační zesilovače. Ve větvi regulace napětí je to *IC1A*. Je zapojen jako komparátor. Při překročení požadovaného napětí komparátor otevře tranzistor *T2* a ten sníží napětí na výstupu tranzistoru *T0*.



Obr. 2.10: Výkonová (analogová část) zdroje

Ve větvi regulace proudu je operační zesilovač *IC1B* zapojen jako diferenciální zesilovač. Pokud byl zapojen jako komparátor, způsoboval značnou nestabilitu zdroje. Výstup tohoto zesilovače je připojen přes diodu a ochranný rezistor k bázi tranzistoru *T1*, který v případě dosažení požadovaného maximálního proudu začne přivírat tranzistor *T0* tak,

aby napětí již dále nerostlo. Kondenzátory $CB1$ a $CB2$ zlepšují stabilitu zdroje na úkor rychlosti reakce zdroje. Hodnota, při které byl zdroj 100% stabilní, je $2,2 \mu\text{F}$. Referenční napětí pro diferenciální zesilovač $IC1B$ je získáno invertováním napětí z DA převodníku pomocí invertujícího zapojení operačního zesilovače $IC2A$. Napětí pro invertující $IC1B$ je pak získáno zesílením úbytku na snímacích rezistorech $R0A$, $R0B$, $R0C$ a $R0D$ pomocí operačního zesilovače $IC2B$ v invertujícím zapojení. Napětí je přivedeno také na dělič složený z rezistorů $RDI1$ a $RDI2$. Výstup děliče je přiveden na AD převodník v procesoru a slouží jak pro softwarovou eliminaci úbytků na snímacích rezistorech, tak i pro odečet proudu tekoucího do zátěže. Dělič složený z rezistorů $RDV1$ a $RDV2$ slouží pro odečet napětí na výstupu zdroje. Je zde započtena velikost napětí vůči zemi zdroje, nikoliv vůči záporné výstupní svorce. Tento neduh je kompenzován softwarově pomocí hodnoty odečetné z děliče RDI . Pro snížení ztrát se na vstupu vybírá ze dvou napětí 12 V a 24 V. Při výstupních napětích menších než 10 V je používáno napětí 12 V. O přepínání vstupních napětí se stará procesor, stejně jako o připojení napětí na výstup. Další důležitou součástí jsou blokovací kondenzátory u operačních zesilovačů a DA převodníku. O ochranu výstupu před připojením jiného napětí, a to jak kladného, tak i záporného, se stará transil $TAZ4$.



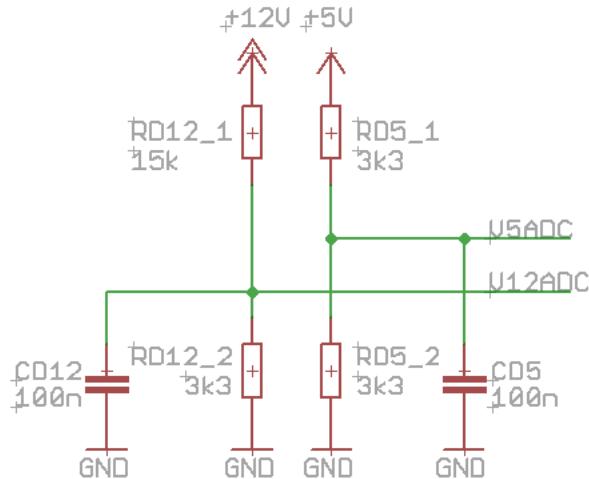
Obr. 2.11: Výkonová (Blokování napájení výkonové části)

Pro zajištění bezchybné funkce analogové části je kvalitní blokování napájení operačních zesilovačů a DA převodníku v těsné blízkosti.

Celý zdroj je vybaven sledováním vnitřních napětí pro diagnostiku. Ta se skládá z děličů, které upravují měřené napětí pro AD převodníky mikrokontroléra. Děliče pro kontrolu výstupních veličin již byly zmíněny. Další děliče jsou připojeny na napětí +12 V, +5 V a na napětí na $C0$. Napětí 3,3 V větve není sledováno, protože to považuji za zbytečné, a napětí -5 V větve také ne. Důvodem je, aby větev nebyla zbytečně zatěžována, což umožnilo použít další dva převodníky pro měřící vstupy.

Pro snadný výpočet děliče se dolní rezistory $RD5_2$, $RD12_2$ a $RDN2$ děličů volí $3,3 \text{ k}\Omega$. Potom platí, že $1 \text{ k}\Omega$ odpovídá 1 V při maximálním napětí děliče. Děliče volíme s dostatečnou rezervou, protože je deska napájena impulzním zdrojem s váhovanou stabilizací

a napětí mohou značně kolísat. Volíme tedy $RD5_1 = 3,3 \text{ k}\Omega$. Dělič je pro napětí až 6,6 V. Rezistor $RD12_1 = 15 \text{ k}\Omega$. Dělič tedy snese napětí 18,3 V. Rezistor děliče $RDN1 = 33 \text{ k}\Omega$, tedy pro napětí 36,3 V.

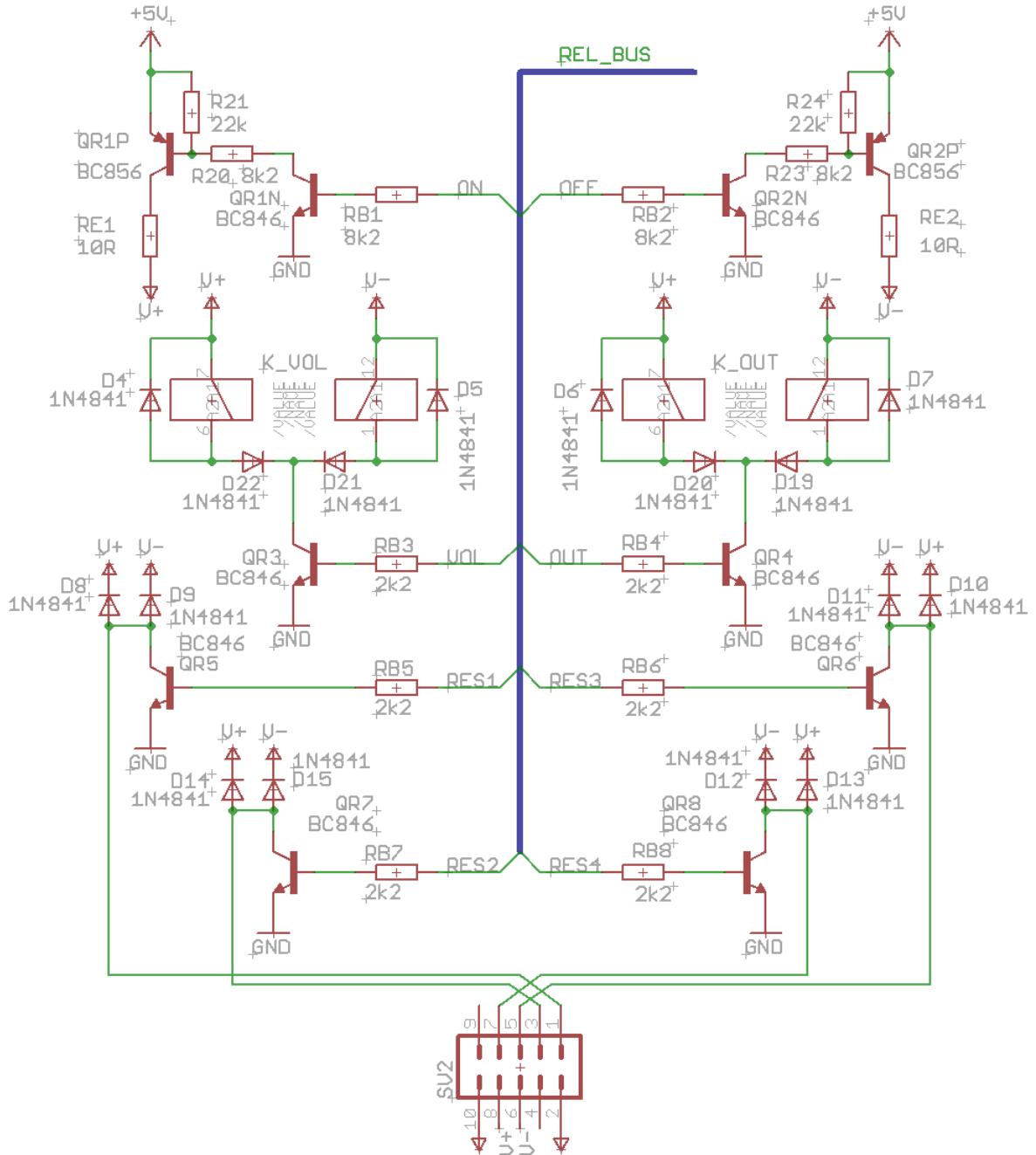


Obr. 2.12: Výkonová část(Děliče)

U děličů na výstupu zdroje již musím volit hodnoty mnohem přesněji, neboť potřebuje co nejvyšší možné rozlišení AD převodníku. Napěťový dělič je navržen s malou rezervou, aby na převodník bylo možné přivést zhruba o 1 V vyšší napětí. Rezistory mají hodnoty $RDV1 = 12 \text{ k}\Omega$ a $RDV2 = 2.2 \text{ k}\Omega$. Dělič pro proud měření proudu je zapojen na výstupu zesilovače, který zesiluje napětí na snímacích rezistorech. Je složen z rezistoru $RDI1 = 1 \text{ k}\Omega$ a $RDI2 = 3.3 \text{ k}\Omega$.

2.4.4 Obvody ovládání relé

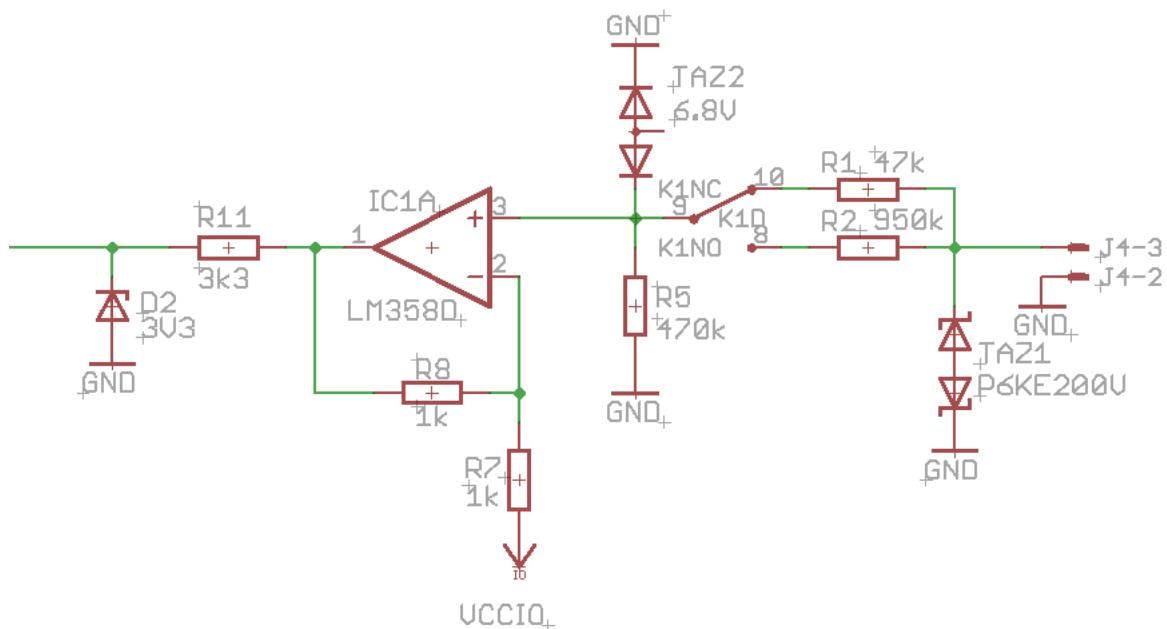
Veškerá relé použitá na tomto modulu jsou bistabilní se dvojicí cívek. Neboť je na desce použito 6 relátek, bylo by při přímém spínání cívek potřeba 12 výstupů z procesoru. Takové množství výstupů bohužel není k dispozice, je proto použito maticové zapojení. Dva vývody jsou použity pro určení směru přepínání relé, dalších šest vstupů adresuje relé. Adresovací piny jsou připojeny přes ochranné rezistory RBx k bázím tranzistorů QRx typu NPN, které mají v kolektorech přes diodu zapojený jeden konec vinutí cívky. Druhý konec je připojen ke kolektoru tranzistoru $QRxP$ typu PNP, které jsou buzeny tranzistory $QRxN$ typu NPN. Relé jsou chráněna antiparalelními diodami zapojenými k vinutím.



Obr. 2.13: Měřící vstupy (přepínání rozsahů, stejnosměrný posuv, ochrany)

2.4.5 Měřicí obvody

Na měřicí vstupy zdroje vstupují signály, které mnohdy nemají vhodné úrovně pro přímé zpracování AD převodníkem. Měřicí obvody tedy mají za úkol přepínání rozsahů 1:2 a 1:20 a úpravu úrovní pro AD převodník mikrokontroléru. Rozsahy jsou přepínány bistabilními relátky a úroveň signálu je stejnosměrně posunutá do kladných hodnot pomocí operačních zesilovačů typu LM358.



Obr. 2.14: Měřící vstupy (přepínání rozsahů, stejnosměrný posuv, ochrany)

Při použití rozsahu 1:2 lze na vstup přivést napětí $0\text{--}\pm 2$ V, při použití rozsahu 1:20 pak napětí $0\text{--}\pm 20$ V

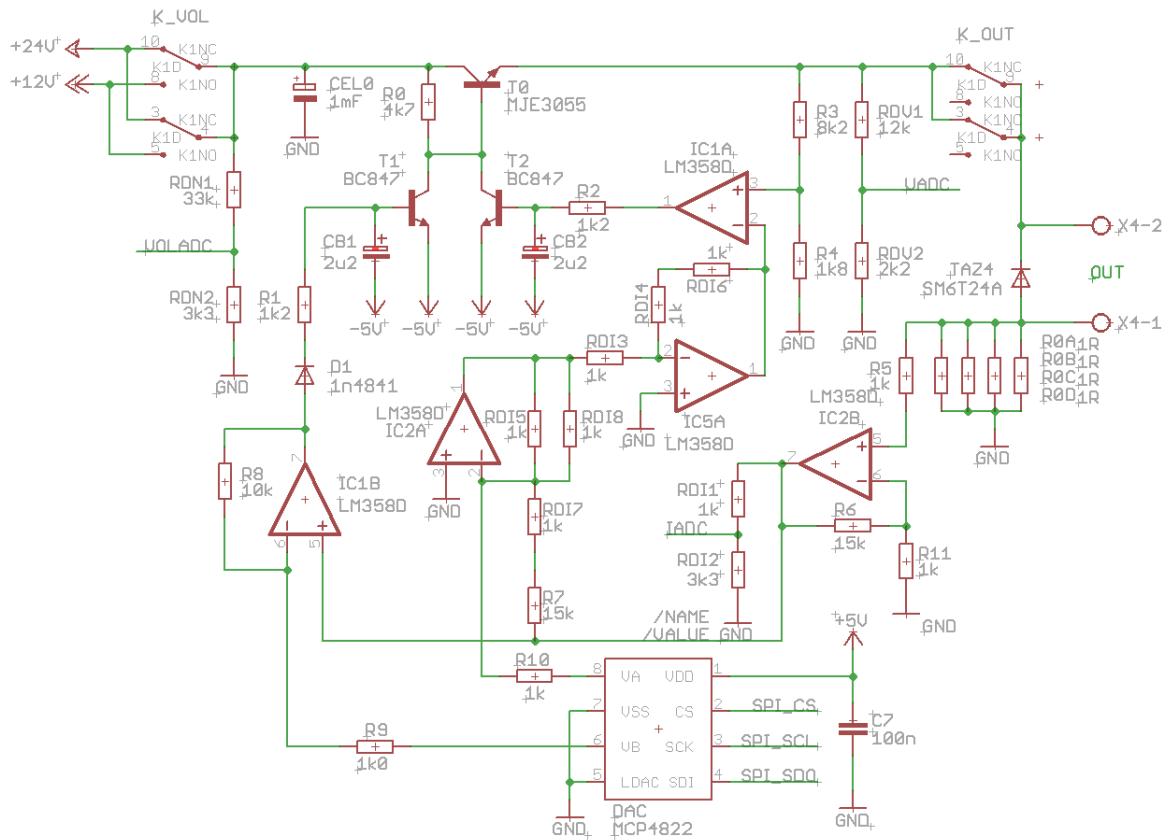
Měřicí obvody včetně relé pro přepínaní rozsahů jsou na oddělené desce.

2.4.6 Chyby v návrhu

Při analýze prvního návrhu bylo objeveno několik chyb a nedostatků, které budou opraveny v další revizi desky.

- Na dělič RDI je přiváděno záporné napětí. Záporné napětí se tedy dostává na pin procesoru.
- Obrácená polarita reference pro měřící vstupy.
- Nevhodné zapojení zesilovačů měřicích vstupů. Stejnosměrný posun je prováděn na vstupech operačních zesilovačů, což má za následek nepřesné hodnoty na vstupech AD převodníků. Je potřeba používat mnoho bytů AD převodníku pro kalibraci. Navíc předěláním zdroje pro referenční napětí -2 V byla přetížena větev -5 V.
- Na desku nebylo umístěno relé pro interní spřažení výstupů.
- Chybná knihovna AD převodníku MCP4288 pro program EAGLE.
- Nepříjemná se jeví také nutnost softwarové kompenzace úbytků na snímacích rezistorech.
- Malé izolační mezery u distančních sloupků (zem desky propojena s kostrou šasi).

2.4.7 Nový obvodový návrh regulační části



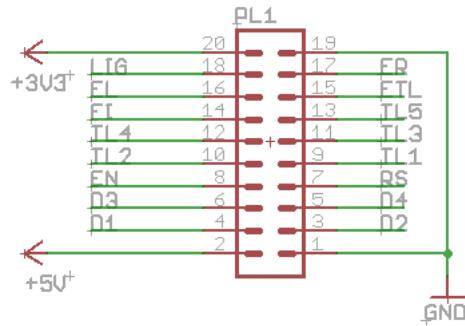
Obr. 2.15: Výkonová (analogová část) zdroje - nový návrh

Tento návrh má za úkol eliminovat úbytky napětí na snímacích rezistorech proudu hardwarově na místo softwarového řešení použitého u předchozí verze obvodu. Dale opravuje chybu v knihovně převodníku MCP4822. A je přehozena polarita napětí na děliče RDI, tak jak má být.

Eliminaci úbytků napětí na snímacích rezistorech zajišťuje sumační OZ IC2A a 2x zesilující invertor IC5A.

2.5 Ovládací modul

Deska ovládacího modulu zajišťuje pouze mechanické upevnění ovládacích a zobrazenovacích prvků, jejich elektrické propojení a převod úrovní pro displej. K řídící desce je připojena prostřednictvím konektoru PLF20. Displej je volen s řadičem HD44780[19] a využívá 4 datové vodiče. Vodiče pro tlačítka jsou připojeny na pull-up rezistory a stiskem tlačítka nebo otočením rotačního kodéru se piny připojují k zemi.

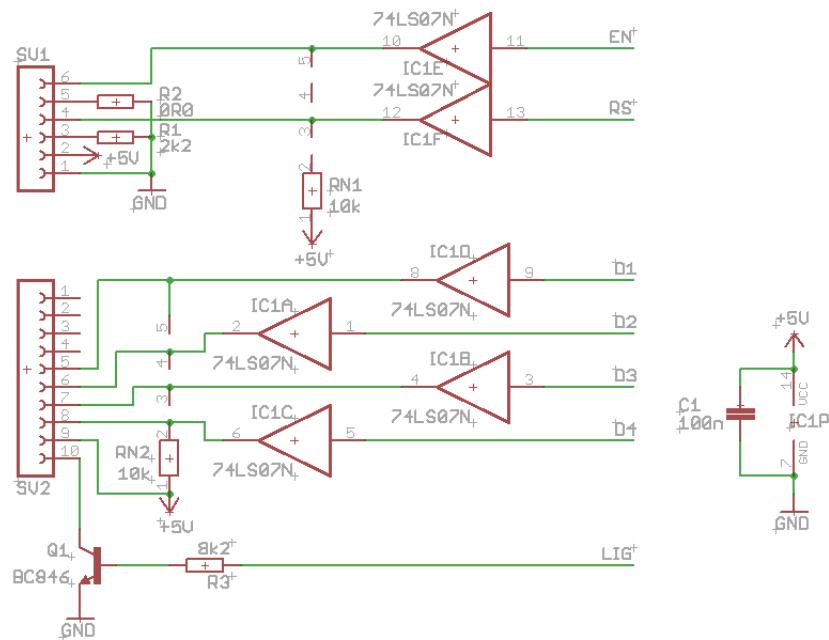


Obr. 2.16: Konektor pro připojení k řídící desce

Popis signálů:

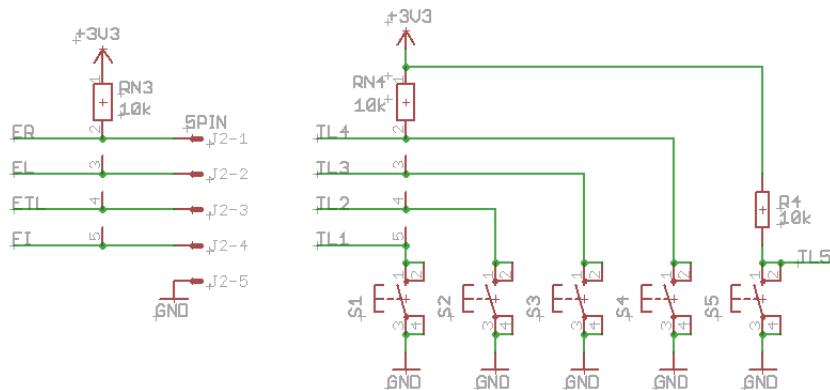
- D1 - D4: Data pro display
- EN: Display Enable
- RS: Display Data/Příkaz
- TL1 - TL5: Tlačítka
- FI:Tlačítko Fine
- EL, ER: n-koder rotace
- ETL: n-koder stisk
- LIG: Podsvícení LCD

RNx jsou rezistorové sítě obsahující 4x rezistor $10\text{ k}\Omega$



Obr. 2.17: Signály pro display

Rezistorové sítě $RN3$ a $RN4$ nemusí být připojeny, pokud jsou v mikrokontroléru připojeny pull-up rezistory.



Obr. 2.18: Zapojení tlačítek a konektorů pro připojení rotačního n-kodéru a tlačítka Fine

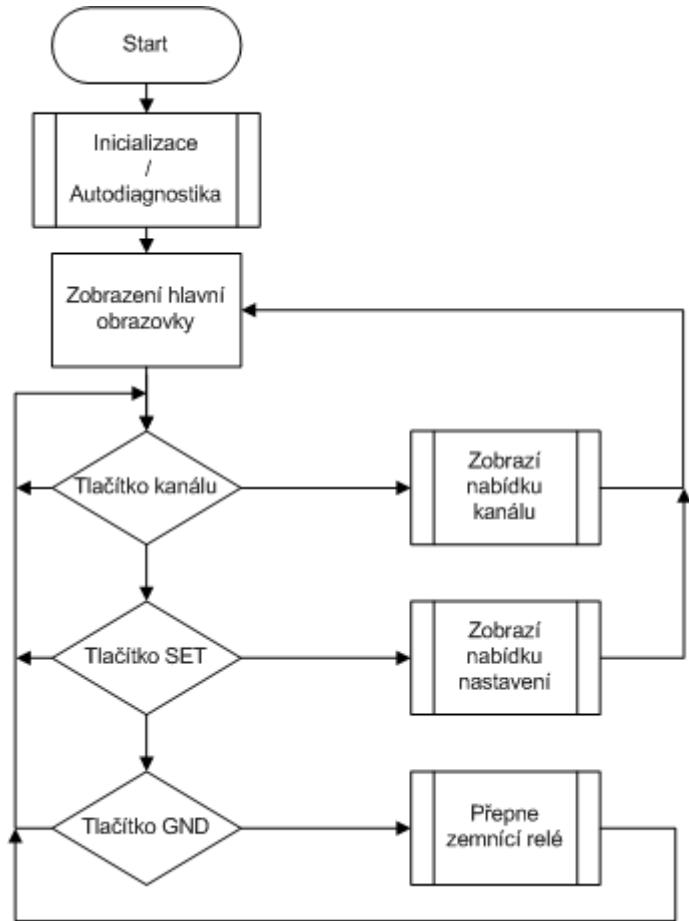
3 FIRMWARE

Firmware pro procesory PIC 18F je psán v jazyce C pro kompilátor MCC18.

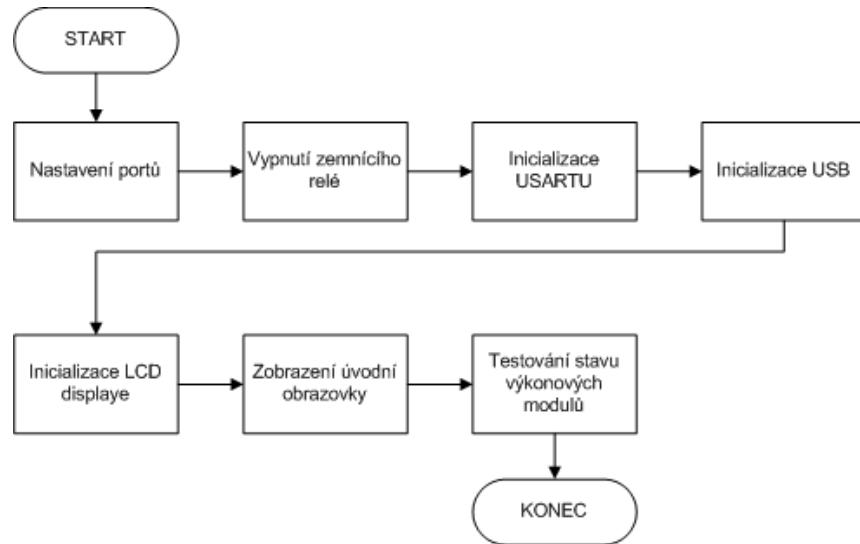
3.1 Firmware řídícího modulu

Firmware řídícího modulu je koncipován tak, že během svého běžného běhu, tj. vyjma obsluhy přerušení, kontroluje činnosti obsluhy, reaguje na ně a vykonává příslušné operace. Druhou důležitou částí je obsluha přerušení. Přerušení je zde vyvoláváno periodicky časovačem. Ten si po určitém intervalu vyžádá data z výkonových modulů a dojde k opětovnému přerušení. Na data se nečeká, ale pokračuje se v programu. Jakmile jsou data přijata, je vyvoláno přerušení od USARTU a data se zpracují a uloží do proměnných. Posledním zdrojem přerušení je USB.

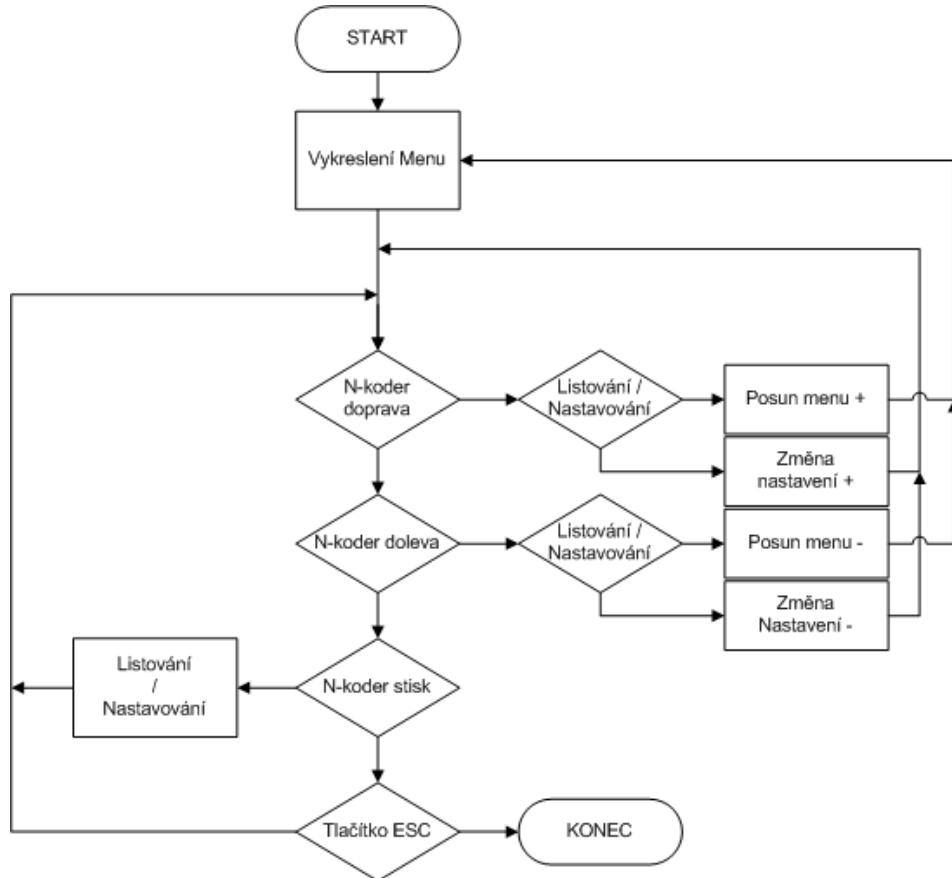
Program začíná inicializací portů a komponent, pokračuje přes vykreslení obrazovky do vedlejší smyčky menu, kde se testují stisky tlačítek a reaguje se na ně.



Obr. 3.1: Stručný vývojový diagram: Inicializace, Autodiagnostika, Zobrazení hlavní nabídky



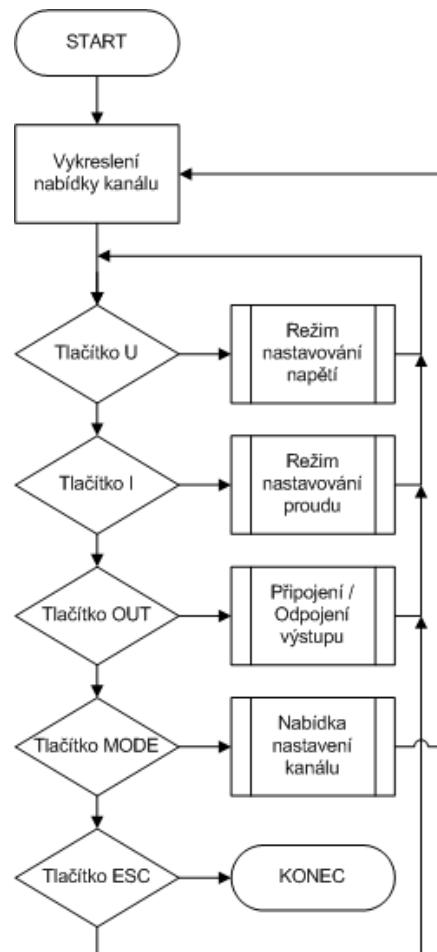
Obr. 3.2: Stručný vývojový diagram: Inicializace, Autodiagnostika (detail)



Obr. 3.3: Stručný vývojový diagram: Nabídka nastavení

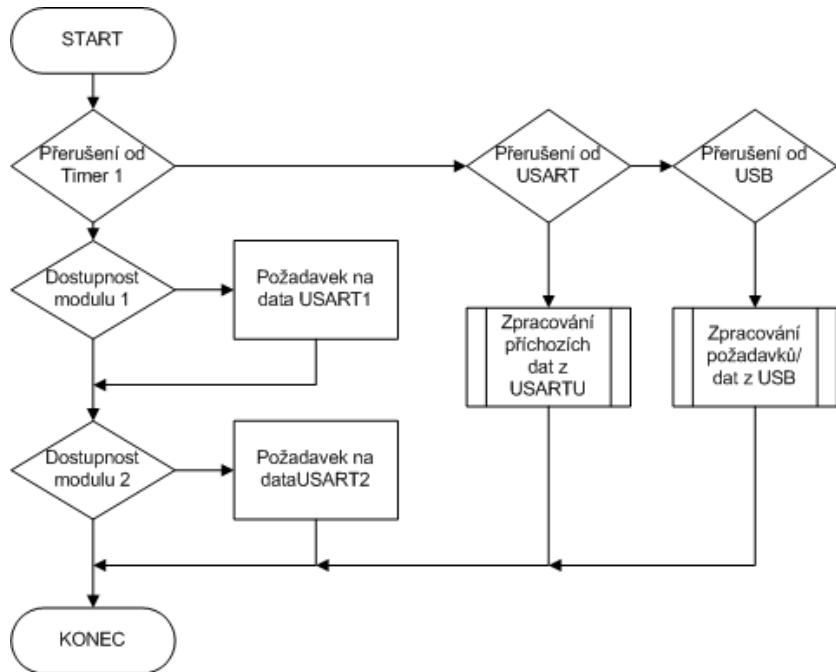
Nabídka menu je realizována jiným způsobem než hlavní menu a menu kanálu, kde se využívají čtyři interaktivní tlačítka pod displejem. V nastavení se pro ovládání používá výhradně rotačního n-koderu. Pomocí něj se posouvá nabídka a jeho stiskem se přepne na změnu parametru vybrané položky.

Nabídka kanálu se chová obdobně jako hlavní nabídka. Vykreslí se potřebné informace na display a čeká se na stisk tlačítka.



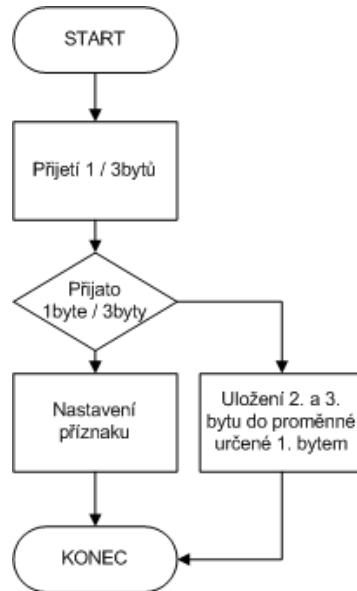
Obr. 3.4: Stručný vývojový diagram: Nabídka kanálu

O další činnosti, tedy o ty, které přímo nevycházejí od obsluhy, se starají přerušení. První z přerušení vysílá periodicky požadavky na stav modulu a parametry výstupních veličin. Další dva zdroje přerušení jsou USB a USART.



Obr. 3.5: Stručný vývojový diagram: Přerušení

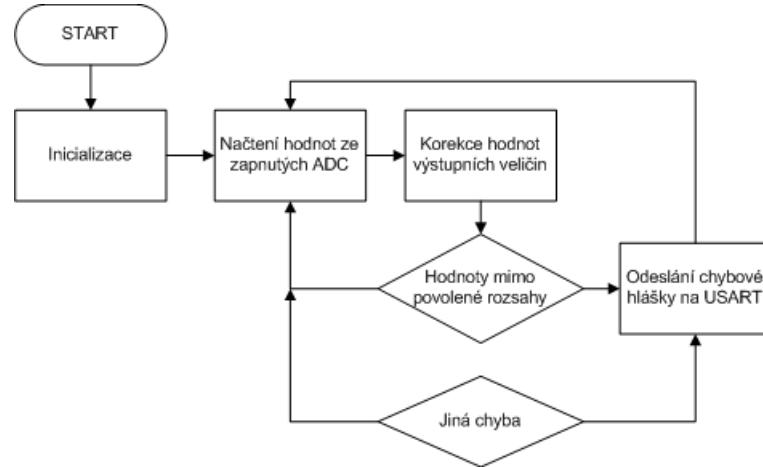
Na výsledky se ovšem nečeká. Ty jsou zpracovány až po přijet přerušení od dat, která přišla z výkonového modulu na příslušný USART.



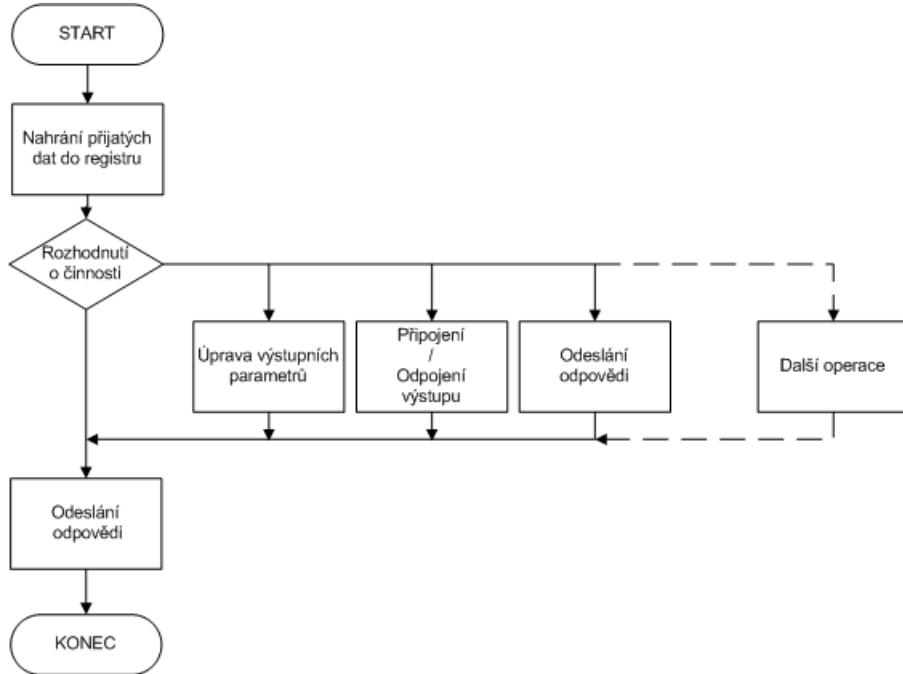
Obr. 3.6: Stručný vývojový diagram: Nabídka kanálu

3.2 Firmware výkonového modulu

Firmware výkonového modulu se stará pouze o kontrolu výstupních veličin, tj. řízení DA převodníku a vykonávání příkazů, kterému zadá řídící modul. O úpravu hodnot výstupních veličin se stará ve hlavní smyčce. O komunikaci s řídícím modulem v obsluze přerušení od USARTu.



Obr. 3.7: Stručný vývojový diagram: Hlavní program



Obr. 3.8: Stručný vývojový diagram: Přerušení od USARTu

Zdrojové kódy jsou dostupné na přiloženém CD v adresáři Firmware

4 KOMUNIKACE MEZI MODULY

Komunikace mezi moduly je realizována rozhraním USART. Používá se asynchronní mód a rychlosť 9600 Baudů. Datové rámce jsou čtyřbytové:

Byte	1	2	3	4
Data	Příkaz	Data H	Data L	ACK (0xAA)

Tab. 4.1: Datový rámec pro komunikační rychlosť 9600 Baudů

Při nízké datové rychlosti není potřeba příliš kontrolovat stav dat. Proto se kontroluje pouze rámce kontrolním čtvrtým bytem.

Tato komunikační rychlosť ale občas zdržuje některé procesy, proto je testován rychlejší protokol, který pracuje na rychlostech 19200 nebo 38400. Ten již ale využívá kontrolu dat pomocí kontrolního součtu CRC. A disponuje možností vyžádat data znova.

Byte	1	2	3	4
Data	Příkaz	Data H	Data L	CRC

Tab. 4.2: Datový rámec pro komunikační rychlosť 19200 a 38400 Baudů

$$CRC = (Byte1 + Byte2 + Byte3) \bmod 256 + (Byte1 + Byte2 + Byte3) / 256$$

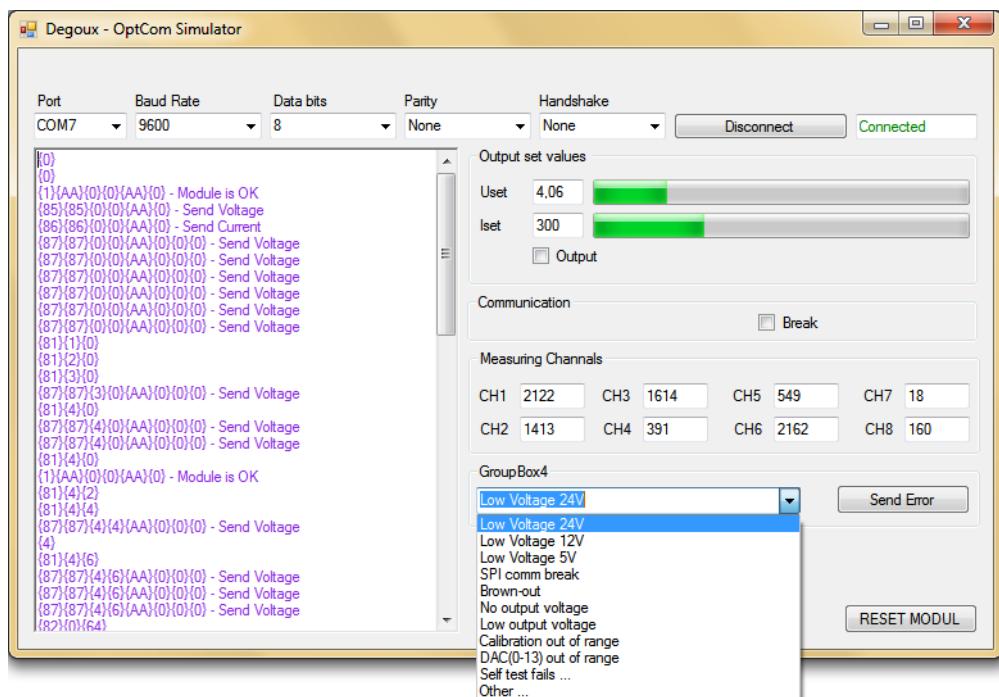
Do budoucnosti se počítá s 12-ti bytovým samoopravným kódem a komunikační rychlosťí až 115200.

5 SOFTWARE

Software pro řízení a vývoj zdroje je psán v jazyce VB.net ve vývojovém prostředí Microsoft Visual Basic 2010 Express. Tento jazyk jsem zvolil z důvodu znalosti jazyka Visual Basic 6.0.

5.1 Testovací software

Pro zjednodušení návrhu komunikace a vývoje řídícího modulu byl vytvořen pomocný software simulující připojení výkonového modulu. Tento software je navržen tak, aby obsloužil požadavky řídícího modulu tak, jak by to udělal skutečný výkonový modul. To je až na rychlosť reakce, která je u PC mnohem pomalejší než u výkonového modulu. Proto byl ve firmwaru výkonového modulu zaveden testovací mód, kdy jsou pomocí podmíněného překladu přidány časové prodlevy komunikuje-li se s tímto simulačním softwarem.



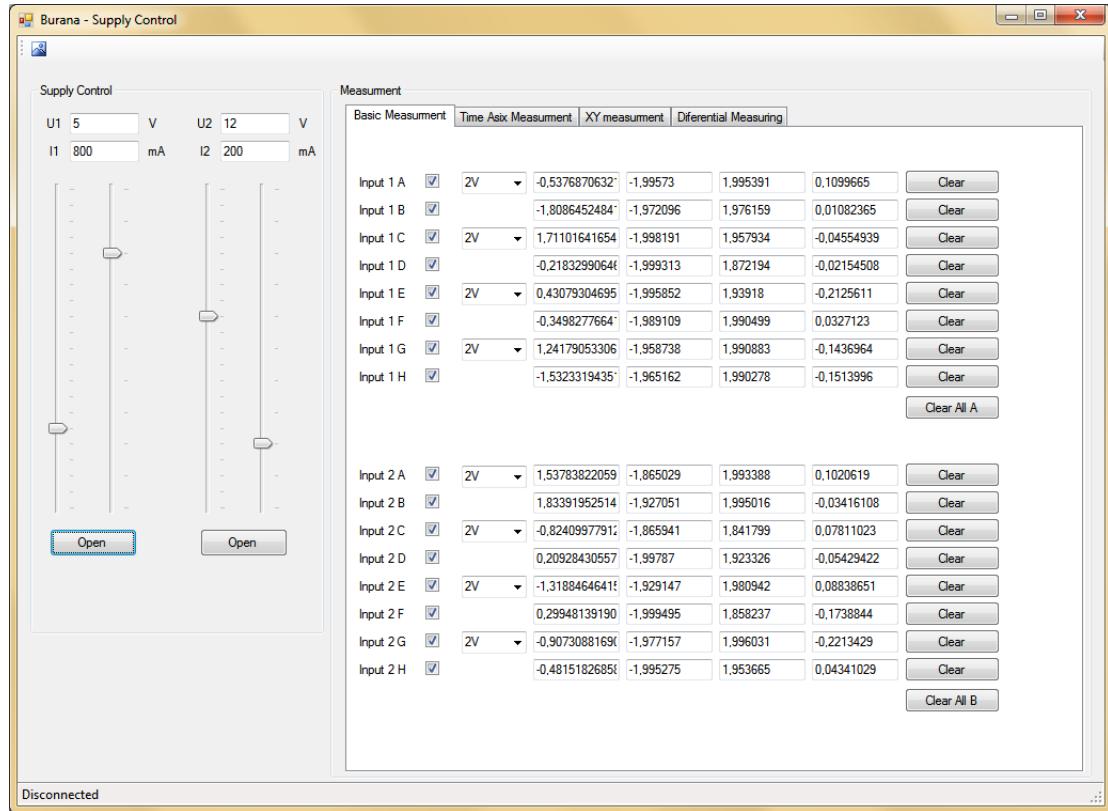
Obr. 5.1: Formulář simulačního softwaru pro komunikaci

Výkonový modul má běžně práva pouze odpovídat na dotazy řídící jednotky, výjimkou je ale situace, kdy dojde k chybě. V tom případě modul sám bez čekání odesílá hlášení o chybě. Pro vývojové práce je dále povolena žádost o reset řídícího modulu požadavkem z výkonového modulu.

Ostatní komunikace probíhá vždy na požadavek řídícího modulu. Běžně jsou to požadavky na změnu výstupního napětí nebo proudu a požadavky na skutečné hodnoty těchto veličin nebo na hodnoty napětí na měřících vstupech.

5.2 Řídící software

Řídící software obstarává komunikaci se zdrojem prostřednictvím PC, tedy jeho ovládání, a sběr dat ze zdroje. Komunikace probíhá prostřednictvím portu USB (momentálně pouze zprostředkován přes virtuální COM port). Software nabídne širokou škálu měření. V okamžiku vydání této práce jsou k dispozici pouze dva módy a to mód směru surových dat 5.2 a mód zobrazení dat do grafů 5.3

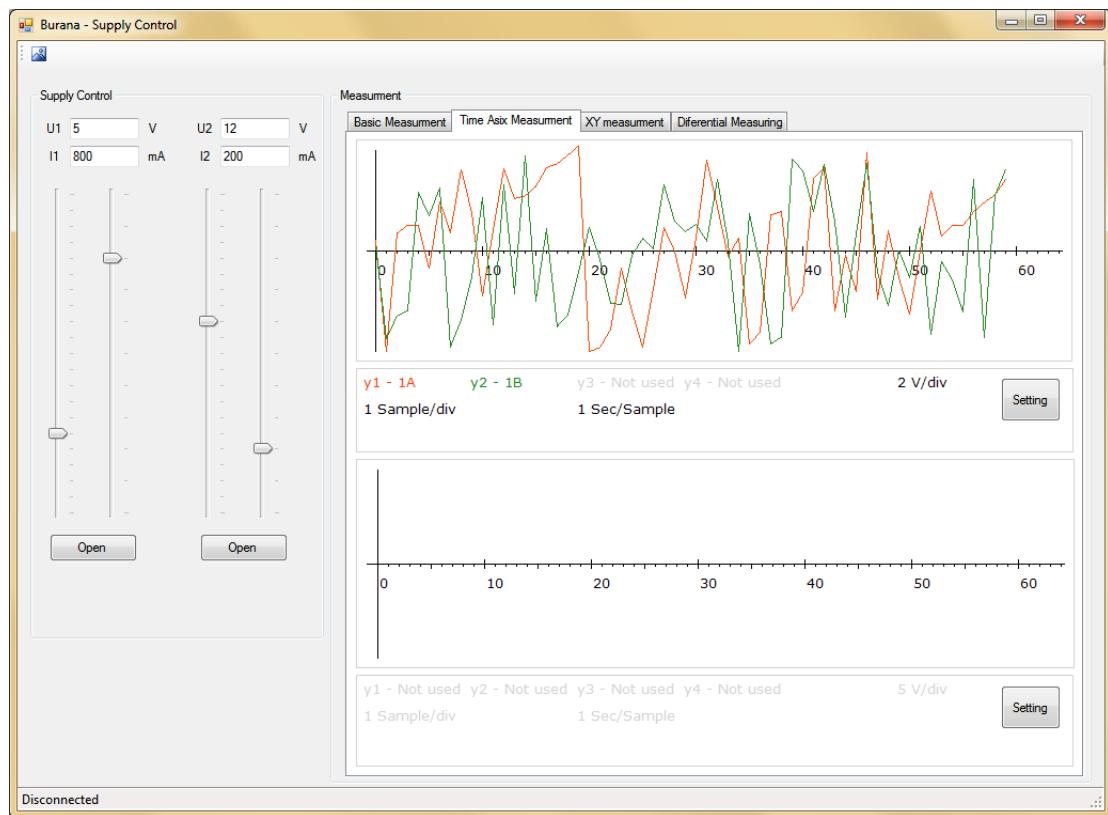


Obr. 5.2: Mód směru surových dat

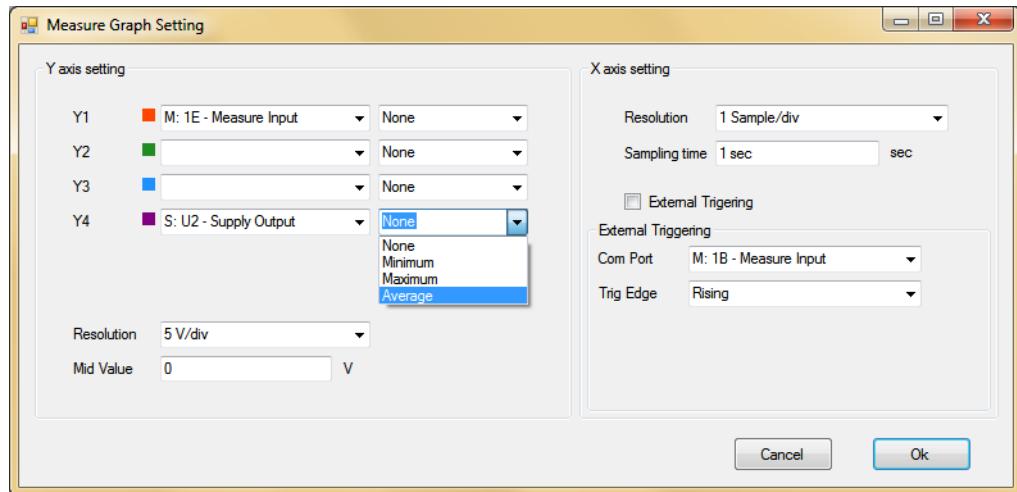
V levé části je ovládací část výstupů zdroje, a v pravé části jsou zobrazována data z měřících vstupů. Jejich maximum, minimum a průměr za dobu měření.

Při výběru druhé záložky *Time axis measurement* se dostaneme do módu zobrazovaní naměřených hodnot do grafů.

Pro nastavení parametrů zobrazení grafů slouží nabídka 5.4 dostupná přes tlačítko setting.



Obr. 5.3: Mód zobrazení dat do grafů

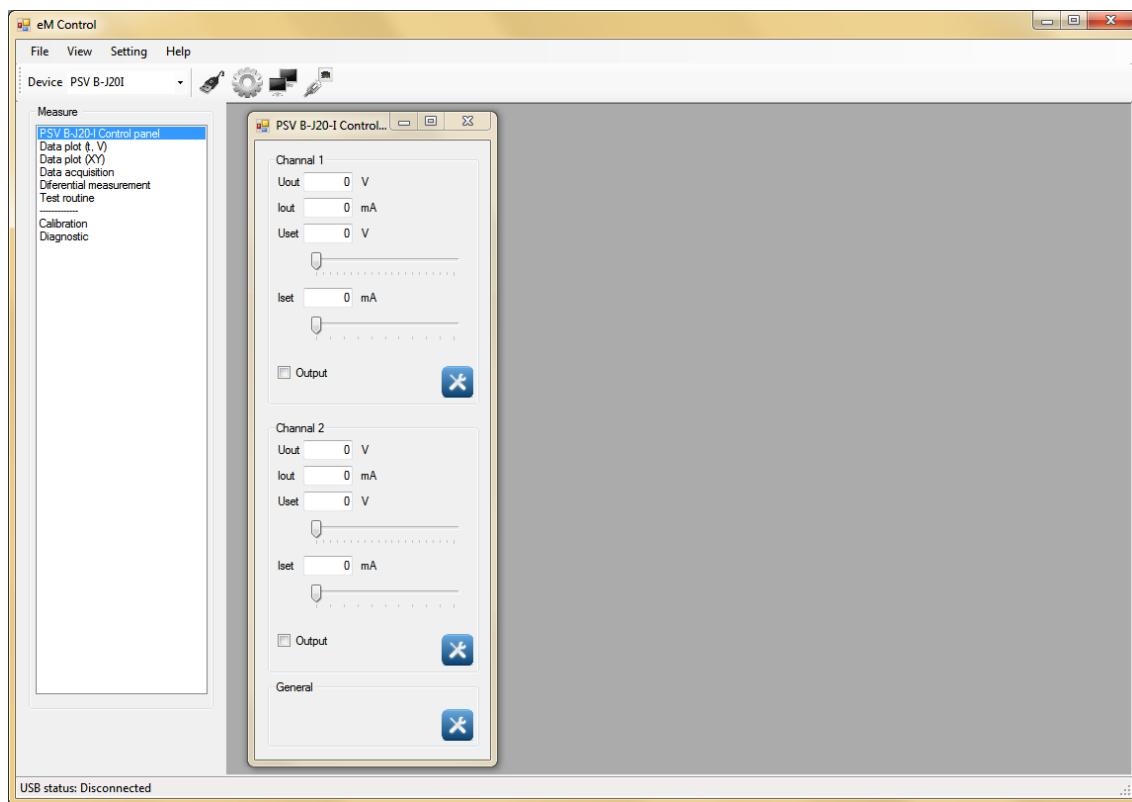


Obr. 5.4: Mód zobrazení dat do grafů

Možnosti softwaru plánované do budoucna:

- Plná podpora USB
- Komunikace pomocí SCPI (Standard Commands for Programmable Instruments)
- Měření v osách XY
- Diferenciální měření (měření proudu na známé součástce)
- Jedno-kvadrantový charakterograf
- Export dat od Excelu
- Kalibrace
- Možnost přehrát firmware ve zdroji

Vzhledem, k nefunkčnímu rozhraní USB byl vývoj řídícího softwaru pozastaven. Navíc software ve své původní koncepci nevyhovuje požadavkům do budoucna a postrádá dynamiku. A přehlednost. Proto jsem začal pracovat na nové verzi, která vychází ze zkušeností při vývoji první verze.



Obr. 5.5: Nová verze Softwaru

Zdrojové kódy jsou dostupné na přiloženém CD v adresáři Software. Zdrojové kódy nové verze nejsou přiloženy.

6 MĚŘENÍ

6.1 Měření na zdroji pro řídící modul

6.1.1 Měření výstupních parametrů

Měření zaměřené na parametry výstupního napětí v závislosti na zátěži a velikosti vstupního napětí.

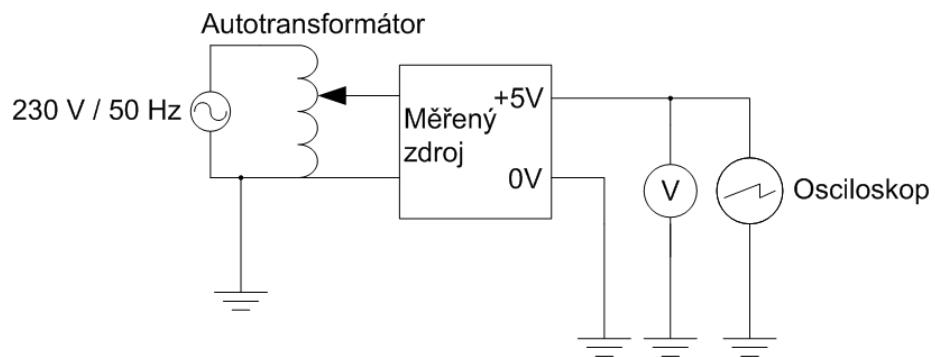
Použité měřící přístroje:

- Autotransformátor: *ESS11013 – 1386*
- Multimetr: *MY68* - bez kalibrace
- Osciloskop: *HP54501* - bez kalibrace
- Zátěž: 5Ω ($5 \times 1 \Omega$ 5% 5W) přesná hodnota $4,96 \Omega$

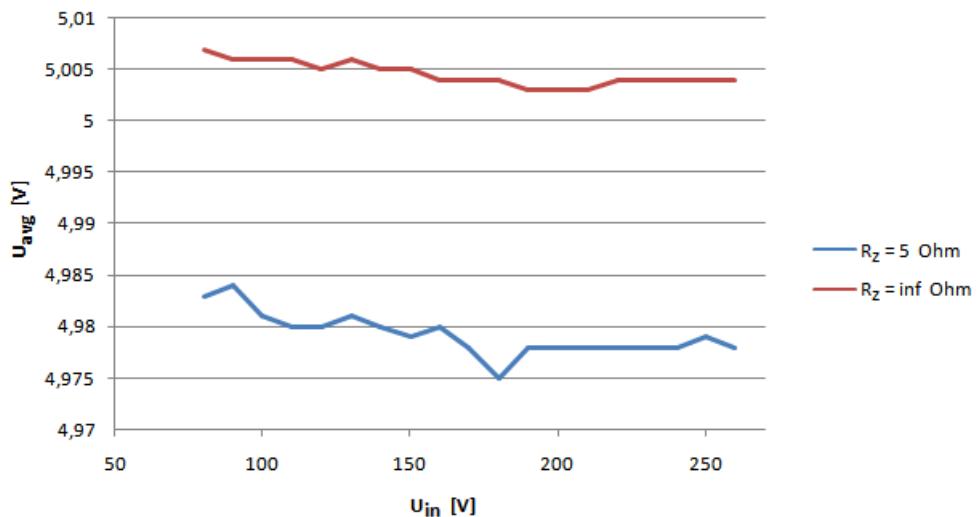
Podmínky měření:

- Datum 23.1.2011
- Teplota: 22.2°C

Měření je zaměřené na měření parametrů výstupního napětí. Měří se jeho střední hodnota průměrováná po dobu jedné minuty. Pro odhad rušení se měří rozkmit tohoto napětí průměrováný také po dobu jedné minuty. Do grafů jsou tyto hodnoty vynášeny v závislosti na vstupním napětí. A vždy pro zdroj nezatížený, a zdroj zatížený rezistorem 5Ω .

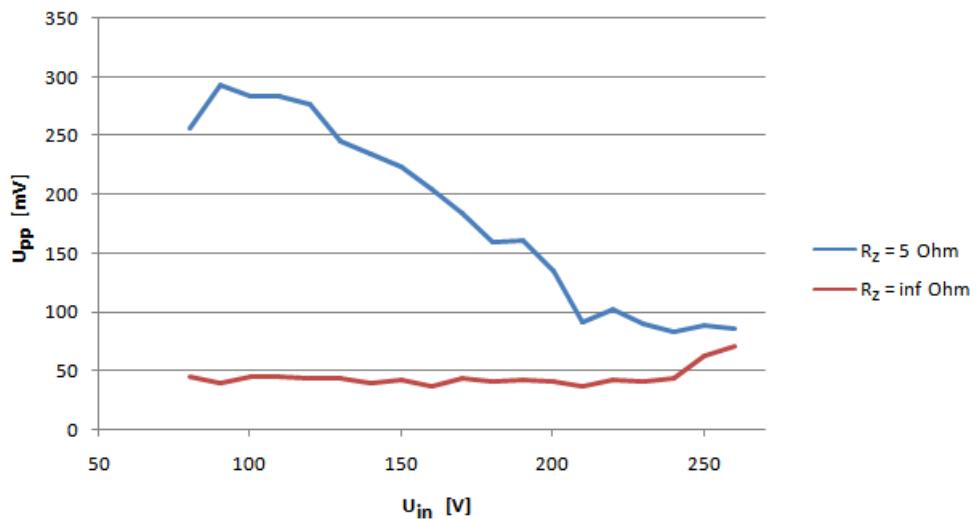


Obr. 6.1: Zapojení měřicího pracoviště



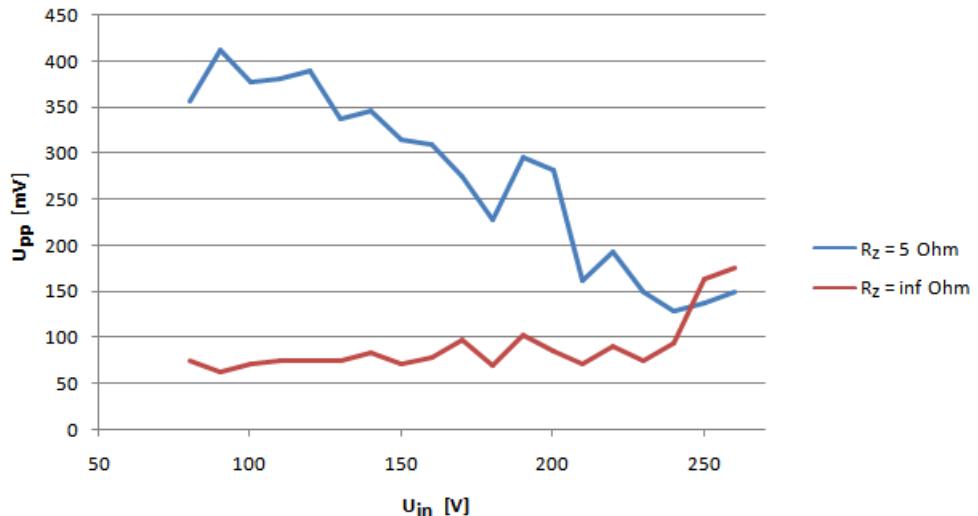
Obr. 6.2: Závislost velikosti střední hodnoty výstupního napětí na vstupním napětí

Z tohoto měření je patrné, že zdroj lze použít i v síti 120 V/ 60 Hz. A to s kolísáním napětí 20 %.



Obr. 6.3: Závislost velikosti rozkmitu výstupního napětí na vstupním napětí

Z měření je patrný růst velikosti rozkmitu výstupního napětí s klesající hodnotou efektivní hodnoty vstupního napětí. Pro doplnění přidávám graf, kde je namísto průměru hodnoty za čas jedné minuty uvedeno maximum změřené hodnoty.



Obr. 6.4: Závislost velikosti rozkmitu výstupního napětí na vstupním napětí (maximum)

6.1.2 Měření vyzařování rušení do sítě

Měření je prováděno na různých konfiguracích síťového filtru zdroje pro porovnání jejich vlastností. V první sérii je měřeno na plně zatíženém zdroji pro 6 konfigurací filtru. Naměřené hodnoty (červená barva) jsou pro porovnání vždy zobrazeny s hodnotami změřenými bez filtru (modrá barva).

Použité měřící přístroje:

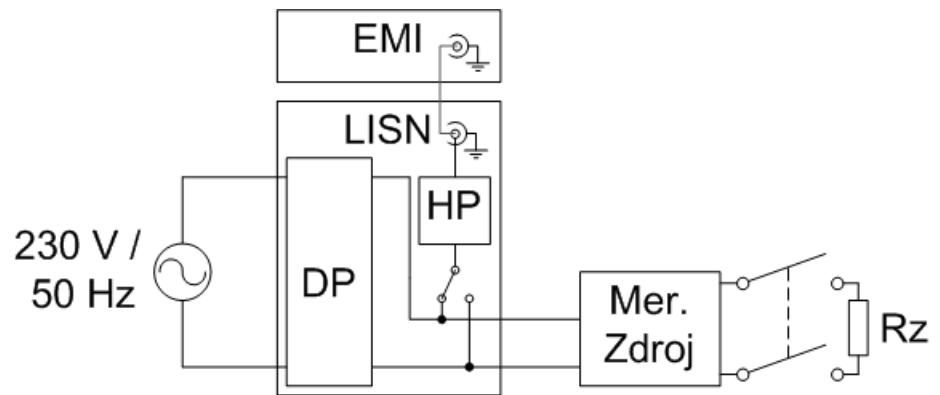
- LISN (Line System Impedance Network - Umělá síť): Seaward Spektrum Reciever
- EMI Test Reciever: ROHDE and SCHWARZ,ESCS,0,2.26 02.01 02.36
- Multimetr: *MAS830L* - bez kalibrace
- Zátěž: 5Ω (5x 1Ω 5% 5W) přesná hodnota $4,96 \Omega$

Podmínky měření:

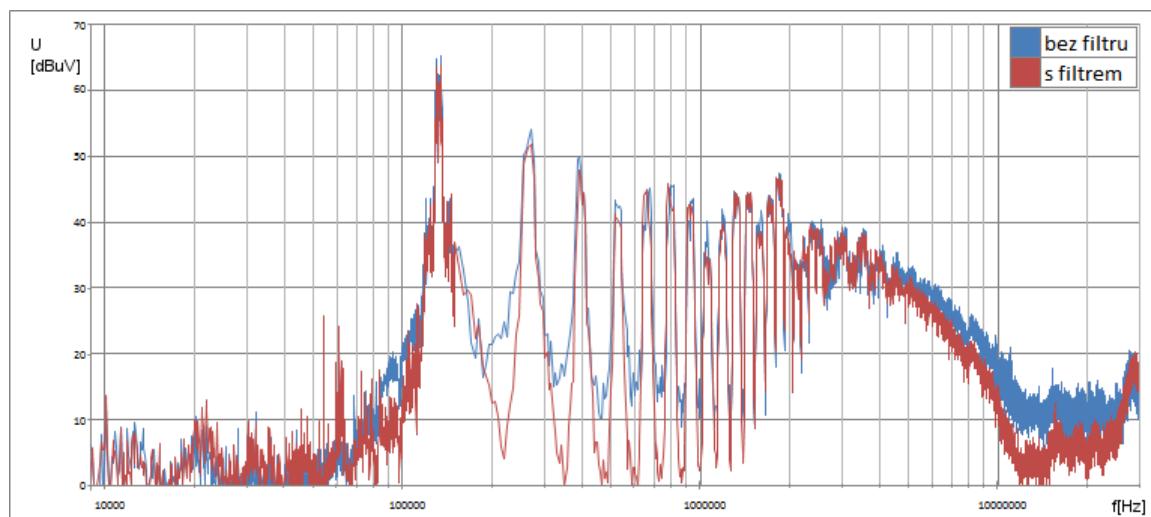
- Datum 7.4.2011
- Teplota: neznámá

Pásma měření:

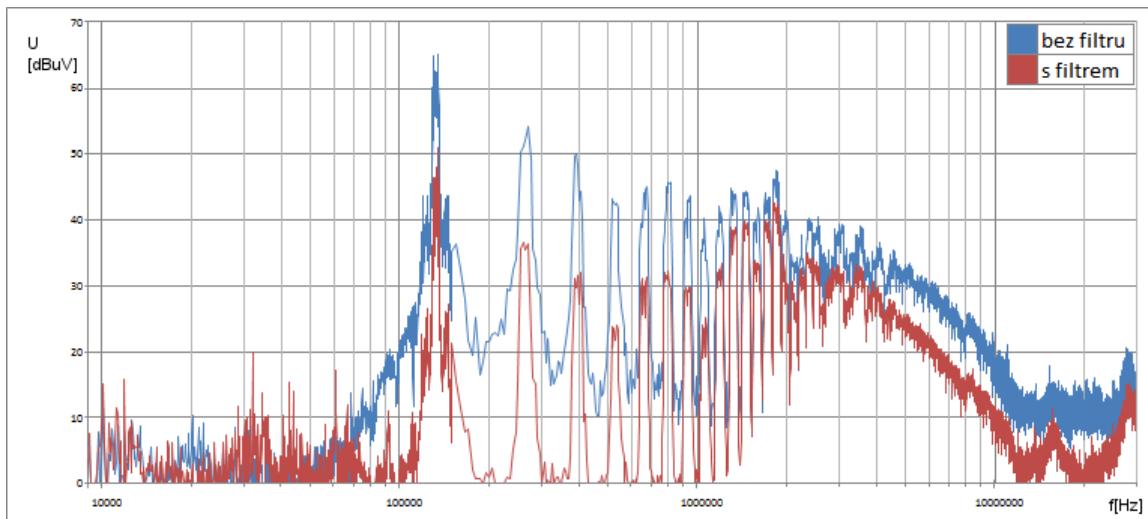
- CISPR A 9 kHz – 150 kHz, BW: 200 Hz, doba měření: 100 ms
- CISPR B 150 kHz – 30 MHz, BW: 9 kHz, doba měření: 20 ms
- CISPR C 30 MHz – 300 MHz, BW: 120 kHz, doba měření: 1 ms - Nevyužito



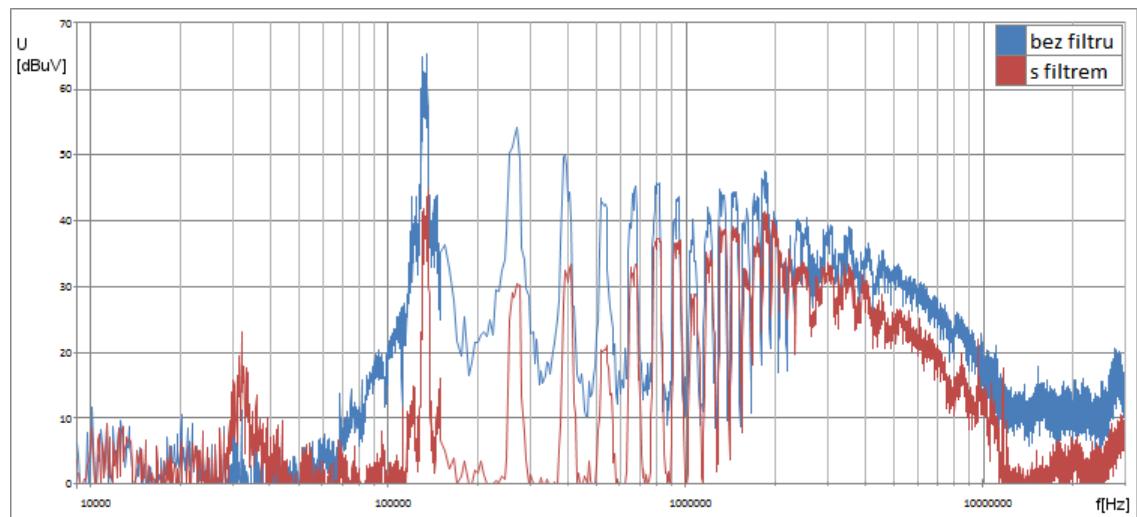
Obr. 6.5: Zapojení měřícího pracoviště



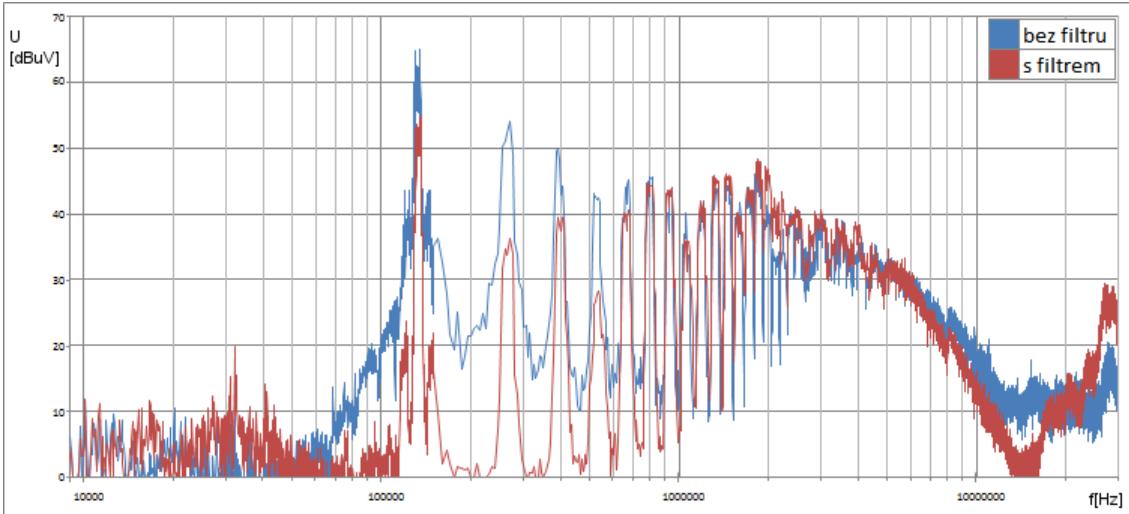
Obr. 6.6: Zdroj s filtrem: kondenzátor X C=100 nF



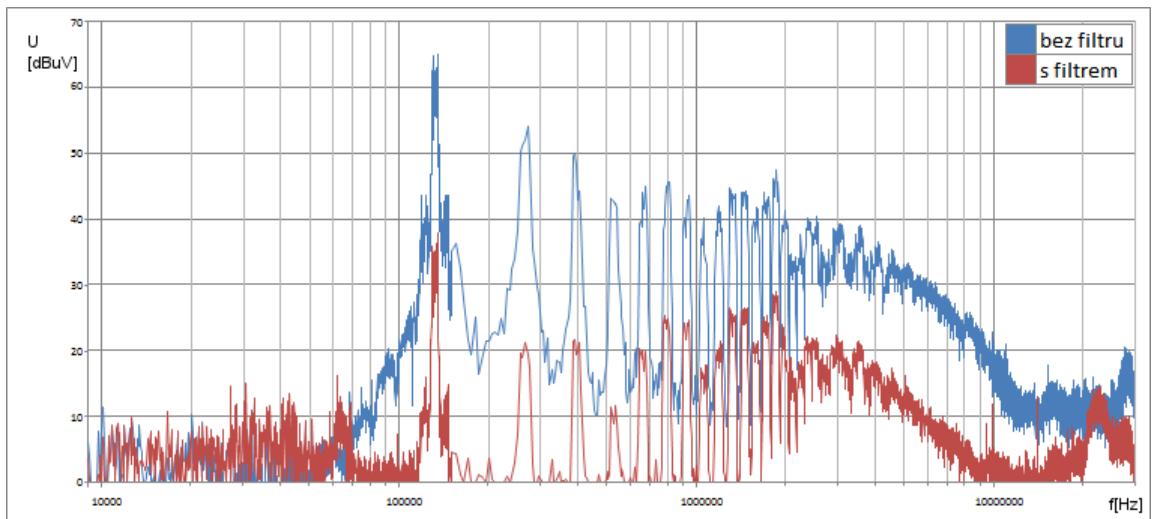
Obr. 6.7: Zdroj s filtrem: varistor, proudově kompenzovaná tlumivka, kondenzátorem X
 $C=100 \text{ nF}$



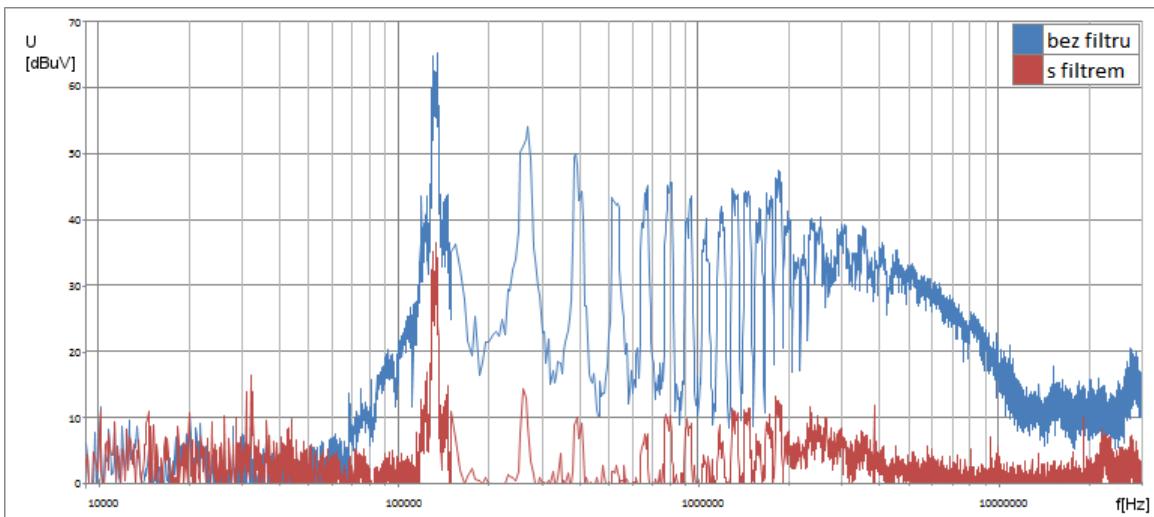
Obr. 6.8: Zdroj s filtrem: varistor, proudově kompenzovaná tlumivka, 2x kondenzátor X
 $C=100 \text{ nF}$



Obr. 6.9: Zdroj s filtrem: varistor, proudově kompenzovaná tlumivka, 2x kondenzátor X C=100 nF, uzemněný záporný výstup

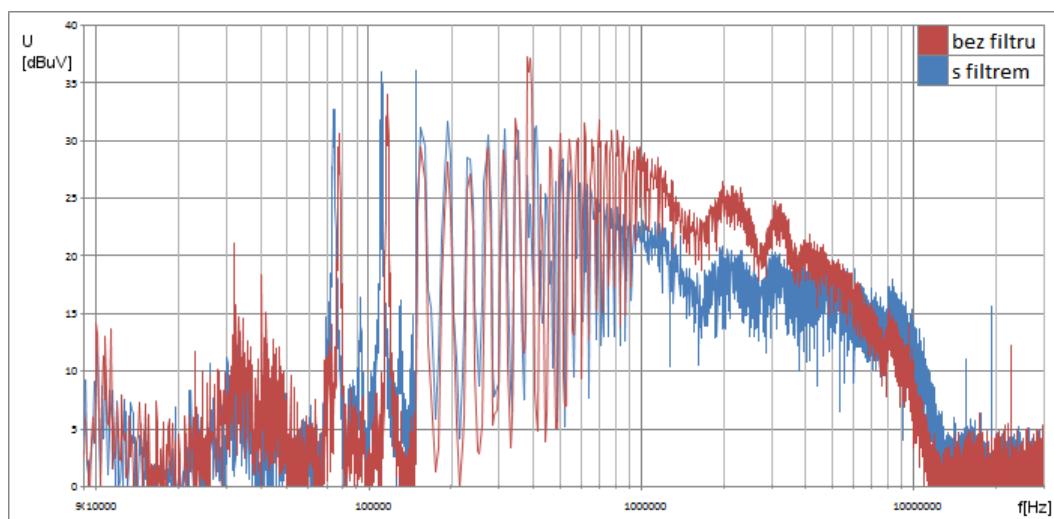


Obr. 6.10: Zdroj s filtrem: varistor, proudově kompenzovaná tlumivka, 2x kondenzátor X C=100 nF, 2x kondenzátor Y C= 3,3 nF

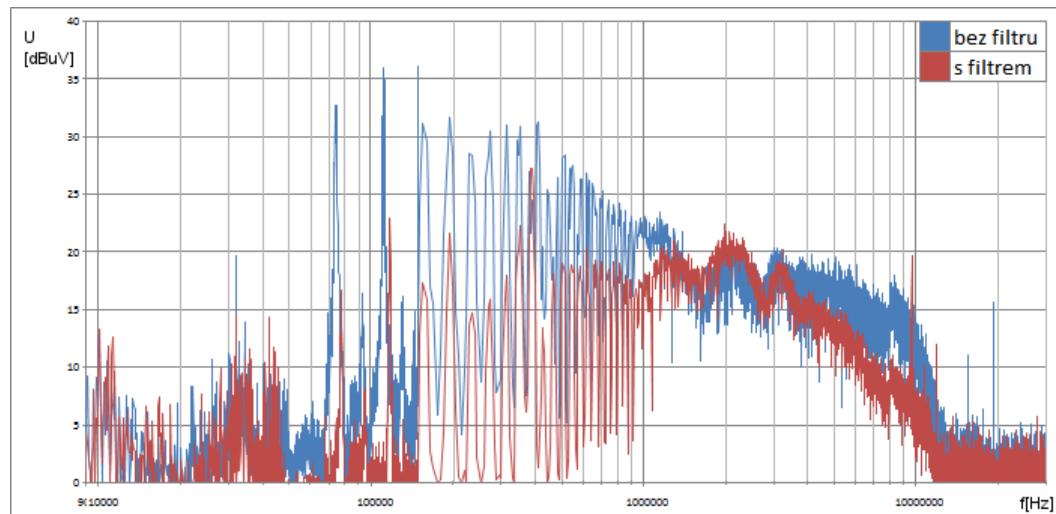


Obr. 6.11: Zdroj s filtrem: varistor, proudově kompenzovaná tlumivka, 2x kondenzátor X C=100 nF, 2x kondenzátor Y C= 3,3 nF, uzemněný záporný výstup

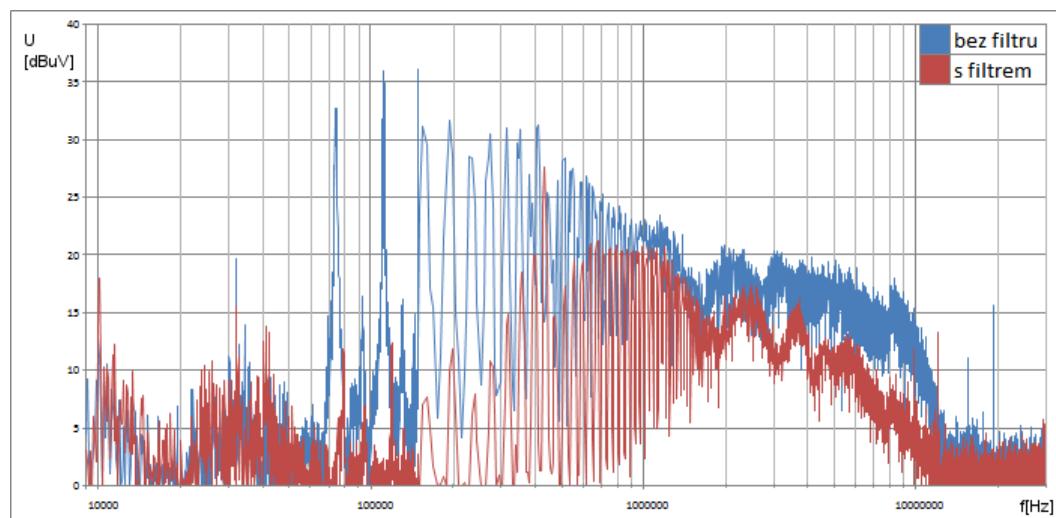
Ve druhé sérii se měří na zdroji bez zátěže. Na 5 konfiguracích filtru.



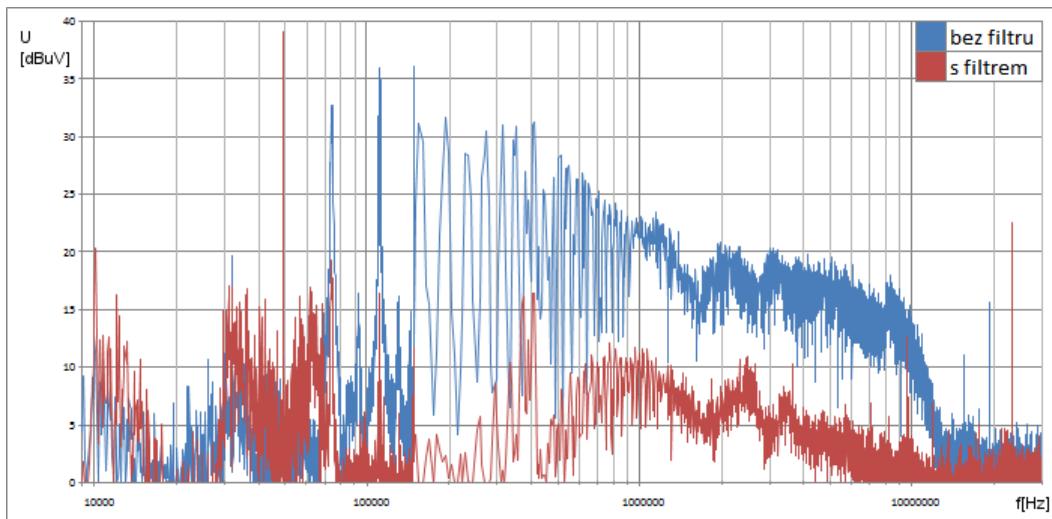
Obr. 6.12: Zdroj s filtrem: kondenzátor X C=100 nF



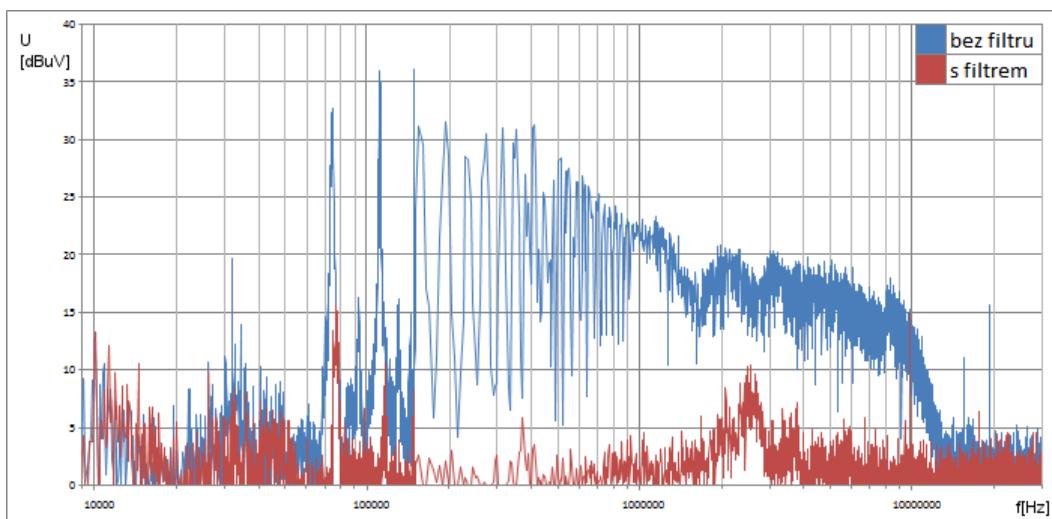
Obr. 6.13: Zdroj s filtrem: varistor, proudově kompenzovaná tlumivka, kondenzátorem X
 $C=100\text{ nF}$



Obr. 6.14: Zdroj s filtrem: varistor, proudově kompenzovaná tlumivka, 2x kondenzátor X
 $C=100\text{ nF}$

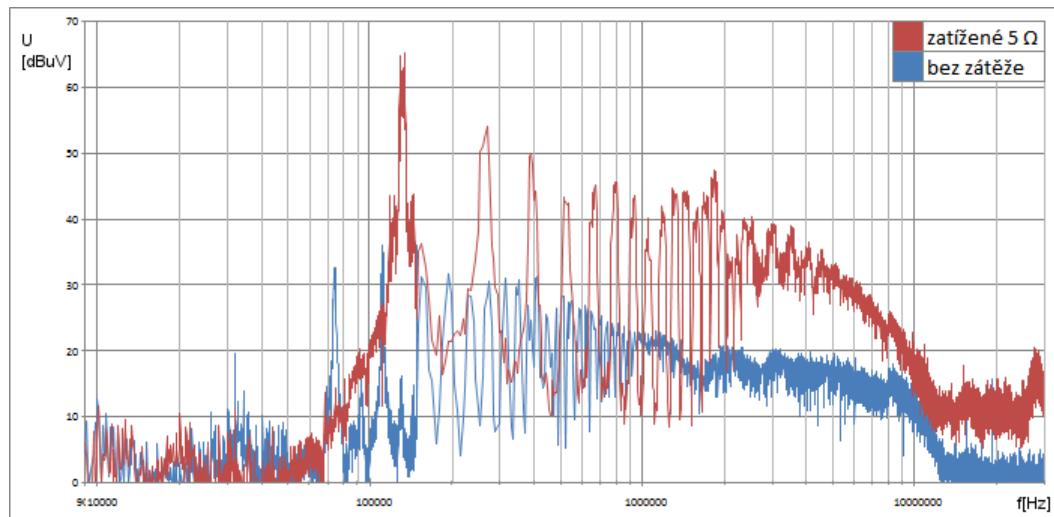


Obr. 6.15: Zdroj s filtrem: varistor, proudově kompenzovaná tlumivka, 2x kondenzátor X C=100 nF, 2x kondenzátor Y C= 3,3 nF

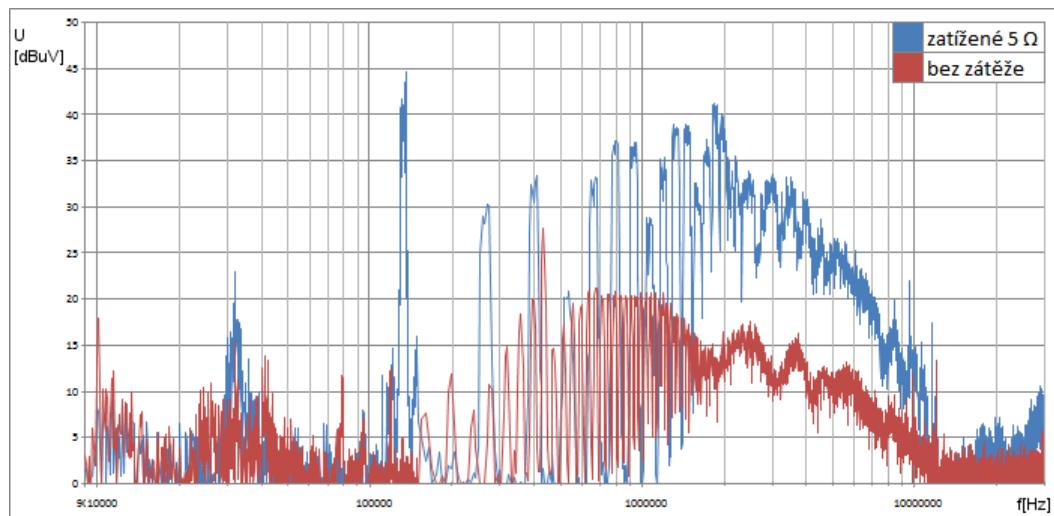


Obr. 6.16: Zdroj s filtrem: varistor, proudově kompenzovaná tlumivka, 2x kondenzátor X C=100 nF, 2x kondenzátor Y C= 3,3 nF, uzemněný záporný výstup

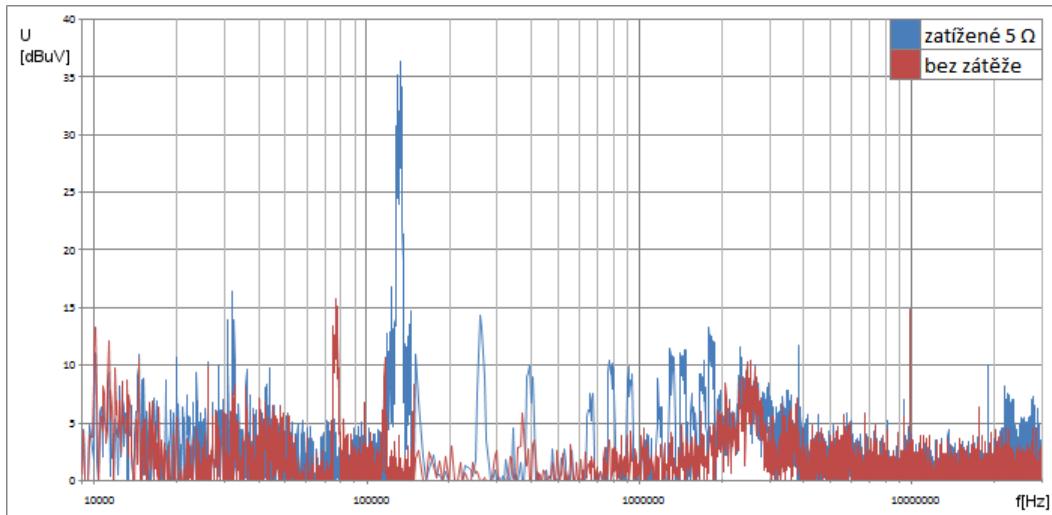
Poslední série měření na síti LISN je zaměřena na porovnání vyzařování u plně zatíženého zdroje a zdroje bez zátěže pro dvě vybrané konfigurace filtru a pro zdroj bez filtru



Obr. 6.17: Zdroj bez filtru



Obr. 6.18: Zdroj s filtrem: varistor, proudově kompenzovaná tlumivka, 2x kondenzátor X C=100 nF



Obr. 6.19: Zdroj s filtrem: varistor, proudově kompenzovaná tlumivka, 2x kondenzátor X C=100 nF, 2x kondenzátor Y C= 3,3 nF, uzemněný záporný výstup

Pro porovnání je u výsledného použitého filtru do jednoho grafu vynesena hodnoty rušení při plné zátěži a bez zátěže

Provedená měření mají bohužel pouze poměrový charakter, neboť nebyla dostupná přenosová charakteristika umělé sítě LISN.

6.1.3 Měření reakce na rychlé odpojení a připojení zátěže.

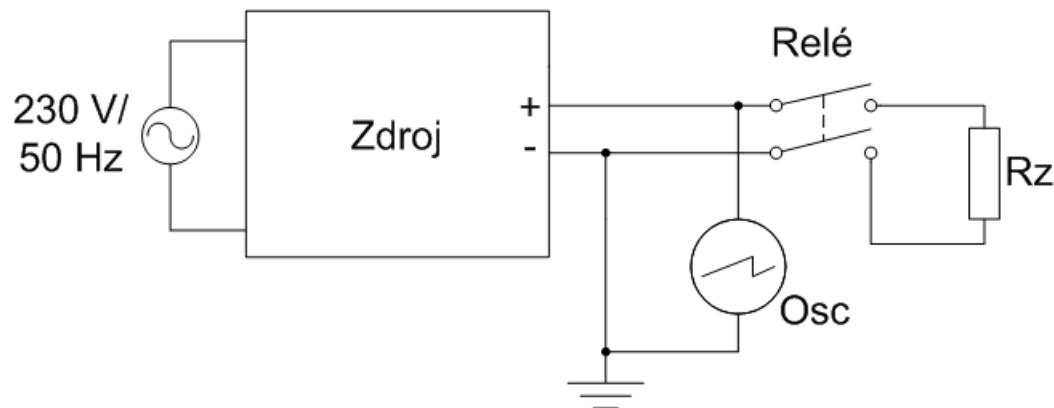
Měření zaměřené na parametry výstupního napětí v závislosti na zátěži a velikosti vstupního napětí.

Použité měřící přístroje:

- Osciloskop: *HP54501* - bez kalibrace
- Vazební člen (relé): Finder 58.34.9.024.0050
- Zátěž: 5Ω ($5 \times 1 \Omega$ 5% 5W) přesná hodnota $4,96 \Omega$

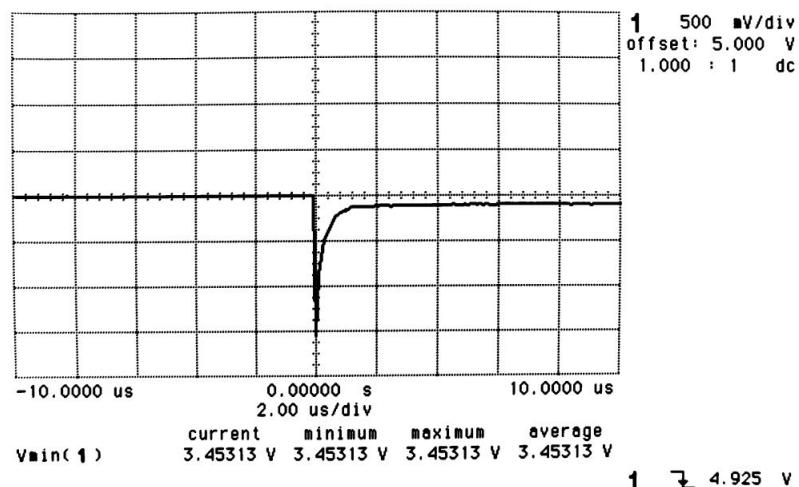
Podmínky měření:

- Datum 5.12.2010
- Teplota: 19.8°C



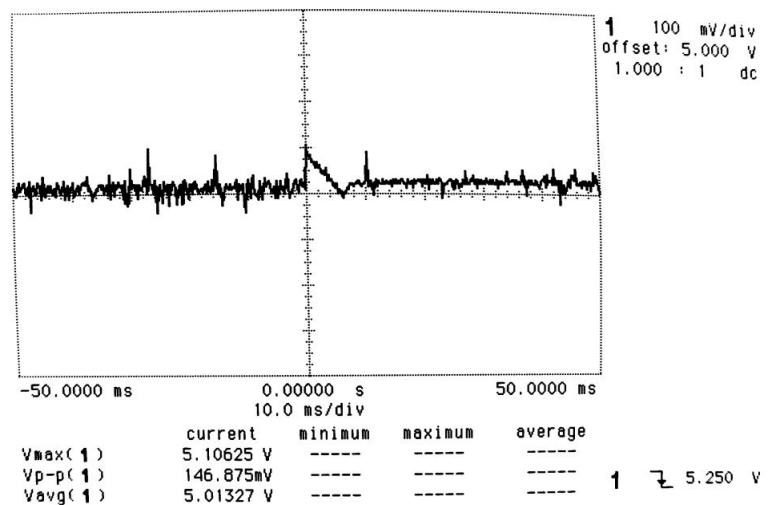
Obr. 6.20: Zapojení měřicího pracoviště

hp stopped



Obr. 6.21: Snímek z osciloskopu při rychlém připojení zátěže

hp stopped



Obr. 6.22: Snímek z osciloskopu při rychlém odpojení zátěže

6.2 Měření na zdroji pro výkonový modul

6.2.1 Měření výstupních parametrů - extrémy zatížení

Toto měření má ukázat chování zdroje v případech, kdy jsou větve zatíženy nestejným proudem. V tomto případě se zkouší všechny kombinace větví pro proudy 0 A a 1 A. Pro tři větve tedy získáme $2^3 = 8$ měření. Dvě měření jsou irrelevantní, protože plovoucí 12 V větev nemůže být zatížena bez "zemněné" 12 V větve.

6.2.2 Měření reakce na rychlé odpojení a připojení zátěže.

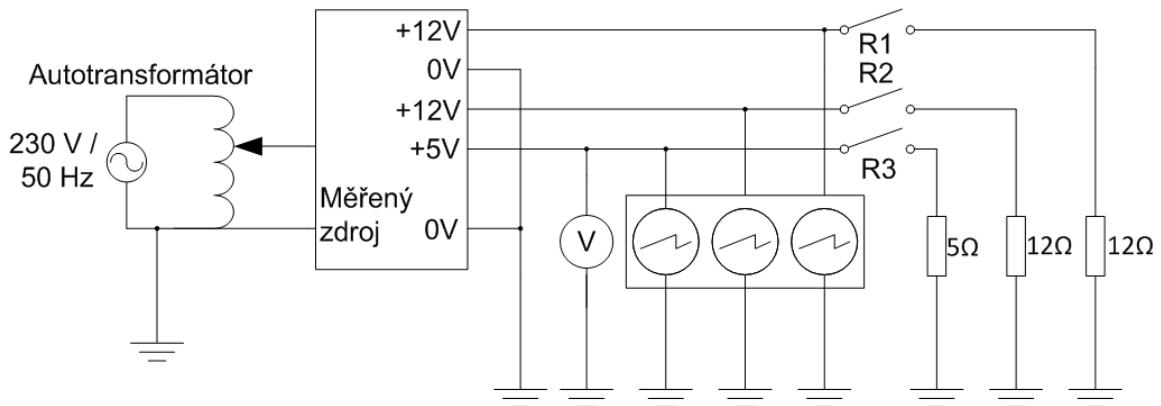
Měření zaměřené na parametry výstupního napětí v závislosti na zátěži a velikosti vstupního napětí.

Použité měřící přístroje:

- Osciloskop: *HP54501* - bez kalibrace
- 3x Vazební člen (relé): Finder 58.34.9.024.0050
- Zátěž: 5 Ω (5x 1 Ω 5% 5W) přesná hodnota 4,96 Ω
- Zátěž: 12 Ω (1x 10 Ω 5% 10W + 2x 1 Ω 5% 5W) přesná hodnota 12,32 Ω
- Zátěž: 12 Ω (1x 10 Ω 5% 10W + 2x 1 Ω 5% 5W) přesná hodnota 12,02 Ω
- Multimetr: *MY68* - bez kalibrace

Podmínky měření:

- Datum 5.12.2010
- Teplota: 19.8°C



Obr. 6.23: Zapojení měřicího pracoviště

Zatížené větve			Verze s regulecí 5v		
5V	12V	x12V	U_{5V} [V]	U_{12V} [V]	U_{f12V} [V]
			5,003	12,86	13,96
		x	5,03	12,71	3,68
	x		5,04	5,12	13,58
x	x		4,99	4,67	4,6
x			5,01	18,58	20,33
x		x	4,99	18,67	16,31
x	x		17,75	4,97	17,29
x	x	x	4,96	15,8	16,7

Obr. 6.24: Výstupní napětí trojúrovňového zdroje při nesymetrickém zatížení (regulace v 5-ti voltové větví)

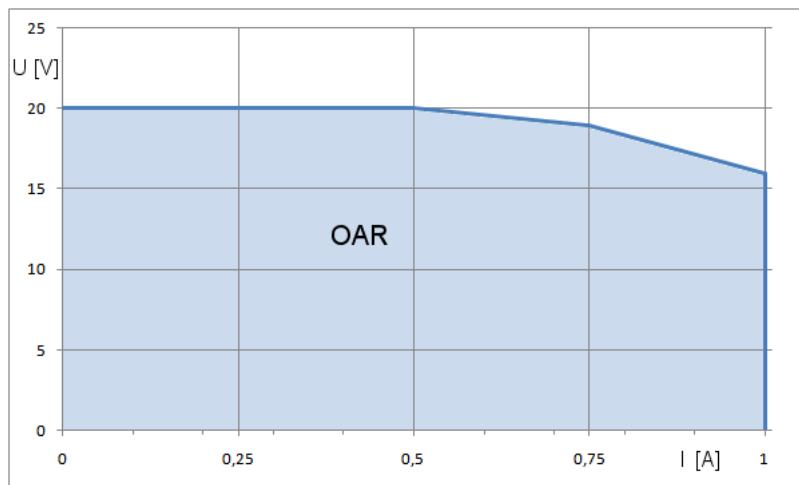
Zatížené větve			Verze s regulecí 12v		
5V	12V	x12V	U_{5V} [V]	U_{12V} [V]	U_{f12V} [V]
			5,03	12,33	13,48
		x	7,35	12,27	6,08
	x		8	10,27	16,08
x	x		8,85	10,15	12,35
x			3,57	15,46	17,44
x		x	4,37	12,31	9,45
x	x		5,49	12,27	17,03
x	x	x	5,47	12,19	12,27

Obr. 6.25: Výstupní napětí trojúrovňového zdroje při nesymetrickém zatížení (regulace v 12-ti voltové větví)

Zatížené větve			Verze s regulecí 5v 12V 1:1		
5V	12V	x12V	U_{5V} [V]	U_{12V} [V]	U_{f12V} [V]
			5,004	13,34	14,28
		x	5,63	4,23	10,61
	x		6,5	8,19	13,6
x	x		6,84	7,03	7,1
x			3,88	17,67	19,12
x		x	4,85	14,36	10,58
x	x		5,41	12,28	19,2
x	x	x	4,48	12,2	11,9

Obr. 6.26: Výstupní napětí trojúrovňového zdroje při nesymetrickém zatížení (regulace rovnoměrně rozdělena do 12-ti a 5-ti voltové větve)

Z těchto měření je patrné, že nejvhodněji se chová regule na 12-ti voltové větvi. Viz tabulka 6.25 Problém je ale, že v případě odlehčené 5-ti voltové větve a plném zatížení obou 12-ti voltových větví se přehříval rekuperační obvod. A to až do jeho vynechání funkce, což mělo za následek značné zhoršení účinnosti celého zdroje, vyšší zvlnění výstupního napětí a přehřívání spínacího obvodu i transformátoru, který se dle teoretických podkladů přesycoval. Proto je prozatím volena váhovaná regulace z 5-ti i 12-ti voltové větve 1:1. Viz tabulka 6.26. To omezuje zdroj v použití dle approximované charakteristiky 6.27.



Obr. 6.27: Operační oblast zdroje

6.3 Měření na výkonovém modulu

6.3.1 Chování lineární části v závislosti na připojené zátěži

Tato měření se zabývají reakcí lineární části zdroje (bez softwarové korekce) na připojování různých zátěží v různých módech. Měření byla prováděna s výkonovým tranzistorem na desce a pro kontrolu stability i na 30 cm dlouhém kablíku vedeném nad impulzními zdroji. Při měřeních se žádné postřehnutelné odchylky neobjevili proto jsou uváděny pouze měření s výkonovým tranzistorem T_0 na kablíku.

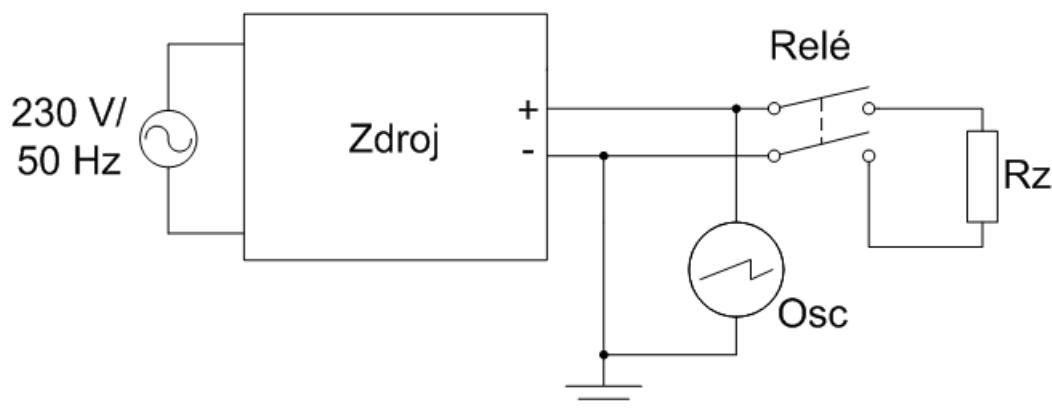
Použité měřící přístroje:

- Osciloskop: HP54501 - bez kalibrace
- Vazební člen (relé): Finder 58.34.9.024.0050
- Zátěž: 5Ω ($5 \times 1 \Omega$ 5% 5W) změřená hodnota hodnota $4,96 \Omega$
- Zátěž: 20Ω ($2 \times 10 \Omega$ 5% 10W) změřená hodnota hodnota $9,99 \Omega$
- Zátěž: 1Ω ($1 \times 1 \Omega$ 5% 10W) změřená hodnota hodnota $1,03 \Omega$
- Zátěž: Indukčnost: $L = 50 \text{ mH}$ - na železném jádře $R_S = 4 \Omega$ změřená hodnota hodnota 51.2 mH $1,03 \Omega$
- Zátěž: Kondenzátor: $C = 2.2 \text{ mH}$ na 35 V
- Zátěž: Motor: $U = 12 \text{ V}$ $P=3 \text{ W}$

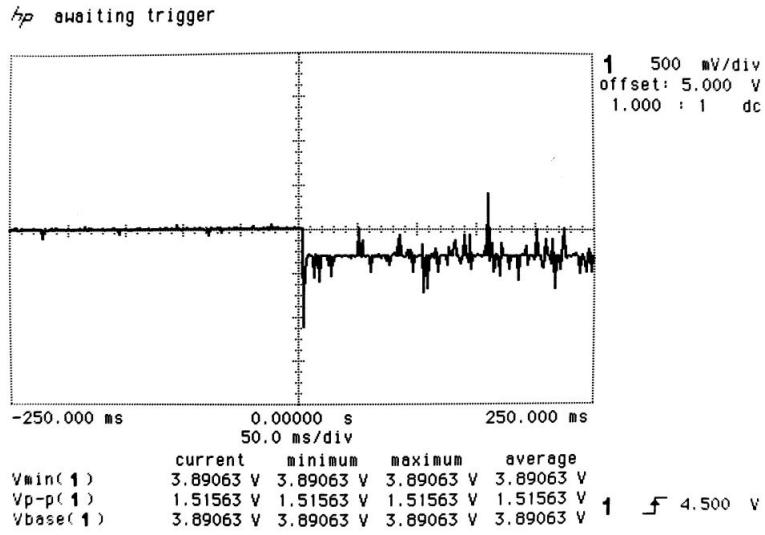
Podmínky měření:

- Datum 30.4.2011
- Teplota: 23.2°C

Na snímcích z displeje osciloskopu mohou být zobrazeny irrelevantní informace (sloupce měření minimum, maximum a average)



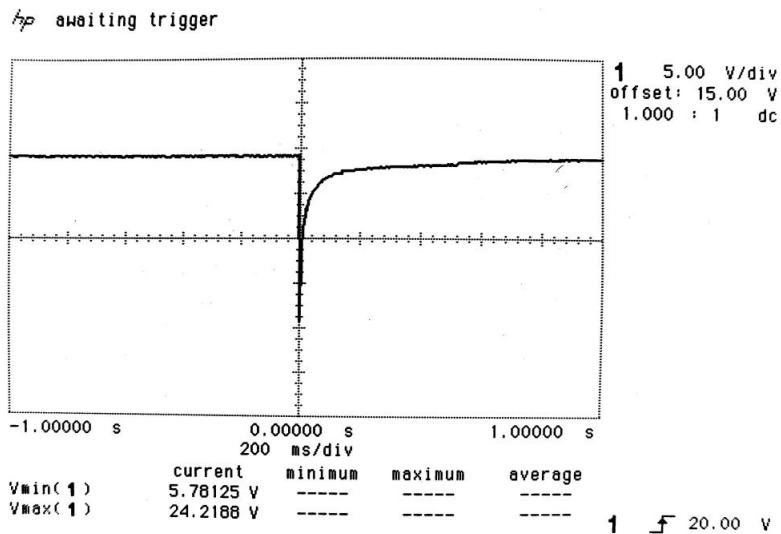
Obr. 6.28: Zapojení měřicího pracoviště



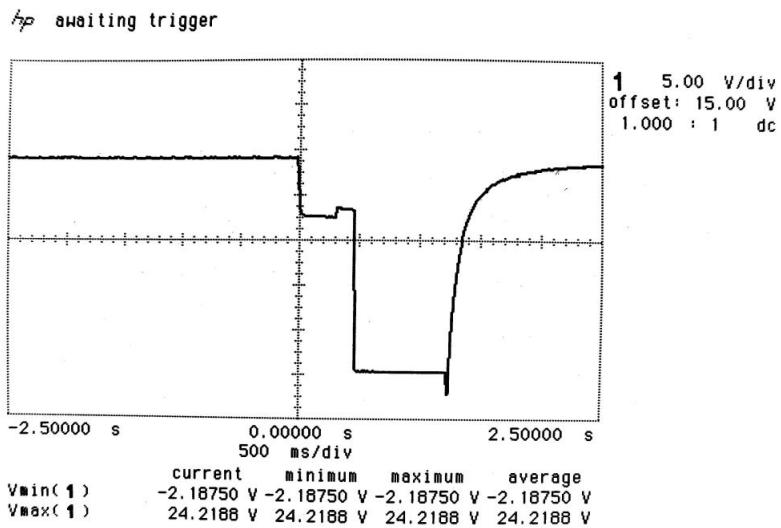
Obr. 6.29: Připojení zátěž: $R_z = 5 \Omega$, $U_{out0} = 5 \text{ V}$, Proudová pojistka: Vypnuta ($I_{max} \gg 1.2 \text{ A}$)

Z grafu na obrázku 6.29 lze pozorovat špičku poklesu napětí o 1,25 V. Střední hodnota napětí se po připojení zátěže ustálila na hodnotě 4,74 V. Úbytek cca 0,25 V odpovídá ztrátě na snímacích rezistorech proudu. Při běžném provozu je tento úbytek softwarově eliminován. Tento úbytek však není zdaleka tak nepříjemný, jako rušení pronikající z impulzního zdroje přes lineární výkonovou část na výstup. S použitím běžného usměrněného a stabilizované napětí z transformátoru byl tento jev jen stěží patrný.

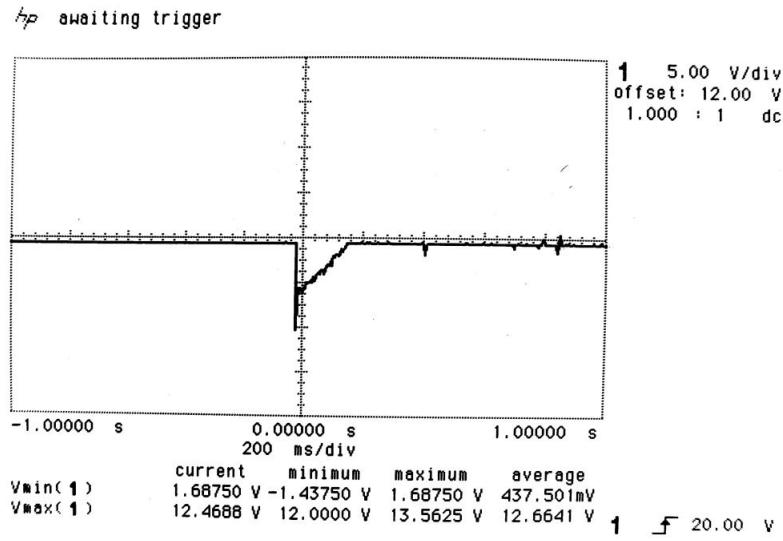
Při připojení kondenzátoru zdroj reagoval dle očekávání, viz obrázek 6.30. Ani induktivní zátěž při sepnutí (čas 0.0 s) neměla tendenci zdroj rozkmitávat. Při rozepnutí v čase 0.3 s se zdroj ale choval nekorektně. Viz 6.31. Časová detaily průběhu na výstupu neuvádím, nevyskytovalo se v nich nic podstatného. Podstatné děje probíhaly ve vnitřní struktuře regulační části, jejichž průběhy neuvádím neboť jsou již mimo rozsah publikace.



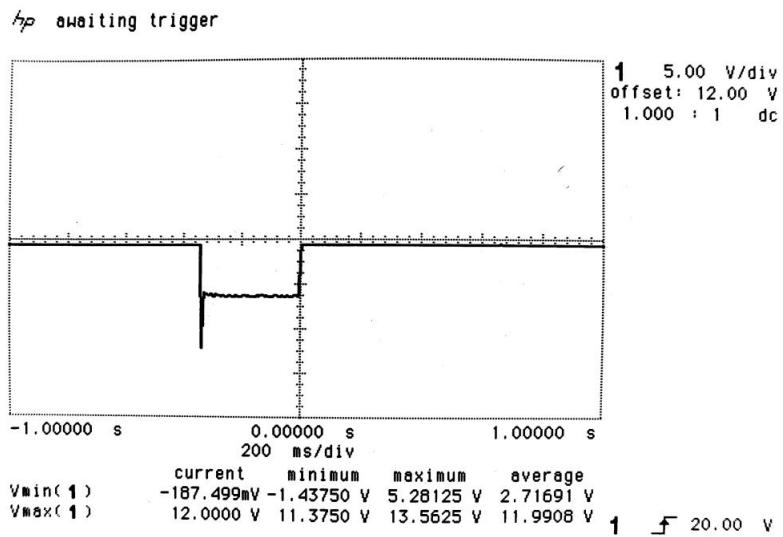
Obr. 6.30: Připojení zátež: $C = 2.2 \text{ mH}$, $U_{out0} = 24 \text{ V}$, Proudová pojistka: Vypnuta ($I_{max} \gg 1.2 \text{ A}$)



Obr. 6.31: Připojení zátež: Indukčnost $L = 50 \text{ mH}$, $R_s = 3.5 \Omega + R = 20 \Omega$, $U_{out0} = 24 \text{ V}$, Proudová pojistka: Vypnuta ($I_{max} \gg 1.2 \text{ A}$)



Obr. 6.32: Motor $U = 12 \text{ V}$, $P = 3 \text{ W}$ - sepnutí nezatíženého motoru, $U_{out0} = 12 \text{ V}$, Proudová pojistka: Vypnuta ($I_{max} \gg 1.2 \text{ A}$)

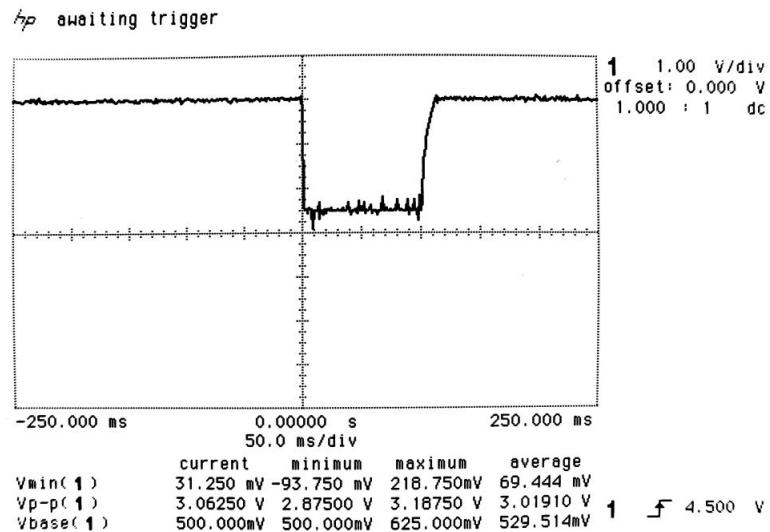


Obr. 6.33: Motor $U = 12 \text{ V}$, $P = 3 \text{ W}$ - sepnutí i rozepnutí zabrzděného motoru, $U_{out0} = 12 \text{ V}$, Proudová pojistka: Vypnuta ($I_{max} \gg 1.2 \text{ A}$)

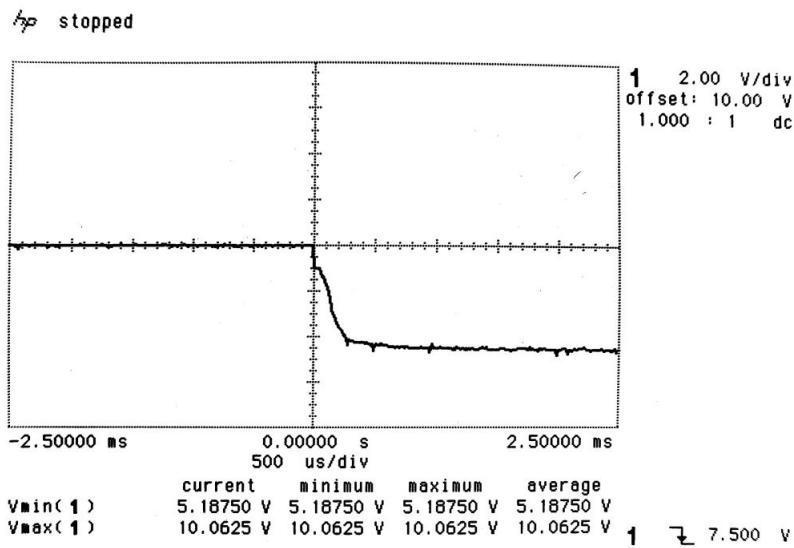
Při zatížení motorem se zdroj choval obstojně, i když je patrná proudová špička, které měla za následek rychlou reakci proudové ochrany a tím snížení výstupního napětí k nule.

6.3.2 Měření reakce proudové pojistky v závislosti na připojení zátěže

Zapojení pracoviště a podmínky měření a měřící přístroje jsou stejné jako u 6.3.1



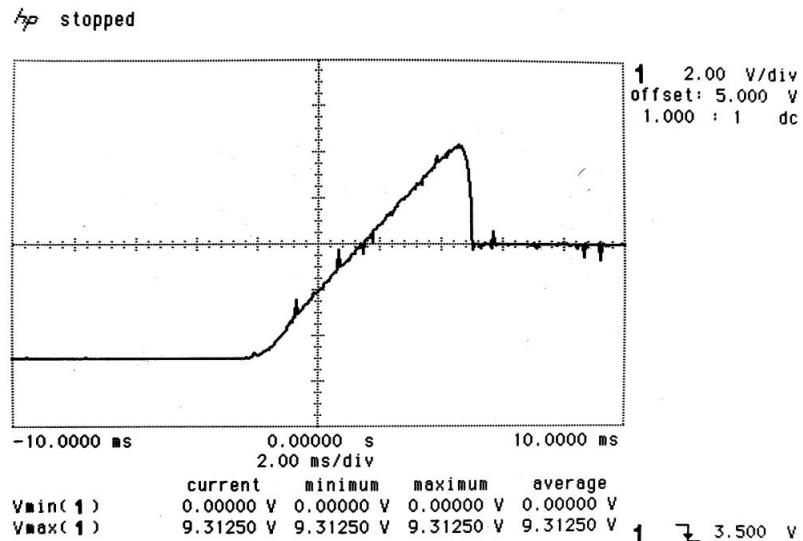
Obr. 6.34: Test proudové pojistky: $R_z = 1 \Omega$ - sepnutí i rozepnutí zátěže $U_{out0} = 3 \text{ V}$, Proudová pojistka: $I_{max} = 500 \text{ mA}$



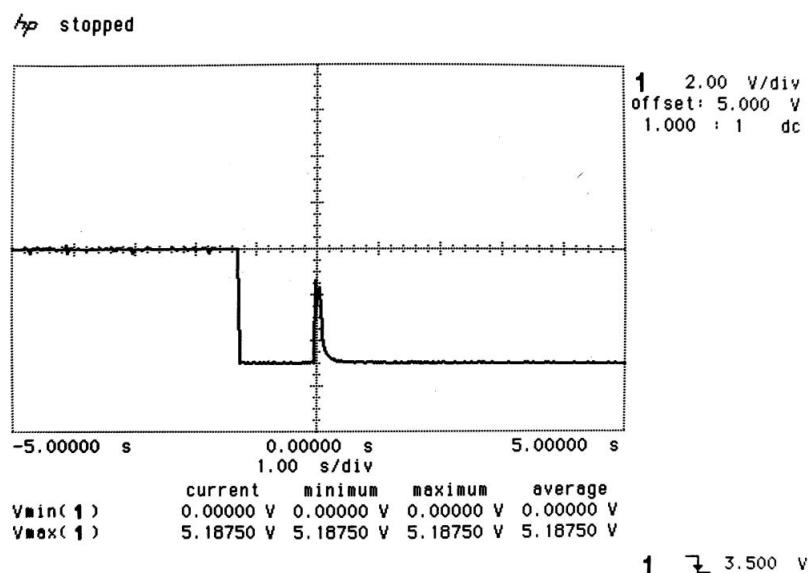
Obr. 6.35: Test proudové pojistky: $R_z = 1 \Omega$ - sepnutí zátěže (časový detail) $U_{out0} = 5 \text{ V}$, Proudová pojistka: $I_{max} = 500 \text{ mA}$

6.3.3 Měření reakce výstupu na připojení a odpojení napájení

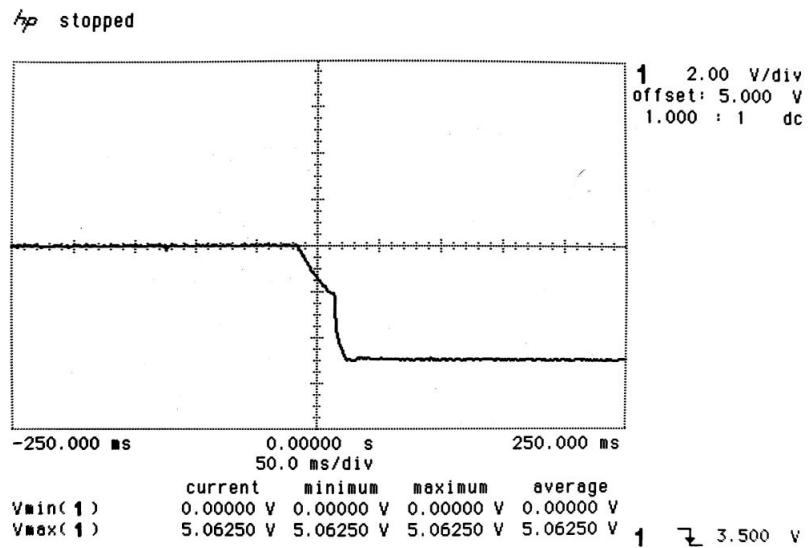
Zapojení pracoviště a podmínky měření a měřící přístroje jsou stejné jako u 6.3.1



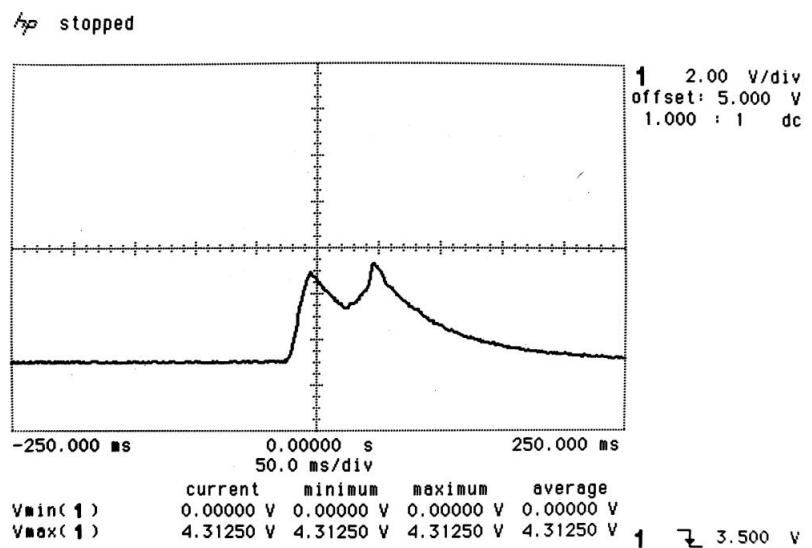
Obr. 6.36: Reakce výstupu na připojení napájení: $R_z = \infty \Omega$, $U_{out0} = 5 \text{ V}$, Proudová pojistka: Vypnuta ($I_{max} \gg 1.2 \text{ A}$)



Obr. 6.37: Reakce výstupu na odpojení napájení: $R_z = 20 \Omega$, $U_{out0} = 5 \text{ V}$, Proudová pojistka: Vypnuta ($I_{max} \gg 1.2 \text{ A}$)



Obr. 6.38: Reakce výstupu na odpojení napájení - (časová detail 1): $R_z = 20 \Omega$, $U_{out0} = 5 \text{ V}$, Proudová pojistka: Vypnuta ($I_{max} \gg 1.2 \text{ A}$)



Obr. 6.39: Reakce výstupu na odpojení napájení - (časová detail 2): $R_z = 20 \Omega$, $U_{out0} = 5 \text{ V}$, Proudová pojistka: Vypnuta ($I_{max} \gg 1.2 \text{ A}$)

Ad: 6.3.2 Na snímku 6.34 z osciloskopu lze pozorovat, jak se zhruba chová proudová pojistka. Na snímku 6.35 je vidět rychlosť reakce proudové pojistky do zátěže $R_z = 1 \Omega$. Se spouštěním časové základy osciloskopu pomocí jednoho z kontaktů relé byly výsledky obdobné (lišili se o několik desítek μs , což mohlo být způsobeno i zpožděním dosednutí kontaktů.)

Ad: 6.3.3 Měření zabývající se chováním zdroje ukazuje reakci výstupu na zapnutí a vypnutí napájení bez softwarových ochran jako je rozpojení výstupního relé. Na snímku 6.36 je ukázka jak se chová výstup při připojení napětí bez zátěže (horší případ). Na snímku 6.37 je zobrazeno odepnutí. Detail poklesu napětí na nulu uvedený na snímku 6.38 je způsoben rychlým výpadkem 5-ti voltové větve (napájení DAC). Mnohem zajímavější je druhý detail, tedy krátký nárůst výstupního napětí způsobený pozdějším výpadkem záporné větve -5 V. Která vyřadí z provozu regulace. Detaily průběhů jsou opět mimo rozsah publikace.

6.3.4 Měření rušivého napětí na výstupu

Je prováděno opět na stejném zapojení jako v měření z kapitoly 6.3.1. Měření je prováděno při $U_{out0} = 5$ V a zátěži $R_z = 10 \Omega$.

Řešení	U_{RMS}	U_{pp}
Žádné	88 mV	220 mV
Ferit na napájení výkonového modulu	76 mV	176 mV
Ferit na vodičích k výstupním svorkám	55 mV	152 mV
Ferit na obou výše uvedených přívodech	49 mV	130 mV

Z měření je patrný vliv feritů na rušení dostávající se na výstup, nicméně potlačení tohoto napětí není dostatečné, a impulzní zdroje pro výkonové moduly se jeví jako nevhodné. A to i přes značné množství použitých filtračních prvků.

7 ZÁVĚR

Obvody řídicí jednotky, ovládacího a zobrazovacího modulu a jejich napájecí zdroj se chovají korektně, bez závad a poruch po celou dobu testování. Horší parametry vykazují výkonové moduly se svými napájecími zdroji. Regulační obvody zdroje se chovaly dobře co se týče stability. Jako méně pohodlná se jeví nutnost softwarové kompenzace úbytků napětí na snímacích odporech proudu. Největším neduhem jsou ale zdroje pro výkonové moduly. Při zatížení je jejich napětí značně zvlněné a obsahuje mnoho VF rušení, které není zachyceno ani regulačním obvodem, a prosakuje přes něj do zátěže. Ani regulace těchto zdrojů nepracuje úplně dle požadavků. Je tedy nutné bud' upravit regulaci nebo navrhnu úplně jiné zdroje, se značně menším rušením a méně se ovlivňujícími napětími mezi větvemi.

Zdroj i přes svou funkčnost tedy nesplňuje všechny požadavky, které na něj byly kladené. Na druhou stranu ze zkušeností z odborné praxe vím, že vývoj podobného zařízení si vyžaduje mnohem více času a testů než bylo možné z časových důvodů provést. Zařízení podobného rozsahu se málokdy podaří vyladit k dokonalosti na první verzi desky.

Na zdroji tedy zbývá opravit značné množství nedostatků a upravit ještě spoustu detailů. Od návrhu nových napájecích zdrojů výkonových modulů a měřicích modulů, přes úpravy regulačních obvodů, až po optimalizaci firmwaru a rozšíření a úpravy ovládacího softwaru pro PC. Další úpravou by mohlo být použití prostornější zobrazovací jednotky a to bud' znakový LCD displej 40x4 znaků nebo grafický zobrazovač. Případně doplnění akustické signalizace.

Práce na tomto zařízení pro mě byla značným přínosem v návrhu obvodů, programování mikrokontrolérů, aplikací pro PC, oblasti EMC, oblasti měření i návrhu mechanické konstrukce.

LITERATURA

- [1] Philips Semiconductors *IP4220CZ6 Product data sheet* [online]. 2005, poslední aktualizace 12.9.2005 [cit. 20. května 2011]. Dostupné z URL: http://www.nxp.com/documents/data_sheet/IP4220CZ6.pdf
- [2] Microchip *PIC18F46J50 Family - Data Sheet* [online]. 2009, poslední aktualizace 26.3.2009 [cit. 20. května 2011]. Dostupné z URL: <http://ww1.microchip.com/downloads/en/DeviceDoc/39931c.pdf>
- [3] Microchip *PIC18F47J13 Family - Data Sheet* [online]. 2009, poslední aktualizace 26.3.2009 [cit. 20. května 2011]. Dostupné z URL: <http://ww1.microchip.com/downloads/en/DeviceDoc/39974A.pdf>
- [4] Microchip *PIC18F2XJXX/4XJXX FAMILY Flash Microcontroller Programming Specification* [online]. 2010, poslední aktualizace 5.1.2010 [cit. 20. května 2011]. Dostupné z URL: <http://ww1.microchip.com/downloads/en/DeviceDoc/39687e.pdf>
- [5] Microchip *TC7660 Charge Pump DC-to-DC Voltage Converter - Data Sheet* [online]. 2002, poslední aktualizace 15.11.2002 [cit. 20. května 2011]. Dostupné z URL: <http://ww1.microchip.com/downloads/en/DeviceDoc/21465b.pdf>
- [6] Microchip *MCP4802/4812/4822 8/10/12-Bit Dual Voltage Output Digital-to-Analog Converter with Internal VREF and SPI Interface - Data Sheet* [online]. 2010, poslední aktualizace 5.1.2010 [cit. 20. května 2011]. Dostupné z URL: <http://ww1.microchip.com/downloads/en/DeviceDoc/22249A.pdf>
- [7] Microchip *MCP606/7/8/9 2.5V to 6.0V Micropower CMOS Op Amp - Data Sheet* [online]. 2009, poslední aktualizace 26.3.2009 [cit. 20. května 2011]. Dostupné z URL: <http://ww1.microchip.com/downloads/en/DeviceDoc/11177f.pdf>
- [8] Myrra *74000 Catalogue* [online]. [cit. 20. května 2011]. Dostupné z URL: http://www.myrra.fr/documentation/74000_catalogue.pdf
- [9] Power Integrations *TOPSwitch-GX - Design Methodology* [online]. 2004, poslední aktualizace 7.2004 [cit. 20. května 2011]. Dostupné z URL: <http://www.powerint.com/sites/default/files/product-docs/an32.pdf>
- [10] Power Integrations *TOP242-250 TOPSwitch-GX Family - Data Sheet* [online]. 2005, poslední aktualizace 11.2005 [cit. 20. května 2011]. Dostupné z URL: <http://www.powerint.com/sites/default/files/product-docs/top242.250.pdf>
- [11] VISHAY *BYV26C Ultra Fast Avalanche Sinterglass Diode - Data Sheet* [online]. 2004, poslední aktualizace 13.8.2004 [cit. 20. května 2011]. Dostupné z URL: <http://www.datasheetcatalog.org/datasheet/GeneralSemiconductor/mXyzrvzw.pdf>

- [12] GeneralSemiconductor *P6KE180 TRANSIENT VOLTAGE SUPPRESSOR - Data Sheet* [online]. 1999, poslední aktualizace 21.1.1999 [cit. 20. května 2011]. Dostupné z URL: <http://www.datasheetcatalog.org/datasheet/GeneralSemiconductor/mXyzrvzw.pdf>
- [13] Vishay Semiconductors *BAV21 Switching Diode - Data Sheet* [online]. 2001, poslední aktualizace 12.2.2001 [cit. 20. května 2011]. Dostupné z URL: <http://www.datasheetcatalog.org/datasheet/vishay/85543.pdf>
- [14] Vishay Semiconductors *Schottky Barrier Rectifier - Data Sheet* [online]. 200'2, poslední aktualizace 1.7.2002 [cit. 20. května 2011]. Dostupné z URL: <http://www.datasheetcatalog.org/datasheet/vishay/85543.pdf>
- [15] Liteon *Optocoupler - Data Sheet* [online]. [cit. 20. května 2011]. Dostupné z URL: <http://pdf1.alldatasheet.com/datasheet-pdf/view/168820/LITEON/LTV-816.html>
- [16] Diotec Semiconductor *Si-Bridge Rectifiers - Data Sheet* [online]. 2003, poslední aktualizace 11.2.2003 [cit. 20. května 2011]. Dostupné z URL: <http://pdf1.alldatasheet.com/datasheet-pdf/view/168820/LITEON/LTV-816.html>
- [17] ST Microelectronics *TL431 Programmable Voltage Reference - Data Sheet* [online]. 1998, poslední aktualizace 11.1998 [cit. 20. května 2011]. Dostupné z URL: <http://www.datasheetcatalog.org/datasheet/vishay/sb320.pdf>
- [18] Vishay Semiconductors *Small Signal Transistors (NPN) - Data Sheet* [online]. 2002, poslední aktualizace 9.5.2002 [cit. 20. května 2011]. Dostupné z URL: <http://www.datasheetcatalog.org/datasheet/vishay/85115.pdf>
- [19] HitachiSemiconductor *Dot Matrix Liquid Crystal Display Controller/Driver - Data Sheet* [online]. [cit. 20. května 2011]. Dostupné z URL: <http://www.datasheetcatalog.org/datasheet/HitachiSemiconductor/mXvyusu.pdf>
- [20] Microchip *MPLAB® C18 C COMPILER LIBRARIES* [online]. 2005, poslední aktualizace 20.4.2005 [cit. 20. května 2011]. Dostupné z URL: http://ww1.microchip.com/downloads/en/devicedoc/mplab_c18_libraries_51297f.pdf
- [21] Microchip *MPLAB® C18 C COMPILER GETTING STARTED* [online]. 2005, poslední aktualizace 24.8.2005 [cit. 20. května 2011]. Dostupné z URL: http://www.kevin.org/frc/C18_3.0_getting_started.pdf
- [22] HRBÁČEK, Jiří. *Komunikace mikrokontroleru s okolím* 1. 2. dotisk 1. vyd. Praha: BEN Technická literatura, 1999 (tisk 2002). 160 s. ISBN 80-7169-608-0
- [23] Microchip *8051projects - Flash writing in Pic 18f6722.* [online]. 2008, poslední aktualizace 10.12.2008 [cit. 20. května 2011]. Dostupné z URL: <http://www.8051projects.net/lofiversion/t15046/Flash-writing-in-pic-18f6722.html>

- [24] DŘÍNOVSKÝ, Jiří, FRÝZA, Tomáš, SVAČINA, Jiří, KEJÍK, Zbyněk, RŮŽEK, Václav. *Skripta - Elektromagnetická kompatibilita*. Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií VUT v Brně 304 s.
- [25] VRBA, Kamil, HERMAN, Ivo, KUBÁNEK, David. *Konstrukce elektronických zařízení*. Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií VUT v Brně 237 s.
- [26] BRANČÍK, Lubomír, DOSTÁL, Tomáš. *Skripta - Měření v elektrotechnice*. Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií VUT v Brně 10.2007 194 s.

SEZNAM SYMBOLŮ, VELIČIN A ZKRATEK

USB univerzální rozhraní pro spojení zařízení – Universal Serial Bus

PIC mikrokontrolér RISC vyráběný firmou Microchip

RISC označení mikrokontrolérů s redukovanou instrukční sadou

I²C nízkorychlostní sběrnice pro komunikaci IO mezi sebou – Inter-Integrated Circuit

IO integrovaný obvod

DAC digitálně analogový převodník – Digital Analog Convertor

ADC analogově digitální převodník – Analog Digital Convertor

SPI rozhraní pro komunikaci s periferiemi – Serial Peripheral Interface

MCU mikrokontroler – MicroControler Unit

USART synchronní / asynchronní sériové rozhraní – Universal Synchronous / Asynchronous Receiver and Transmitter

USART asynchronní sériové rozhraní – Universal Asynchronous Receiver and Transmitter

OZ operační zesilovač

OTG On-The-Go – Zařízení, které je na sběrnici USB převážně určeno jako slave, může pracovat i jako host

ESR ekvivalentní sériový odpor – parametr udávající sériovou rezistivitu elektrolytických kondenzátorů

V_{OR} Reflected output voltage – efektivní výstupní napětí na primární straně transformátoru

ICSP In Circuit Serial Programming – programování mikrokontroléru přímo v aplikaci vyvinuté společností Microchip

ESD Electrostatic discharge – lokální výboj statické elektriny

EMC Electromagnetic Compatibility – Elektromagnetická kompatibilita

EMI Electromagnetic Interference – Elektromagnetické vyzařování

EMS Electromagnetic Susceptability – Elektromagnetická odolnost

BW Bandwidth – šířka pásma

EFT Electronic Fast Trasient – rychlé přechodné pulsy (rušení způsobované například řízenými pohony)

CISPR Comité International Spécial des Perturbations Radioélectriques - výbor pro rádiovou interferenci

SEZNAM PŘÍLOH

A Seznamy součástek	84
A.1 Seznam součástek pro napájecí zdroj řídícího modulu	84
A.2 Seznam součástek pro napájecí zdroj výkonového modulu	85
A.3 Seznam součástek pro řídící modul	87
A.4 Seznam součástek pro ovládací a zobrazovací panel	89
A.5 Seznam součástek pro výkonový modul	90
B Obvodová schémata bloků	94
B.1 Zdroj řídícího modulu	94
B.2 Zdroj výkonového modulu	95
B.3 Řídícího modulu	96
C Podklady pro výrobu DPS	97
C.1 Podklady pro výrobu zdroje řídícího modulu (+5 V)	97
C.1.1 Předloha pro DPS (BOTTOM)	97
C.1.2 Osazovací plán (TOP)	97
C.1.3 Osazovací plán (BOTTOM)	97
C.2 Podklady pro výrobu zdroje výkonového modulu (+5 V)	98
C.2.1 Předloha pro DPS (BOTTOM)	98
C.2.2 Osazovací plán (TOP)	99
C.2.3 Osazovací plán (BOTTOM)	99
C.3 Podklady pro výrobu Řídící jednotky	100
C.3.1 Předloha pro DPS (BOTTOM)	100
C.3.2 Osazovací plán (TOP)	101
C.3.3 Osazovací plán (BOTTOM)	101
C.4 Podklady pro výrobu výkonového modulu	102
C.4.1 Předloha pro DPS (TOP)	102
C.4.2 Předloha pro DPS (BOTTOM)	102
C.4.3 Osazovací plán (TOP)	103
C.4.4 Osazovací plán (BOTTOM)	103
C.5 Podklady pro výrobu měřící desky výkonového modulu	104
C.5.1 Předloha pro DPS (TOP)	104
C.5.2 Předloha pro DPS (BOTTOM)	104
C.5.3 Osazovací plán (TOP)	105
C.5.4 Osazovací plán (BOTTOM)	105
C.6 Podklady pro výrobu ovládacího a zobrazovacího panelu	106
C.6.1 Předloha pro DPS (BOTTOM)	106
C.6.2 Osazovací plán (TOP)	107
C.6.3 Osazovací plán (BOTTOM)	107

D Pouzdra mikrokontrolerů	108
D.1 Pouzdro mikrokontroleru PIC18F47J13	108
D.2 Pouzdro mikrokontroleru PIC18F46J50	109
E Zapojení vývodů mikrokontrolerů	110
E.1 Zapojení vývodů mikrokontroleru PIC18F47J13 ve výkonovém modulu . . .	110
E.2 Zapojení vývodů mikrokontroleru PIC18F46J50 ve výkonovém modulu . . .	112
F Bloková schémata integrovaných obvodů	114
F.1 TOP242	114
F.2 TOP244	115
G Mechanické parametry součástek	116
G.1 Transformátor pro impulzní zdroje 74001	116
G.2 Transformátor pro impulzní zdroje 74030	117

A SEZNAMY SOUČÁSTEK

A.1 Seznam součástek pro napájecí zdroj řídícího modulu

Označení	Pouzdro	Hodnota Typ	Poznámka
R1	0207/10	2M2	
R2	R1206	100R	
R3	R1206	10k	
R4	R1206	10k	
R5	R1206	1k0	
R6	R1206	3k3	
R7	R1206	330R	Volitelný (opt. signalizace)
RV	S10K17	275VAC	Volitelný (ochranný varistor)
B1	MiniDIL	S380B	Můstek
D1	DO-201AD	SB360	
D2	DO-35	BAV21	
DR1	SOD-57	BYV26C	
DR2	DO-204AC	P6KE180	Transil
LED1	5mm	Červená	Volitelná (opt. signalizace)
C1	EUE5-10.5	330uF/16V	nízká ESR
C2	EUE5-10.5	330uF/16V	
C3	EUE5-13	10uF/450V	
C4	C1206	100nF/50V	
C5	EUE1.8-4	2,2uF/50V	
C6	C1206	100nF/50V	
CF1	X2 (15mm)	100nF/305V	Volitelný (filtr)
CF2	X2 (15mm)	100nF/305V	Volitelný (filtr)
L1	10mm	cca 2,5uH	Feritová perlička
LF	74311	viz. [8]	Volitelná (filtr)
TR1	74001	viz. [8]	
VR1	TO-92	TLC431	
IO1	DIL8	TOP242PN	
OPTO1	DIL4	LTV816	Nebo PC817 apod.
X1	PTR500/2		Osadit při použití filtru
X2	PTR500/2		Osadit při neosazení filtru
X3	PTR500/2		

A.2 Seznam součástek pro napájecí zdroj výkonového modulu

Označení	Pouzdro	Hodnota Typ	Poznámka
R1A	0207/10	1M0	
R1B	0207/10	1M0	
R2A	R1206	47R	
R2B	R1206	47R	
R3	R1206	10k	
R4A	R1206	10k	Osadit pro referenční větev 5 V
R4B	R1206	38k	Osadit pro referenční větev 12 V
R5	R1206	1k0	
R6	R1206	3k3	
R7	R1206	6R8	
RO	R1206	1k0	Volitelný (pouze při ext. spínání)
RV	S10K17	275VAC	Ochranný varistor
B1	MiniDIL	S380B	Můstek
D1a	SOD-57	BYV27-200	
D1b	SOD-57	BYV27-200	
D1w	DO-201AD	SB360	
D2	DO-35	BAV21	
DR1	SOD-57	BYV26C	
DR2	DO-204AC	P6KE150	Transil
C1a	EUE5-10.5	330uF/35V	Nízká ESR
C2a	EUE5-10.5	330uF/35V	
C1b	EUE5-10.5	330uF/35V	Nízká ESR
C2b	EUE5-10.5	330uF/35V	
C1w	EUE5-10.5	330uF/16V	Nízká ESR
C2w	EUE5-10.5	330uF/16V	
C3	EUE5-13	47u/450V	
C4	C1206	100n/50V	
C5	EUE1.8-4	2u2/50V	
C6	C1206	100n/50V	
C7	C1206	47uF/16V	

Označení	Pouzdro	Hodnota Typ	Poznámka
CF1	X2 (15mm)	100nF/305V	Filtr
CF2	X2 (15mm)	100nF/305V	Filtr
L1a	10mm	cca 2,5uH	Feritová perlička
L1b	10mm	cca 2,5uH	Feritová perlička
L1w	10mm	cca 2,5uH	Feritová perlička
LF	74311	viz. [8]	Filtr
TR1	74001	viz. [8]	
VR1	TO-92	TLC431	
IO1	TO220-7	TOP244Y	
OPTO1	DIL4	LTV816	nebo PC817 apod.
OPTO2	DIL4	LTV816	Volitelný (pouze při ext. spínání)
X1	PTR500/2		
X2	PTR500/2		
X3	PTR500/2		
X4	PTR500/2		
X5	PTR500/2		Volitelná (pouze při ext. spínání)
JP1	FE02-1		

A.3 Seznam součástek pro řídící modul

Označení	Pouzdro	Hodnota Typ	Poznámka
C1	C1206K	100n	
C2	C1206K	100n	
C3	C1206K	100n	
C4	C1206K	100n	
C5	C1206K	10uF	
C8	C1206K	18pF	
C9	C1206K	18pF	
C10	C1206K	100n	
D1	SOD-123-MINI	1N4181	
D2	SOD-123-MINI	1N4181	
D3	DO-214AC	1N4007	
IO2	DPACK	LF33	
IO3	SOT475	IP4220CZ6	
J1	con-molex	PIN-4	
J2	con-molex	PIN-4	
J3	con-molex	PIN-4	
J4	con-molex	PIN-4	
K1	TX2SA-L2	G6SK-2F-H	
OPTO1	DIL4	LTV816	
OPTO2	DIL4	LTV816	
OPTO3	DIL4	LTV816	
OPTO4	DIL4	LTV816	
MCU	TQFP44	PIC18F46J50	
PL1	con-harting	20V	
Q1	HC49UP	12MHz	

Označení	Pouzdro	Hodnota Typ	Poznámka
R1	M1206	1k5	
R2	M1206	10k	
R3	M1206	10k	
R4	M1206	110R	
R5	M1206	110R	
R6	M1206	1k	
R7	M1206	1k	
R8	M1206	1k	
R9	M1206	110R	
R10	M1206	1k	
R11	M1206	110R	
R12	M1206	39R	
R13	M1206	39R	
R14	M1206	8k2	
R15	M1206	8k2	
R16	M1206	8k2	
R17	M1206	8k2	
R18	M1206	8k2	
SV1	con-lsta	FE06	
T1	SOT23	BC846	
T2	SOT23	BC846	
T3	SOT23	BC846	
T4	SOT23	BC846	
USB	con-cypress	MINI-USB	
X1	con-ptr500	AK500/2	
X2	con-ptr500	AK500/2	

A.4 Seznam součástek pro ovládací a zobrazovací panel

Označení	Pouzdro	Hodnota Typ	Poznámka
C1	C1206	100n	
IC1	DIL14	74LS07N	
J2	con-molex 5	5PIN	
PL1	harting 20	20H	
Q1	SOT23	BC846	
R1	R1206	2k2	
R2	R1206	0R0	
R3	R1206	8k2	
R4	R1206	10k	
RN1	SIL5	10k	
RN2	SIL5	10k	
RN3	SIL5	10k	Pouze pokud nejsou zapnuté pull-up v MCU
RN4	SIL5	10k	Pouze pokud nejsou zapnuté pull-up v MCU
S1	B3F-10XX	h:19mm	
S2	B3F-10XX	h:19mm	
S3	B3F-10XX	h:19mm	
S4	B3F-10XX	h:19mm	
S5	B3F-10XX	h:19mm	
SV1	con-lsta	FE06	Spolu s SV2 mohou být nahrazeny FE16
SV2	con-lsta	FE10	

A.5 Seznam součástek pro výkonový modul

Označení	Pouzdro	Hodnota Typ	Poznámka
C3	C1206	100n	
C4	C1206	100n	
C5	C1206	100n	
C6	C1206	100n	
C7	C1206	100n	
C25	C1206	100n	
C27	C1206	100n	
CB1	E2-5	2u2	
CB2	E2-5	2u2	
CD5	C1206	100n	
CD12	C1206	100n	
CEF3	E5-10,5	330uF	
CEL0	E7,5-18	1mF	
CEL1	E5-10,5	330uF	
CEL2	E5-10,5	330uF	
CEL3V3	E2-5	10uF	
CM1	E2-5	10uF	
CM2	E2-5	10uF	
CO1	C1206	100n	
CO2	C1206	100n	
CO3	C1206	100n	
CP1	C1206	100n	
CP2	C1206	100n	
CR	C1206	1uF	
CXTAL1	C1206	15pF	
CXTAL2	C1206	15pF	
D1	R MICROMELF-R	1n4841	
D3	SOT23		
D4	MINIMELF	1N4841	
D5	MINIMELF	1N4841	
D6	MINIMELF	1N4841	
D7	MINIMELF	1N4841	
D8	MINIMELF	1N4841	
D9	MINIMELF	1N4841v	
D10	MINIMELF	1N4841	

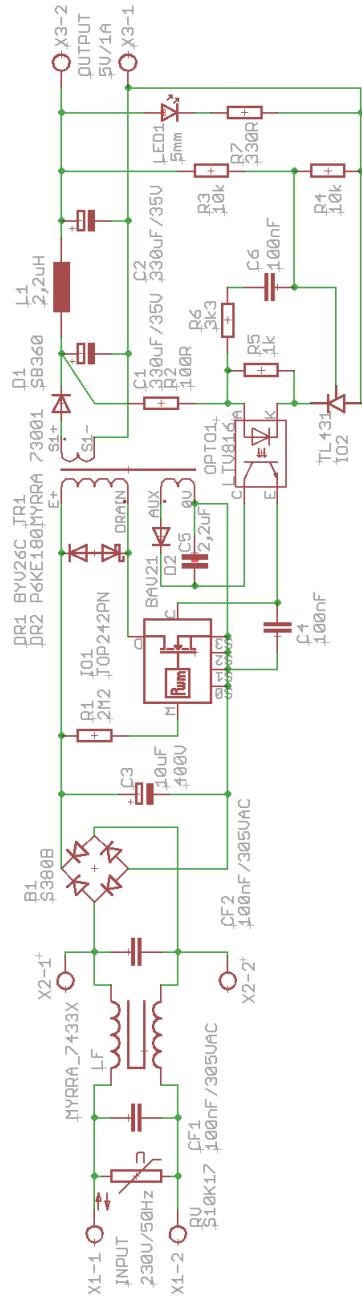
Označení	Pouzdro	Hodnota Typ	Poznámka
D11	MINIMELF	1N4841	
D12	MINIMELF	1N4841	
D13	MINIMELF	1N4841	
D14	MINIMELF	1N4841	
D15	MINIMELF	1N4841	
D19	MINIMELF	1N4841	
D20	MINIMELF	1N4841	
D21	MINIMELF	1N4841	
D22	MINIMELF	1N4841	
IC1	SO08	LM358D	
IC2	SO08	LM358D	
IC3	SO08	MCP4822	
IC4	SO08	LM358D	
J2	7395-04	molex con4	
K1	TX2SA-L2	RELAY-G5H6	
K2	TX2SA-L2	RELAY-G5H6	
LED1	M1206		
LED2	M1206		
MCU	TQFP44	PIC18F47J13	
QR1N	SOT23	BC846	
QR1P	SOT23	BC856	
QR2N	SOT23	BC846	
QR2P	SOT23	BC856	
QR3	SOT23	BC846	
QR4	SOT23	BC846	
QR5	SOT23	BC846	
QR6	SOT23	BC846	
QR7	SOT23	BC846	
QR8	SOT23	BC846	
R0	M1206	4k7	
R0A	M1206	0R5	
R0B	M1206	0R0	
R0C	M1206	0R0	
R0D	M1206	0R5	
R1	M1206	1k2	
R2	M1206	1k2	
R3	M1206	8k2	

Označení	Pouzdro	Hodnota Typ	Poznámka
R4	M1206	1k8	
R5	M1206	1k	
R6	M1206	15k	
R7	M1206	1k0	
R8	M1206	10k	
R9	M1206	1k0	
R10	M1206	1k	
R12	M1206	1k0	
R14	M1206	22k	
R15	M1206	22k	
R16	M1206	470R	
R20	M1206	4k7	
R21	M1206	22k	
R23	M1206	4k7	
R24	M1206	22k	
RB1	M1206	8k2	
RB2	M1206	8k2	
RB3	M1206	2k2	
RB4	M1206	2k2	
RB5	M1206	2k2	
RB6	M1206	2k2	
RB7	M1206	2k2	
RB8	M1206	2k2	
RD5-1	M1206	3k3	
RD5-2	M1206	3k3	
RD12-1	M1206	15k	
RD12-2	M1206	3k3	
RDI1	M1206	1k	
RDI2	M1206	3k3	
RDN1	M1206	33k	
RDN2	M1206	3k3	
RDV1	M1206	12k	
RDV2	M1206	2k2	
RE1	M1206	10R	
RE2	M1206	10R	
RL1	M1206	180R	

Označení	Pouzdro	Hodnota Typ	Poznámka
RL2	M1206	180R	
RR	M1206	10k	
SV1	MA05-2		
SV2	MA05-2		
SV3	MA05-2		
T0	TO220AV	MJE3055	
T1	SOT23	BC847	
T2	SOT23	BC847	
TAZ1	DO-214AC	SM6T6V8A	
TAZ2	DO-214AC	SM6T15A	
TAZ3	DO-214AC	SM6T15A	
TAZ4	SMB	SM6T24A	
U1	DPACK	LF33	
U2	SO08	TC7660	
X1	AK500/2		
X2	AK500/2		
X3	AK500/2		
X4	AK500/2		
XTAL1	SM49	20MHz	

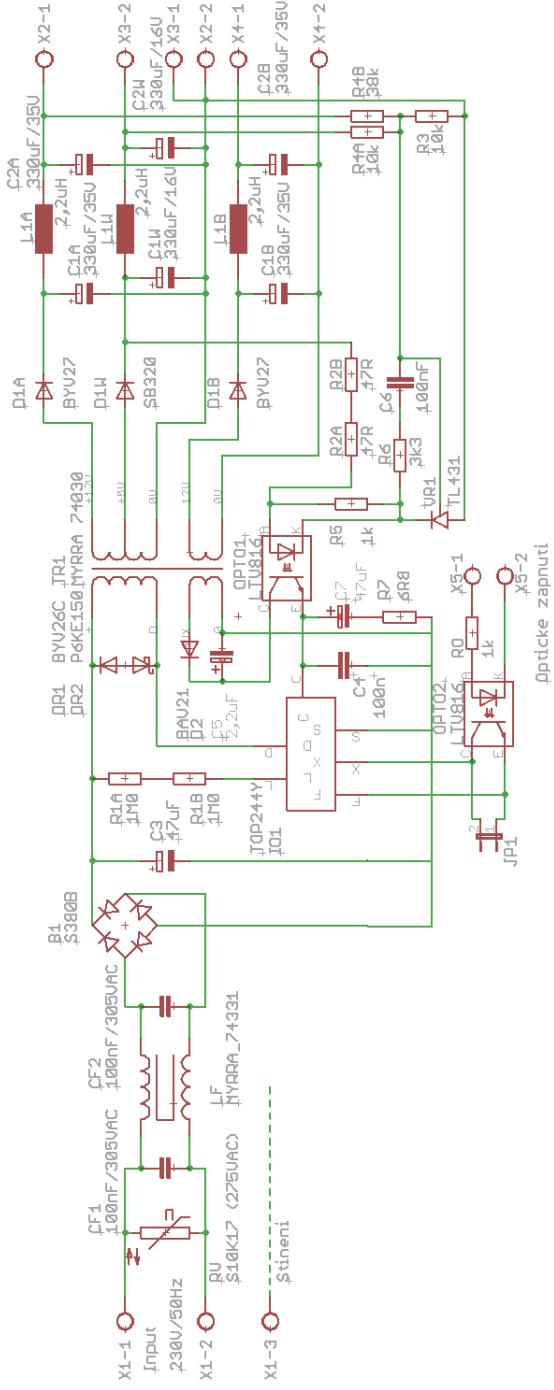
B OBVODOVÁ SCHÉMATA BLOKŮ

B.1 Zdroj řídícího modulu



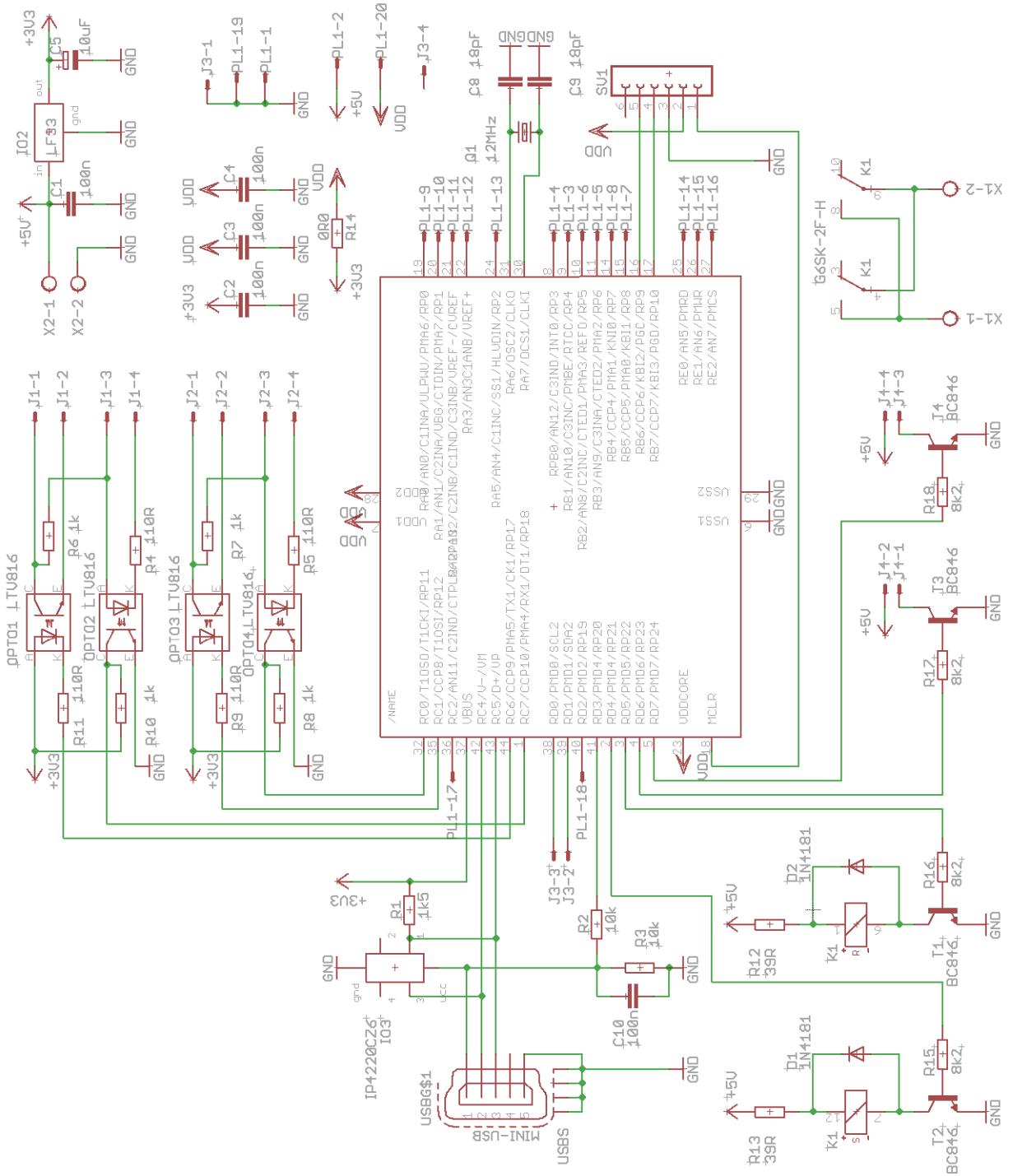
Obr. B.1: Zdroj řídícího modulu - obvodové schéma

B.2 Zdroj výkonového modulu



Obr. B.2: Zdroj výkonového modulu - obvodové schéma

B.3 Řídícího modulu

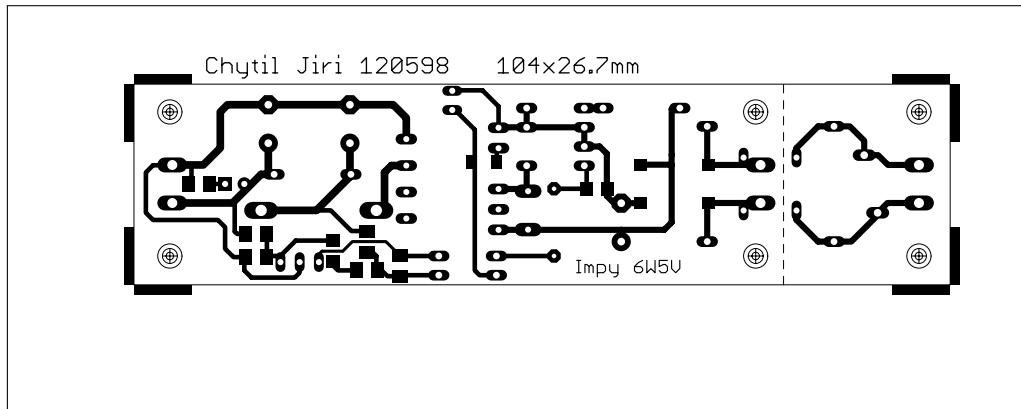


Obr. B.3: Řídící modul - obvodové schéma

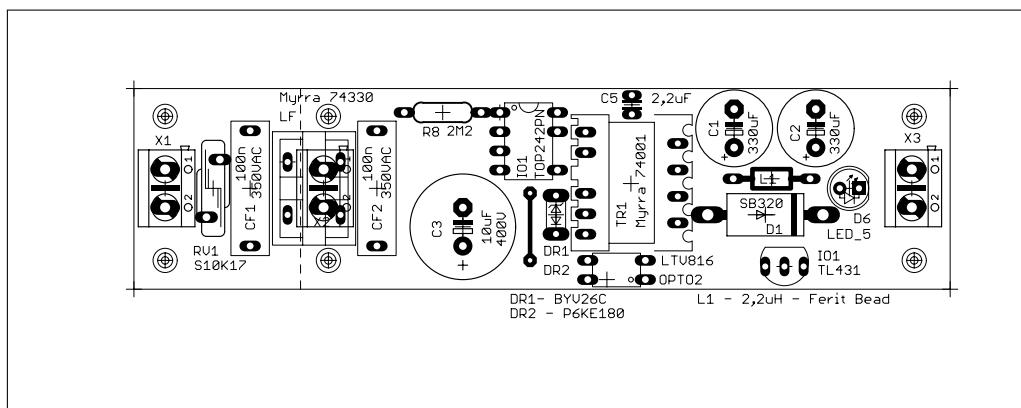
C PODKLADY PRO VÝROBU DPS

C.1 Podklady pro výrobu zdroje řídícího modulu (+5 V)

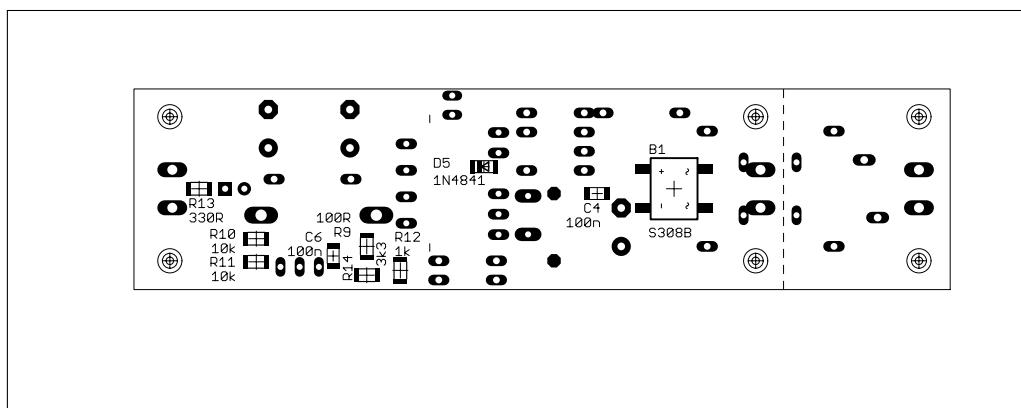
C.1.1 Předloha pro DPS (BOTTOM)



C.1.2 Osazovací plán (TOP)

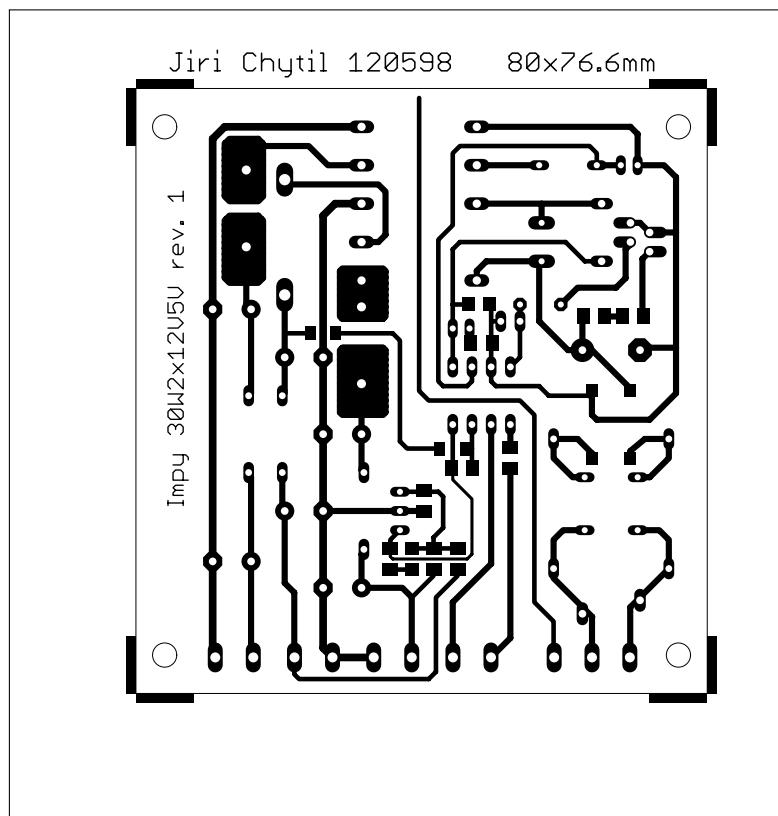


C.1.3 Osazovací plán (BOTTOM)

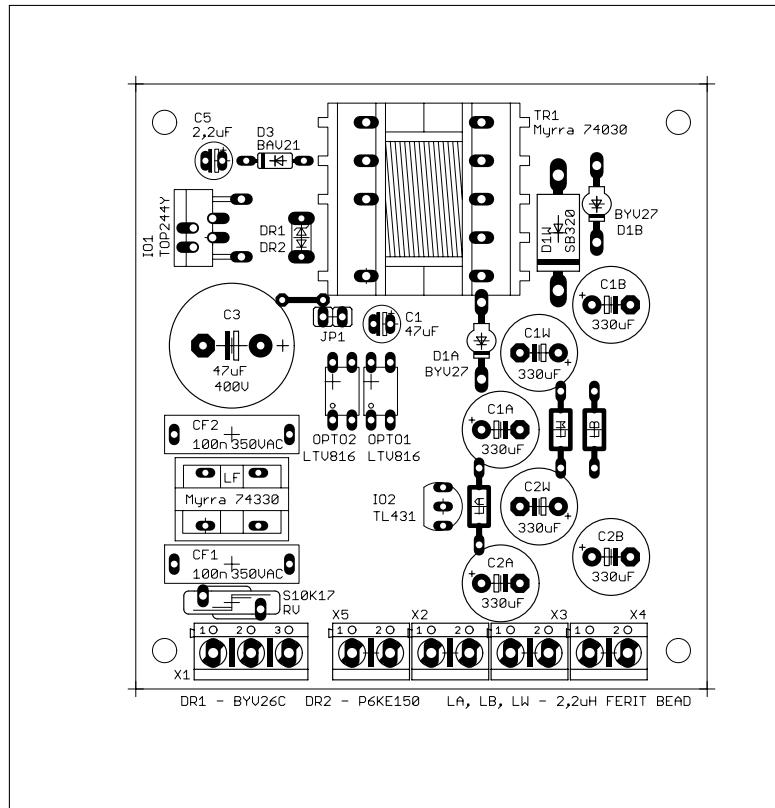


C.2 Podklady pro výrobu zdroje výkonového modulu (+5 V)

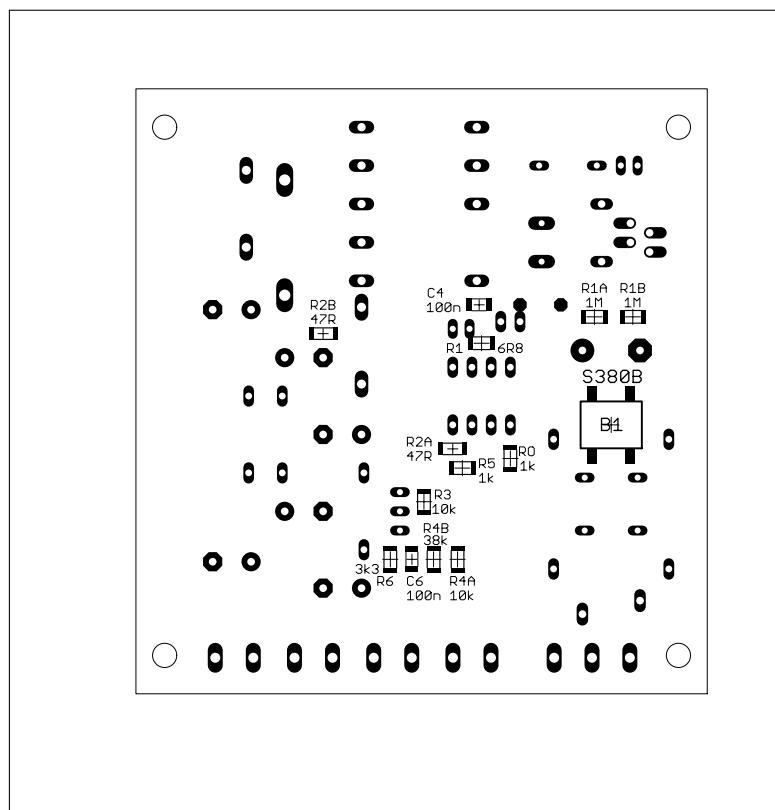
C.2.1 Předloha pro DPS (BOTTOM)



C.2.2 Osazovací plán (TOP)

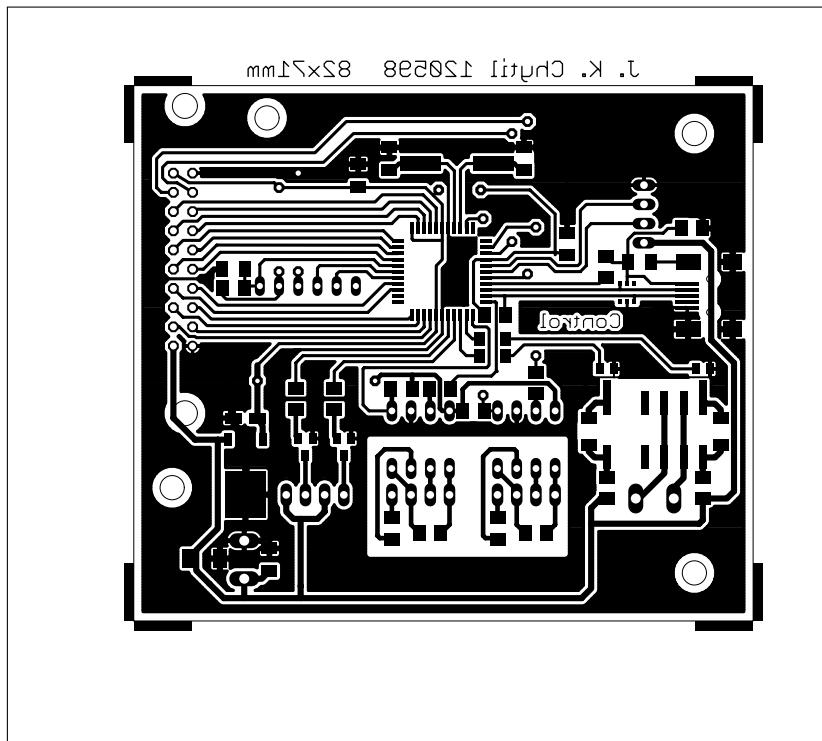


C.2.3 Osazovací plán (BOTTOM)

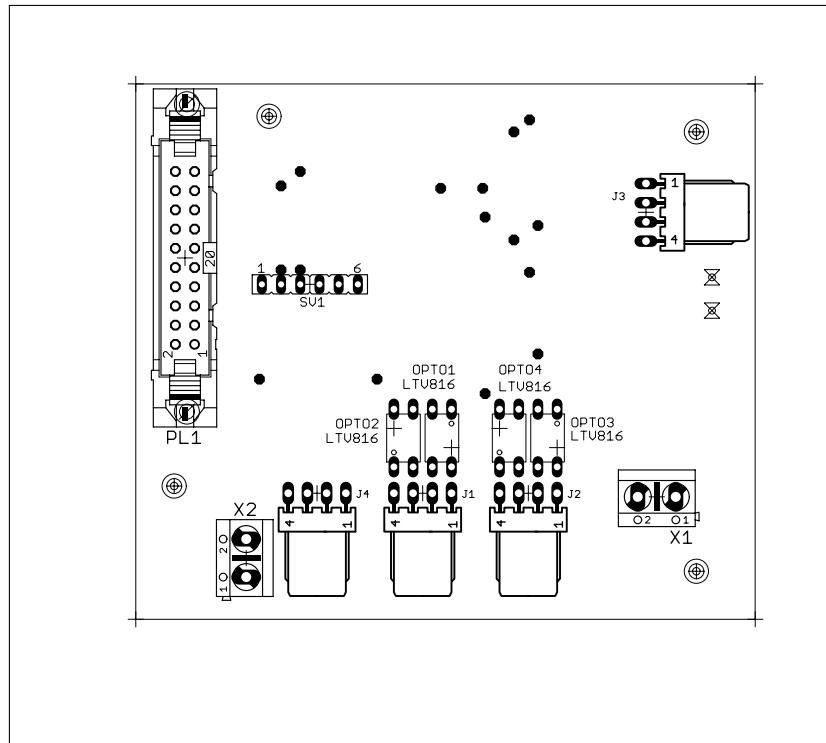


C.3 Podklady pro výrobu Řídící jednotky

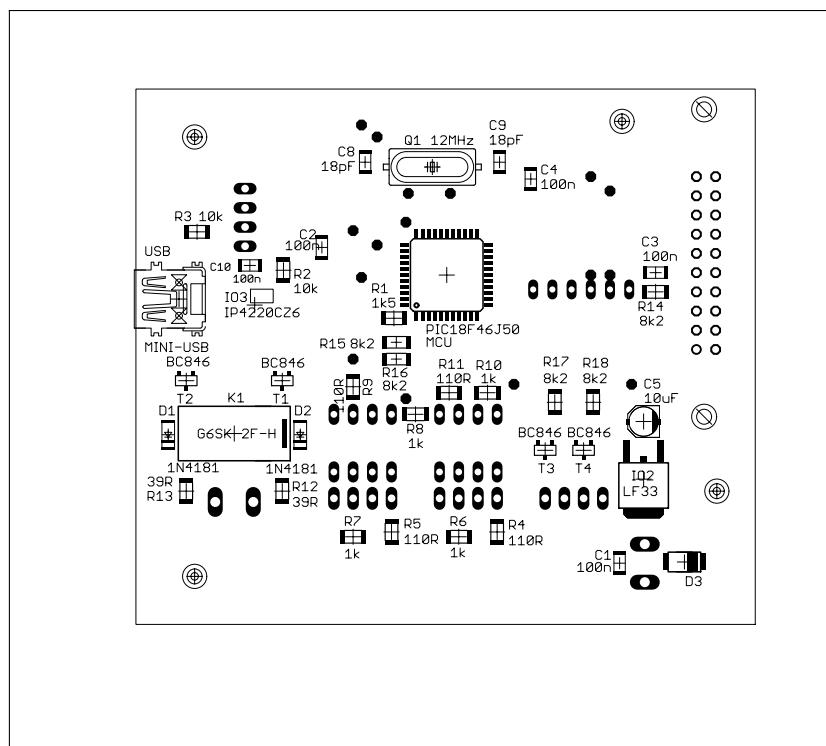
C.3.1 Předloha pro DPS (BOTTOM)



C.3.2 Osazovací plán (TOP)

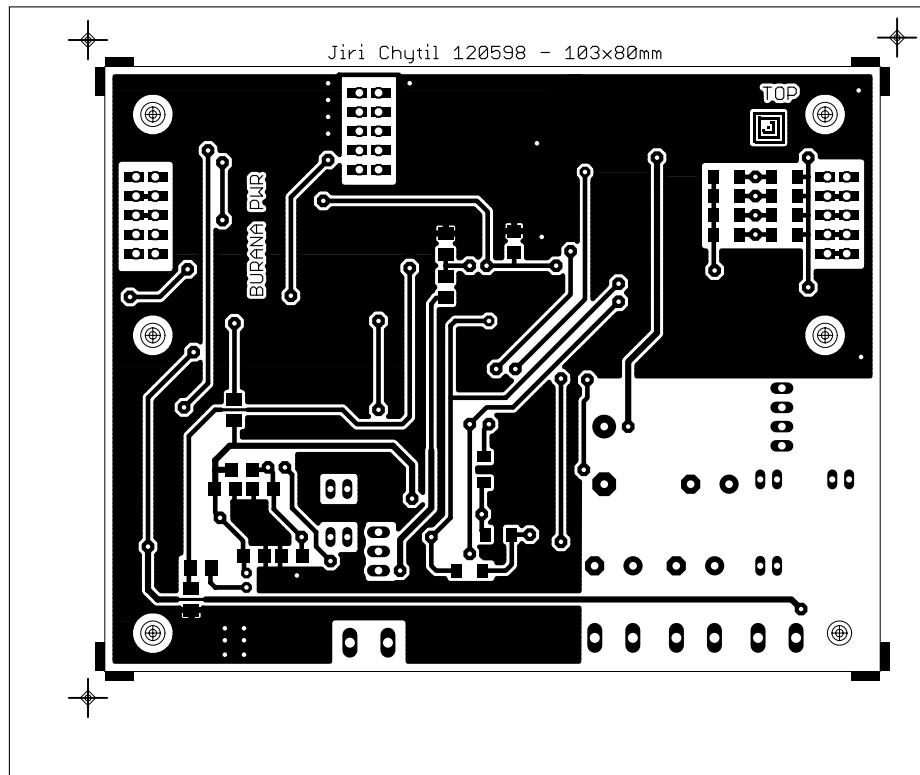


C.3.3 Osazovací plán (BOTTOM)

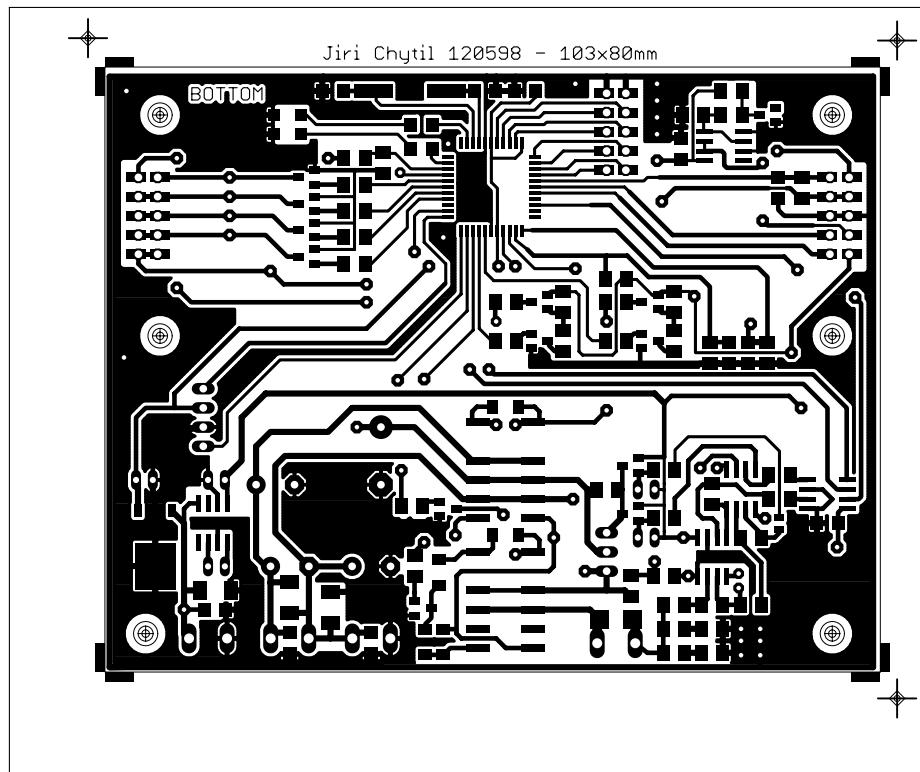


C.4 Podklady pro výrobu výkonového modulu

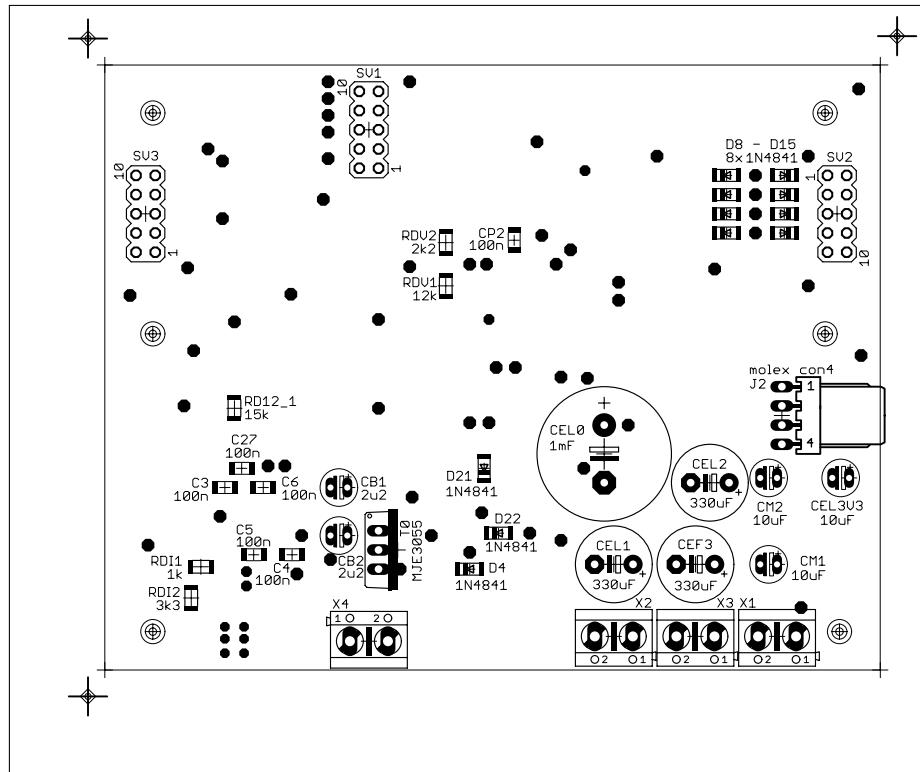
C.4.1 Předloha pro DPS (TOP)



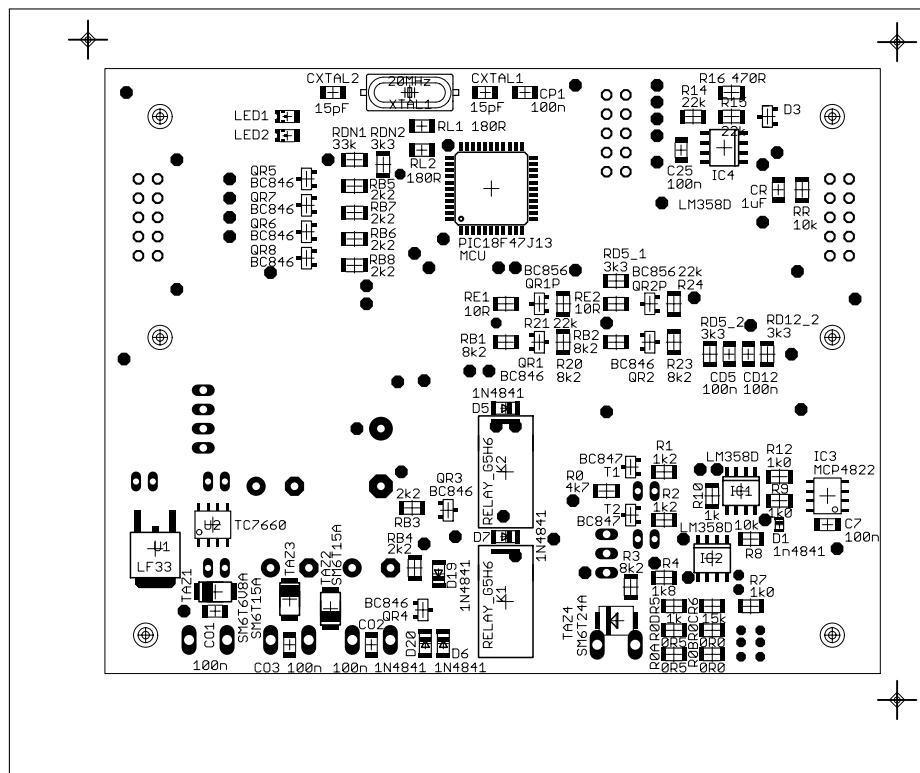
C.4.2 Předloha pro DPS (BOTTOM)



C.4.3 Osazovací plán (TOP)

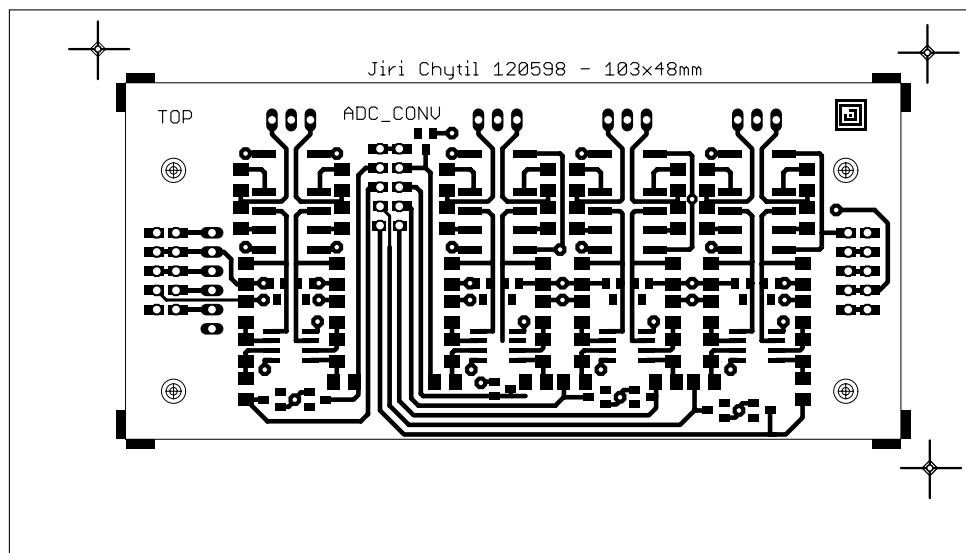


C.4.4 Osazovací plán (BOTTOM)

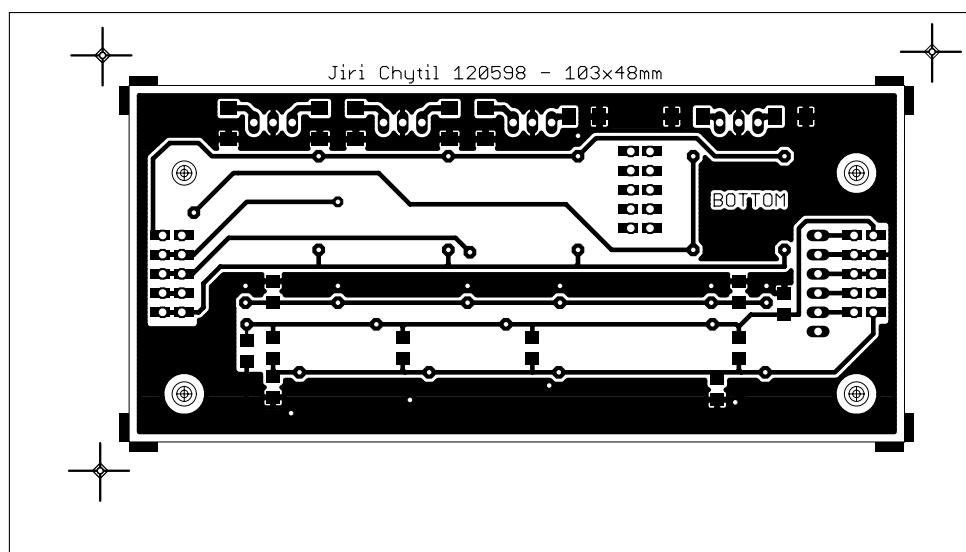


C.5 Podklady pro výrobu měřící desky výkonového modulu

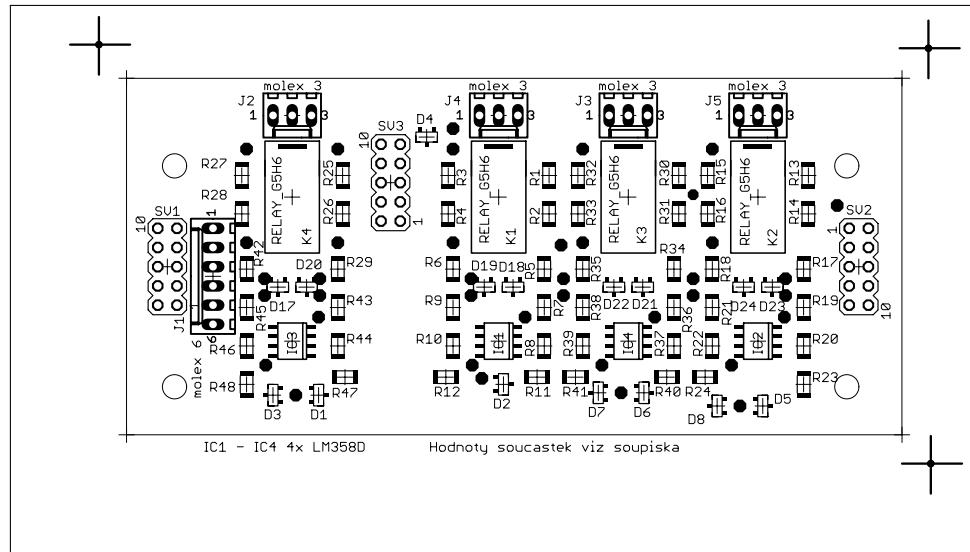
C.5.1 Předloha pro DPS (TOP)



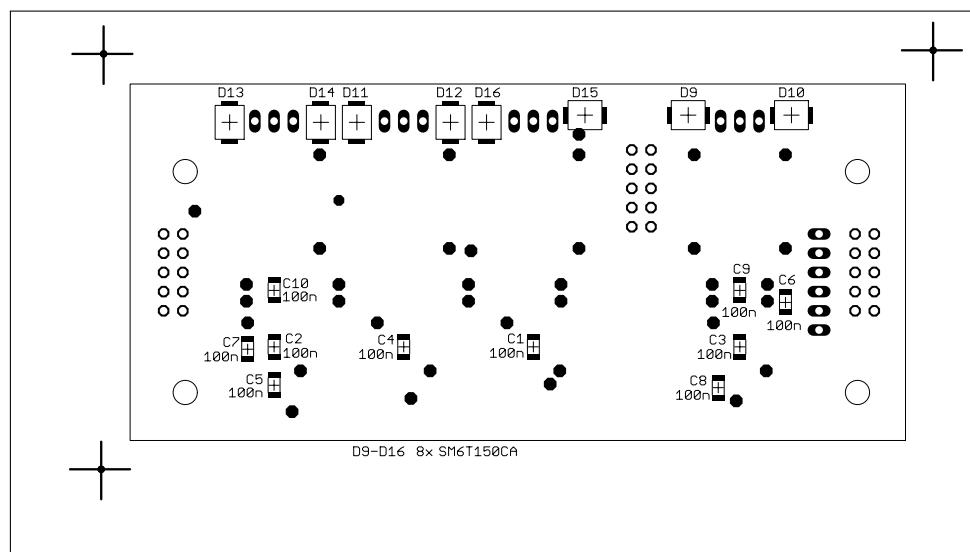
C.5.2 Předloha pro DPS (BOTTOM)



C.5.3 Osazovací plán (TOP)

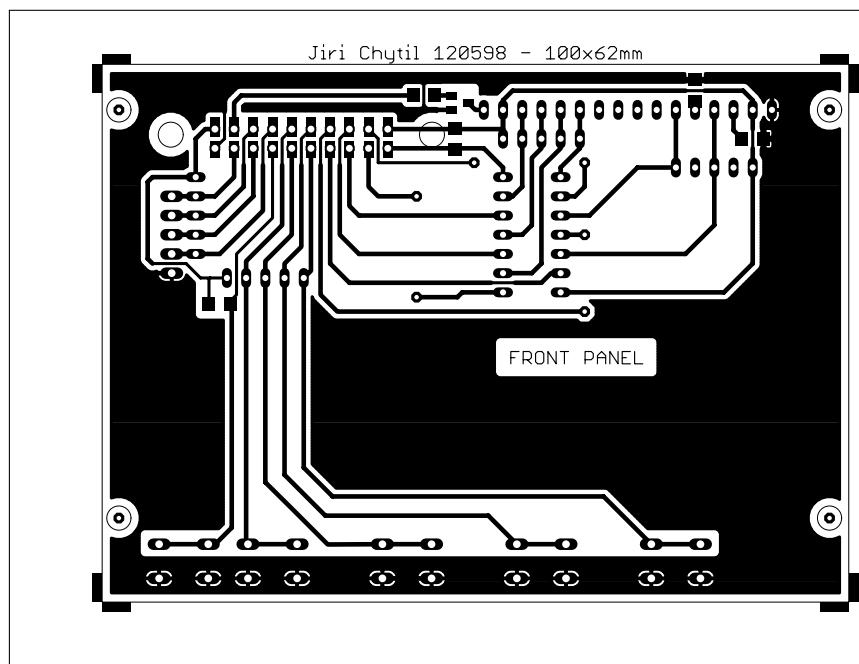


C.5.4 Osazovací plán (BOTTOM)

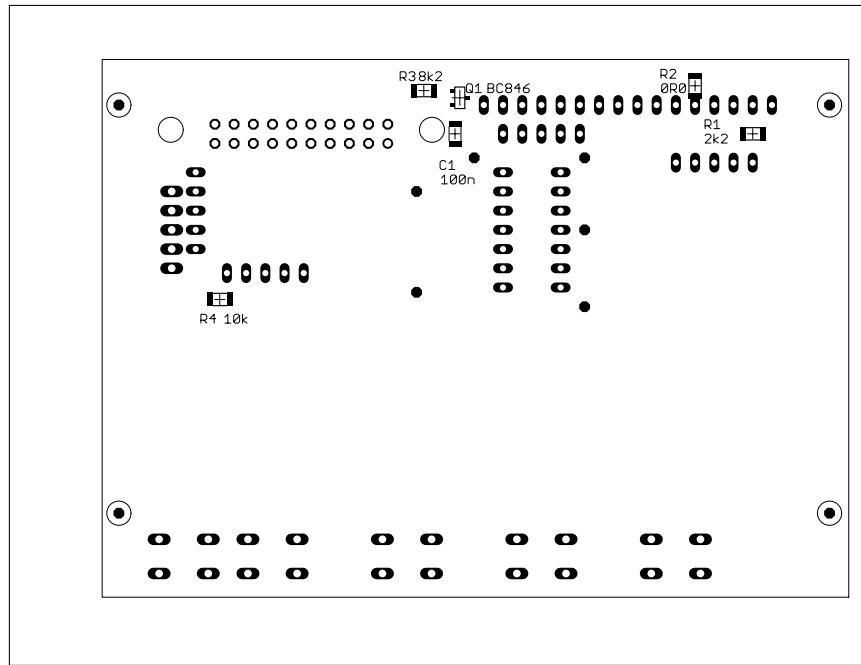


C.6 Podklady pro výrobu ovládacího a zobrazovacího panelu

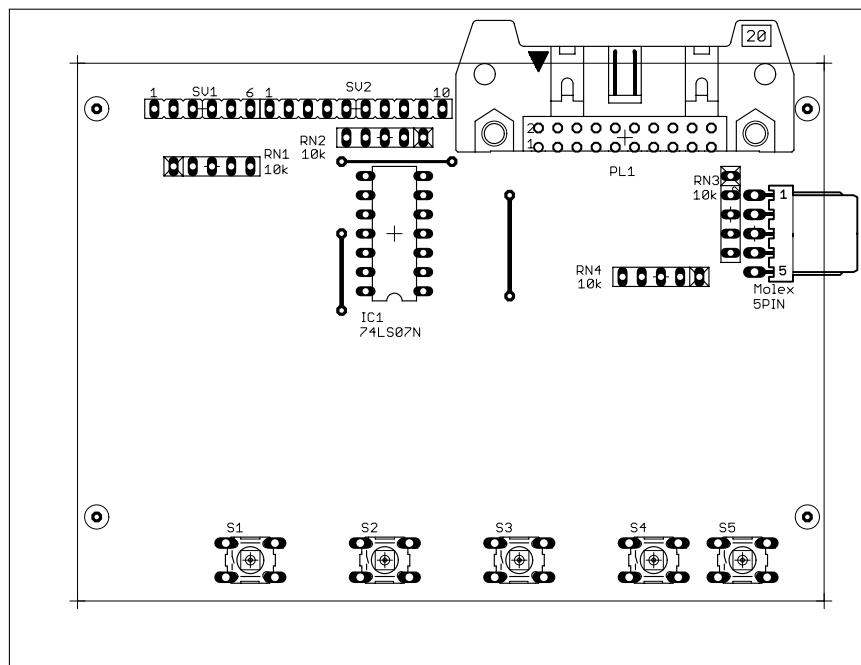
C.6.1 Předloha pro DPS (BOTTOM)



C.6.2 Osazovací plán (TOP)



C.6.3 Osazovací plán (BOTTOM)

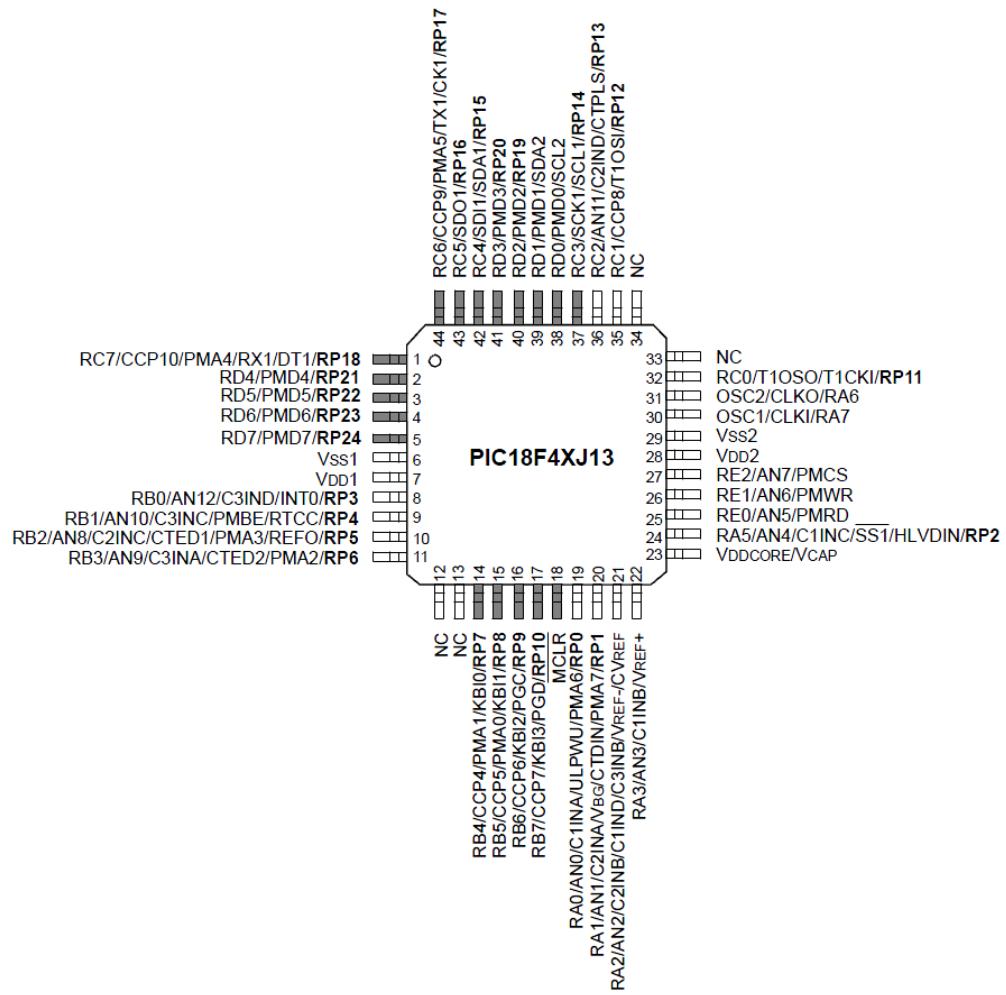


D POUZDRA MIKORKONTROLERU^o

D.1 Pouzdro mikrokontroleru PIC18F47J13

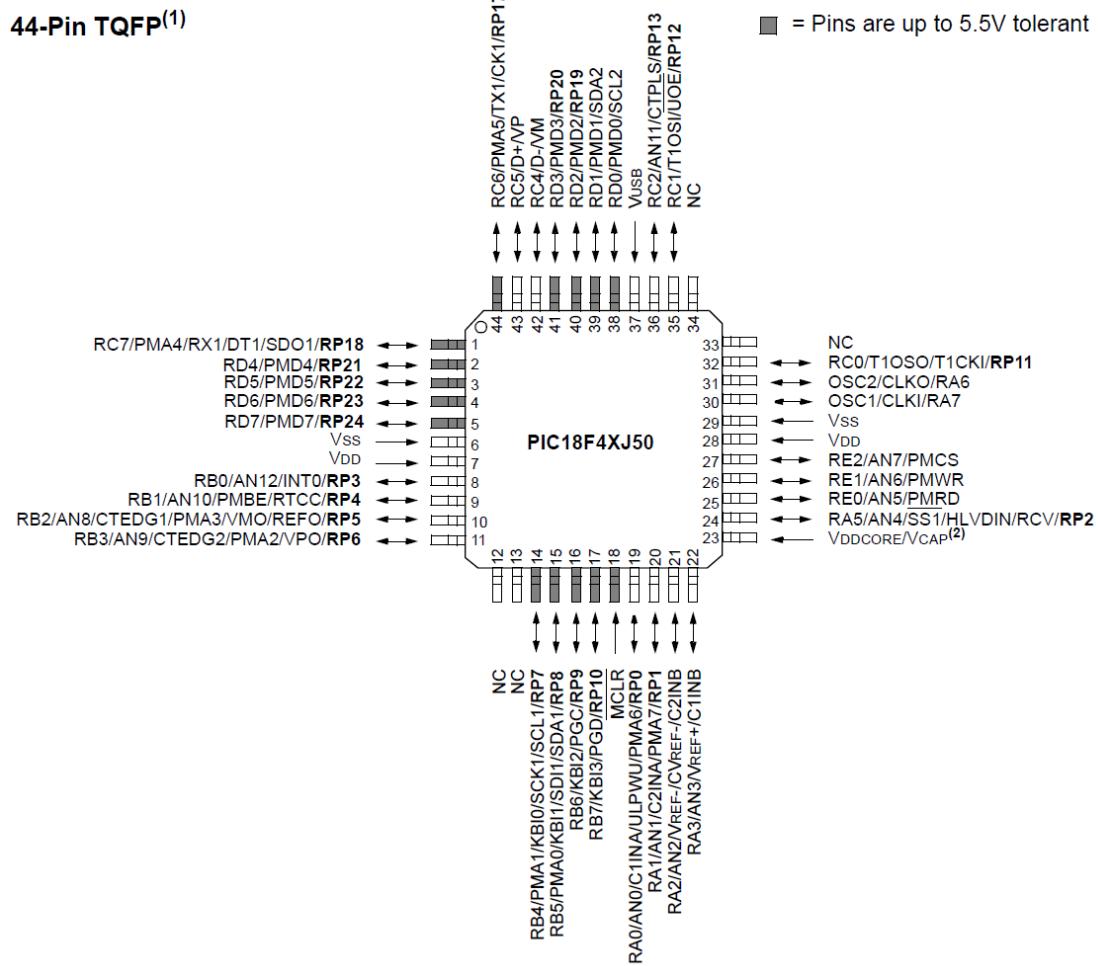
44-Pin TQFP

■ = Pins are up to 5.5V tolerant



Obr. D.1: Pouzdro mikrokontroleru PIC18F47J13 - převazato z [3]

D.2 Pouzdro mikrokontroleru PIC18F46J50



Obr. D.2: Pouzdro mikrokontroleru PIC18F46J50 - převazato z [2]

E ZAPOJENÍ VÝVODŮ MIKROKONTROLERŮ

E.1 Zapojení vývodů mikrokontroleru PIC18F47J13 ve výkonovém modulu

Vývod	Funkce	Použití
1	RX1	Optická komunikace
2	RD4	Relé OUT na GND
3	RD5	Relé 0 na GND
4	FREE	Volné
5	FREE	Volné
6	VSS1	Napájení
7	VDD1	Napájení
8	AN12	Diagnostika 12V
9	AN10	Diagnostika 12/24V
10	AN8	Měření Proudu
11	AN9	Měření Napětí
12	NC	Nepoužito
13	NC	Nepoužito
14	RB4	Relé 12/24V
15	RB5	Výstupní relé (Bezpečností)
16	PGC	Programování ICSP
17	PGD	Programování ICSP
18	MCLR	Programování ICSP
19	AN0	Měřící vstup
20	AN1	Měřící vstup
21	AN2	Měřící vstup
22	AN3	Měřící vstup

Vývod	Funkce	Použití
23	VDDCORE	Napájení
24	AN4	Měřící vstup
25	AN5	Měřící vstup
26	AN6	Měřící vstup
27	AN7	Měřící vstup
28	VDD1	Napájení
29	VSS1	Napájení
30	OSC1	Krystal
31	OSC2	Krystal
32	RC0	Relé 1. (rozsah ADC)
33	NC	Nepoužito
34	NC	Nepoužito
35	RC1	Relé 2. (rozsah ADC)
36	AN11	Diagnostika 5V
37	SCK1	SPI DAC
38	FREE	Volné
39	FREE	Volné
40	RD2	Relé 3. (rozsah ADC)
41	RD3	Relé 4. (rozsah ADC)
42	SDI1	SPI DAC
43	SDO1	SPI DAC
44	TX1	Optická komunikace

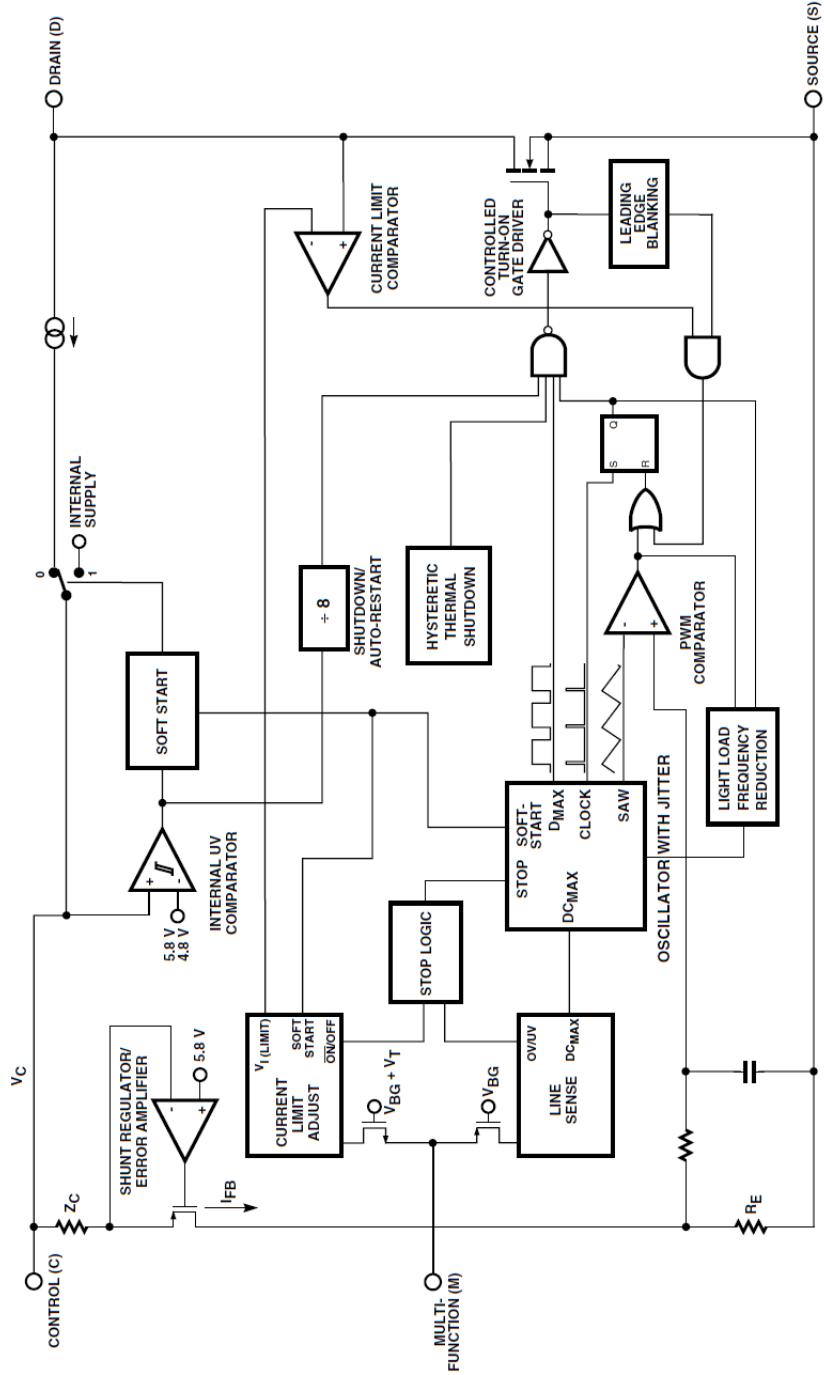
E.2 Zapojení vývodů mikrokontroleru PIC18F46J50 ve výkonovém modulu

PORT	Funkce	Použití
1	RXD1	Optická komunikace modul 1
2	RXD2	Zemnící relé sepnutí
3	TXD2	Zemnící relé rozepnutí
4	RD6	Spínání zdroje 1
5	RD7	Spínání zdroje 2
6	VSS	Napájení
7	VDD	Napájení
8	RB0	Display D0
9	RB1	Display D1
10	RB2	Display D2
11	RB3	Display D3
12	NC	Nezapojen
13	NC	Nezapojen
14	RB4	Display E
15	RB5 (CCP5)	Display podsvícení (PWM)
16	PGC	Programování ICSP
17	PGD	Programování ICSP
18	MCLR	Programování ICSP
19	RA0	Tlačítko Vernier
20	RA1	Rotační n-koder
21	RA2	Rotační n-koder
22	RA3	Rotační n-koder (stisk)

Vývod	Funkce	Použití
23	VCORE	Napájení
24	RA5	Tlačítko 1
25	RE0	Tlačítko 2
26	RE1	Tlačítko 3
27	RE2	Tlačítko 4
28	VDD	Napájení
29	VSS	Napájení
30	OSC1	Krystal
31	OSC2	Krystal
32	RC0	Optická komunikace modul 2
33	NC	Nezapojen
34	NC	Nezapojen
35	RC1	Optická komunikace modul 2
36	RC2	Volný
37	VBUS	USB sens
38	SCL2	I2C
39	SDA2	I2C
40	RD2	Volný
41	RD3	USB Senzor připojení
42	D-	USB Data
43	D+	USB Data
44	TXD1	Optická komunikace modul 1

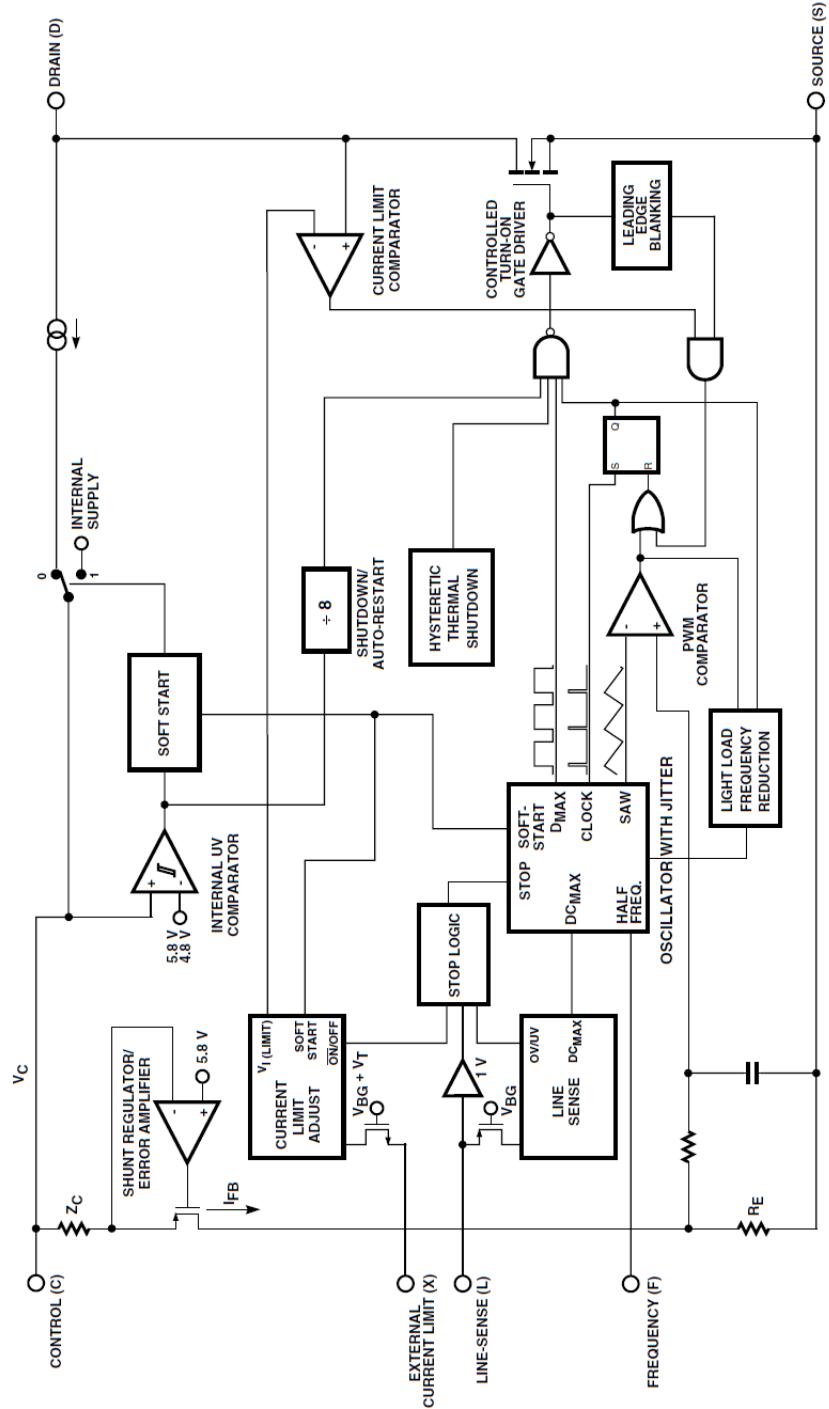
F BLOKOVÁ SCHÉMATA INTEGROVANÝCH OBVODU^o

F.1 TOP242



Obr. F.1: Blokové schéma integrovaného obvodu spínaného zdroje TOP242 - převzato z [10]

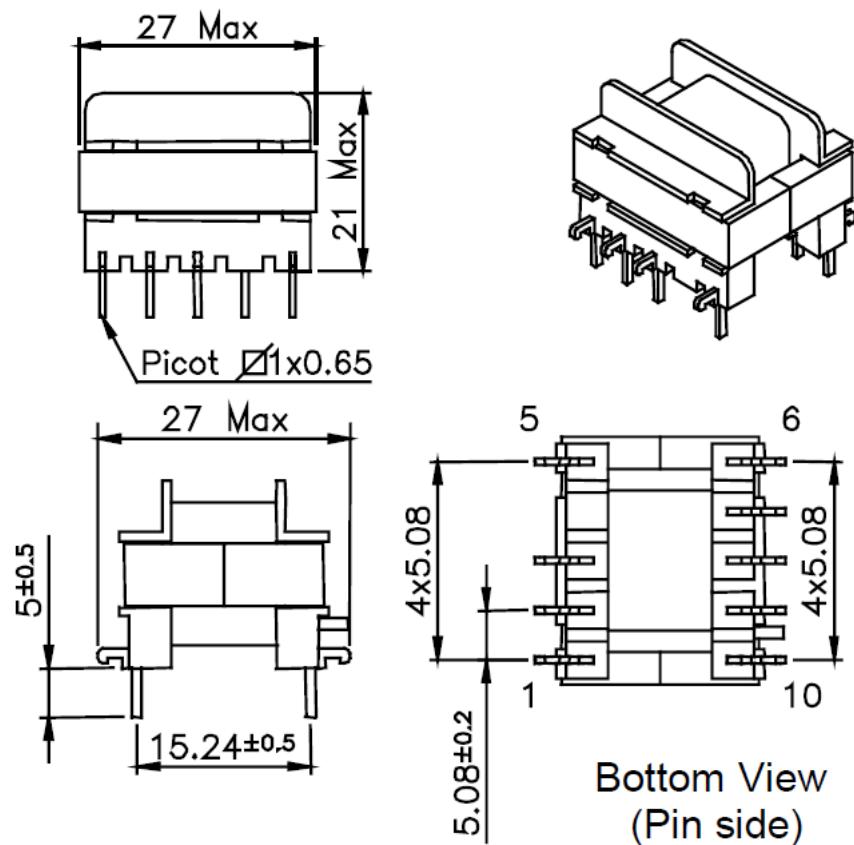
F.2 TOP244



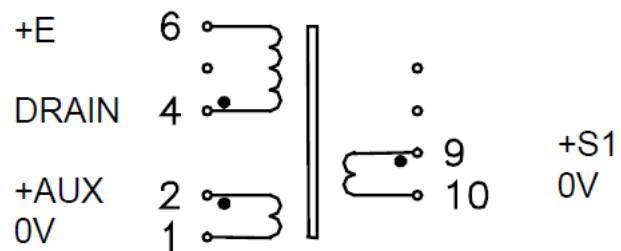
Obr. F.2: Blokové schéma intagrovaného obvodu spínaného zdroje TOP244 - převzato z [10]

G MECHANICKÉ PARAMETRY SOUČÁSTEK

G.1 Transformátor pro impulzní zdroje 74001

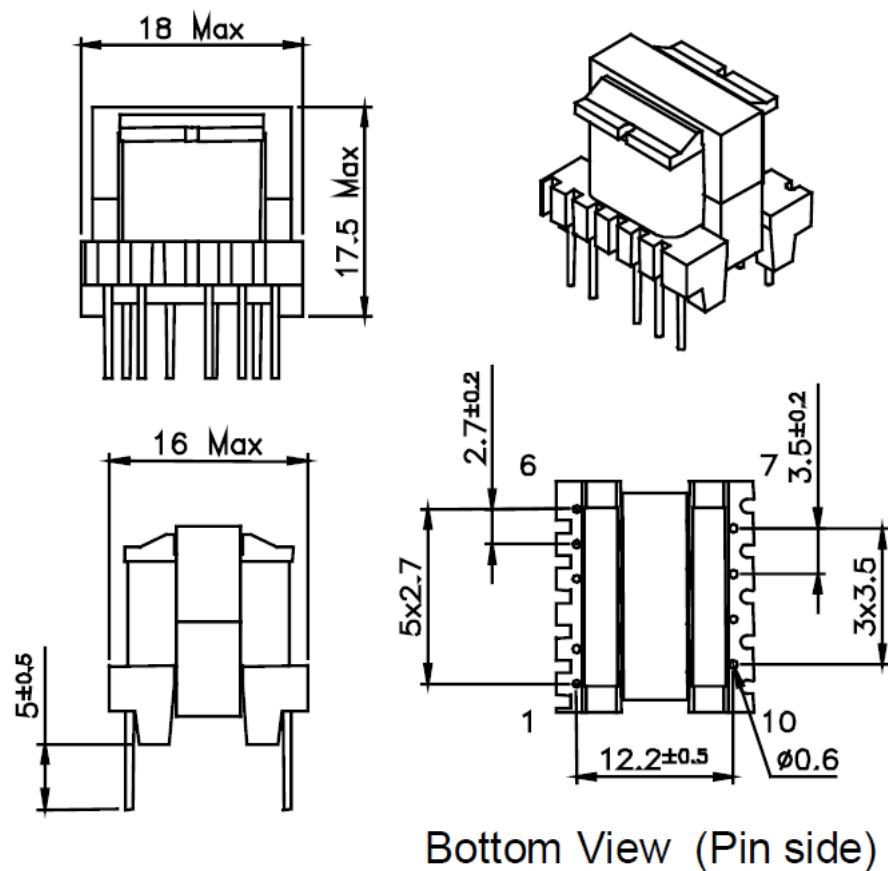


Obr. G.1: Mechanické rozměry transformátoru pro impulzní zdroje 74001 - převzato z [8]

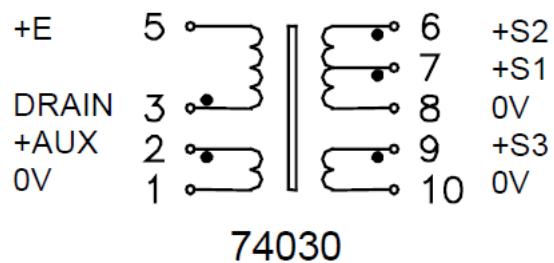


Obr. G.2: Zapojení vývodů transformátoru pro impulzní zdroje 74001 - převzato z [8]

G.2 Transformátor pro impulzní zdroje 74030



Obr. G.3: Mechanické rozměry transformátoru pro impulzní zdroje 74030 - převzato z [8]



Obr. G.4: Zapojení vývodů transformátoru pro impulzní zdroje 74030 - převzato z [8]