

VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

Fakulta elektrotechniky
a komunikačních technologií

DIPLOMOVÁ PRÁCE

Brno, 2016

Bc. Lubomír Sehnálek



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA ELEKTROTECHNIKY

A KOMUNIKAČNÍCH TECHNOLOGIÍ

FACULTY OF ELECTRICAL ENGINEERING AND COMMUNICATION

ÚSTAV RADIOELEKTRONIKY

DEPARTMENT OF RADIO ELECTRONICS

LABORATORNÍ ZDROJ S ROZHRANÍM USBTMC

USBTMC BENCH POWER SUPPLY

DIPLOMOVÁ PRÁCE

MASTER'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Bc. Lubomír Sehnálek

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

Ing. Michal Kubíček, Ph.D.

BRNO 2016



Diplomová práce

magisterský navazující studijní obor **Elektronika a sdělovací technika**
Ústav radioelektroniky

Student: Bc. Lubomír Sehnálek

ID: 101882

Ročník: 2

Akademický rok: 2015/16

NÁZEV TÉMATU:

Laboratorní zdroj s rozhraním USBTMC

POKYNY PRO VYPRACOVÁNÍ:

Navrhněte modulární laboratorní stejnosměrný napájecí zdroj ovládaný prostřednictvím rozhraní RS-485. Návrh proveďte tak, aby bylo možné na společnou sběrnici připojit několik takových zdrojů. Ke zdroji navrhněte komunikační jednotku, která bude sloužit jako rozhraní mezi sběrnici RS-485 a rozhraním USB. Jednotka bude umožňovat vzdáleně ovládat zdroje připojené na sběrnici RS-485 jako zařízení třídy USBTMC. Dále zvažte možnost vytvoření dedikované jednotky lokálního ovládání (displej, klávesnice), kterou bude možné jako další modul začlenit do systému. Ověřte vlastnosti samotného napájecího zdroje a funkci jeho vzdáleného ovládání.

DOPORUČENÁ LITERATURA:

[1] KAINKA, B. Měření, řízení a regulace pomocí PC. Praha: BEN - technická literatura, 2003.

[2] SCPI Consortium, Standard Commands for Programmable Instruments (SCPI) Volume 1: Syntax and Style [online], Versiton 1999.0, May 1999, [cit. dne 28-1-2016] dostupné na [www <http://www.scpiconsortium.org/SCPI-99.pdf>](http://www.scpiconsortium.org/SCPI-99.pdf).

Termín zadání: 8.2.2016

Termín odevzdání: 19.5.2016

Vedoucí práce: Ing. Michal Kubíček, Ph.D.

Konzultant diplomové práce:

doc. Ing. Tomáš Kratochvíl, Ph.D., předseda oborové rady

UPOZORNĚNÍ:

Autor diplomové práce nesmí při vytváření diplomové práce porušit autorská práva třetích osob, zejména nesmí zasahovat nedovoleným způsobem do cizích autorských práv osobnostních a musí si být plně vědom následků porušení ustanovení § 11 a následujících autorského zákona č. 121/2000 Sb., včetně možných trestněprávních důsledků vyplývajících z ustanovení části druhé, hlavy VI. díl 4 Trestního zákoníku č.40/2009 Sb.

ABSTRAKT

Téma bylo vybráno za účelem položení základu univerzální platformy pro ovládání přístrojů pomocí USBTMC a konstrukce laboratorního napájecího zdroje pro domácí využití. Tato práce se zabývá návrhem a konstrukcí regulovatelného lineárního napájecího zdroje. Úvodem práce zmiňuje druhy napájecích zdrojů a druhy rozhraní používaných v měřicí a testovací technice. Práce dále popisuje bloky lineárního napájecího zdroje s rozhraním USB ve specifikace USBTMC pro vzdálené řízení. Realizací regulovatelného lineárního napájecího zdroje s USBTMC rozhraním práce končí. Bylo dosaženo přijatelných výsledků. Komunikace mezi PC a ovládacím modulem, tak mezi ovládacím modulem a modulem výkonového zdroje pracuje dobře. Maximální výstupní napětí a proud jsou 40V a 3A. Velké rušení vzniklé na pomocném napájení však snižuje přesnost regulace.

KLÍČOVÁ SLOVA

stejnoseměrný regulovatelný napájecí zdroj, USBTMC, laboratorní napájecí zdroj, Univerzální Sériová Sběrnice Testovací a Měřicí Třída, specifikace USBTMC, lineární napájecí zdroj, VISA, Architektura Virtuální Přístrojové Aplikace

ABSTRACT

This thesis was selected due to establishing of universal platform for USBTMC remote instrumentation and constructing a laboratory DC power supply for hobby use. This thesis is focused on design and realization of regulated linear DC power supply. At first thesis mentions kinds of DC power supplies and kinds of interfaces used for test and measurement instruments. Thesis continues by describing of blocks of a developed linear DC power supply with an USB interface following the USBTMC specification for remote control. Thesis ends by realization of the regulated linear DC power supply with USBTMC interface. It was achieved acceptable results. Communication between PC and Control module works well as same as communication between Control module and Power supply module. Maximum output ranges of voltage and current are 40V and 3A. Big interference on auxiliary supply rail decreases accuracy.

KEYWORDS

DC regulated power supply, USBTMC, laboratory power supply, Universal Serial Bus Test and Measurement Class, specification USBTMC, linear power supply, VISA, Virtual Instrument Software Architecture

SEHNÁLEK, Lubomír *Laboratorní zdroj s rozhraním USBTMC*: diplomová práce. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, Ústav radioelektroniky, 2016. 104 s. Vedoucí práce byl Ing. Michal Kubíček, Ph.D.

PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že svou diplomovou práci na téma „Laboratorní zdroj s rozhraním USBTMC“ jsem vypracoval(a) samostatně pod vedením vedoucího diplomové práce a s použitím odborné literatury a dalších informačních zdrojů, které jsou všechny citovány v práci a uvedeny v seznamu literatury na konci práce.

Jako autor(ka) uvedené diplomové práce dále prohlašuji, že v souvislosti s vytvořením této diplomové práce jsem neporušil(a) autorská práva třetích osob, zejména jsem nezasáhl(a) nedovoleným způsobem do cizích autorských práv osobnostních a/nebo majetkových a jsem si plně vědom(a) následků porušení ustanovení § 11 a následujících autorského zákona č. 121/2000 Sb., o právu autorském, o právech souvisejících s právem autorským a o změně některých zákonů (autorský zákon), ve znění pozdějších předpisů, včetně možných trestněprávních důsledků vyplývajících z ustanovení části druhé, hlavy VI. díl 4 Trestního zákoníku č. 40/2009 Sb.

Brno

.....

podpis autora(-ky)

PODĚKOVÁNÍ

Rád bych poděkoval vedoucímu diplomové práce panu Ing. Michalu Kubíčkoví, Ph.D. za odborné vedení, konzultace, trpělivost a podnětné návrhy k práci.

Brno

.....

podpis autora(-ky)



Faculty of Electrical Engineering
and Communication
Brno University of Technology
Technická 3082/12, CZ-61600 Brno
Czech Republic
<http://www.six.feec.vutbr.cz>

PODĚKOVÁNÍ

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

Brno

.....
podpis autora(-ky)



EVROPSKÁ UNIE
EVROPSKÝ FOND PRO REGIONÁLNÍ ROZVOJ
INVESTICE DO VAŠÍ BUDOUCNOSTI



OBSAH

Úvod	12
1 Regulovatelné napájecí zdroje a rozhraní používaná v měřící technice	13
1.1 Zdroje s lineární regulací	13
1.2 Spínané zdroje	14
1.3 Rozhraní pro vzdálené ovládání testovacích a měřících zařízení	15
2 Popis navrhovaných bloků napájecího zdroje	19
2.1 Navrhované zařízení z pohledu uživatele	20
2.2 Modul ovládání	21
2.2.1 Lokální (místní) řízení	21
2.2.2 Vzdálené řízení	22
2.3 Modul výkonového zdroje	24
2.3.1 Komunikační blok	24
2.3.2 Řídící blok	25
2.3.3 Regulační blok	26
2.3.4 Transformační blok	28
2.4 SCPI příkazy pro vzdálené řízení	28
3 Realizace - HW modulu výkonového zdroje	30
3.1 Obvodové řešení klíčových komponent	31
3.2 Výběr MCU	33
3.3 Blokové schéma	33
3.4 Výstupní parametry zdroje	36
4 Realizace - HW modulu ovládání	37
4.1 Výběr MCU	37
4.2 Blokové schéma	38
5 Realizace - MCU Firmware	40
5.1 Komunikační schéma	40
5.2 Komunikační protokol pro sériová rozhraní	42
5.3 Modul ovládání	44
5.3.1 SCPI parser	46
5.4 Modul výkonového zdroje	50
5.4.1 Regulace	50

6	Dosažené výsledky, měření	53
6.1	Řešené nedostatky návrhu	53
6.2	Vybrané průběhy měření, výpis komunikace RS-485, detekce VISA . .	55
6.3	Dosažené parametry zařízení	59
7	Závěr	62
	Literatura	64
	Seznam symbolů, veličin a zkratk	66
	Seznam příloh	67
A	HW modulu výkonového zdroje	68
A.1	Výběr stěžejních analogových komponentů	68
A.2	Schémata	73
A.3	Desky plošných spojů	83
B	HW modulu ovládní	99
B.1	Schéma	99
B.2	Deska plošných spojů	100
C	Obsah příloženého CD	103

SEZNAM OBRÁZKŮ

1.1	Principiální blokové schéma síťového lineárního zdroje[2]	14
1.2	Principiální blokové schéma spínaného síťového zdroje[2]	15
1.3	Rychlost a zpoždění používaných sběrnic, převzato z [1]	17
2.1	Blokové schéma konceptu navrhovaného řešení	20
2.2	Pulsně šířková modulace - obdelníkový signál[12]	26
2.3	Regulační blok	27
3.1	Schéma regulačního obvodu	31
3.2	Zapojení regulačních OZ	32
3.3	Spínač realizován dvěma P-MOS tranzistory v zapojení TrueSwitch	33
3.4	Blokové schéma modulu výkonového zdroje	35
4.1	Blokové schéma ovládacího modulu	39
5.1	Komunikační schéma navrhovaného zařízení	42
5.2	Komunikační protokol RS-485 rozhraní	44
5.3	Exekuce programu Ovládacího modulu	46
5.4	Dekodér SCPI zprávy - příkazové části	48
5.5	Dekodér SCPI zprávy - parametrické části	49
5.6	Exekuce programu modulu výkonového zdroje	51
5.7	Regulace požadovaných veličin	52
6.1	Rušení na výstupu zesilovače měření proudu	54
6.2	Rušení na výstupu zesilovače měření proudu s odlehčenými spínanými zdroji	54
6.3	Zobrazení zařízení ve VISA manažeru	55
6.4	Ovládací konzole Agilent IO	56
6.5	Komunikace ovládacího modulu s modulem výkonového zdroje	56
6.6	Odezva regulace na skokovou změnu proudu z 0A na 5A	57
6.7	Odezva regulace na skokovou změnu proudu z 5A na 0A	57
6.8	Odezva regulace na skokovou změnu napětí z 5V na 15V	58
6.9	Odezva regulace na skokovou změnu proudu z 15V na 5V	58
6.10	Standardní průběh přepnutí konfigurace vinutí	59
6.11	Přepnutí ze 40V konfigurace na 20V restartováním mikrokontroléru	59
6.12	Prototyp modulu výkonového zdroje spolu s ovládacím modulem	61
A.1	Schéma pomocného napájení 1/3	73
A.2	Schéma pomocného napájení 2/3	74
A.3	Schéma pomocného napájení 3/3	75
A.4	Schéma regulačních komparátorů	76
A.5	Schéma kontroléru výkonového zdroje 1/2	77
A.6	Schéma kontroléru výkonového zdroje 2/2	78

A.7	Schéma měřicího modulu elektrických veličin	79
A.8	Schéma modulu hlavního napájení	80
A.9	Schéma modulu výkonové části regulátoru	81
A.10	Schéma modulu TrueSwitch	82
A.11	Spodní vrstva DPS pomocného napájení	83
A.12	Horní vrstva DPS pomocného napájení	84
A.13	Vrstva součástek DPS pomocného napájení	85
A.14	Spodní vrstva DPS regulačních komparátorů	86
A.15	Horní vrstva DPS regulačních komparátorů	86
A.16	Vrstva součástek DPS regulačních komparátorů	87
A.17	Spodní vrstva DPS kontroléru	87
A.18	Horní vrstva DPS kontroléru	88
A.19	Vrstva součástek DPS kontroléru	89
A.20	Spodní vrstva DPS instrumentálního zesilovače	89
A.21	Horní vrstva DPS instrumentálního zesilovače	90
A.22	Vrstva součástek DPS instrumentálního zesilovače	90
A.23	Spodní vrstva DPS hlavního zdroje napětí	91
A.24	Horní vrstva DPS hlavního zdroje napětí	92
A.25	Vrstva součástek DPS hlavního zdroje napětí	93
A.26	Spodní vrstva DPS regulátoru	94
A.27	Horní vrstva DPS regulátoru	95
A.28	Vrstva součástek DPS regulátoru	96
A.29	Spodní vrstva DPS TrueSwitch	97
A.30	Horní vrstva DPS TrueSwitch	97
A.31	Vrstva součástek DPS TrueSwitch	98
B.1	Schéma ovládacího modulu	99
B.2	Spodní vrstva DPS ovládacího modulu	100
B.3	Horní vrstva DPS ovládacího modulu	101
B.4	Vrstva součástek DPS ovládacího modulu	102

SEZNAM TABULEK

1.1	Porovnání sběrnic používaných pro vzdálené řízení přístrojů[1]	17
1.2	Srovnání vybraných regulovatelných napájecích zdrojů na trhu[3]. . .	18
2.1	Descriptor USB zařízení[5].	23
2.2	Konfigurační descriptor[5].	23
2.3	Descriptor rozhraní[5].	24
2.4	Možnosti ovládání a indikace navrhovaného zařízení	28
2.5	Možnosti ovládání a indikace navrhovaného zařízení	29
5.1	Přehled adres jednotlivých zařízení	41
5.2	Tabulka převodu symbolů pro navržený protokol	43
5.3	CMD/ACK/NACK komunikace	43
5.4	Podoby podporovaných parametrů	47
6.1	Parametry realizovaného zařízení	60

ÚVOD

Tato práce se zabývá problematikou návrhu regulovatelného napájecího zdroje. Cílem této práce je realizovat vzdáleně řízený napájecí zdroj, který bude cenově výhodnější než zdroje mu podobné dostupné na trhu. Koncepce navrhovaného řešení by měla umožnit připojení několika zdrojů na společnou řídicí sběrnici RS-485, která bude přivedena do ovládacího rozhraní. Rozhraní bude umožňovat řízení přes standardní rozhraní USBTMC (Universal Serial Bus Test and Measurement Class). Toto rozhraní bude také připraveno na možnost připojení lokálního ovládání (Display + klávesnice). Výhoda této koncepce spočívá právě ve variabilitě počtu připojených zdrojů na sběrnici, lze si tak počet zdrojů zvolit podle potřeby bez změny rozhraní pro vzdálené řízení. Za předpokladu, že je samotný napájecí zdroj cenově srovnatelný se zdroji bez možnosti vzdáleného řízení, bude toto modulární řešení cenově výhodné. Díky modularitě lze také mít v sestavě zdroje s různými parametry.

Tato práce by měla ukázat zda je koncepce cenově výhodná, případně zda se modularita napájecích zdrojů ukáže užitečnou.

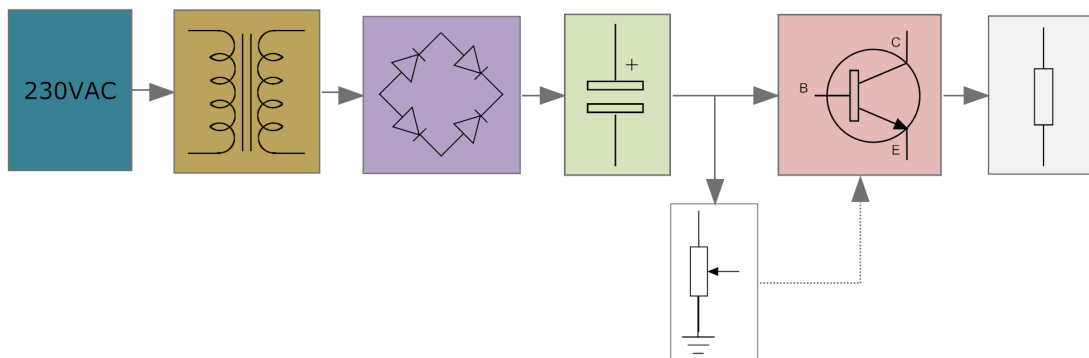
1 REGULOVATELNÉ NAPÁJECÍ ZDROJE A ROZHRAŇÍ POUŽÍVANÁ V MĚŘÍCÍ TECH- NICE

S regulovatelnými napájecími zdroji se lze nejčasteji setkat v laboratořích, měřících a testovacích pracovištích, kde si různé aplikace žádají různé úrovně napětí či proudu. Z toho důvodu se tyto zdroje občas pojmenovávají jako **laboratorní zdroje**. I u regulovatelných napájecích zdrojů se lze setkat s oběma typy řízeného zdroje, a to lineárního a spínaného řízení. Každý z těchto typů má svá pro a proti, která budou později zmíněna. Aby bylo možné na napájecím zdroji nastavit požadované výstupní veličiny, jsou tyto zdroje vybaveny ovládacím rozhraním. Toto rozhraní může být **lokální** nebo **dálkové**. Lokální rozhraní se nachází na vnější části zařízení v podobě snímací jednotky (klávesnice, tlačítka, otočné prvky) a indikační jednotky (displej, LED diody, apod.). Dálkové rozhraní bývá většinou reprezentováno komunikačním konektorem s jehož pomocí lze propojit zařízení se vzdálenou ovládací jednotkou. Tato jednotka bývá většinou reprezentována počítačem či jiným podobným zařízením. Napájecí zdroj lze pořídit od cca 1500 až po řádově sta tisíce korun. Cena je závislá na mnoha faktorech, nicméně tyto ji ovlivňují pravděpodobně nejvíce:

- maximální výkon, který je zdroj schopný dodat
- rozsah regulace
- počet druhů regulovaných veličin
- počet a druh ovládacích rozhraní
- doplňkové funkce zdroje
- rozměry
- přesnost regulace
- stabilita regulace (časová, teplotní)

1.1 Zdroje s lineární regulací

Vstupní střídavé napětí, myšleno síťové, vstupující do zdroje je nejdříve pomocí transformátoru převedeno na nižší, a poté je usměrněno pomocí diod, dále vyfiltrováno pomocí kondenzátoru. Tímto způsobem upravené napětí a proud, které jsou neměnné (ideálně) se přivedou na regulační člen v podobě říditelného polovodičového prvku 1.1. Mění-li se na ovládací bráně regulačního prvku napětí či proud, mění se vodivost mezi vstupní a výstupní bránou. Regulační člen tak lze zjednodušeně vnímat jako napětím či proudem řízený rezistor. Přebytečná energie se na tomto regulačním prvku promění v teplo.



Obr. 1.1: Principiální blokové schéma síťového lineárního zdroje[2]

Výhody:

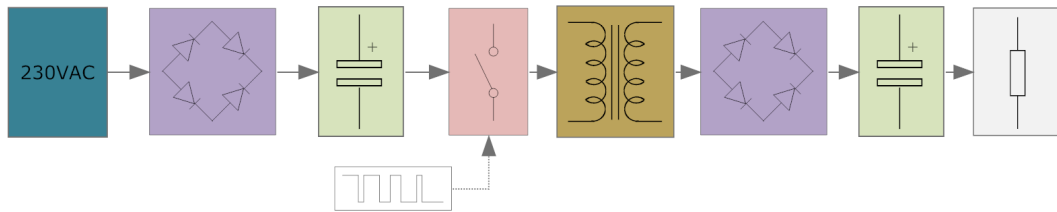
- nízká technická náročnost
- malé rušení do okolí a zpět do sítě
- stabilita a malé zvlnění výstupní veličiny

Nevýhody:

- rozměry zařízení, obzvláště pokud je požadován velmi vysoký výkon
- nízká účinnost, ztráty regulace v podobě tepla
- hmotnost

1.2 Spínané zdroje

Nejdříve se provede usměrnění a filtrace vstupního síťového napětí. Toto stejnosměrné napětí je přiváděno přes spínací prvek (MOS, IGBT tranzistor) 1.2 na impulzní transformátor. Transformované napětí je opět usměrněno a vyfiltrováno. Změnou kmitočtu nebo střídý (PWM) spínání pak lze regulovat požadovanou výstupní veličinu. Na spínacím prvku dochází oproti lineárnímu řízení jen k malým energetickým ztrátám. Dalším zdrojem ztrát vlivem vysokých kmitočtů je transformátor. V praxi se frekvence spínání pohybují od jednotek kHz až po stovky kHz.



Obr. 1.2: Principiální blokové schéma spínaného síťového zdroje[2]

Výhody:

- účinnost
- lze dosáhnout vysokých výkonů při nepatrném zvětšení rozměrů

Nevýhody:

- vysoká technická náročnost
- vyšší rušení do okolí a zpět do sítě
- nižší stabilita a výstupní zvlnění výstupní veličiny¹

1.3 Rozhraní pro vzdálené ovládání testovacích a měřících zařízení

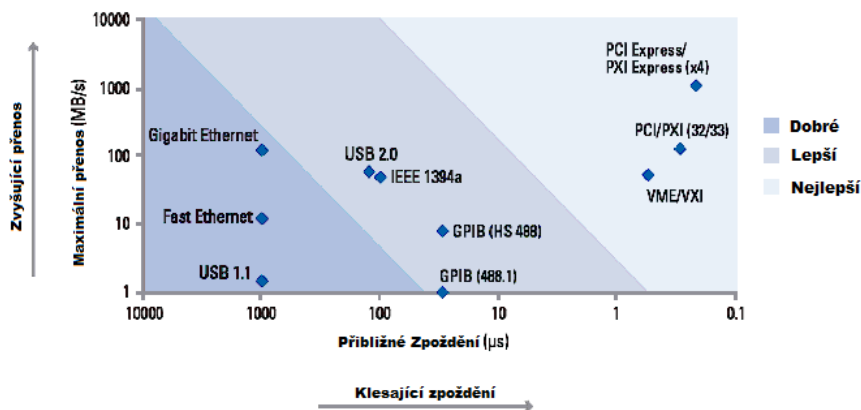
Jak se postupem času vyvíjela elektronika a s ní měřící přístroje, objevila se potřeba automatického řízení. Začala tak vznikat zařízení se vzdáleným řízením.

První standardní sběrnici pro automatické testování vyvinula společnost Hewlett-Packard na konci 60. let minulého století. Sběrnice se nazývala HP-IB (HP Interface Bus). Sběrnice se stala oblíbenou a začali ji používat i jiní výrobci pod názvem GPIB (General Purpose Interface Bus). V roce 1975 IEEE (Institute of Electrical and Electronics Engineers) sběrnici standardizoval jako IEEE-488 (Standard Digital Interface for Programmable Instrumentation). Tento standard byl později přepracován a vznikl IEEE-488.1. Tento standard již definoval mechanické, elektrické a základní komunikační parametry sběrnice. Až v roce 1987 IEEE zavedla standard IEEE-488.2 (Standard Codes, Formats, Protocols, and Common Commands), který definoval podobu komunikačního protokolu. Problémy s příkazy specifickými podle určení přístroje to však nevyřešilo. Příkazy se tak lišily od různých výrobců a zařízení tak nebyla kompatibilní. Na tento problém poukázala opět společnost Hewlett-Packard a vyvinula vlastní jazyk příkazů. Tento jazyk položil základy

¹V dnešní době vyspělých spínaných napájecích zdrojů tato nevýhoda mizí.

SCPI (Standard Commands for Programmable Instrumentation), který byl zaveden jako průmyslový standard v roce 1990. Tento standard dodržuje syntaxi příkazů dle IEEE-488.2, ale umožňuje použití jiné fyzické vrstvy než IEEE-488.1. SCPI příkazy jsou textové řetězce obsahující ASCII znaky, které jsou posílány přes fyzickou vrstvu do zařízení. Příkazy jsou série jednoho nebo více klíčových slov, z nichž mnoho udává parametr.

Od této chvíle bylo možné použít jakékoliv vhodné sběrnice. Vzhledem k tomu, že většina automatických měření je řízena počítačem, začaly se používat sběrnice, které lze na běžném PC nalézt. Několik předních společností vyrábějící testovací a měřicí přístroje zavedlo průmyslový standard, univerzální, široce používanou API (Application Programming Interface) pro počítače zvanou VISA (Virtual Instrument Software Architecture). Tato API umožňuje komunikaci s přístrojem na běžných počítačových, testovacích a měřicích sběrnicích (USB, RS232/RS-485, LAN, GPIB, VXI).



Obr. 1.3: Rychlost a zpoždění používaných sběrnic, převzato z [1]

	Přenosová rychlost [MB/s]	Zpoždění [μs]	Dosah [m]	Nastavení a připojení	Odolnost konektoru
GPiB	1.8 (488.1) 8 (HS488)	30	20	Dobré	Nejlepší
RS-232	0.02	1000 (115200)	15	Dobré	Lepší
USB	60 (Hi-Speed)	1000 (USB) 125 (Hi-Speed)	5	Nejlepší	Dobré
PCI	132	0.7	vnitřní PC sběrnice	Lepší	Lepší, Nejlepší (pro PXI)
PCI Express	250 (x1) 4000 (x16)	0.7 (x1) 0.7 (x4)	vnitřní PC sběrnice	Lepší	Lepší, Nejlepší (pro PXI)
Ethernet LAN LXI	12.5 (Fast) 125 (Gigabit)	1000 (Fast) 1000 (Gigabit)	100	Dobré	Dobré

Tab. 1.1: Porovnání sběrnic používaných pro vzdálené řízení přístrojů[1]

Produkt	Max. U;I;P	Přesnost U;I	Zvlnění U;I	Rozhraní	Cena [Kč]
TENMA; 72-10480	30V;3A;90W	$\leq 0.5\% + 20mV$; $\leq 0.5\% + 5mA$	$\leq 1mV_{rms}$; $\leq 3mA_{rms}$	Lokální	1 883
EA; EA- PS 2042- 10B	42V;10A;160W	$\leq 0.2\%$; $\leq 0.2\%$	$\leq 9mV_{rms}$; $\leq 15mA_{rms}$	Lokální; USB(non std.)	7 398
EA; EA- PS 5040- 10A	40V;10A;160W	$\leq 0.2\%$; $\leq 0.2\%$	$\leq 10mV_{rms}$; $\leq 15mA_{rms}$	Lokální; USB(non std.)	16 012
B&K PRECI- SION; BK9201	60V;10A;200W	$\leq 0.03\% + 5mV$; $\leq 0.1\% + 10mA$	$\leq 8mV_{rms}$; $\leq 6mA_{rms}$	Lokální; USB; GPIB; RS232	19 739
EA; EA- PS 8032- 10DT	32V;10A;320W	$\leq 0.05\%$; $\leq 0.15\%$	$\leq 40mV_{pp}$; $\leq 50mA_{pp}$	Lokální; USB; GPIB; RS232; CAN	27 275
KEY- SIGHT; 6653A- 240-PLG	35V;15A;525W	15mV; 13mA	400 μV_{pp} ; 5mA _{pp}	Lokální; GPIB	98 253

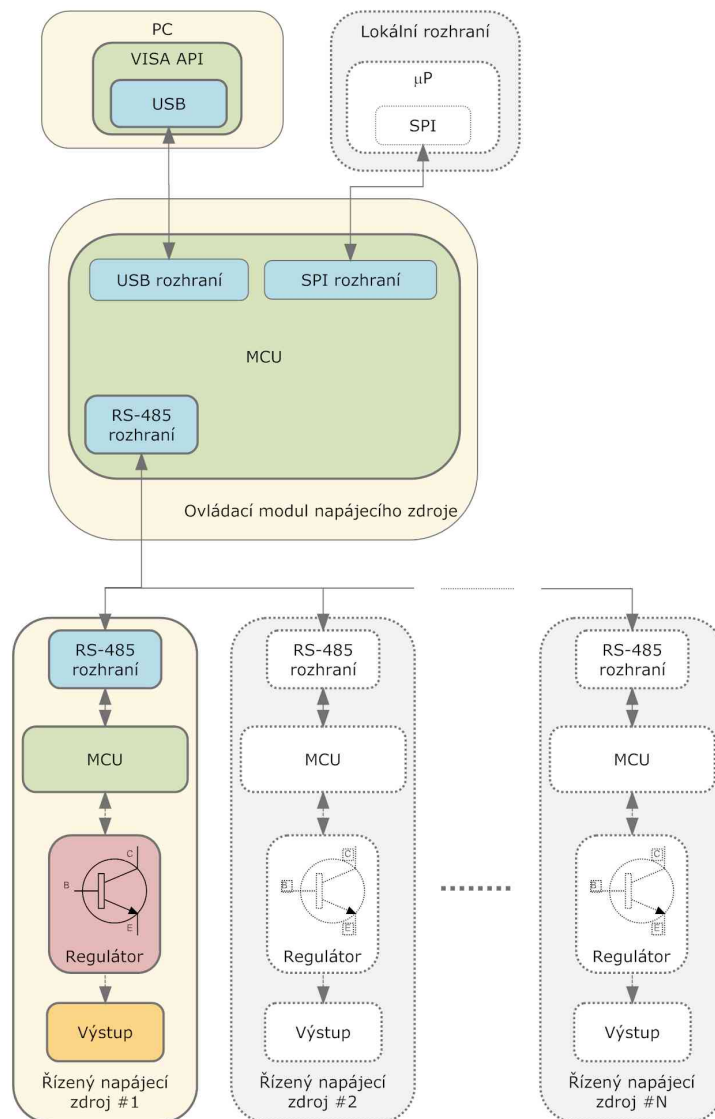
Tab. 1.2: Srovnání vybraných regulovatelných napájecích zdrojů na trhu[3].

2 POPIS NAVRHOVANÝCH BLOKŮ NAPÁJECÍHO ZDROJE

Níže jsou shrnuty zadané parametry návrhu zdroje:

Zadání:

- Koncepce zdroje rozdělena na modul ovládání a modul regulovatelného výkonového zdroje
- Modul ovládání
 - rozhraní USB specifikace USBTMC pro vzdálené řízení
 - příprava na připojení jednotky pro lokální ovládání s ovládacími a zobrazovacími prvky
 - Propojení modulu s modulem (moduly) regulovatelného výkonového zdroje pomocí průmyslové sběrnice RS-485
- Modul regulovatelného výkonového zdroje
 - Regulace napětí 0V-40V, zvoleno
 - Regulace proudu 0A-10A, zvoleno
 - Pokusit se dosáhnout podobných kvalitativních parametrů jako podobná, na trhu dostupná zařízení 1.2
 - Pokusit se dosáhnout nižších výrobních nákladů



Obr. 2.1: Blokové schéma konceptu navrhovaného řešení

2.1 Navrhované zařízení z pohledu uživatele

Koncepce a funkčnost zařízení z pohledu uživatele by měla být co nejintuitivnější a pohodlné. Zařízení by tedy mělo mít tyto vlastnosti:

- pohodlné připojení k PC
- zvoleny standardní příkazy ze skupiny napájecích zdrojů definované SCPI
- veškeré funkce výkonového zdroje dostupné z lokálního či vzdáleného ovládání, nic nemá být ovládané pouze z modulu výkonového zdroje
- jednoduché připojení dalšího modulu výkonového zdroje (automatická detekce připojených zařízení)
- jednoduché rozšíření o jednotku lokálního řízení

- jednotlivé moduly výkonových zdrojů nemusí mít stejné rozsahy výstupních veličin

Modularita navíc umožní uživateli umístit si ovládací modul v dosahu, zatímco rozměrné moduly výkonového zdroje do racku, pod stůl, atd. Díky odolné průmyslové sběrnici RS-485 mohou být moduly výkonových zdrojů umístěny v poměrně velké vzdálenosti od ovládacího modulu.

Ovládací modul bude obsahovat rozhraní USBTMC, rozhraní pro připojení lokální jednotky, rozhraní RS-485 a konektor síťového napájení pro případ, kdy nebude připojeno USB k počítači, a bude tak nutné napájet modul vlastním zdrojem.

Výkonový zdroj bude mít výstupní svorky regulovaného napájení, napájecí konektor, konektor sběrnice RS-485 a volič adresy modulu výkonového zdroje, který je nezbytný k provozování více zařízení na sběrnici a není žádoucí, aby zařízení měly adresu pevně přidělenou. To umožní měnit moduly mezi sebou bez nutnosti změny ovládacích programů či rozšiřovat sestavu libovolně. Je však v úvaze, že počet modulů výkonového zdroje v jedné sestavě bude omezen na **maximální počet 16 modulů**. Tento počet by měl plně vystačit nejnáročnějším požadavkům na počet zdrojů.

2.2 Modul ovládání

Funkce ovládacího modulu bude přijímat příkazy ze vzdáleného rozhraní v podobě SCPI příkazů nebo příkazy z místní ovládací jednotky. Podoba komunikačního protokolu bude navržena tak, aby vyhovovala požadavkům místního ovládání. Oproti vzdálenému ovládání, kde se budou zasílat jen požadované hodnoty, jednotka místního ovládání bude vyžadovat informace o všech měřených veličinách všech připojených modulů výkonových zdrojů několikrát za vteřinu, aby zobrazované informace na jednotce byly aktuální.

2.2.1 Lokální (místní) řízení

Pro místní ovládání bude nutné k ovládacímu modulu připojit rozšiřovací jednotku na které budou umístěny ovládací a zobrazovací prvky. Proto je třeba s touto možností počítat a modul navrhnout tak, aby se jednotka dala na modul připevnit a modul s jednotkou tak spolu zase tvořili jeden celek. Jednotka místního ovládání by měla být napájena z ovládací jednotky, aby nebylo potřeba žádné dodatečné napájení. Z toho důvodu je to potřeba zohlednit při návrhu napájení ovládací jednotky.

2.2.2 Vzdálené řízení

Aby bylo možné zařízení jednoduše připojit a začít používat, zařízení musí splňovat následující podmínky:

- zařízení musí být připojeno přes jednu z podporovaných rozhraní VISA API
- zařízení musí podporovat SCPI příkazy

Na vzdáleném hostujícím zařízení (PC) musí být nainstalováno VISA, které bývá součástí instalace aplikací pro měření a testování (LabVIEW - National Instruments).

Rozhraní USB specifikace USBTMC

USB bylo oficiálně představeno v roce 1996, začátek vývoje však sahá až do roku 1994. V roce 1996 byla verze 1.0, která byla problémová. Opravdu široce využitelná verze USB, USB1.1 se objevila v 1998. USB1.1 má datovou rychlost 1.5Mb/s pro připojení například herního zařízení a datovou rychlost 12Mb/s pro USB disky. Od této doby se začalo USB rozhraní objevovat na všech osobních počítačích.

Protože USB je univerzální sběrnice a je možné ji v dnešní době použít prakticky na připojení libovolného zařízení, má tato sběrnice zavedený mechanismus pro rozpoznání připojeného zařízení. Tento mechanismus je spuštěn okamžitě po připojení a nazývá se **ENUMERACE**. V průběhu enumerace poskytuje zařízení „Device“ nadřazenému zařízení „Host“ data, která popisují vlastnosti zařízení. Data jsou rozdělena do datových struktur a tyto struktury se nazývají popisovače „DESCRIPTORS“. Tyto descriptorů mimo jiné rozřazují zařízení do tříd „classes“, potažmo podtříd. Každá tato třída je samostatně specifikována. Proces enumerace a strukturu popisovačů popisuje specifikace USB rozhraní[4]. Komunikace tohoto druhu je provozována přes tzv. **kontrolní koncový bod** „CONTROL ENDPOINT“. Koncový bod je logický vstup nebo výstup komunikace, zařízení jich může mít různý počet v závislosti na funkci zařízení a specifikaci třídy. Kontrolní koncový bod je však povinný pro všechna zařízení kvůli enumeraci a jiným kontrolním operacím probíhajících mezi zařízeními.

Specifikace USBTMC

Pro účely práce s měřicími a testovacími zařízeními přes rozhraní USB byla vytvořena třída USBTMC[5]. Tato specifikace popisuje konfiguraci popisovačů a komunikaci zařízení s hostujícím zařízením. Dále specifikace definuje minimální požadavky na zařízení, aby splňovalo specifikaci.

Specifikace ukládá použití těchto koncových bodů:

CONTROL ENDPOINT - je vyžadován specifikací pro USB2.0

BULK-OUT ENDPOINT - je používán k zaslání dat z nadřazeného zařízení (host) do podřízeného zařízení (device). Host posílá na tento koncový bod zprávy a zařízení je zpracovává v pořadí v jakém je přijímá.

BULK-IN ENDPOINT - je používán k zaslání dat z device do host. Host přijímá zprávy odpovědí ze zařízení.

INTERRUPT-IN ENDPOINT - je používáno zařízením k zaslání upozornění pro host. Může být požadován specifikací podtřídy USBTMC USB488 subclass popsané specifikací USBTMC USB488 subclass[6], pokud bude v popisovači rozhraní nastaveno „bInterfaceProtocol = 1“. Jinak se tento koncový bod nepoužívá.

Aby po připojení zařízení například k PC s nainstalovaným VISA bylo zařízení správně detekováno jako zařízení USBTMC je nutné správně nastavit descriptor. V tabulkách 2.1, 2.2, 2.3 jsou vypsána pouze nastavení spojená s konfigurací podle specifikace USBTMC[5].

položka	hodnota	poznámka
Specifikace USB	0x0200	verze USB rozhraní
Třída zařízení	0	0 - jednotlivá rozhraní mají vlastní třídu
Podtřída zařízení	0	musí být 0 pokud třída je 0
Protokol zařízení	0	není použit protokol specifické třídy pro úroveň komunikace se zařízením
Velikost kontrolního koncového bodu	64	vyžaduje specifikace USBTMC
Počet konfigurací	1	počet možných konfigurací zařízení

Tab. 2.1: Descriptor USB zařízení[5].

položka	hodnota	poznámka
Počet rozhraní	1	udává kolik má daná konfigurace rozhraní

Tab. 2.2: Konfigurační descriptor[5].

položka	hodnota	poznámka
Číslo rozhraní	0	
Alternativní nastavení	0	číslo alternativního nastavení pro toto rozhraní
Počet koncových bodů rozhraní	2 (3)	3 - pokud bude zařízení splňovat požadavky podtřídy USBTMC USB488[6]
Třída rozhraní	0xFE	přiděleno třídě USBTMC
Podtřída rozhraní	0x03	přiděleno podtřídě USBTMC
Protokol rozhraní	0x00	0 - bez specifikace podtřídy; 1 - podporuje podtřídu rozhraní USBTMC USB488

Tab. 2.3: Descriptor rozhraní[5].

2.3 Modul výkonového zdroje

Tento modul bude přijímat příkazy z ovládacího modulu. Pokud bude příkaz adresován právě tomuto zařízení, tak tento příkaz vykoná. Úkolem této jednotky je regulovat výstupní veličinu (napětí U nebo proud I) na požadovanou velikost. Reálné (měřené) výstupní hodnoty pak bude možné z modulu vyčíst zpět. Modul lze rozložit do těchto bloků:

- komunikační blok
- řídicí blok
- regulační blok
- transformační blok

Komunikační blok představuje vstupní blok pro komunikaci s ovládacím modulem. Pomocí tohoto bloku bude komunikovat s okolím řídicí blok. Řídicí blok bude provádět měření veličin a porovnávat je s požadovanými veličinami přijatých z ovládacího modulu. Na základě tohoto porovnání bude řízen regulační blok tak, aby bylo dosaženo co nejmenší odchylky. Transformační blok bude transformovat napětí ze síťového (230V) na příhodné vstupní napětí regulačního bloku.

2.3.1 Komunikační blok

Předpoklad je, že výkonový modul zdroje bude používán pro napájení různých aplikací. Bude vyžadováno, aby napájení bylo galvanicky oddělené a bylo teoreticky možné zdroj připojit k jakémukoliv referenčnímu potenciálu. V praxi je však tento

maximální rozdíl potenciálů konečný. V průmyslové elektronice se tento limit pohybuje na hranici $1 - 2kV$. O oddělení regulovaného napájení se postará transformační blok. Pokud by nebyla oddělena komunikace, referenční potenciál by byl definován potenciálem komunikační linky. Proto bude nutné použít v komunikačním bloku oddělovací prvky komunikace. Pro tyto účely existuje široká škála integrovaných obvodů. Jelikož sběrnice RS-485 je diferenciální komunikací, kde se vyhodnocují rozdíly napětí na 2 vodičích linky, přímé oddělení se neprovádí. Nejdříve se RS-485 převede na RS-232 linku, ta je poté oddělena. Až poté bude komunikace vstupovat do řídicího bloku. Většina mikrokontrolérů podporuje sběrnici RS-232 (UART), proto již nebude nutné po oddělení zpětné konverze na RS-485, která stejně není mikrokontroléry podporována.

2.3.2 Řídicí blok

Řídicí blok bude reprezentován mikrokontrolérem, který bude vykonávat přijaté příkazy, měřit výstupní veličiny regulátoru a řídit regulátor. Aby byl kompenzován úbytek napětí na vodičích při vysokém proudu, bude jednotka měřit výstupní napětí přímo na konektoru výstupní regulované veličiny. Výstup regulátoru na svorky modulu bude odepínatelný stejně jak tomu je u komerčně dostupných napájecích zdrojů na trhu, což je vlastně také zdroj úbytku napětí uvnitř zařízení. Z důvodu řízení pomocí mikrokontroléru budou veškeré měřicí a ovládací signály referovány k 0V a jejich rozsah bude do 5V (kompatibilní s logikou TTL - Transistor Transistor Logic). Některé mikrokontroléry však nemají DAC (Digital to Analog Converter), bude tedy třeba konverzi na analogový signál provést vně mikrokontroléru. Lze použít externí DAC (složitější, nákladnější, přesnější) nebo převodem PWM (Pulse Width Modulation) generované mikrokontrolérem na střední hodnotu napětí pomocí filtru dolní propusti.

$$D = \frac{\tau}{T} \quad (2.1)$$

τ - doba trvání stavu logické úrovně 1 [s]

T - doba trvání periody signálu [s]

D - střída, poměr trvání logických úrovní

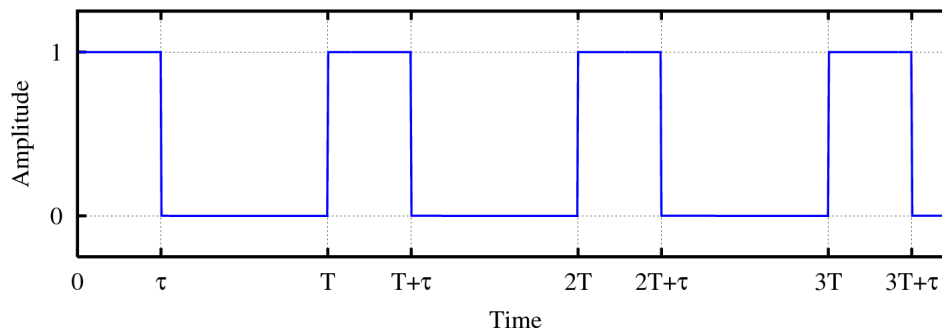
$$U_{AVG} = U_{HI} * D \quad (2.2)$$

U_{HI} - úroveň napětí logické úrovně 1 [V]

D - střída, poměr trvání logických úrovní

U_{AVG} - střední hodnota napětí ¹

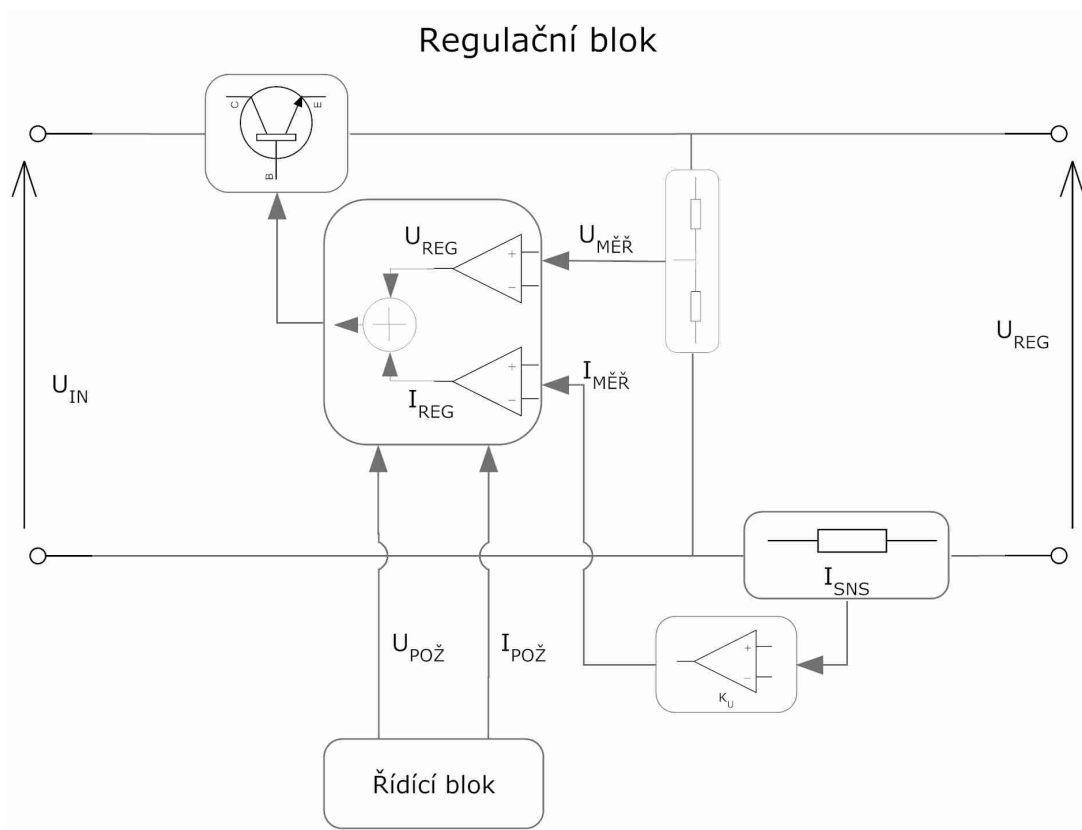
¹stejně bude i napětí za filtrací (dolní propustí) PWM signálu



Obr. 2.2: Pulsně šířková modulace - obdelníkový signál[12]

2.3.3 Regulační blok

Tento blok bude obsahovat aktivní regulační prvek, kterým bude prováděna regulace. Na vstup regulačního prvku bude přivedeno usměrněné a filtrované transformované napětí. Na ovládací vstup bude přivedeno řídicí napětí, které bude měnit odpor regulačního prvku a regulovat výstupní napětí. Jelikož lze předpokládat, že přímá regulace pomocí mikrokontroléru nebude dostatečně rychlá a mohla by způsobovat rozkmitání či zvětšené zvlnění výstupní veličiny, použije se dvoustavová regulace. Rychlá regulace bude součástí regulačního bloku a pomalá regulace bude zastoupena řídicím blokem. Bylo by vhodné provádět regulaci napětí či proudu změnou napětí v rozsahu $0 - 5V$ (TTL). Rozsah měřících i řídicích napětí by byl $0 - 5V$. Pak bude možné připojit řídicí signály z mikrokontroléru přímo na řídicí vstupy regulátoru. Proud bude snímán rezistorem malé hodnoty jako úbytek napětí na tomto rezistoru. Napětí bude zesíleno tak, aby odpovídalo rozsahu regulace pro úrovně logiky TTL.



Obr. 2.3: Regulační blok

Rychlá regulace

Bude tvořit nejdůležitější regulační prvek. Tento prvek bude zodpovědný za stabilitu systému a rychlost reakce na případné proudové přetížení. Tento regulátor bude mít tyto vstupy na jejichž základě bude provádět regulaci:

U_{RO} - Výstupní napětí regulátoru (měřená hodnota)

U_{RP} - Požadované výstupní napětí (požadovaná hodnota)

I_{RO} - Výstupní proud regulátoru (měřená hodnota)

I_{RP} - Požadovaný maximální výstupní proud (požadovaná hodnota)

Regulátor bude mít dva operační režimy:

napěťový - když $I_{RO} < I_{RP}$, regulace U_{RO} , aby $U_{RO} = U_{RP}$

proudový - když $I_{RO} \geq I_{RP}$, regulace(omezení) U_{RO} aby $I_{RO} = I_{RP}$

Pomalá (dodatečná) regulace

Regulace bude tvořena programově uvnitř mikrokontroléru, kde mikrokontrolér bude generovat U_{URP} a U_{IRP} . Tyto hodnoty budou doladovány na základě reálně měřených veličin v zařízení. Tato regulace bude kompenzovat úbytky na vodičích či úbytky na spínacích prvcích zařízení. Regulace bude muset být opět schopna pracovat v obou regulačních režimech a pracovat spíše jen, když je rychlá regulace v ustáleném stavu, kdy neprobíhají velké změny výstupní regulované veličiny.

2.3.4 Transformační blok

Tento blok bude mít na starosti konverzi, usměrnění a vyfiltrování síťového napětí (230VAC) na navržené vstupní napětí regulátoru. Přihledne-li se k faktu, že čím větší bude $\Delta U_{REG} = U_{RIN} - U_{ROUT}$ (úbytek napětí na regulátoru), tím více bude klesat účinnost napájecího zdroje. U lineárních napájecích zdrojů se často tento problém řeší přepínáním vstupních napětí regulátoru tak, aby bylo ΔU_{REG} co nejmenší. Takto lze alespoň částečně zlepšit účinnost lineárního napájecího zdroje. Transformační jednotka bude tedy obsahovat přepínač úrovní vstupního napětí regulátoru. Tento přepínač bude ovládán řídicím blokem výkonového zdroje.

2.4 SCPI příkazy pro vzdálené řízení

V tabulce 2.4 je sumarizace nastavitelných parametrů či získatelných hodnot na základě výše zmíněných vlastností a schopností celého zařízení.

parametr
Indikace na lokální jednotce
Adresace modulu výkonového zdroje
Nastavení výstupního napětí vybraného zdroje
Nastavení výstupního proudu vybraného zdroje
Měření výstupního napětí vybraného zdroje
Měření výstupního proudu vybraného zdroje
Sepnutí/rozepnutí výstupu vybraného zdroje

Tab. 2.4: Možnosti ovládání a indikace navrhovaného zařízení

Na základě tabulky 2.4 jsou v tabulce 2.5 vybrané příkazy ze specifikace SCPI[11]. V této tabulce jsou uvedeny i příkazy, které bude zařízení podporovat jen pokud bude připojena jednotka místního ovládání.

SCPI příkaz	parametr
Základní příkazy	
*IDN?	—
*CLS	—
*RST	—
Systémové příkazy	
SYSTem:BEEPer[:IMMEDIATE]	—
SYSTem:ERRor?	—
SYSTem:VERSion?	—
SYSTem:LOCal	—
SYSTem:REMote	—
SYSTem:RWLock	—
Zobrazovací příkazy - určené pro jednotku lokálního ovládní	
DISPlay[:WINDow][:STATe]	{OFF|ON|TRUE|FALSE}
DISPlay[:WINDow][:STATe]?	—
DISPlay[:WINDow]:TEXT[:DATA]	<quoted string>
DISPlay[:WINDow]:TEXT[:DATA]?	—
DISPlay[:WINDow]:TEXT:CLEar	—
Příkazy adresace modulů výkonových zdrojů	
INSTRument[:NSElect]	{1-16}
INSTRument[:NSElect]?	—
INSTRument:RINSTRument	—
INSTRument:CINSTRument?	—
INSTRument:IPARameters?	—
Konfigurační příkazy adresovaného modulu výkonového zdroje	
[SOURce:]CURRent[:LEVel][:IMMEDIATE][:AMPLitude]	{<current>|MIN|MAX}
[SOURce:]CURRent[:LEVel][:IMMEDIATE][:AMPLitude]?	—
[SOURce:]VOLTage[:LEVel][:IMMEDIATE][:AMPLitude]	{<voltage>|MIN|MAX}
[SOURce:]VOLTage[:LEVel][:IMMEDIATE][:AMPLitude]?	—
Měřicí příkazy adresovaného modulu výkonového zdroje	
MEASure[:SCALar]:CURRent[:DC]?	—
MEASure[:SCALar][:VOLTage][:DC]?	—
Příkazy pro ovládní výstupů modulů výkonových zdrojů	
OUTPut[:STATe]	{OFF|ON|TRUE|FALSE}
OUTPut[:STATe]?	—
OUTPut:ALL	{OFF|ON|TRUE|FALSE}

Tab. 2.5: Možnosti ovládní a indikace navrhovaného zařízení

3 REALIZACE - HW MODULU VÝKONOVÉHO ZDROJE

Ze zadaných maximálních výstupních veličin zdroje byl určen dostupný transformátor od společnosti TRONIC s.r.o. <<http://www.trafo.cz/cms/>>. S tímto transformátorem budou dosaženy hodnoty blízké zadání. Transformátor má tyto parametry:

Prim. vinutí - 230VAC

Sec. vinutí - $u_{SEK} = 20V/40V$ (vyvedený střed vinutí); $i_{SEK} = 10A$

Výstupní výkon - 400VA

Po usměrnění a filtraci bude dosaženo těchto hodnot (zjednodušené výpočty bez započtených ztrát), které budou použity jako limitní parametry pro výběr komponentů. Výběh kritických komponentů je uveden v příloze A.1. Schémata zapojení a nákres DPS jsou také umístěny v příloze A.2 a A.3.

$$U_{MAX} = \sqrt{2} \cdot u_{SEK} \quad (3.1)$$

$$I_{MAX} = \sqrt{2} \cdot i_{SEK} \quad (3.2)$$

Pro návrh podle podle vztahů 3.1 a 3.2 budou použity tyto hodnoty:

$$U_{MAX} \cong 57V$$

$$I_{MAX} \cong 15A$$

U_{MAX} - maximální napětí po usměrnění a filtraci

u_{SEK} - efektivní napětí sekundárního vinutí

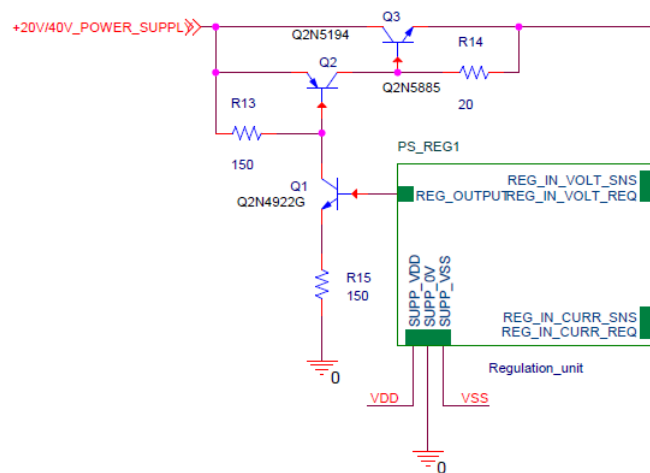
I_{MAX} - maximální proud po usměrnění a filtraci

i_{SEK} - efektivní proud sekundárního vinutí

Protože bude realizován prototyp, kde lze očekávat nedostatky v návrhu, bude elektronika výkonového zdroje rozložena na funkční bloky. Všechny tyto bloky budou modulární. Každý funkční blok bude na samostatné desce plošných spojů. Za blokem regulátoru jsou navrženy 4 připínané kompenzační prvky v podobě kondenzátorů, které budou použity pro stabilizaci zpětné vazby během oživování. K projevům nestability zpětné vazby dochází typicky při skokových změnách výstupního proudu[14].

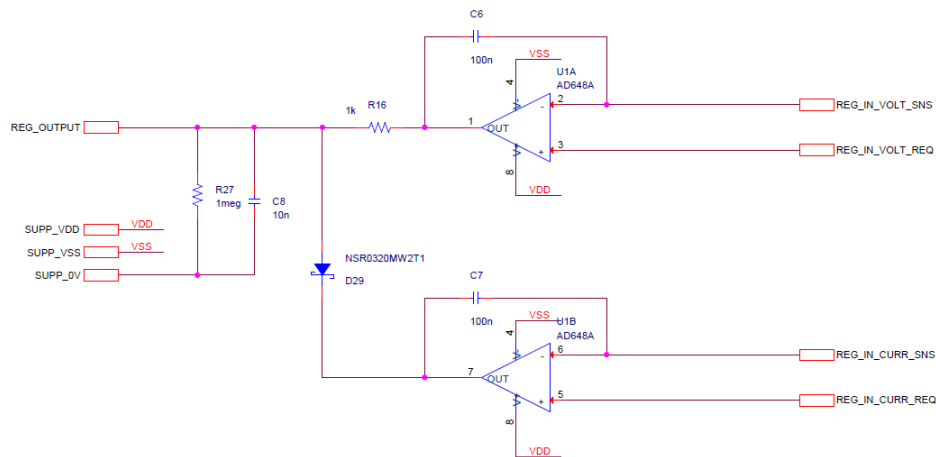
3.1 Obvodové řešení klíčových komponent

Na obrázku 3.1 je zapojení regulační části výkonového zdroje. Tranzistor Q3 je zapojený jako proudový zesilovač. K němu je připojen tranzistor Q2 jako budič tranzistoru Q3. Tranzistor Q2 řízen tranzistorem Q1. Díky tranzistoru Q1 se regulační napětí pohybuje uvnitř rozsahu napájecích úrovní TTL. Na bázi tranzistoru Q1 tedy vstupuje napětí z výstupů regulačních operačních zesilovačů. Z pravé strany do regulační jednotky vstupují měřené a požadované veličiny v rozsahu 0-5V.



Obr. 3.1: Schéma regulačního obvodu

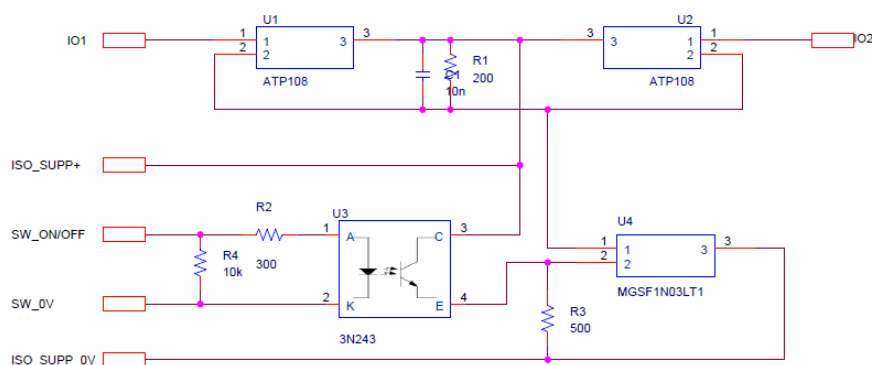
Dále na obrázku 3.2 je zapojení regulační jednotky. Regulační jednotka se skládá z dvojitého operačního zesilovače. Spodní větev OZ, tedy U1B, je proudová. Do doby než měřený proud nepřesáhne požadovaný proud je překlopen na kladné napájecí napětí, a díky D29 neovlivňuje výstupní napětí celé jednotky. Výstupní napětí je tak řízeno pouze horní napěťovou regulací (režim konstatního napětí). Až ve chvíli, kdy bude měřený proud větší než požadovaný, začne proudová regulace snižovat své výstupní napětí tak, aby vyrovnala napětí na svých vstupech. Na výstupu U1B bude nižší napětí než na výstupu U1A a přes diodu D29 začne protékat proud. Tím se na R16 zvětší úbytek napětí a na výstupu regulační jednotky tak klesne výstupní napětí (režim konstatního proudu). Regulace má tak dvojitou zpětnou vazbu (napěťovou a proudovou) a proměnné referenční vstupní napětí.



Obr. 3.2: Zapojení regulačních OZ

Na tomto obrázku 3.3 je znázorněno zapojení dvou P-MOS tranzistorů zapojenými **SOURCE** piny k sobě. Toto zapojení se nazývá „TrueSwitch“. Pomocí takto zapojených P-MOS tranzistoru bude mít zapojení z obou stran na **DRAIN** pinech stejné vlastnosti. Lze ho pak použít místo mechanických spínacích prvků. Dále je na obrázku znázorněn spínací obvod tranzistorů. Ke správné a bezpečné funkci je tento obvod třeba napájet galvanicky odděleným napájením a ovládací signál vést prostřednictvím optického oddělovacího prvku. V návrhu zdroje je toto řešení použito na místo běžného relé jako experiment, který ukáže funkčnost, výhody a nevýhody zapojení. Již nyní se dají vyjmenovat očividné klady a zápory takového zapojení:

- + tichý provoz, žádné „cvakání“ mechanického prvku
- větší náročnost na zapojení
- pravděpodobně vyšší cena



Obr. 3.3: Spínač realizován dvěma P-MOS tranzistory v zapojení TrueSwitch

3.2 Výběr MCU

Mikrokontrolér musí mít minimálně jedno rozhraní UART. Pro generování řídicích napětí regulační jednotky je nutné, aby měl mikrokontrolér minimálně 1 časovač s dvěmi komparačními registry. Tyto registry budou sloužit pro generování PWM na dvou výstupních pinech. Čím více bitový časovač mikrokontrolér bude mít, tím jemnější bude kvantizační krok (změna střídavy po menším krku → jemnější regulace střední hodnoty napětí za dolní propustí). Dále bude zapotřebí 4 ADC vstupů pro měření napětí před regulátorem (ověření funkčnosti předchozích obvodů), napětí za regulátorem, napětí na výstupních svorkách zdroje a proud tekoucí do zátěže. A posledním požadavkem je 7 digitálních výstupů pro přepínání konfigurace transformátoru, spínání výstupu a 4 kompenzace zátěže.

Na základě výše popsaných požadavků byl vybrán mikrokontrolér ATmega328PB[8] od společnosti Atmel. Vybraný mikrokontrolér disponuje dvěma rozhraními UART, třemi 16bit časovači, osmi 10bit DAC kanály a 27 vstupně-výstupními piny. Mikrokontrolér lze programovat pomocí ISP a je podporován programátorem „BiProg“.

3.3 Blokové schéma

Z blokového diagramu na obrázku 3.4 je patrné, že modul výkonového zdroje je rozdělen na 4 hlavní bloky. První dva bloky jsou napájecí, další řídicí a poslední regulační. Každý z těchto bloků tvoří samostatnou DPS (Deska Plošných Spojů). Dále na samostatných DPS jsou měřící, regulační obvody a také obvody pro spínání TrueSwitch.

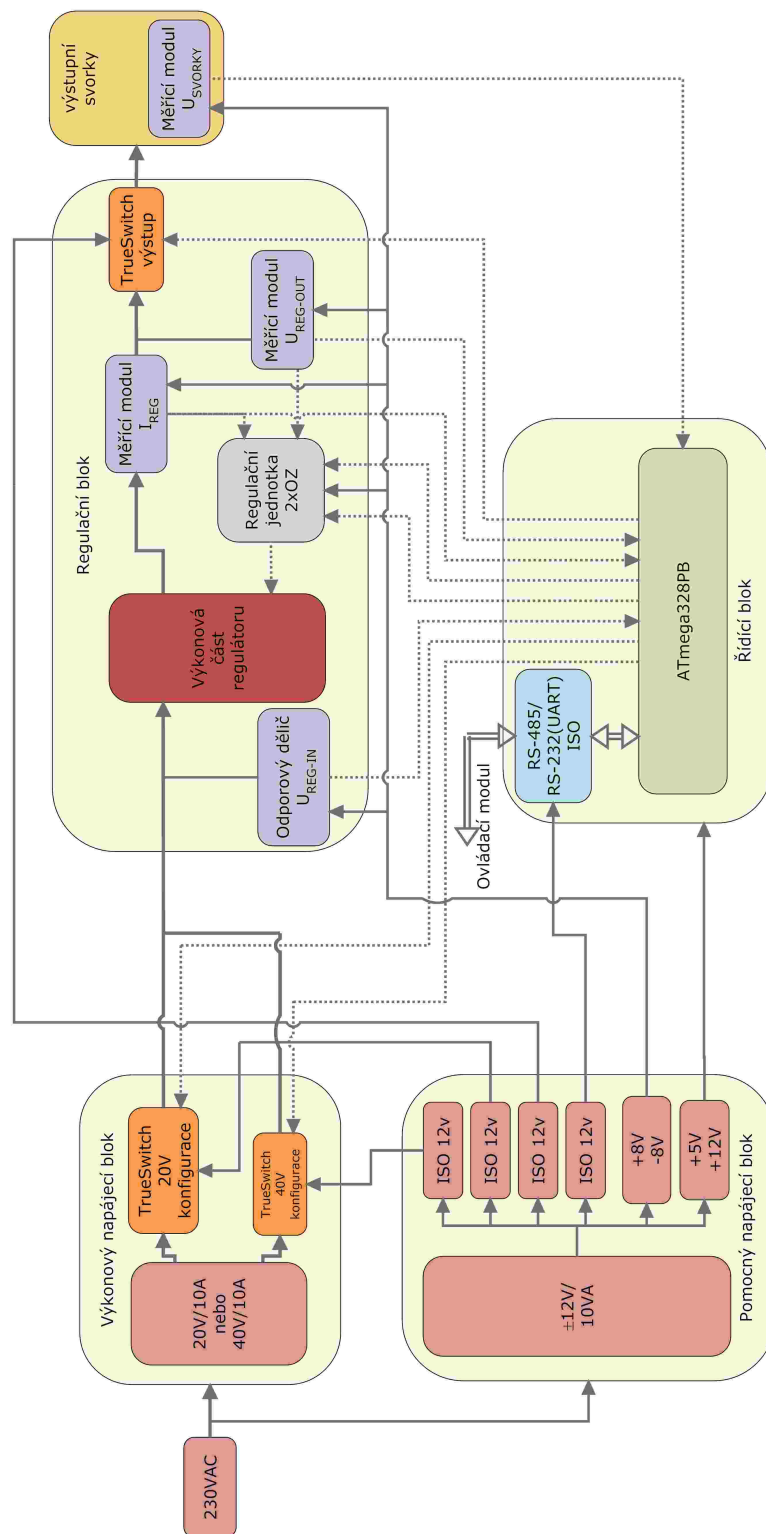
Příprava napájení pro vstup regulátoru je provedena ve výkonovém napájecím bloku. Do tohoto bloku je přivedeno síťové napětí přes transformátor s vyvedeným

středem. Konfigurace vinutí je pomocí TrueSwitch spínacích prvků vybírána a přiváděna na usměrňovač, a to buď v konfiguraci 20V nebo 40V. Toto napětí je pak usměrněno a vyvedeno ven. TrueSwitch jsou na DPS bloku výkonového napájení připevněny pomocí „hřebíkových konektorů“. Spínací prvky jsou ovládány z řídicího bloku.

Dalším napájecím blokem je pomocné napájení. Pomocné napájení generuje symetrické napájení $\pm 8V$ pro měřicí a regulační obvody, $+5V$, $+12V$, $+12V_{ISO}$ pro napájení řídicího bloku a $3x + 12V_{ISO}$ pro napájení TrueSwitch ovládacích jednotek.

Řídicí blok obsahuje mikrokontrolér se snímacími a řídicími perifériemi a galvanicky oddělenou komunikační částí převodníku RS-485/RS-232. Tento blok vykonává příkazy přijaté z ovládacího modulu.

Regulační blok obsahuje výkonové regulační prvky, regulační jednotku a většinu měření. Měřicí moduly a regulační jednotka je na tomto bloku připojena pomocí „hřebíkových konektorů“.



Obr. 3.4: Blokové schéma modulu výkonového zdroje

3.4 Výstupní parametry zdroje

$$U_{P-P} = \frac{p \cdot U_{MAX}}{100} [V; \%, V] \quad (3.3)$$

$$U_{Omax} = U_{MAX} - (2 \cdot U_F + U_{TR-SW} + U_{REG} + U_{OUT-SW} + U_{P-P} + U_{R-SNS}) \quad (3.4)$$

U_{Omax} - maximální dosažitelné napětí na výstupních svorkách zdroje

u_{SEK} - efektivní napětí sekundárního vinutí

U_F - úbytek usměrňovací diody v propustném směru

U_{TR-SW} - přechodový odpor prvku pro přepínání vinutí

U_{REG} - minimální úbytek na regulačním prvku

U_{OUT-SW} - střída, poměr trvání logických úrovní

U_{P-P} - zvlnění usměrněného filtrovaného napětí[13]

p - zvlnění za filtračním kondenzátorem[13]

$$U_{Omax} = 41V$$

$$I_{MAX} = 10A$$

4 REALIZACE - HW MODULU OVLÁDÁNÍ

Tento modul realizuje distribuci příkazů mezi rozhraními a jejich konverzi mezi SCPI a programovým jazykem. Modul je navržen takovým způsobem, že pokud je modul připojen k USB není třeba použít síťové napájení, protože je 5V napětí pro elektroniku modulu získáváno z USB. Aby bylo možné detekovat připojení/odpojení USB je napájení z USB vedeno přes nízko úbytkovou Schottkyho diodu, která zabraňuje, aby se dostalo napětí zpět na USB rozhraní v případě, kdy bude použito síťové napájení. Schéma a návrh DPS je umístěn v příloze B.1 a B.2.

Na tomto modulu není galvanicky oddělený převodník RS-485/RS-232, protože už jsou galvanicky oddělené komunikační bloky v modulech výkonového zdroje. Na DPS je taky osazen konektor na připojení sériové komunikace pro připojení místní ovládací jednotky. Vhodné rozhraní pro tuto komunikaci je SPI (Serial Peripheral Interface).

Další funkcí modulu je zvuková signalizace pomocí sirény. Tato funkce bude přístupná pomocí SCPI příkazem `SYSTEM:BEEPper[:IMMEDIATE]`.

4.1 Výběr MCU

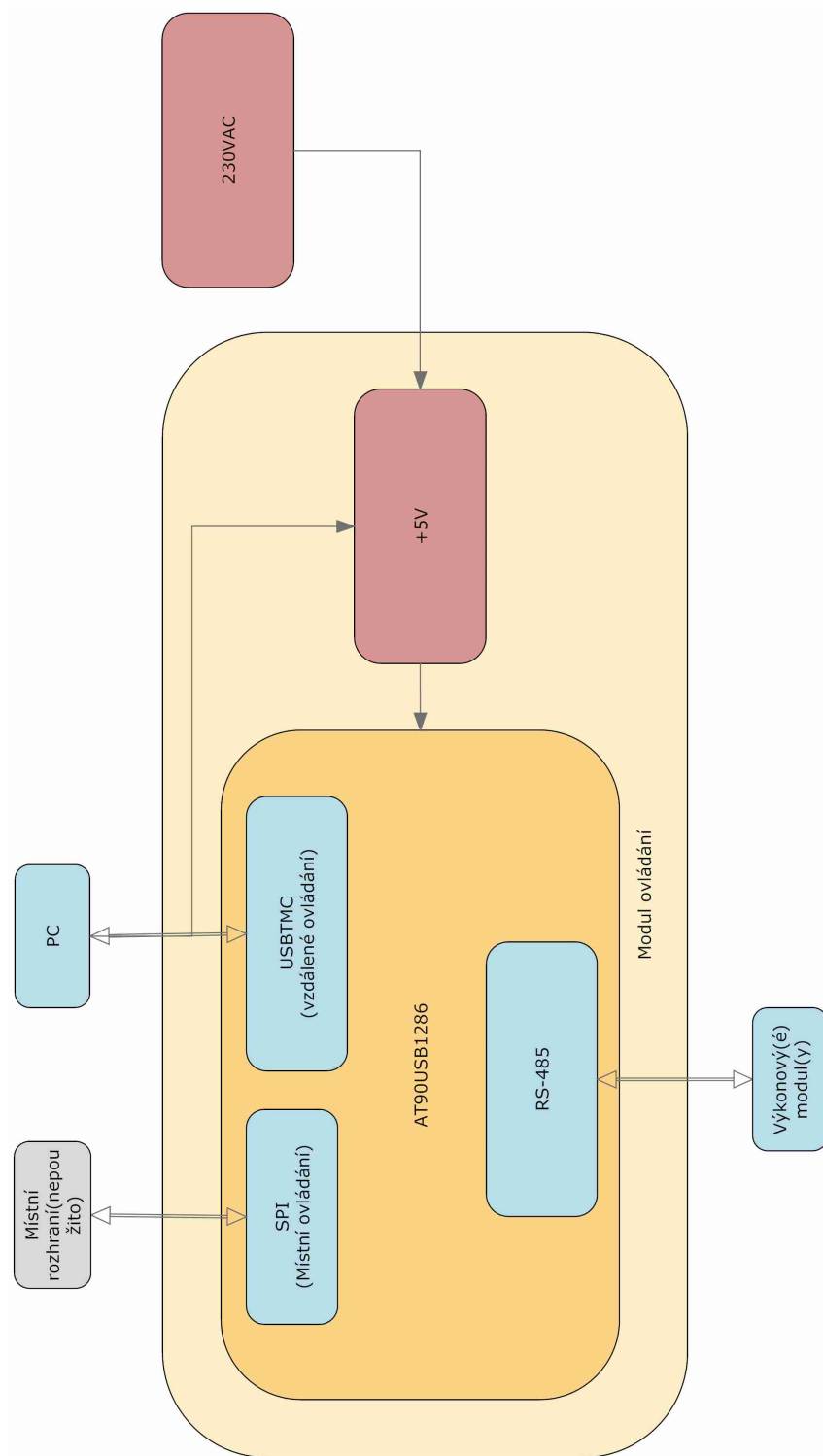
Mikrokontrolér musí obsahovat USB, SPI a UART rozhraní a několik digitálních výstupů pro řízení směru komunikace RS-485 (v jednom okamžiku lze komunikovat jen jedním směrem), spínání sirény. Bylo by užitečné, kdyby se dal použít stejný programovací nástroj.

Tyto podmínky splňuje mikrokontrolér AT90USB1286[9] také od společnosti Atmel. K tomuto mikrokontroléru je již vytvořena šablona různých typů USB zařízení dostupná na stránkách výrobce[7]. Tato šablona sice neobsahuje typ zařízení USBTMC, ale i tak ulehčí práci na FW. Tento mikrokontrolér lze také programovat pomocí programátoru „BiProg“. Mikrokontrolér je vybaven:

- 1x USB 2.0/USB1.1 kompatibilní rozhraní
- 2x 8bit čítač/časovač
- 2x 16bit čítač/časovač
- 1x USART (Universal Synchronous Asynchronous Receiver Transmitter)
- 1x Master/Slave SPI rozhraní
- 48x programovatelných vstupů/výstupů

4.2 Blokové schéma

Na obrázku 4.1 je blokové schéma modulu ovládání. Modul je realizován na jediné DPS. Na této DPS je umístěn síťový transformátor s usměrňovačem, filtrací a stabilizátorem $+5V$, které mají účel jen pokud není modul napájen přes USB z PC. Modul je vybaven sirénou, kterou bude možné ovládat pomocí SCPI příkazu.



Obr. 4.1: Blokové schéma ovladačího modulu

5 REALIZACE - MCU FIRMWARE

Programy jsou koncipovány tak, že hlavní smyčka (jádro programu) volá jednotlivé API a pak podprogramy, které zpracovávají události generované API. Podstatou API je přizpůsobit události, data a stavy standardnímu formátu nadřazené vrstvy (aplikaci). API pracují s danou periférií pomocí jejího ovladače. Takto je program modulární, a lze tak jednoduše kód pro práci s periférií použít v jiném programu. Tohoto bylo využito například pro komunikaci UART. API a ovladač periférie zkopírován z programu modul ovládání do modul výkonového zdroje. Dále bylo možno využít i samotného jádra programu z modulu ovládání. Práce s některými API byly odebrány, byla vytvořena API regulátoru a nakonec bylo jádro programu zjednodušeno, protože v komunikaci vystupuje jenom jako podřízené zařízení.

Programy pro oba mikrokontroléry jsou napsané v AtmelStudio[10] od společnosti Atmel.

5.1 Komunikační schéma

Na obrázku 5.1 je znázorněno schéma komunikace. Modul ovládání je v této komunikaci stěžejním článkem. Veškerá komunikace je řízena právě tímto modulem. Ovládací modul může přijímat příkazy přes rozhraní USB(PC) i SPI (lokální ovládací jednotka). Podle schématu je patrné, že komunikace může být směřována pouze k ovládacímu modulu, což mohou být například základní příkazy (*IDN?, *RST) nebo k zařízení na jednom z konců komunikačního schématu.

Ovládací modul vystupuje na rozhraní USB jako podřízené zařízení. SCPI příkazy jsou jen přijímány nikoliv vysílány. Vysílány jsou však případné odpovědi. Veškerá komunikace přes toto rozhraní je kódována v ASCII.

Na rozhraní SPI modul vystupuje jako nadřazené zařízení, nicméně jen z pohledu iniciace komunikace. Tato komunikace není v tuto chvíli navržena, ale předpokládá se nepřetržitá komunikace v rámci API. Pokud ani jedno ze zařízení nebude mít žádná data k odeslání, budou posílány pakety prázdné zprávy. Pokud však bude přijmuta zpráva obsahující informace, budou tyto informace postoupeny vyšší vrstvě aplikace. Tato koncepce umožní i podřízenému zařízení, tedy místní ovládací jednotce, odesílat příkazy ovládacímu modulu či modulu výkonového zdroje. Předpokládaný komunikační protokol bude stejný jako pro komunikaci ovládacího modulu s moduly výkonového zdroje.

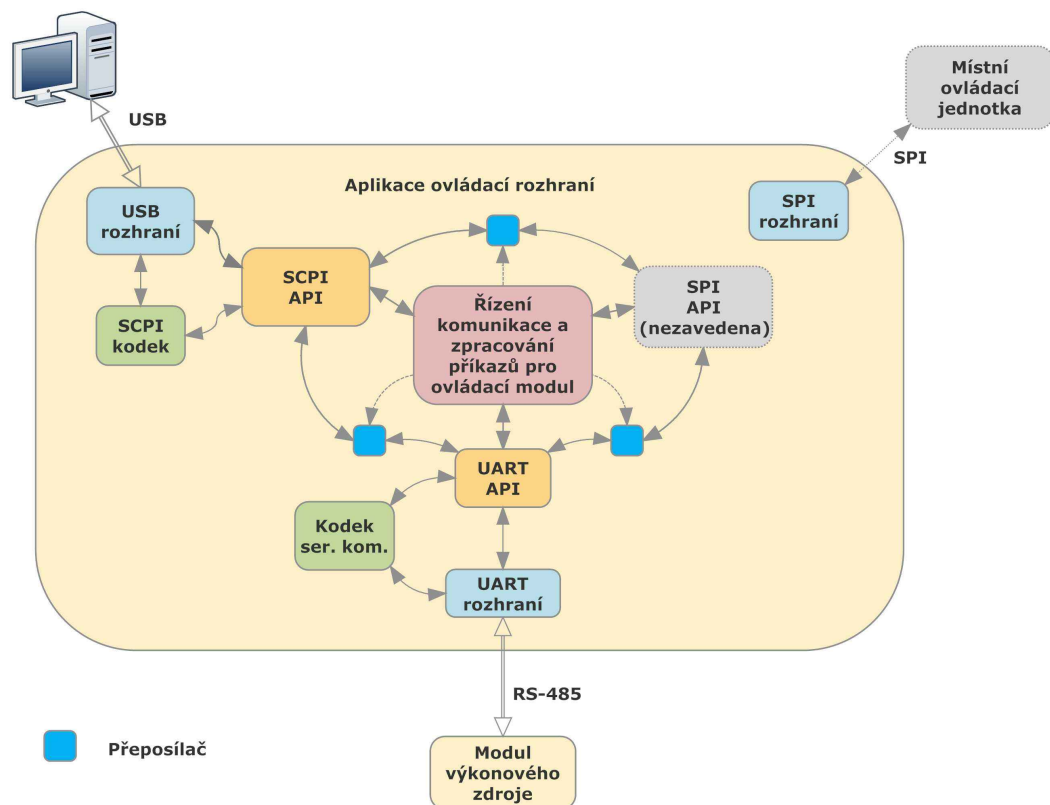
Na rozhraní UART působí modul ovládání opět jako nadřazené zařízení. Modul výkonového zdroje tak může zasílat jen případné odpovědi na dotazy. Jelikož je toto rozhraní jako jediné polo-duplexní (RS-485), modul ovládání v rámci řízení

komunikace dohlíží, aby na rozhraní nebylo vysíláno, když je očekávána odpověď od podřízeného zařízení (modul výkonového zdroje).

Jelikož jsou všechna zařízení připojená k rozhraním ovládacího modulu vnímána jako součást jedné sítě, má každé zařízení svou adresu. Adresy zařízení jsou uvedeny v tabulce 5.1. Zařízení mají pevně přidělenou adresu a ovládací modul tak může rozhodnout, kterému zařízení je zpráva určena. Zjistí se tak i na jaké rozhraní má tato zpráva být přeměrována.

Tab. 5.1: Přehled adres jednotlivých zařízení

Zařízení	Adresa
USB zařízení	0x01
Modul ovládání	0x02
Jednotka místního ovládání	0x03
Hromadné volání zdrojů	0x04
Zdroj č. 1	0x05
Zdroj č. 2	0x06
Zdroj č. 3	0x07
Zdroj č. 4	0x08
Zdroj č. 5	0x09
Zdroj č. 6	0x0A
Zdroj č. 7	0x0B
Zdroj č. 8	0x0C
Zdroj č. 9	0x0D
Zdroj č. 10	0x0E
Zdroj č. 11	0x0F
Zdroj č. 12	0x10
Zdroj č. 13	0x11
Zdroj č. 14	0x12
Zdroj č. 15	0x13
Zdroj č. 16	0x14



Obr. 5.1: Komunikační schéma navrhovaného zařízení

5.2 Komunikační protokol pro sériová rozhraní

Komunikační protokol je navržen tak, aby byl univerzální. Umožnil synchronizaci příjmu dat a zahrnoval v sobě i jednoduchou formu kontroly správnosti dat. Struktura protokolu je popsána na diagramu 5.2. Aby bylo možné dodržet pravidla struktury protokolu a ponechat unikátní **Start Symbol** a **Stop Symbol**, byla zavedena substituční tabulka 5.2 pro konverzi hodnot stejné hodnoty jako zmiňované symboly.

Protokol je zpracováván v několika vrstvách. V první **Linkové vrstvě** se pracuje se samotným rozhraním a provádí se zde linkové kódování viz tabulka 5.2. Dále je na této vrstvě prováděn kontrolní součet zprávy. V tomto případě se jedná o „jednotkový doplněk“. **Linková vrstva** také zajišťuje sudý počet bytů nutných k výpočtu kontrolního součtu. Pokud tedy délka datového rámce z vyšší vrstvy je lichá, bude její délka upravena na sudou přidáním „nulového“ byte.

Další vrstva na které je protokol řešen je **síťová vrstva**. V této vrstvě dochází k rozhodování zda ono zařízení je adresátem či ne. Zda ID zprávy (**Paket ID**) je správné. V každém zařízení je při inicializaci uložena adresa zařízení buď z definičního souboru nebo z vyčtené hodnoty stavu přepínače (viz 5.4). Pokud je zařízení nadřazené generuje ID zprávy. Na zprávu s tímto ID musí podřazené

zařízení odpovědět se stejným ID zprávy. Toto řešení zabraňuje zpracování odpovědí na jinou zprávu. V rámci síťové vrstvy je dále zpracován tzv. **broadcast** nebo **sub-broadcast**. Tyto funkce umožňují hromadné adresování zařízení. První z jmenovaných adresuje všechna zařízení (adresa 0x00), druhý umožňuje adresovat pouze skupinu zařízení. Pro hromadné ovládání modulů výkonového zdroje je použita adresa třídy (**Hromadné volání zdrojů** tj. 0x04).

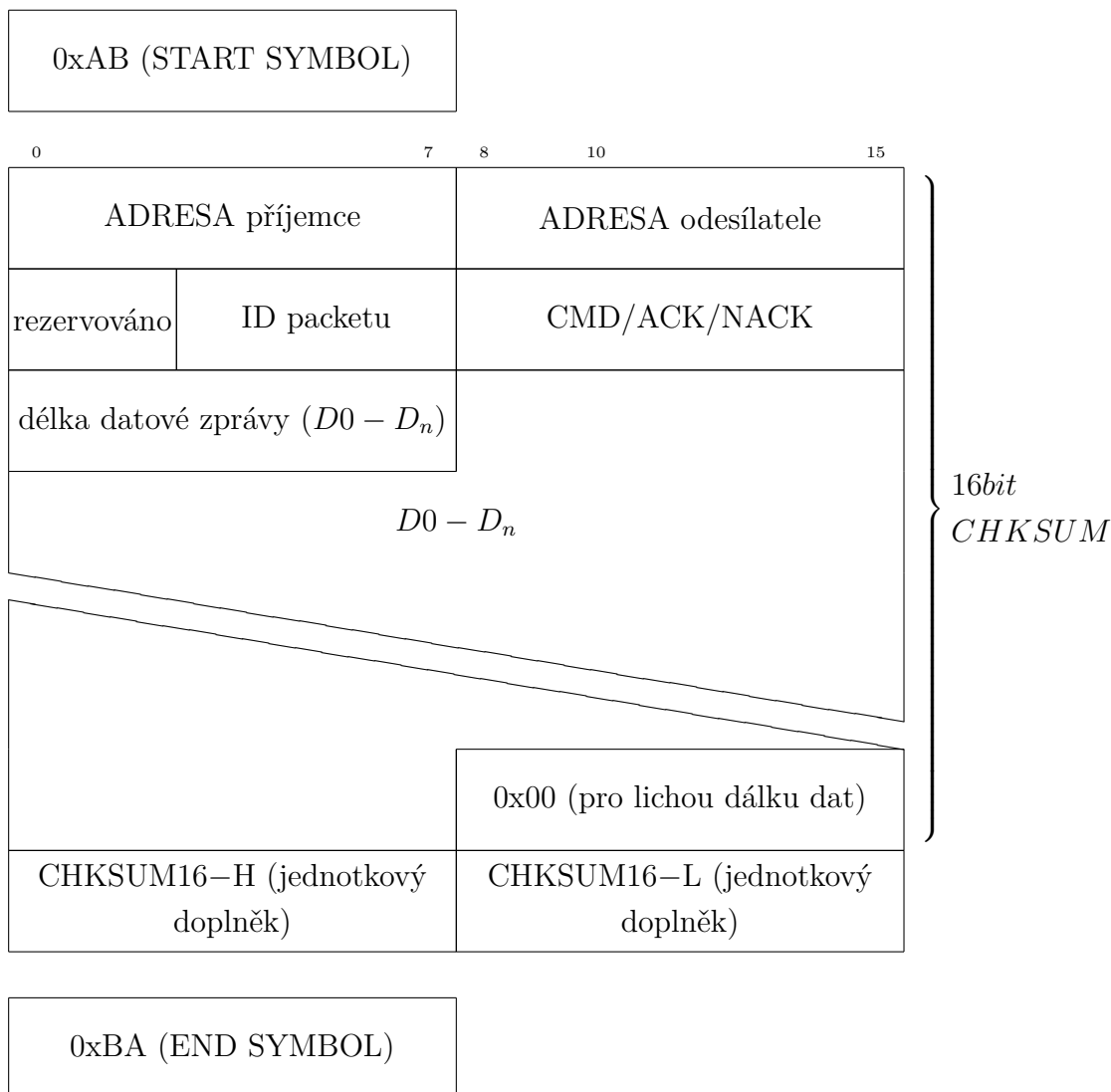
Komunikace je navržena takovým způsobem, aby po každém příkazu, který není adresován hromadně se muselo odpovědět. Na tento příkaz je odpovězeno buď zprávou obsahující ACK (Acknowledgement) nebo NACK (Negativ-Acknowledgement). Odpověď není nikdy generována v rámci nižších vrstev a tedy zcela pod kontrolou „aplikační vrstvy“. Odpovědí je signalizováno zpracování příkazu. Maximální velikost paketu je 254B včetně START a STOP symbolu. Užtečných dat tak ($ACK/NACK/CMD + delkadat + (D_0 - D_n)$) lze přeneést až 121B.

Tab. 5.2: Tabulka převodu symbolů pro navržený protokol

Symbol	Popis	Substituce
0xAB	START SYMBOL	0x80; 0x81
0xBA	STOP SYMBOL	0x80; 0x82
0x80	KONVERZNÍ SYMBOL	0x80; 0x81

Tab. 5.3: CMD/ACK/NACK komunikace

Typ zprávy	Symbol	Popis
Command CMD	0x01 – 0xFD	libovolný příkaz
Acknowledgement ACK	0xFE	kladné potvrzení
Negativge-Acknowledgement NACK	0xFF	záporné potvrzení



Obr. 5.2: Komunikační protokol RS-485 rozhraní

5.3 Modul ovládání

Funkce ovládacího modulu je vykonávat příkazy a přeposílat data na cílová rozhraní. Program začíná inicializací mikrokontroléru, kde se vykoná inicializace periférií, které nejsou kontrolovány pomocí API. Dále se inicializují API, které nakonfigurují periférii a inicializují své proměnné. Nakonec se inicializují proměnné programu. Další operace programu jsou vykonávány v nekonečné smyčce. Nicméně lze tuto smyčku přerušit resetováním mikrokontroléru. Resetovat mikrokontrolér lze příkazem „*RST“. Tento příkaz zahrnuje reset celého zařízení, proto je nejdříve po přijetí tohoto příkazu odeslán příkaz **RESET** všem ostatním zařízením, tj. moduly výkonového zdroje prostřednictvím adresy pro **Hromadné volání zdrojů** -

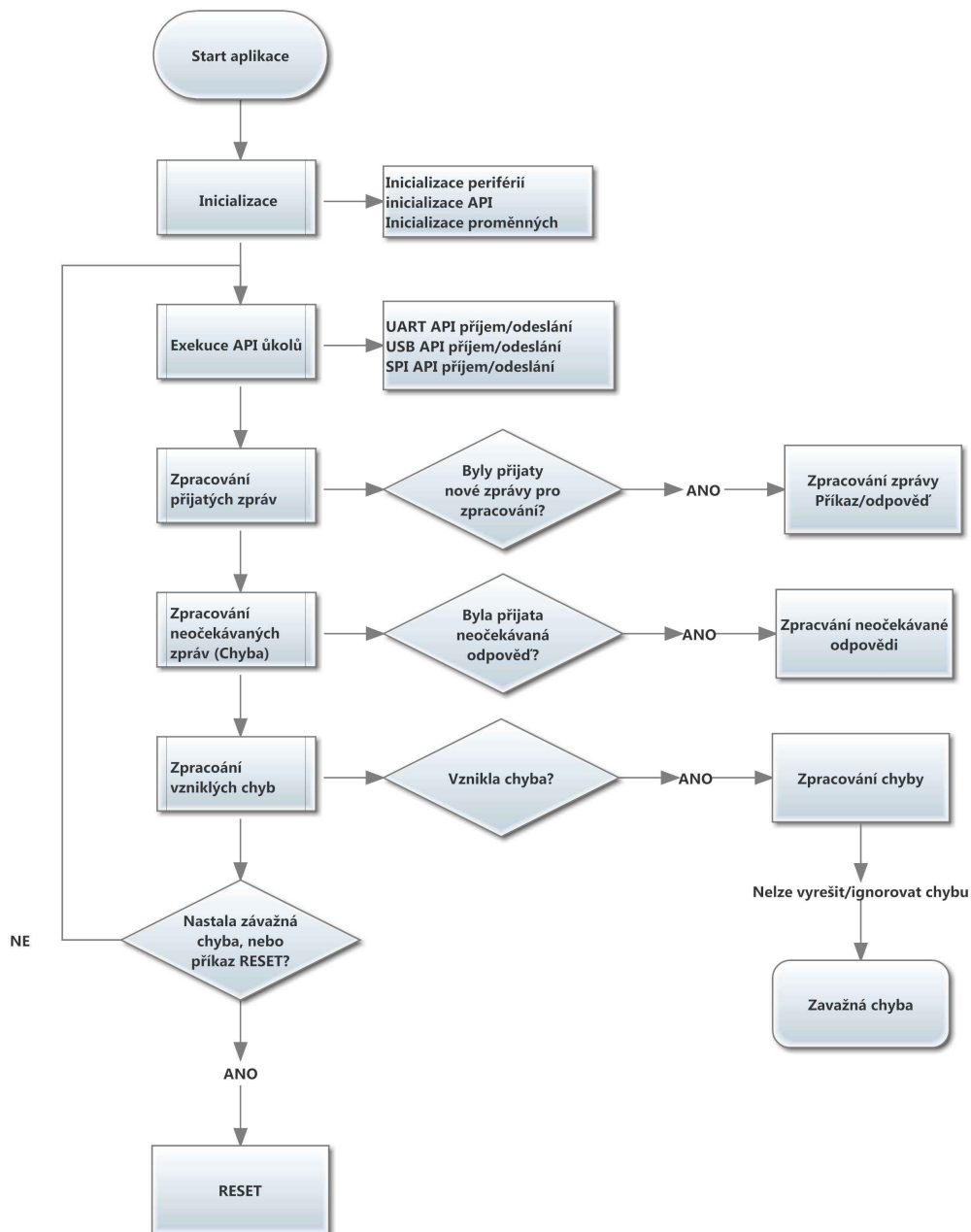
sub-broadcast a jednotka lokálního ovládní pokud je připojena. Až poté se ovládací modul sám resetuje. Na obrázku 5.3 je znázorněn vývojový diagram programu.

Jako první jsou ve smyčce vykonávané úkoly všech API. Na všech rozhraních se zpracují příchozí a odchozí zprávy. Jsou aktualizovány stavy událostí na rozhraních. Tyto stavy informují dalšími podprogramy. Například o nově příchozí zprávě čekající na zpracování.

Dále jsou zpracovávány zprávy přijaté perifériemi. Na základě adresáta zprávy je buď zpráva přeposlána nebo zpracována. Jelikož se prostřednictvím SCPI příkazů žadná adresa neposílá, je adresa přidělena na základě druhu deódované zprávy. Pokud je tedy zpráva `DISP: . . .`, je adresátem **jednotka místního ovládní**. V případě adresování modulu výkonového zdroje je situace vyřešena tak, že nativně se používá adresa zdroje č. 1. Pokud je požadavek na adresování jiného zdroje, lze to provést příkazem `INSTrument[:NSElect]` a zvolit požadované číslo zdroje. Ovládací jednotka detekuje připojená zařízení ihned po zapnutí. Aby bylo možné adresovat zařízení, které bylo připojeno později, je nutné použít SCPI příkaz `INSTrument:RINStrument`. Tím jednotka provede „PING“ všech adres. Adresy od kterých obdrží odpověď jsou uloženy do seznamu dostupných zařízení. V případě adresování, které není v seznamu je zpráva zahozena.

Dále jsou zpracovávány neočekávané zprávy (odpovědi) od zařízení. Tato situace by neměla nastat a je zpracována zpravidla jako chyba.

Chyby jsou zpracovávány v posledním kroku hlavní smyčky. Pokud se jedná o nezávažnou chybu, je chybě přiděleno číslo a vloženo do chybového zásobníku. Tento zásobník lze vyčítat pomocí SCPI příkazu `SYSTem:ERRor?`. V zásobníku může být nashromážděno až 8 chyb. Po vyčtení se chyba ze zásobníku smaže.



Obr. 5.3: Exekuce programu Ovládacího modulu

5.3.1 SCPI parser

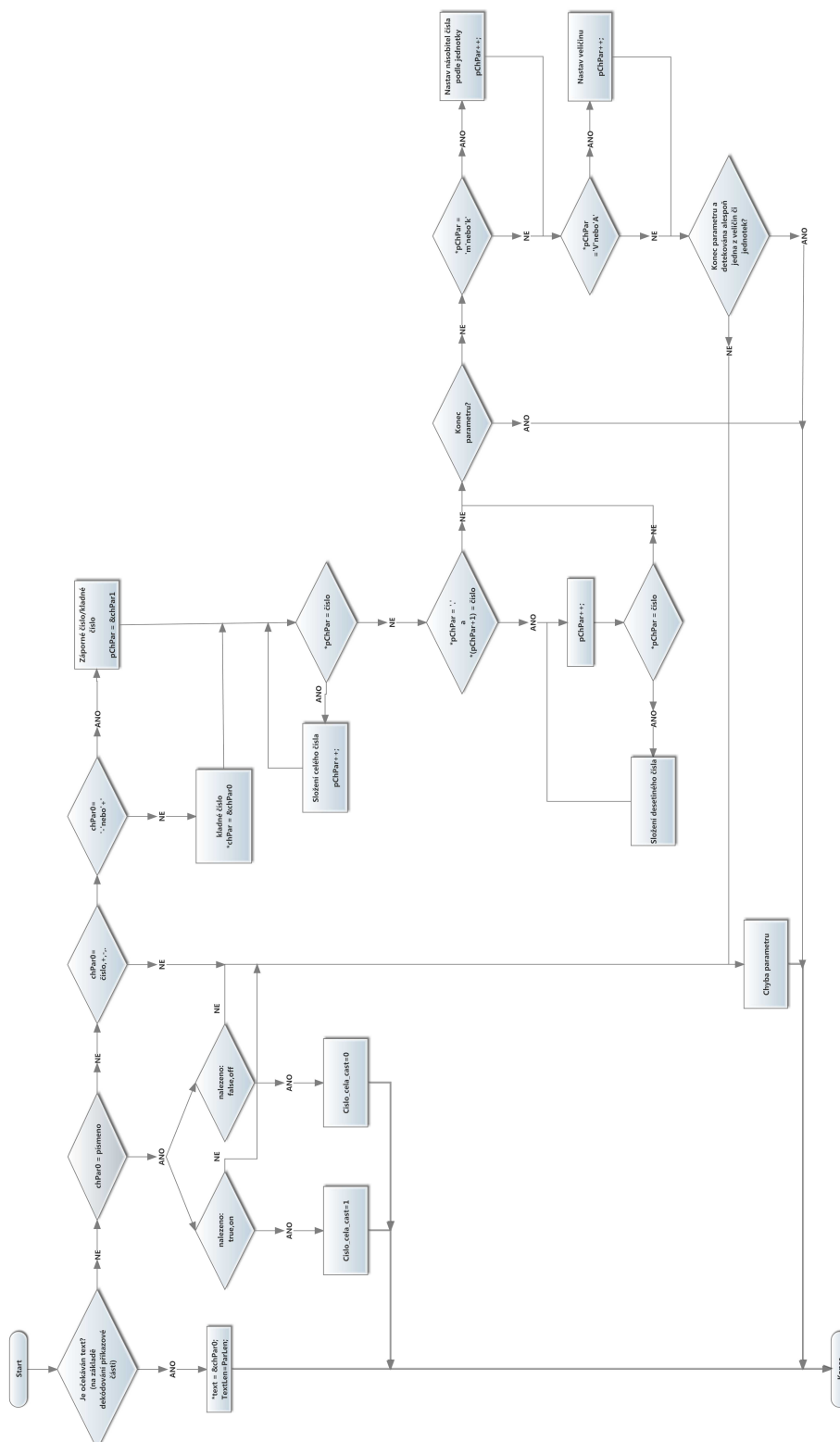
Tato funkce zpracovává řetězec znaků dle specifikace SCPI[11]. SCPI zpráva je složena z příkazu a jeho parametru. Podle SCPI je možné vynechat nepovinnou část příkazu (ohraňována [nepovinný příkaz]) a použít zkrácené (INST:) nebo celé části příkazu (INSTrument:). Příkazová část může být zakončena '?', pak se nejedná o příkaz, ale o dotaz (query). Na dotaz je nutné odpovědět. Odpověď je v podobě hodnoty či textu převedeného do ASCII řetězce zakončeného termínovacím znakem.

Na diagramu 5.4 je znázorněno zpracování příkazové části. Nejdříve je načten první kompletní příkaz ze seznamu podporovaných příkazů. Následuje srovnání první části načteného příkazu s první částí přijatého příkazu. Když se tyto části rovnají, pokračuje se srovnáním druhých částí. Pokud se části nerovnají a první část načteného příkazu nebyla povinná, pokračuje se srovnáním druhé části načteného příkazu a první částí přijatého příkazu. Takto se v porovnání pokračuje až na konec přijatého příkazu, pokud jsou části příkazů shodné nebo chybí nepovinná část příkazu. V opačném případě se operace přeruší a začne se porovnávat další načtený příkaz s přijatým příkazem od začátku. Pokračuje se dokud nejsou otestovány všechny podporované příkazy nebo dokud není nalezena shoda. Na konci shodných příkazů se také testuje shoda zda jsou oba příkazy `dotaz` či `ne`.

Parametr SCPI zprávy může nabývat spousty podob. Pro účely zařízení však byly vybrány jen některé možné podoby parametrů viz tab.5.4. Na základě zpracovaného příkazu je očekáván text nebo hodnota. Text se nezpracovává, jen je zjištěna jeho délka a je funkcí vrácen. Pokud je očekávána hodnota, funkce nejdříve testuje zda se nejedná o stavový parametr. Když tomu tak není, je přichozí parametr testován zda splňuje interpretaci hodnoty v rozsahu definovaném tabulkou 5.4. Nejdříve se testuje možný začátek číselné hodnoty (`.`; `+`; `-`; `0` – `9`), dále následuje složení celého čísla dokud funkce nenarazí na jiný znak než číslo. Funkce pokračuje testováním desetinné části, pokud desetinná část existuje, je složena desetinná část čísla. Nakonec se testuje zda hodnota je opatřena jednotkou a veličinou. V závěru funkce složí číslo, přidělí znaménko a vynásobí případným násobitelem jednotky pokud číslo bylo jednotkou opatřeno.

Tab. 5.4: Podoby podporovaných parametrů

Prvek	rozsah	Popis
jednotky	$[-; m; k]$	jednotky - volitelné
veličiny	$[-; V; A]$	veličina - volitelné
stavy	$[TRUE; FALSE; ON; OFF]$	vyjádření stavu
hodnoty	$\pm iii.ttt$	vyjádření číselné hodnoty



Obr. 5.5: Dekodér SCPI zprávy - parametrické části

5.4 Modul výkonového zdroje

Struktura programu je obdobná jako u modulu ovládání. Nejdříve se provede inicializace. Na začátku smyčky se provede obsluha API. V tomto případě to je komunikace UART a Regulace výstupní veličiny. Pak se provede zpracování příchozích příkazů a nakonec se provede zpracování chyb. Stejně jako u ovládacího modulu, když nastane vážná chyba nebo bude přijmut příkaz *RST, se zařízení resetuje.

Tento modul vystupuje jako podřízené zařízení. Navržený protokol určuje, že toto zařízení nikdy neinicuje komunikaci, ale vždy čeká na příkaz. Až po přijetí příkazu může zařízení odpovědět.

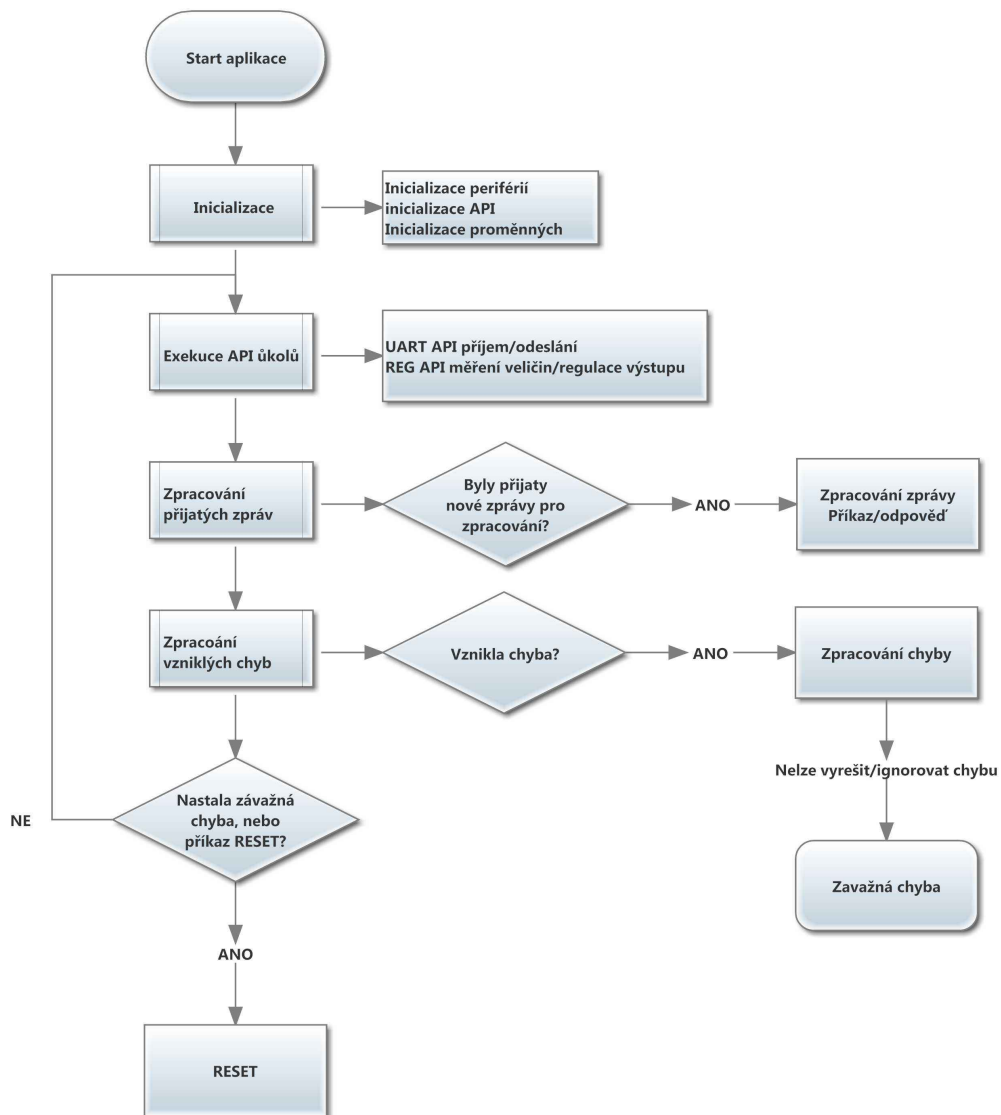
V rámci iniciace UART API je přečtena hodnota **hexadecimálního** přepínače na DPS. K této adrese je přiřčena adresa **prvního zdroje**. Takto vzniklá adresa je považována za adresu modulu výkonového zdroje. Aby celý systém fungoval správně, nesmí se vyskytnout zařízení se stejnou adresou. Zařízení by odpovídala na stejný příkaz a na sběrnici RS-485 by poté vysílala obě zařízení. Došlo by ke konfliktu na lince. Tuto skutečnost musí mít uživatel na paměti.

5.4.1 Regulace

Regulace elektrických veličin je rozdělena do 4 funkčních bloků. Každý z těchto bloků pokrývá jeden z možných stavů regulace. Po zapnutí se zařízení nachází ve stavu vypnuté regulace, všechny požadované veličiny mají nulovou hodnotu. Tento stav nastává také, když ovládací jednotka nastaví obě požadované veličiny (napětí a proud) na nulovou hodnotu.

Dalším stavem regulace je inicializace (reinicilizace) dvou referenčních PWM výstupů. Tento stav slouží pouze k prvotnímu nastavení PWM dle vypočtených hodnot. Referenční výstupy jsou inicializovány vždy, když ovládací jednotka změní alespoň jednu z požadovaných veličin. Podle těchto hodnot pak rychlá regulace tvořená dvěma komparátory nastaví výstupní veličiny.

Po inicializaci referenčních výstupů regulaci přebírá zpětnovazební regulace, která slouží pro průběžné korekce výstupních veličin na základě měřených veličin. Takto lze však regulovat jen jednu z možných veličin. To, která z veličin je regulována se rozhoduje na základě předchozího porovnání naměřených a požadovaných hodnot. Regulace je nativně nastavena na regulaci napětí, avšak za splnění podmínek uvedených níže je prováděna regulace veličiny proudu. Funkční diagram regulace je na obrázku 5.7.



Obr. 5.6: Exekuce programu modulu výkonového zdroje

$$\text{Regulace } I : I_{mer} > I_{poz} - I_{tol}$$

I_{mer} - naměřená veličina proudu

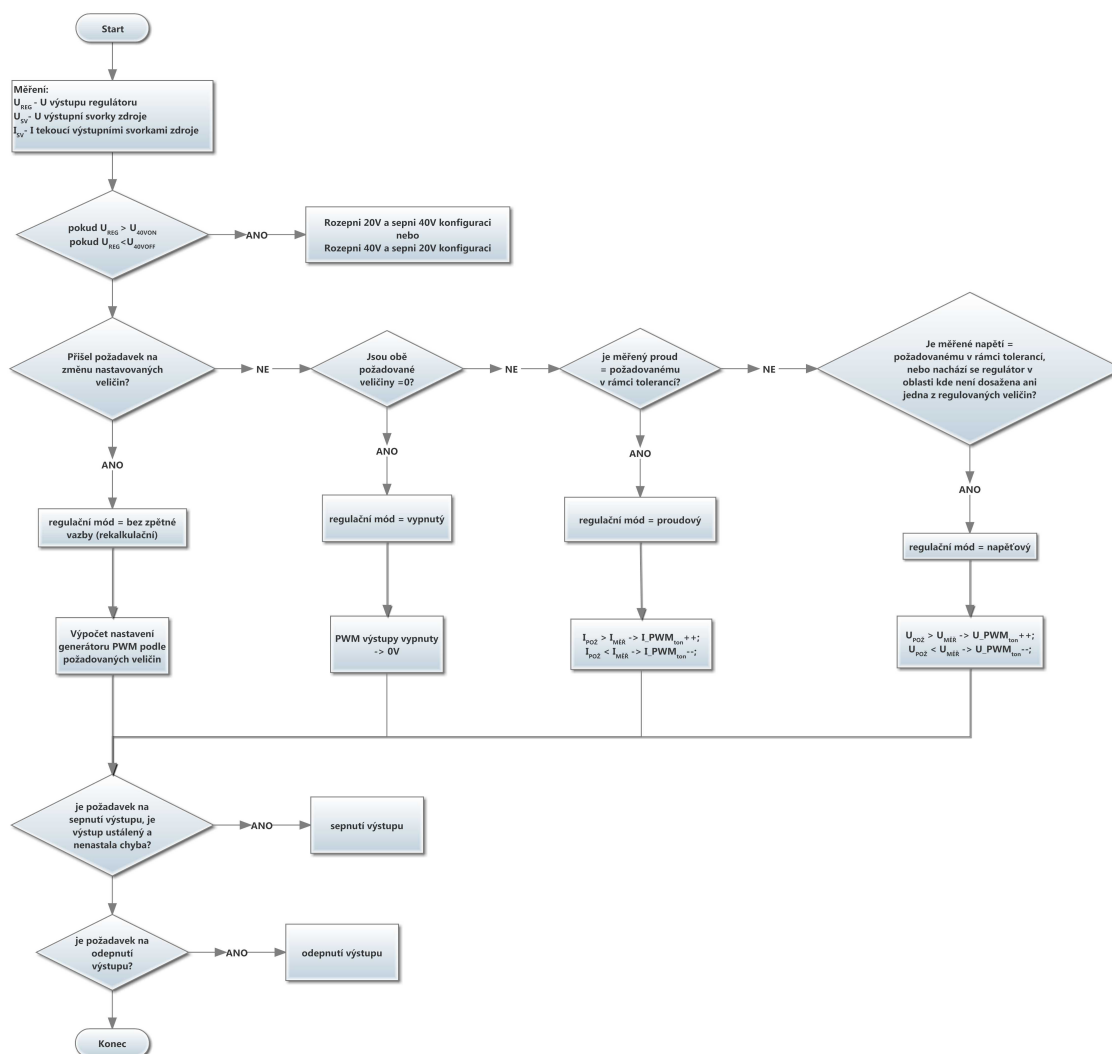
I_{poz} - požadovaná veličina proudu

I_{tol} - povolený rozdíl měřené a požadované veličiny

Mimo regulační funkční bloky je postaven konfigurátor zapojení vinutí transformátoru. Tento konfigurátor je spouštěn na začátku regulační smyčky. Funkce vyhodnotí zda se napětí za regulátorem blíží nastavenému meznímu napětí. Případně provede rekonfiguraci vinutí transformátoru pomocí dvou TrueSwitch spínačů. Tento

konfigurátor má hysterézní vlastnosti.

Pro stabilizaci provedených změn regulací referenčních hodnot je zavedena stabilizační doba. Tato doba je proměnná na základě provedené regulační akce. V průběhu této stabilizační doby se neprovádí průběžné korekce výstupní veličiny.



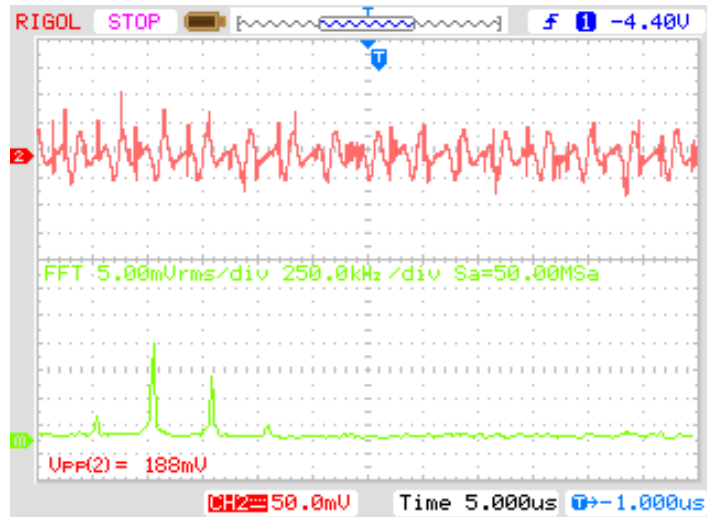
Obr. 5.7: Regulace požadovaných veličin

6 DOSAŽENÉ VÝSLEDKY, MĚŘENÍ

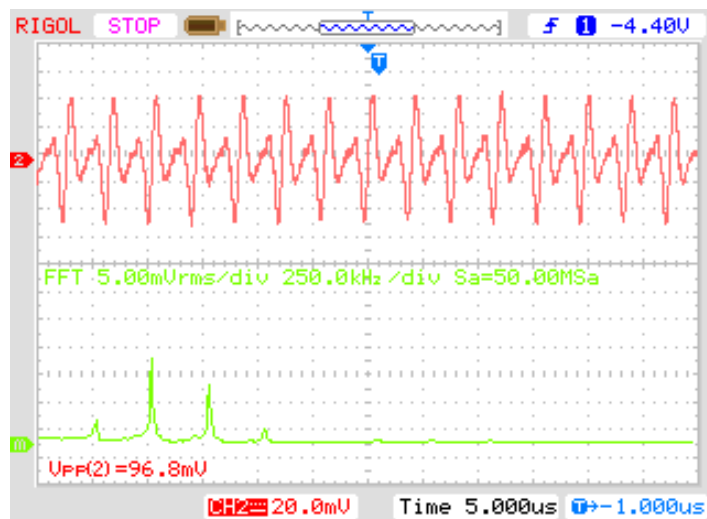
Byl realizován prototyp modulu výkonového zdroje a modul ovládání. Výrobek je funkční a má veškeré náležitosti dle zadání. Nutno však poznamenat, že v tuto chvíli nespĺňuje kvalitativní vlastnosti, které byly vytyčeny jak doplňující cíl. V průběhu oživování výkonové části vyšlo najevo hned několik nedostatků návrhu. Tyto nedostatky byly vyřešeny úpravami vyrobených DPS, přidáním a odebráním komponent či změnou hodnot některých komponent. Jelikož se tak stalo před dokončením této práce, veškeré dotčené přílohy byly opraveny a aktualizovány. Z důvodu provizorního chlazení prototypu bylo měření parametrů zdroje prováděno při proudech do 5A (pro některá měření dokonce jen do proudu 3A).

6.1 Řešené nedostatky návrhu

Váženým nedostatkem návrhu, který se nepodařilo odstranit je poměrně značné pronikání 100Hz složky do pomocného napájení. Podle frekvence lze soudit, že se jedná o rušení pramenící z usměrňovače. Dále se na pomocném napájení projevují proudové rázy čtyřech miniaturních spínaných zdrojů sloužících k vytvoření galvanicky oddělených napájení pro komunikaci a tři TrueSwitch spínače. Toto rušení o frekvenci kolem 175kHz působí velké nepřesnosti při měření proudu na snímacím rezistoru. Jelikož je hodnota napětí velmi malá, bylo nutné tuto hodnotu velmi (25x) zesílit. Bohužel zesilovač také zvyšuje i toto rušení. Díky tomu klesla přesnost měření proudu, a také se zhoršila stabilita rychlé regulace. Na obrázku 6.1 je zesílené rušení měřené na výstupu zesilovače napětí na snímacím rezistoru. Na obrázku 6.2 je rušení s odlehčenými spínanými zdroji měřené na stejném místě. Toto také způsobovalo nestabilitu při regulaci v proudovém režimu. Zvýšením kapacity v záporné zpětné vazbě proudového komparátoru a přidáním kondenzátoru o velké kapacitě na výstup regulátoru nestabilitu odstranilo. Pro zvýšení stability měření bylo do měřící funkce přidáno kumulativní klouzavé průměrování.



Obr. 6.1: Rušení na výstupu zesilovače měření proudu

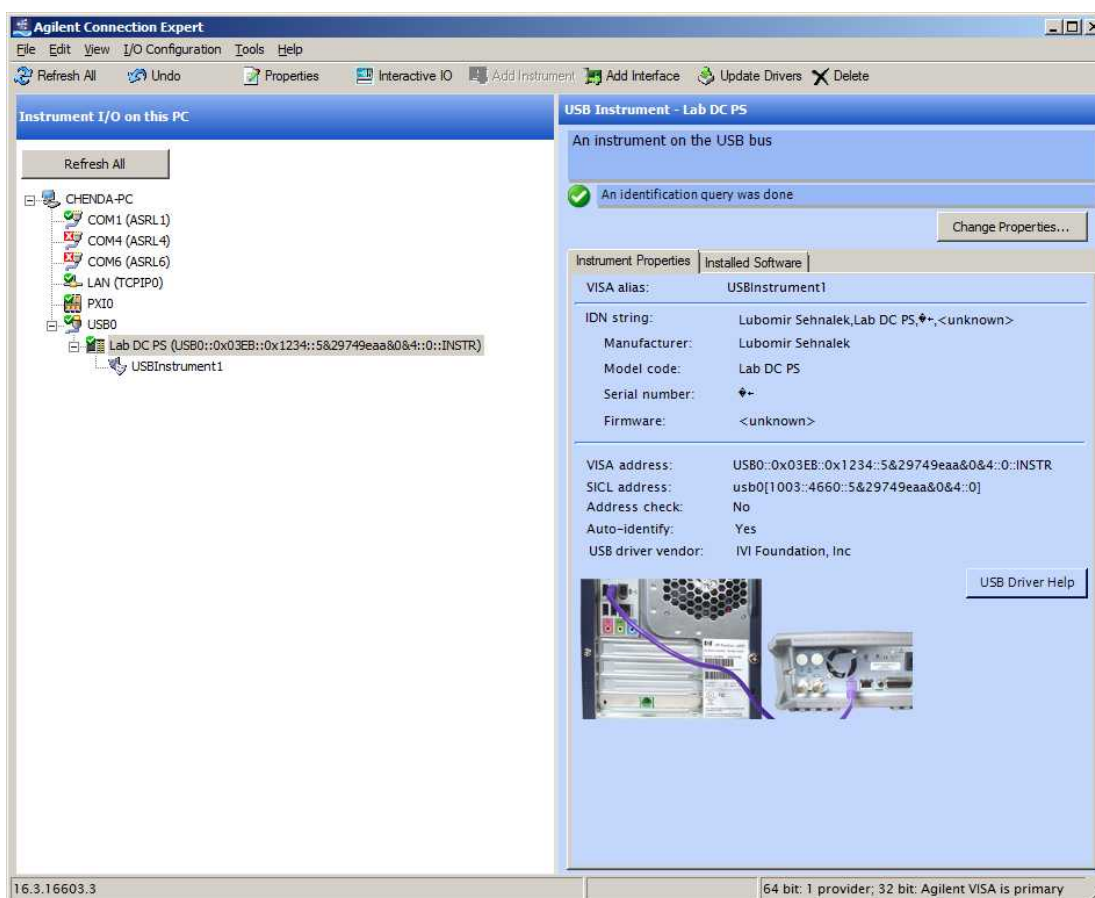


Obr. 6.2: Rušení na výstupu zesilovače měření proudu s odlehčenými spínacími zdroji

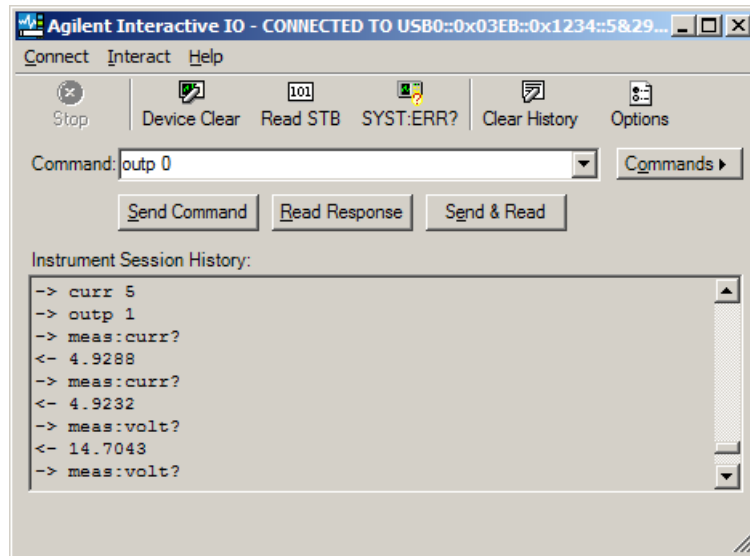
Před připojením výkonové části, kdy se kontrolovala funkčnost ovládacích periférií kontroléru modulu výkonového zdroje byl objeven nedostatek. Ten by pravděpodobně způsobil zničení některé z výkonových komponent pro přepínání konfigurace vinutí zdroje. Problém spočíval v sepnutí obou TrueSwitch spínačů pro konfiguraci vinutí zdroje. To by způsobilo zapojení vinutí na krátko přes jednu z usměrňovacích diod. Tento problém nastával při resetování MCU, kdy MCU má piny ve stavu vysoké impedance. Problém byl vyřešen externím pull-Up rezistorem, který v době resetování udržuje napětí 5V na vstupu ovladače konfigurace vinutí.

6.2 Vybrané průběhy měření, výpis komunikace RS-485, detekce VISA

Pokud je na PC nainstalován VISA v podobě Agilent IO nebo NI-MAX, a je připojen modul ovládání, ve VISA prohlížeči bude možno toto zařízení nalézt. Příklad připojeného zařízení je na obrázku 6.3. Na dalším obrázku 6.4 je zobrazena možnost jednoduchého zaslání a přijímání zpráv. Stejně tak lze zařízení ovládat z vytvořeného programu v LabView nebo Agilent VEE.



Obr. 6.3: Zobrazení zařízení ve VISA manažeru



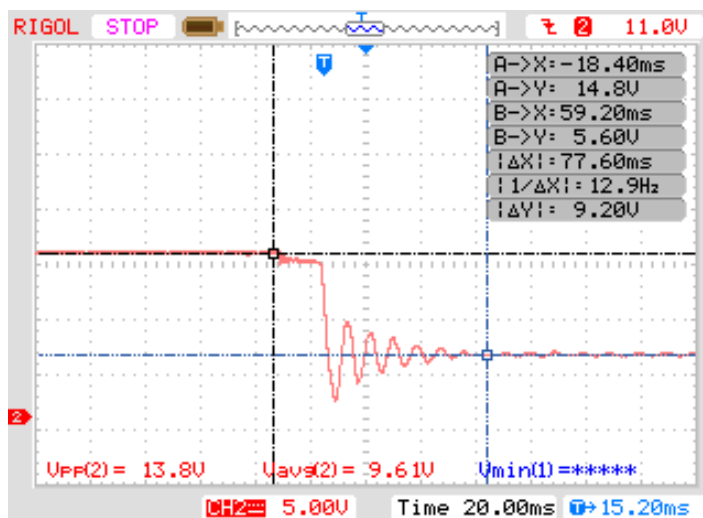
Obr. 6.4: Ovládací konzole Agilent IO

Na dalším obrázku je výčet komunikace těsně po startu ovládacího modulu. Na obrázku 6.5 je záznam detekce připojených zařízení na sběrnici RS-485. Komunikace začíná detekcí zařízení adresy „0x05“. Na tento dotaz je odpovězeno. Detekce dalších zařízení je již bez odpovědi. Komunikační protokol je popsán zde 2.5.

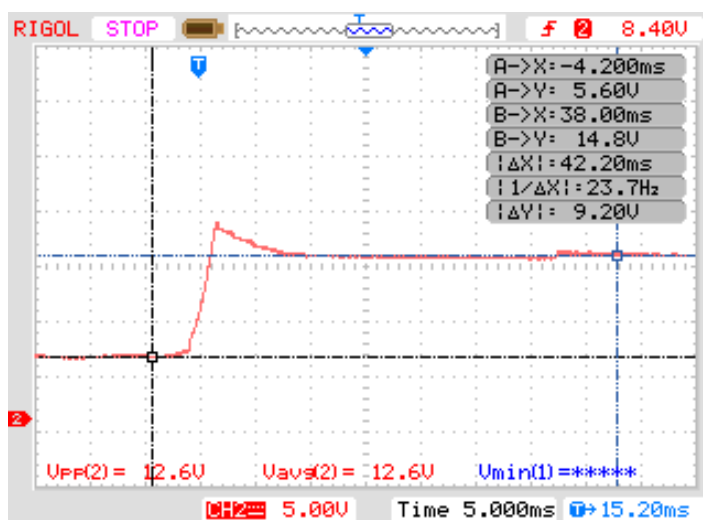
PING adresy 0x05	odpověď zařízení s adresou 0x05	PING adresy 0x06
AB 05 02 08 80 80 00 00 F2 7D BA	AB 02 05 08 FE 00 00 F4 FC BA	AB 06 02 10 80 80
00 00 E9 7D BA	AB 07 02 18 80 80 00 00 E0 7D BA	00 00 00 D7 7D BA
AB 09 02 28 80 80 00	PING adresy 0x07 A AB 0A 02 30 80 80 00 00 C5 7D BA	AB 0B 02 38 80
80 00 00 BC 7D BA AB UC UZ 4U 80 80 00 00 B3 7D BA	AB 0D 02 48 80 80 00 00 AA 7D	BA AB 0E 02 50 80 80 00 00 A1 7D BA
BA AB 0E 02 50 80 80 00 00 A1 7D BA	AB 0F 02 58 80 80 00 00 98 7D BA	AB 10 02 60
80 80 00 00 8F 7D BA	AB 11 02 68 80 80 00 00 86 7D BA	AB 12 02 70 80 80 00 00 7D
7D BA AB 13 02 78 80 80 00 00 74 7D BA	AB 14 02 80 80 80 80 00 00 6B 7D BA	AB 05
01 88 42 05 00 14 00 00 00 59 BC BA	AB 01 05 88 FE 00 00 75 FC BA	AB 05 01 90 40
05 00 05 00 00 00 60 BE BA	AB 01 05 90 FE 00 00 6D FC BA	AB 05 01 98 60 05 00 01
00 00 00 5C 9E BA	AB 01 05 98 FE 00 00 65 FC BA	

Obr. 6.5: Komunikace ovládacího modulu s modulem výkonového zdroje

Na obrázcích níže jsou zobrazeny průběhy odezev regulace zdroje na některé události. První událostí je skoková změna proudu z 0A na 5A. Další událostí je odezva na opačnou změnu, tedy z 5A na 0A. Odezvy regulátoru jsou zobrazeny na obrázcích 6.6 a 6.7.

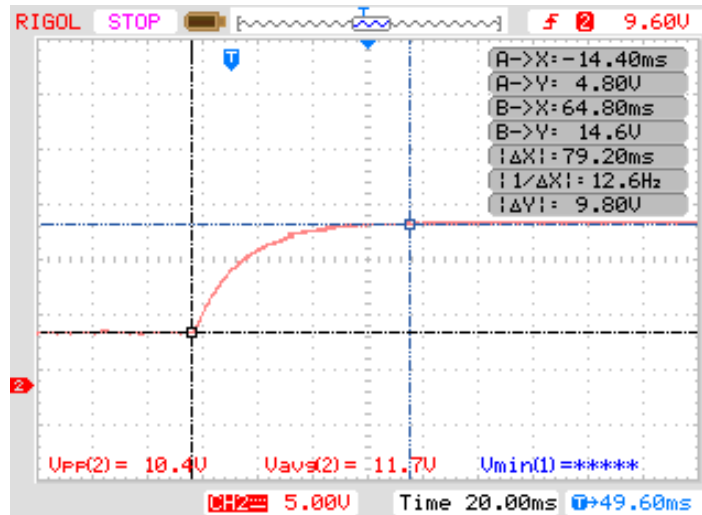


Obr. 6.6: Odezva regulace na skokovou změnu proudu z 0A na 5A

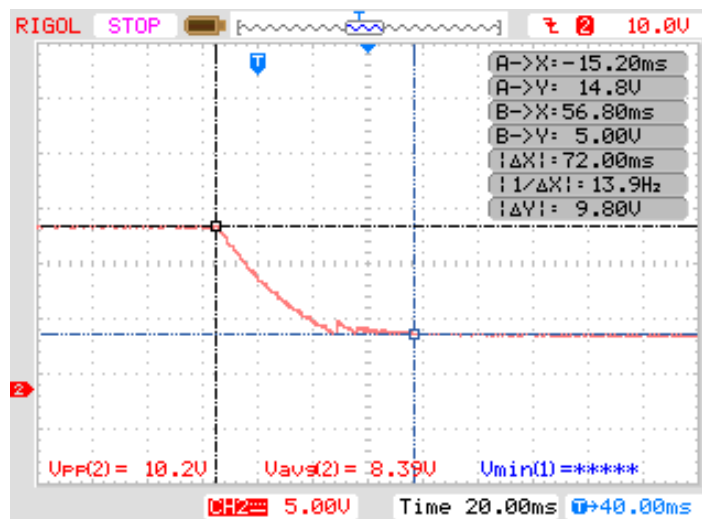


Obr. 6.7: Odezva regulace na skokovou změnu proudu z 5A na 0A

Další měřené průběhy jsou analogií předchozích. Na těchto průbězích je zobrazena odezva na skokovou změnu napětí. Na průbězích 6.8 a 6.9 je dobře patrný vliv vložené velké kapacity na výstupu regulátoru.

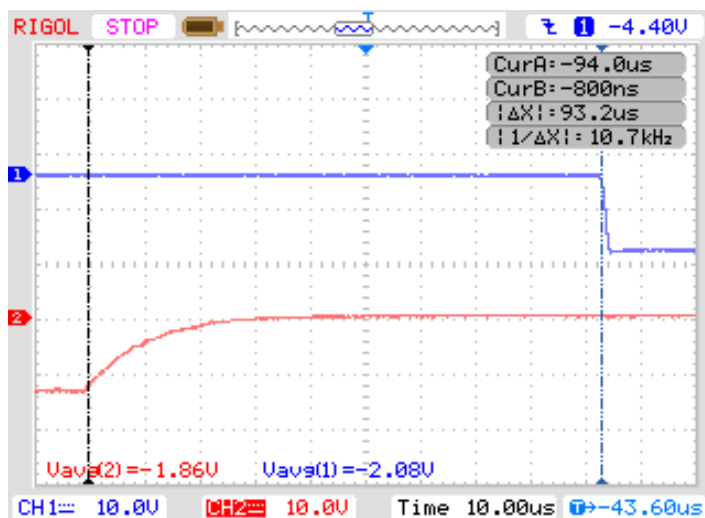


Obr. 6.8: Odezva regulace na skokovou změnu napětí z 5V na 15V

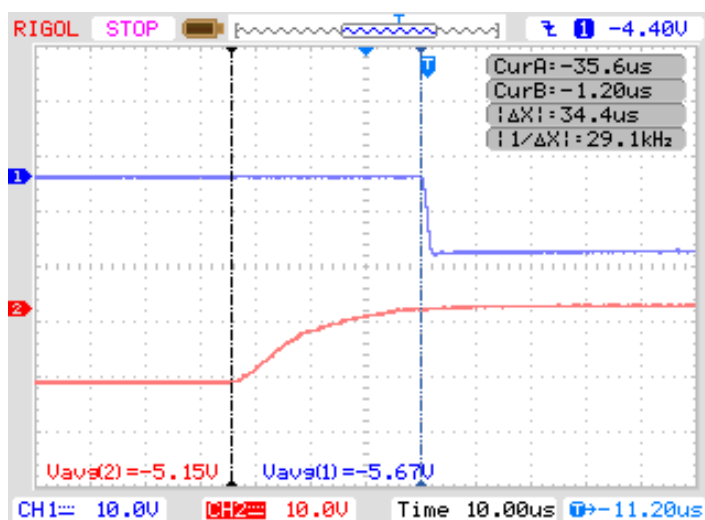


Obr. 6.9: Odezva regulace na skokovou změnu proudu z 15V na 5V

Jak již bylo zmíněno, TrueSwitch je v projektu použit z experimentálních důvodů. Z dosud absolvovaného testování zařízení je chování tohoto zapojení uspokojivé. Úbytek napětí na tomto spínači je $0,175\text{mV}@5\text{A}$. Následující obrázky zobrazují průběhy napětí na řídicích branách TrueSwitch pro 20V konfiguraci vinutí a TrueSwitch pro 40V konfiguraci vinutí. Průběh 6.10 zobrazuje standardní řízené přepnutí konfigurace mikrokontrolérem. Druhý průběh 6.11 zobrazuje stav, kdy se zařízení resetuje při 40V konfiguraci vinutí. Zde je přepnutí provedeno přes přidaný pull-Up na vstup ovládacího obvodu na přepínání konfigurace vinutí. Před přidáním pull-up rezistoru byly v průběhu resetování mikrokontroléru oba TrueSwitch sepnuty.



Obr. 6.10: Standardní průběh přepnutí konfigurace vinutí



Obr. 6.11: Přepnutí ze 40V konfigurace na 20V restartováním mikrokontroléru

6.3 Dosažené parametry zařízení

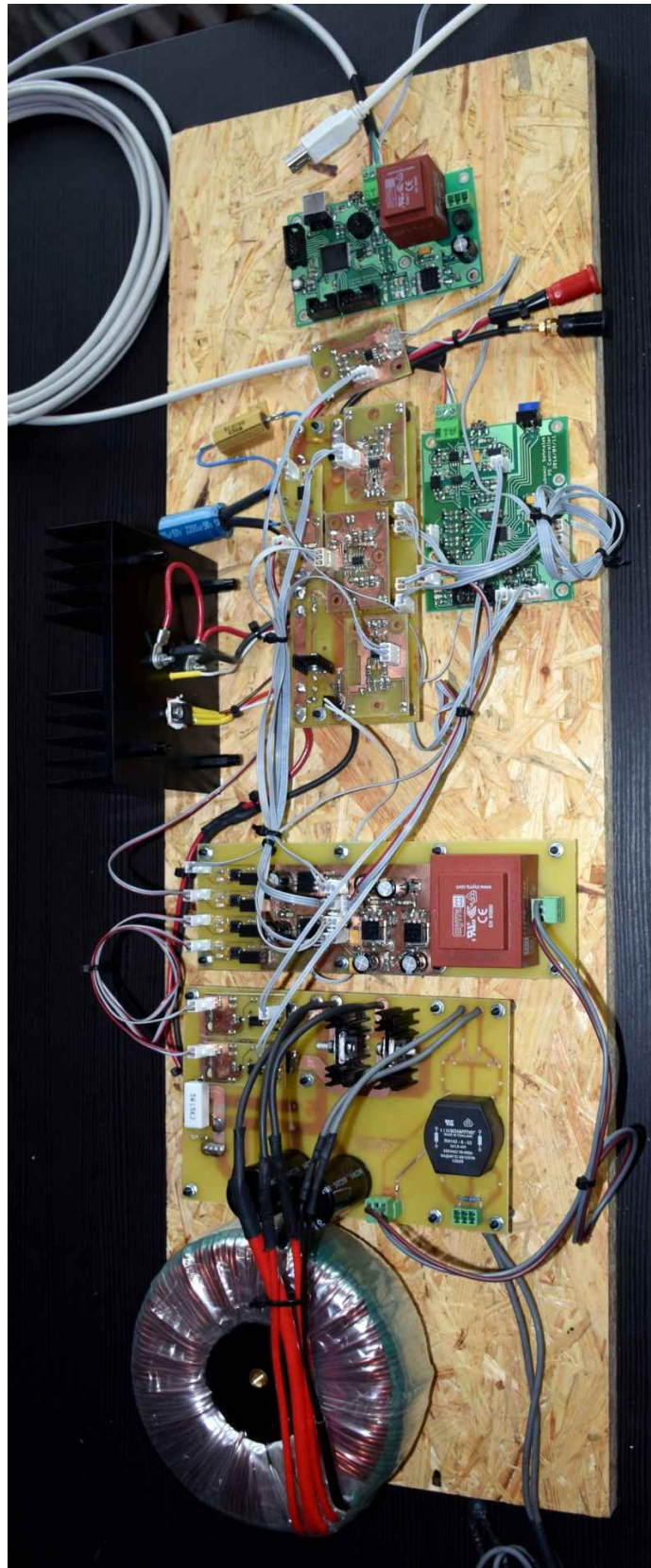
V tabulce 6.1 jsou uvedeny dosažené parametry. K uvedených parametrů lze uvést, že největší slabinou zdroje je nízká dosažitelná přesnost nastavení výstupních parametrů a velké zvlnění výstupního napětí. Na obrázku 6.12 je vyobrazena realizace prototypu zařízení. Toto zařízení mělo ověřit navržené principy, komunikační protokol a firmware. Prototyp je modulární a osazen levnými konektory. Jako další krok pro zlepšení přesnosti je integrovat návrh modulu výkonového zdroje, co nejvíce používat stíněné vodiče a konektory pro vedení měřících signálů. Dále je nutné odstranit

problém s rušením v pomocném napájecím napětí, což přinese další velké zlepšení.

Parametr	
Max. U;I;P	40V;3A;120W
Přesnost U;I	$-120mV$; $-175mA$
Zvlnění U;I	$\leq 52mV_{rms}$; $\leq 150mA_{rms}$
Rozhraní	USB
Cena [Kč]	cca. 7000 ¹

Tab. 6.1: Parametry realizovaného zařízení

¹Cena není konečná, v ceně není zahrnuto krytování a adekvátní chladicí jednotky



Obr. 6.12: Prototyp modulu výkonového zdroje spolu s ovládacím modulem

7 ZÁVĚR

V této práci byl čtenář nejdříve seznámen s požadavky na laboratorní napájecí zdroje, jejich dvěma nejtypičtějším principy regulace a jejich výhodami a nevýhodami. Dále byla popsána historie a možnosti vzdáleného řízení přístrojové techniky. Byly srovnány jednotlivé druhy rozhraní pro vzdálené řízení. Problematika zdrojů byla zakončena srovnáním několika zdrojů dostupných na trhu, které jsou svými parametry podobné navrhovanému v této práci.

Práce dále pokračovala návrhem jednotlivých bloků napájecího zdroje se vzdáleným řízením. Zpočátku byly definovány vlastnosti a parametry navrhovaného řešení. Z těchto požadavků byly pak navrženy bloky a celková koncepce navrhovaného zařízení. Bylo zde podrobně popsáno rozhraní USBTMC sloužící pro vzdálené řízení laboratorního zdroje. Dále byla popsána vybraná metoda řízení výstupních veličin (U a I) pomocí dvou OZ a také generování řídicích napětí mikrokontrolérem. Návrh byl zakončen definicí příkazů SCPI pro vzdálené řízení.

Dále následovala realizace HW všech částí navrhovaného řešení. Součástí realizace bylo i dimenzování a výběr jednotlivých komponent do výkonové části zařízení, a také výběr vhodných mikrokontrolérů. V této části byly také popsány použité zajímavá obvodová řešení. Jsou zde také spočítány teoreticky dosažitelné parametry zdroje, které jsou $U_O = 41V$ a $I_O = 10A$. Proud je omezen na tuto hodnotu na úkor snížení výstupní regulované veličiny.

Asi nejobjemnější částí této práce je firmware ovládacího modulu a modulu výkonového zdroje. První část je věnována komunikačnímu schématu a návrhu komunikačního protokolu mezi výkonovou částí zdroje a jeho ovládacím modulem. Dále práce popisuje běh hlavní části programu obou modulů. Také popisuje dekódování SCPI příkazu a parametru. Definuje limity shody standardu SCPI, protože nejsou podporovány všechny formy SCPI parametru. Je zde také popsán princip regulace požadovaných veličin.

Prototyp modulárního napájecího zdroje s ovládacím modulem byl zkonstruován i přes nemalé komplikace. Například s nestabilitou regulace, rušením v pomocné napájecí síti a několika návrhovými chybami. Mezi návrhové chyby patřilo chybně navržené pozdro LM 337 či opomenutý kondenzátor na výstupu regulátoru. Naopak hladce šlo propojení a komunikace modulů ovládaní a výkonového zdroje. Je pravdou, že na FW bylo stráveno nejvíce času v poměru k ostatním částem zařízení. Prototyp ověřil navržené principy, odzkoušel kód pro spracování SCPI příkazů, a také navržený komunikační protokol.

Zařízení bylo měřeno jen do $3A@40V$ nebo $5A@20V$ z důvodu použití poddimenzovaných chladících prvků. S ohledem na kvalitu výstupních veličin zdroje nelze hovořit o laboratorním zařízení. Do budoucna se počítá s přepracováním výkonové

části s velkým důrazem na miniaturizaci, přepracování návrhu pomocného napájení a vylepšení regulačních a měřících obvodů. S výsledkem práce jsem spokojen.

LITERATURA

- [1] National Instruments *Instrument Bus Performance – Making Sense of Competing Bus Technologies for Instrument Control* [online]. 2012, poslední aktualizace 1. 10. 2012 [cit. 15. 5. 2016]. Dostupné z URL: <<http://www.ni.com/white-paper/3509/en/>>.
- [2] Wikipedie *Stabilizátor napětí* [online]. 2016, poslední aktualizace 25. 2. 2016 [cit. 15. 5. 2016]. Dostupné z URL: <https://cs.wikipedia.org/wiki/Stabilizátor_napětí>.
- [3] Farnell CZ *e-shop* [online]. 2016, poslední aktualizace 27. 4. 2016 [cit. 15. 5. 2016]. Dostupné z URL: <<http://cz.farnell.com/>>.
- [4] usb.org *Universal Serial Bus Specification, Revision 2.0* [online]. 2000, poslední aktualizace 27. 4. 2000 [cit. 15. 5. 2016]. Dostupné z URL: <<http://www.usb.org/>>.
- [5] usb.org *USB Test and Measurement Class Specification, Revision 1.0* [online]. 2001, poslední aktualizace 14. 3. 2003 [cit. 15. 5. 2016]. Dostupné z URL: <<http://www.usb.org/>>.
- [6] usb.org *USB Test and Measurement Class USB488 subclass specification, Revision 1.0* [online]. 2001, poslední aktualizace 14. 3. 2003 [cit. 15. 5. 2016]. Dostupné z URL: <<http://www.usb.org/>>.
- [7] Atmel Corporation *AVR USB Series6⁶7software library template* [online]. 2008, poslední aktualizace 3. 11. 2008 [cit. 15. 5. 2016]. Dostupné z URL: <<http://www.atmel.com/>>.
- [8] Atmel Corporation *ATmega328PB* [online]. 2015, poslední aktualizace 1. 10. 2015 [cit. 15. 5. 2016]. Dostupné z URL: <<http://www.atmel.com/>>.
- [9] Atmel Corporation *AT90USB1286* [online]. 2012, poslední aktualizace 1. 8. 2012 [cit. 15. 5. 2016]. Dostupné z URL: <<http://www.atmel.com/>>.
- [10] Atmel Corporation *Atmel Studio 7* [online]. 2016, poslední aktualizace 1. 2. 2016 [cit. 15. 5. 2016]. Dostupné z URL: <<http://www.atmel.com/>>.
- [11] IVI Foundation *Standard Commands for Programmable Instruments* [online]. 1999, poslední aktualizace 1. 5. 1999 [cit. 15. 5. 2016]. Dostupné z URL: <<http://www.ivifoundation.org/>>.

- [12] Wikipedie *Standard Commands for Programmable Instruments* [online]. 2015, poslední aktualizace 7. 4. 2015 [cit. 15. 5. 2016]. Dostupné z URL: <[https://cs.wikipedia.org/wiki/Střída_\(elektronika\)](https://cs.wikipedia.org/wiki/Střída_(elektronika))>.
- [13] KREJČIŘÍK, Alexandr *Napájecí zdroje I., 1. vydání*. Praha: 1996, poslední aktualizace 30. 8. 1996 [cit. 15. 5. 2016].
- [14] BORDOVSKÝ, Tomáš *Elektronická zátěž s digitálním řízením: diplomová práce*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, Ústav radioelektroniky, 2012. 93 s. Vedoucí práce byl Ing. Michal Kubíček, Ph.D. [cit. 15. 5. 2016].

SEZNAM SYMBOLŮ, VELIČIN A ZKRATEK

USB	Universal Serial Bus
USBTMC	Universal Serial Bus Test and Measurement Class
HP-IB	HP Interface Bus
GPIB	General Purpose Interface Bus
IEEE	Institute of Electrical and Electronics Engineers
IEEE-488	Standard Digital Interface for Programmable Instrumentation
IEEE-488.2	Standard Codes, Formats, Protocols, and Common Commands
SCPI	Standard Commands for Programmable Instrumentation
API	Application Programming Interface
VISA	Virtual Instrument Software Architecture
UART	Universal Asynchronous Receiver Transmitter
TTL	Transistor Transistor Logic
DAC	Digital to Analog Converter
ADC	Analog to Digital Converter
PWM	Pulse Width Modulation
OZ	Operační Zesilovač
DPS	Deska Plošných Spojů
SPI	Serial Peripheral Interface
ISP	In-System Programming
FW	Firmware
ACK	Acknowledgement
NACK	Negativ-Acknowledgement

SEZNAM PŘÍLOH

A HW modulu výkonového zdroje	68
A.1 Výběr stěžejních analogových komponentů	68
A.2 Schémata	73
A.3 Desky plošných spojů	83
B HW modulu ovládní	99
B.1 Schéma	99
B.2 Deska plošných spojů	100
C Obsah přiloženého CD	103

A HW MODULU VÝKONOVÉHO ZDROJE

A.1 Výběr stěžejních analogových komponentů

Usměrňovací dioda

Požadavky:

$$U_R > 2 \cdot U_{MAX} > 120V$$

$$I_F > I_{MAX} > 15A$$

Vybraný komponent MBR40250[3]:

$$U_F = 0.86V$$

$$U_R = 250V$$

$$I_F = 40A$$

U_F - napětí v propustném směru

U_R - závěrné napětí

I_F - proud v propustném směru

Filtrační kondenzátor

Pro dvoucestné usměrnění lze podle vzorce A.1[13]

$$C_F = 300 \cdot \frac{I_{MAX}}{p \cdot U_{MAX}} \text{ [}\mu F; mA, \%, V\text{]} \quad (A.1)$$

Požadavky:

$$U_C > U_{MAX} > 60V$$

$$p < 10\%$$

$$C_F > 7.8mF$$

Vybraný komponent MCGPR63V478M25X42[3]:

$$U_C = 63V$$

$$C_F = 4.7mF$$

$$C_{F_{celk}} = 2 \cdot C_F$$

U_C - jmenovité napětí kondenzátoru

p - požadavek na zvlnění u běžných napájecích zdrojů podle[13]

C_F - minimální kapacita kondenzátoru

C_F - kapacita kondenzátoru

$C_{F_{celk}}$ - součet kapacit paralelně řazených kondenzátorů

Spínací prvek - Dual MOSFET P-kanál

Požadavky:

$$U_{DS} > U_{MAX} > 60V$$

$$I_D > I_{MAX} > 15A$$

Vybraný komponent SUM55P06-19L-E3[3]:

$$U_{DS} = -60V$$

$$I_D = -55A$$

$$R_{DS(on)} = 0.019\Omega$$

$$U_{DS(on)} = 2 \cdot I_{MAX} \cdot R_{DS(on)} = 0.57V@15A$$

U_{DS} - maximální napětí mezi Drain a Source

I_D - maximální proud drainu

$R_{DS(on)}$ - odpor v sepnutém stavu

$U_{DS(on)}$ - úbytek napětí v sepnutém stavu na 2 tranzistorech

Regulační NPN tranzistor

Požadavky:

$$U_{CE} > U_{MAX} > 60V$$

$$I_C > I_{MAX} > 15A$$

Vybraný komponent 25886G[3]:

$$\begin{aligned}U_{CE} &= 80V \\I_C &= 25A \\h_{21} &= 20@I_C = 10A \\P_D &= 200W \\U_{CEsat} &= 1V@I_C = 15A, I_B = 1.5A\end{aligned}$$

U_{CE} - napětí kolektor - emitor
 I_C - proud kolektorem
 h_{21} - proudový zesilovací činitel
 P_D - maximální ztrátový výkon
 U_{CEsat} - saturační úbytek napětí kolektor - emitor

Budící PNP tranzistor pro regulační tranzistor

$$I_B = \frac{I_{h_{21}}}{I_B} \tag{A.2}$$

Požadavky:

$$\begin{aligned}U_{CE} &> U_{MAX} > 60V \\I_C &> \frac{I_{MAX}}{h_{21} - T_{reg}} > 0.75A\end{aligned}$$

Vybraný komponent D45H8[3]:

$$\begin{aligned}U_{CE} &= -60V \\I_C &= -8A \\h_{21} &= 60@I_C = -2A \\P_D &= 60W \\U_{CEsat} &= -1V\end{aligned}$$

U_{CE} - napětí kolektor - emitor
 I_C - proud kolektorem
 h_{21} - proudový zesilovací činitel

P_D - maximální ztrátový výkon
 U_{CEsat} - saturační úbytek napětí kolektor - emitor

Řídící NPN tranistor

Požadavky:

$$U_{CE} > U_{MAX} > 60V$$

$$I_C > \frac{I_{C-Tbudic}}{h_{21} - Tbudic} > 0.0125A$$

Vybraný komponent 2N4922G[3]:

$$U_{CE} = 60V$$

$$I_C = 1A$$

$$h_{21} = 40@I_C = 50mA$$

$$P_D = 30W$$

$$U_{CEsat} = 0.6V$$

U_{CE} - napětí kolektor - emitor

I_C - proud kolektorem

h_{21} - proudový zesilovací činitel

P_D - maximální ztrátový výkon

U_{CEsat} - saturační úbytek napětí kolektor - emitor

Dvojitý regulační OZ

Požadavky:

$$0V \leq U_{OUT} \leq 5V$$

Vybraný komponent ADA4077-2[3]:

$$U_{SUPP} = \pm 15V$$

$$2 \times OZv1$$

$$U_{DROP} = 1.5V$$

U_{OUT} - rozsah napětí výstupů OZ(Operační Zesilovač)

U_{SUPP} - napájecí napětí OZ

U_{DROP} - úbytek napětí mezi napájením a výstupem při max. výst. napětí

Přístrojový měřicí OZ

Požadavky:

$$0V \leq U_{OUT} \leq 5V$$

Vybraný komponent AD8422ARZ[3]:

$$U_{SUPP} = \pm 18V$$

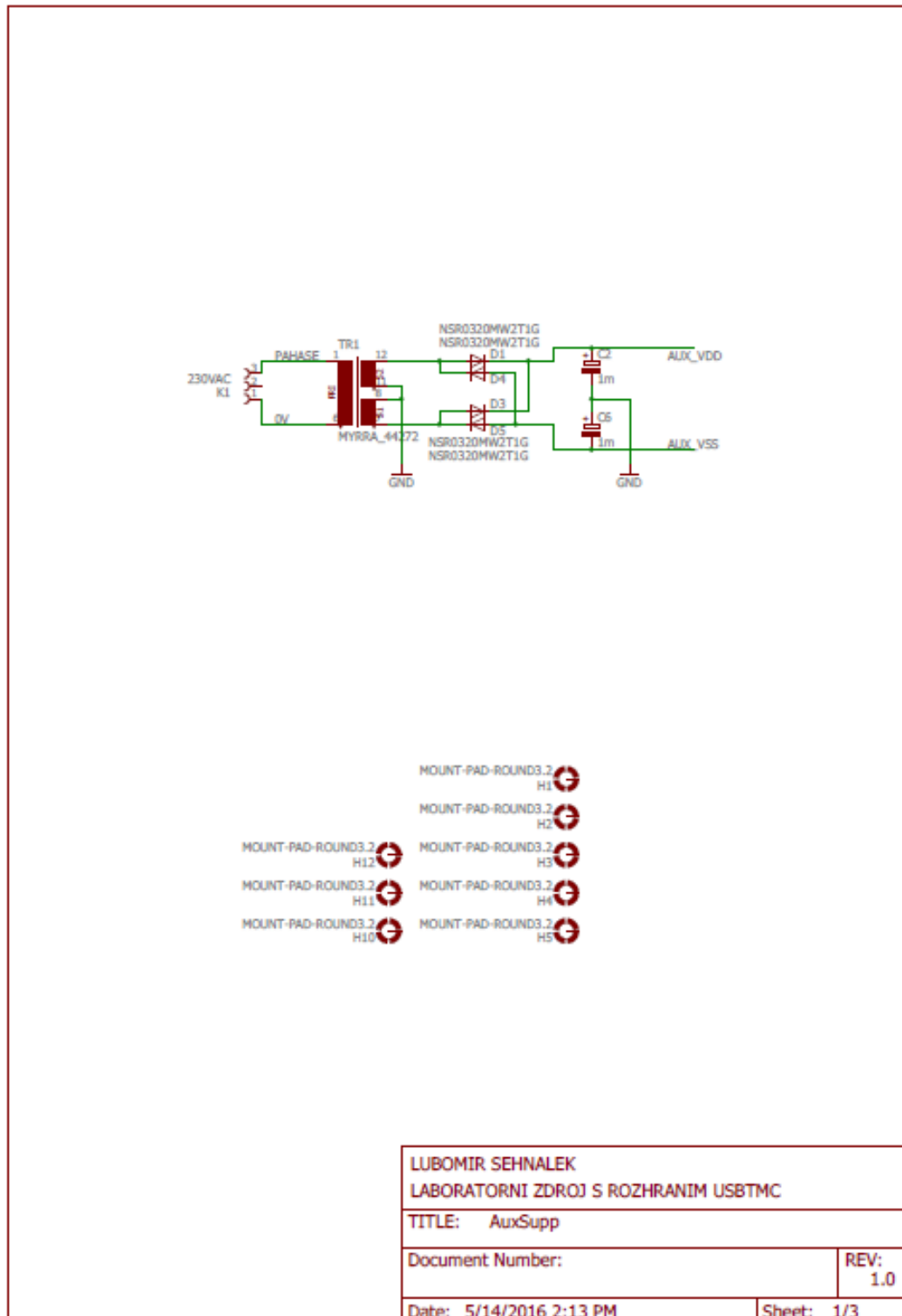
$$U_{DROP} = 0V$$

U_{OUT} - rozsah napětí výstupu OZ

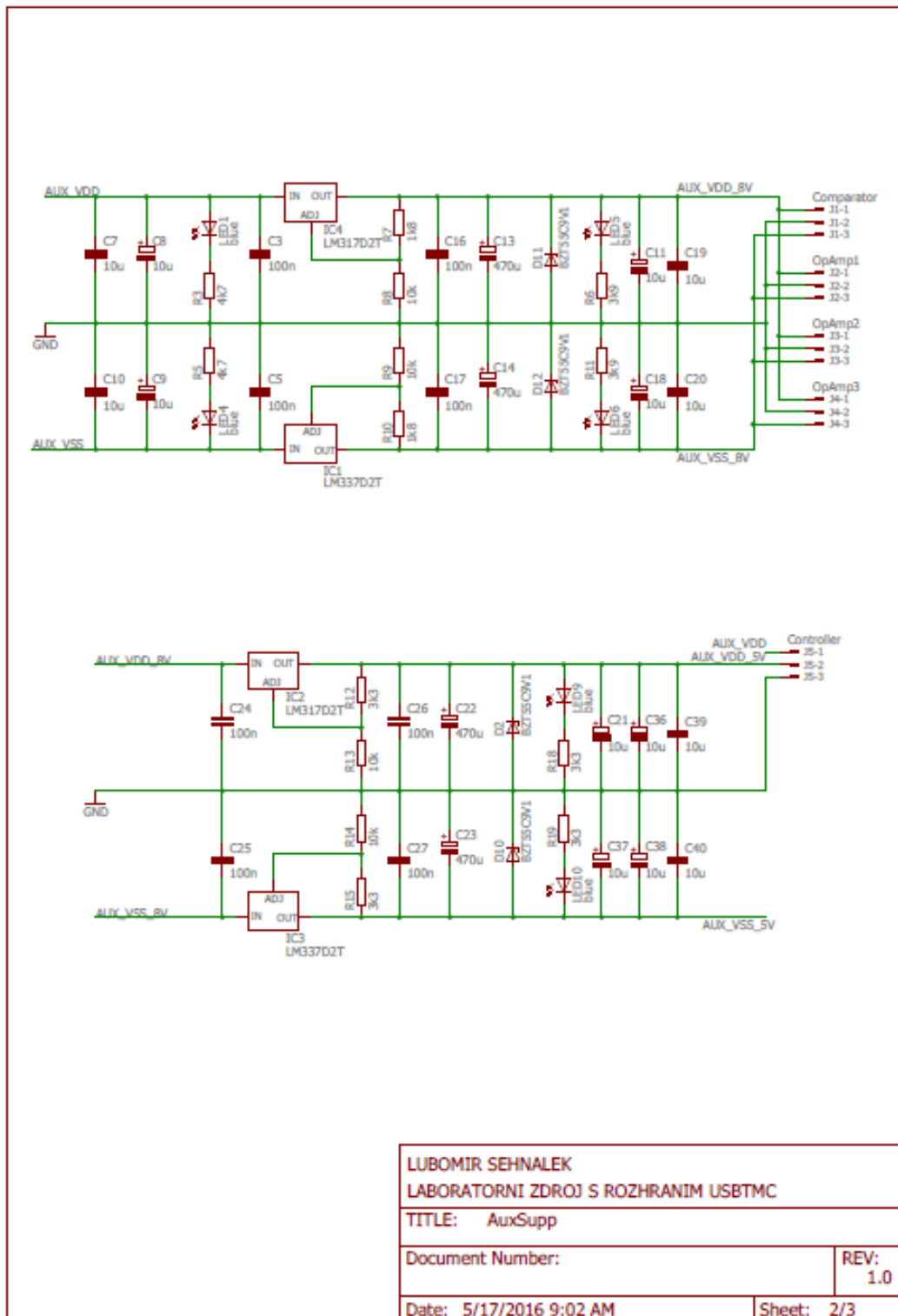
U_{SUPP} - napájecí napětí OZ

U_{DROP} - úbytek napětí mezi napájením a výstupem při max. výst. napětí

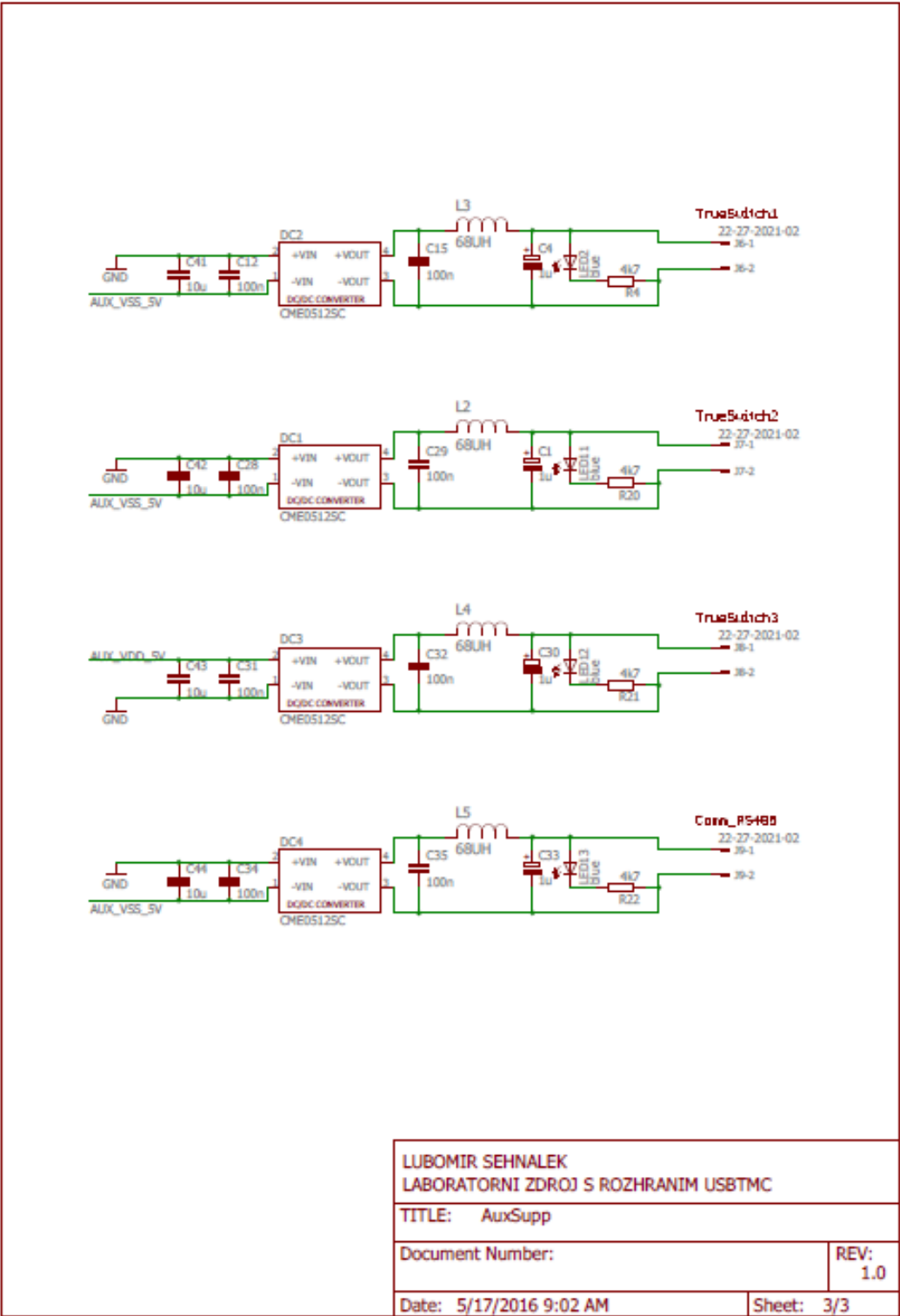
A.2 Schémata



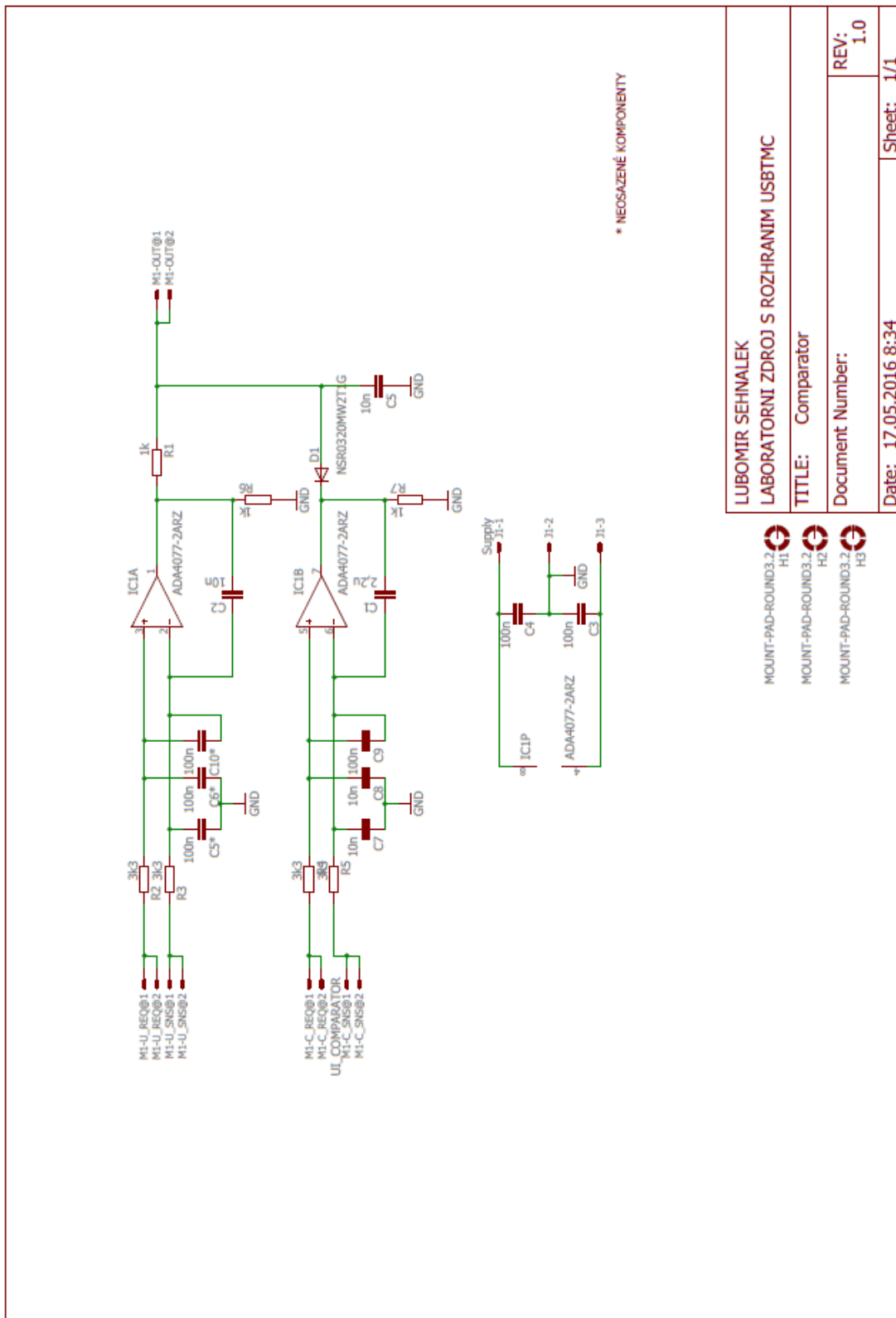
Obr. A.1: Schéma pomocného napájení 1/3



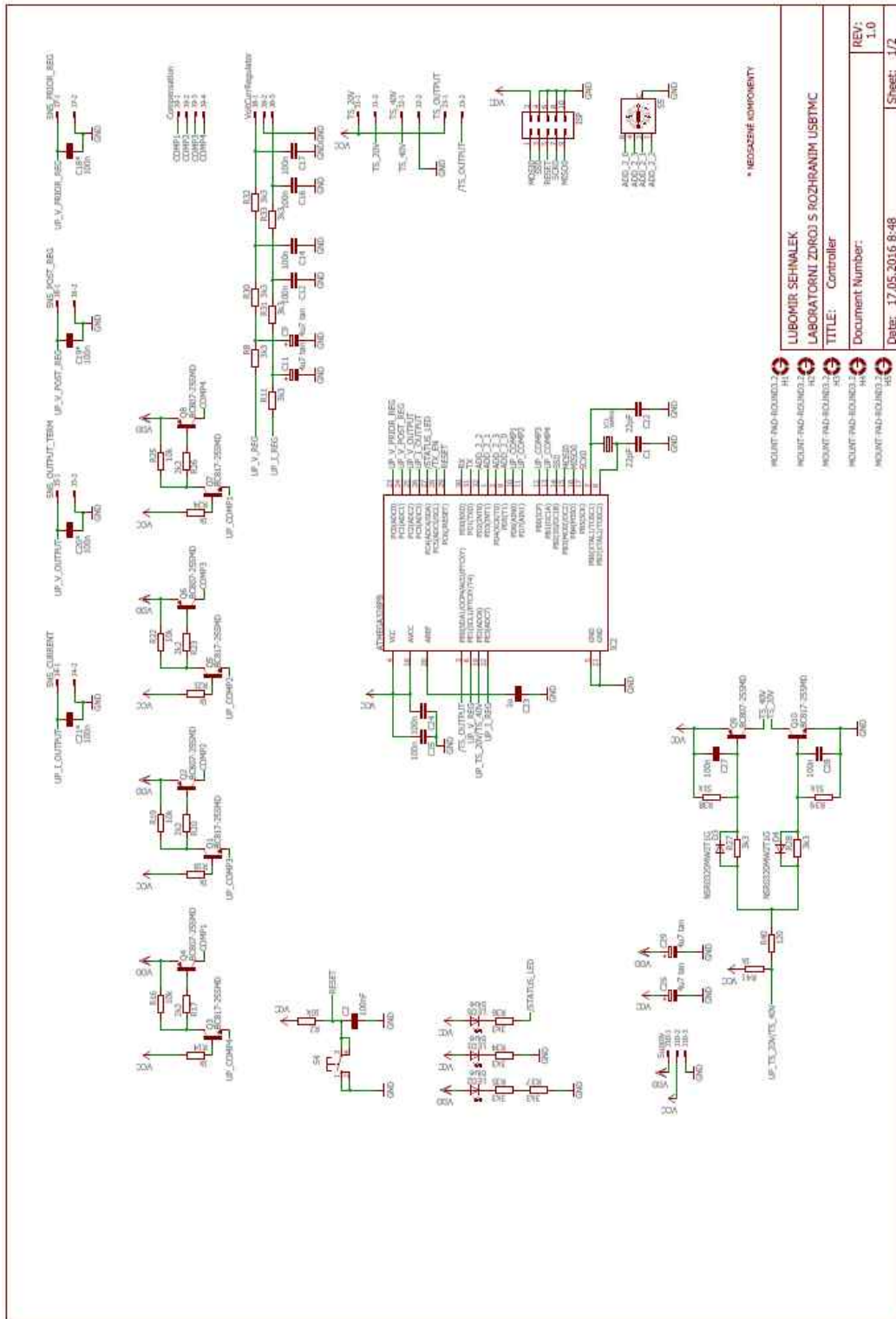
Obr. A.2: Schéma pomocného napájenia 2/3



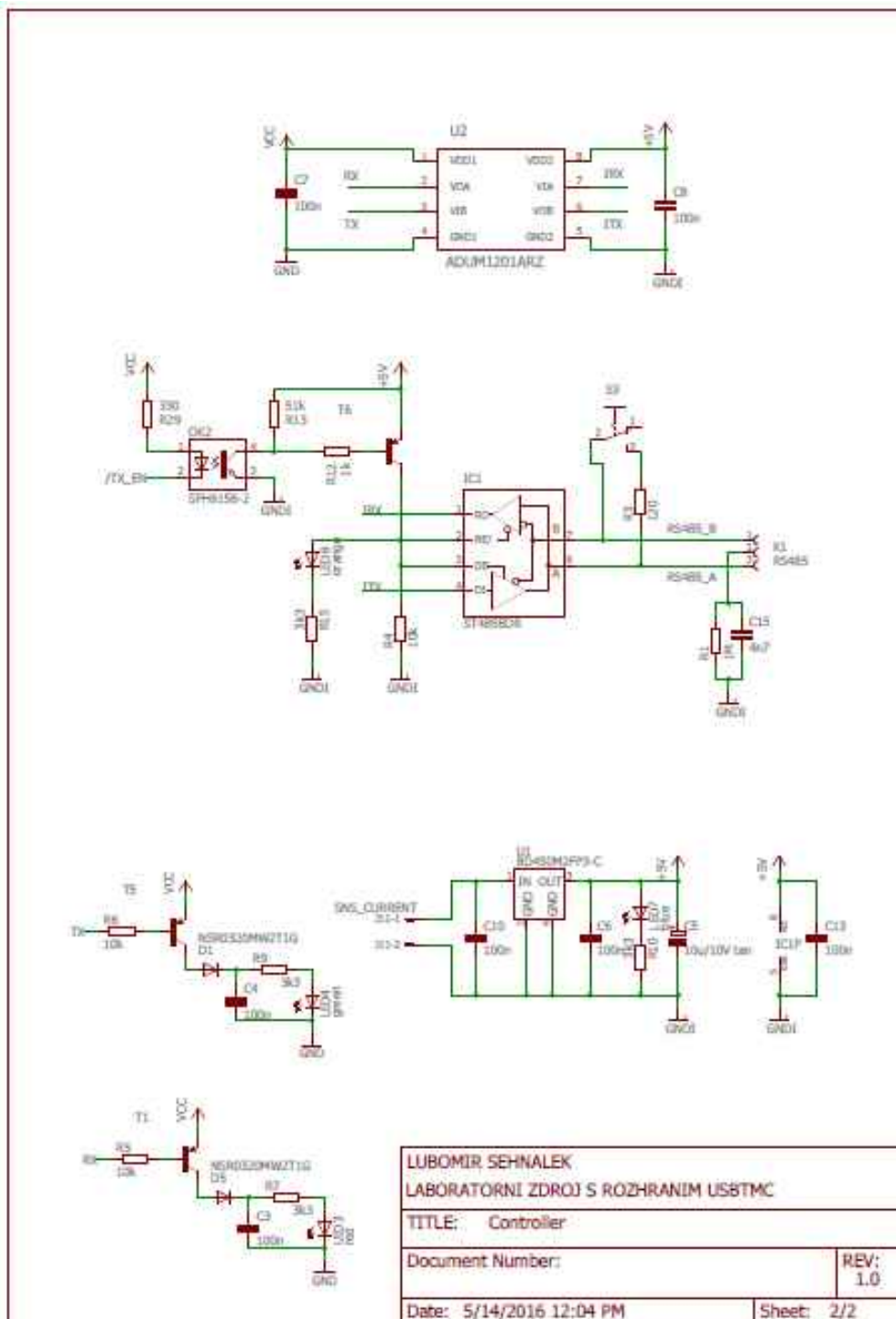
Obr. A.3: Schéma pomocného napájení 3/3



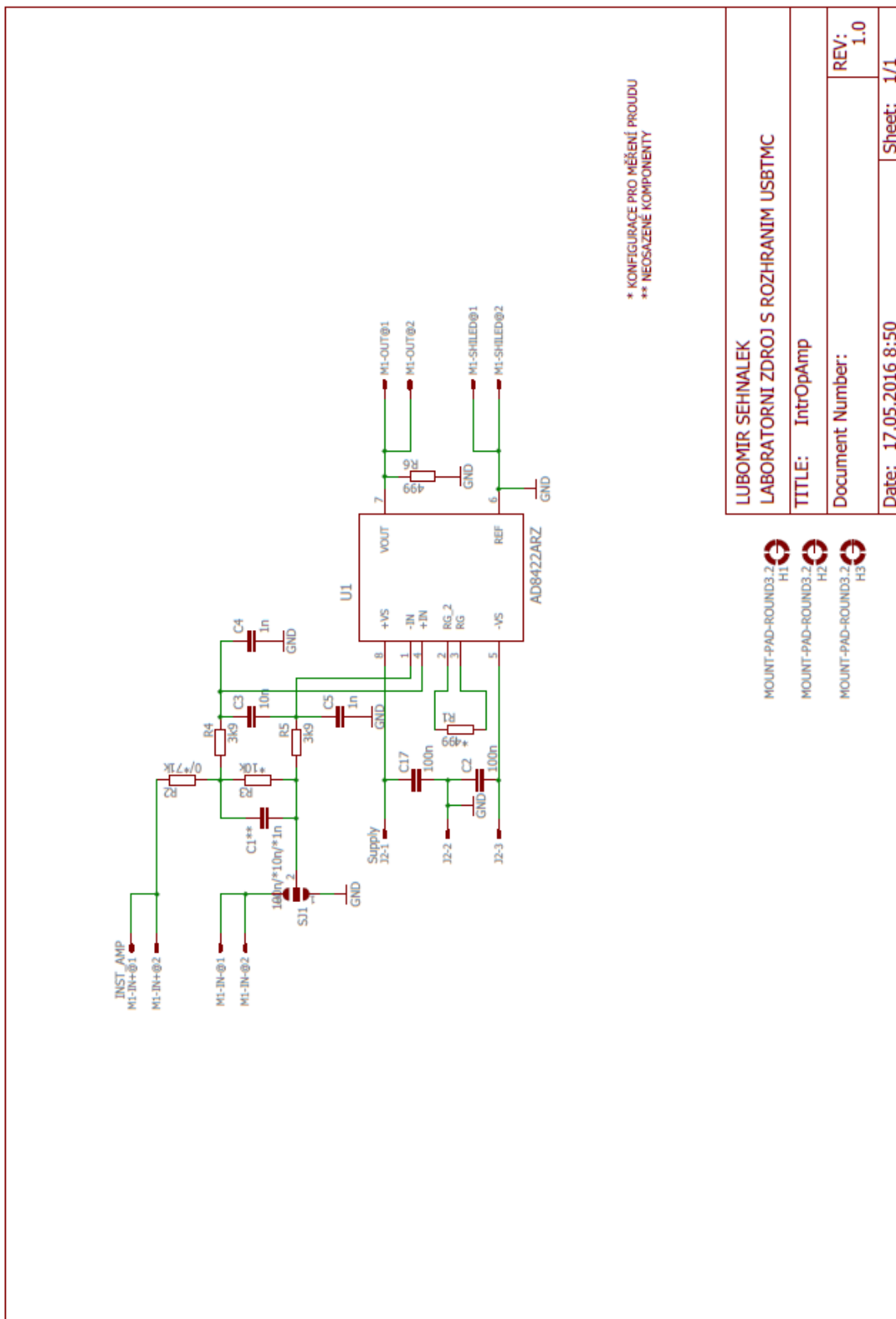
Obr. A.4: Schéma regulačních komparátorů



Obr. A.5: Schéma kontroléru výkonového zdroje 1/2



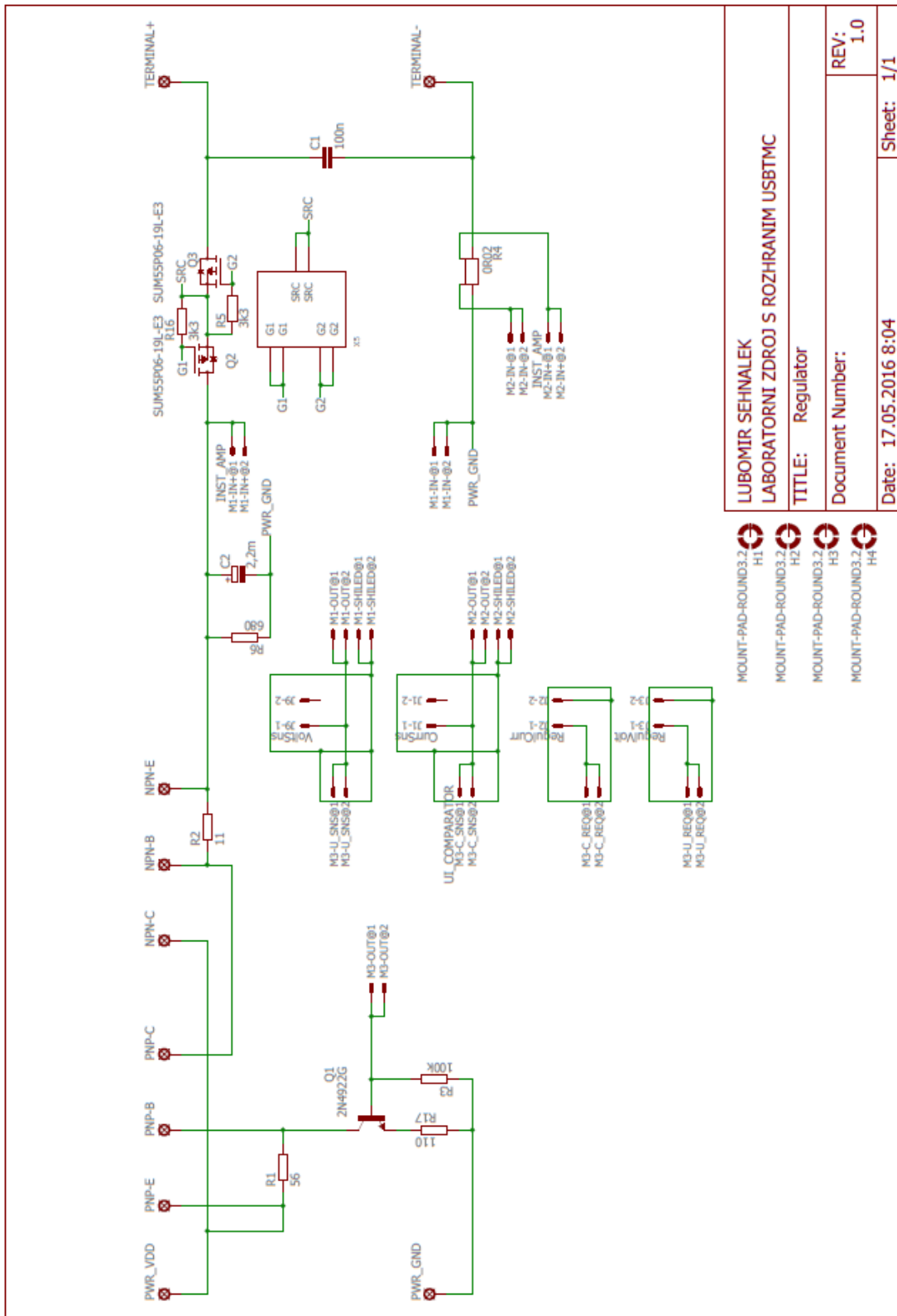
Obr. A.6: Schéma kontroléru výkonového zdroje 2/2



LUBOMIR SEHNALEK LABORATORNI ZDROJ S ROZHRANIM USBTMC	
TITLE: IntraOpAmp	
Document Number:	REV: 1.0
Date: 17.05.2016 8:50	Sheet: 1/1

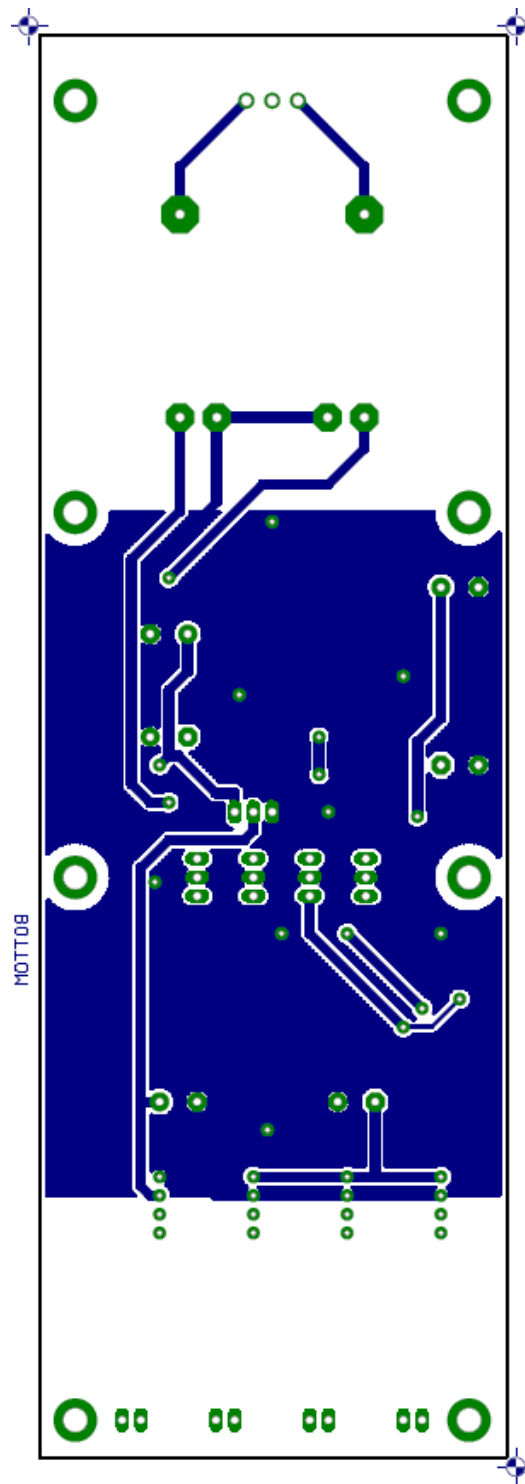
- MOUNT-PAD-ROUNDS3.2 H1
- MOUNT-PAD-ROUNDS3.2 H2
- MOUNT-PAD-ROUNDS3.2 H3

Obr. A.7: Schéma měřícího modulu elektrických veličin

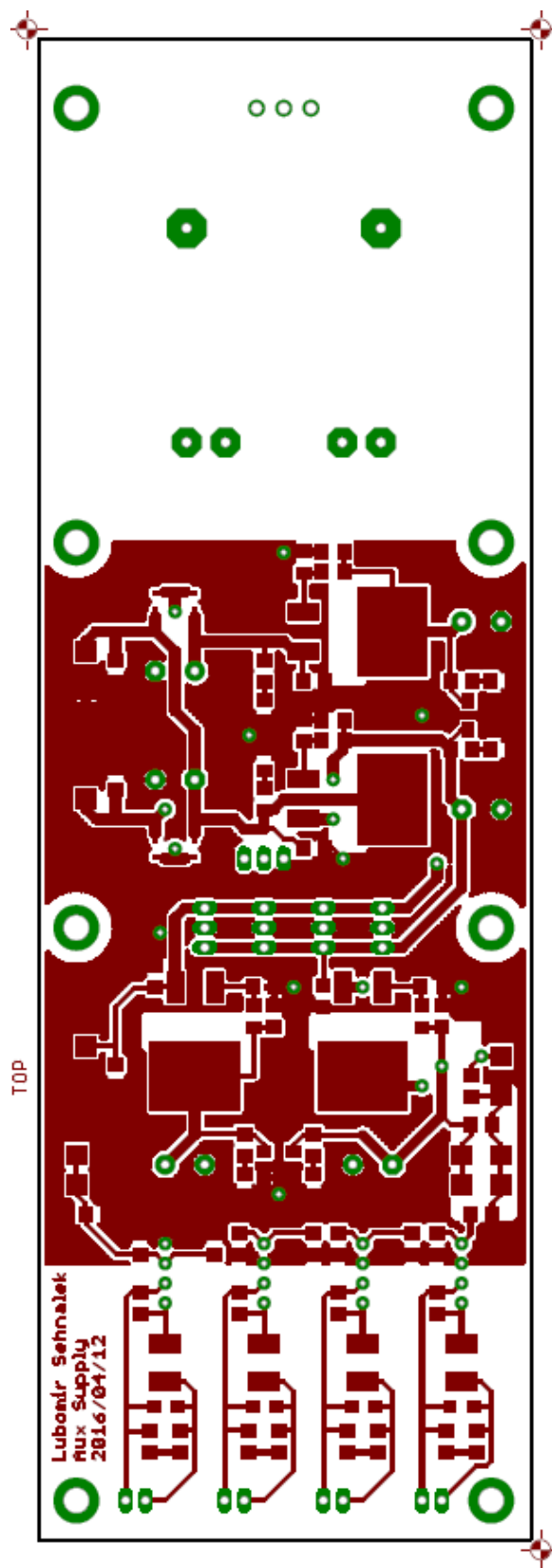


Obr. A.9: Schéma modulu výkonové části regulátoru

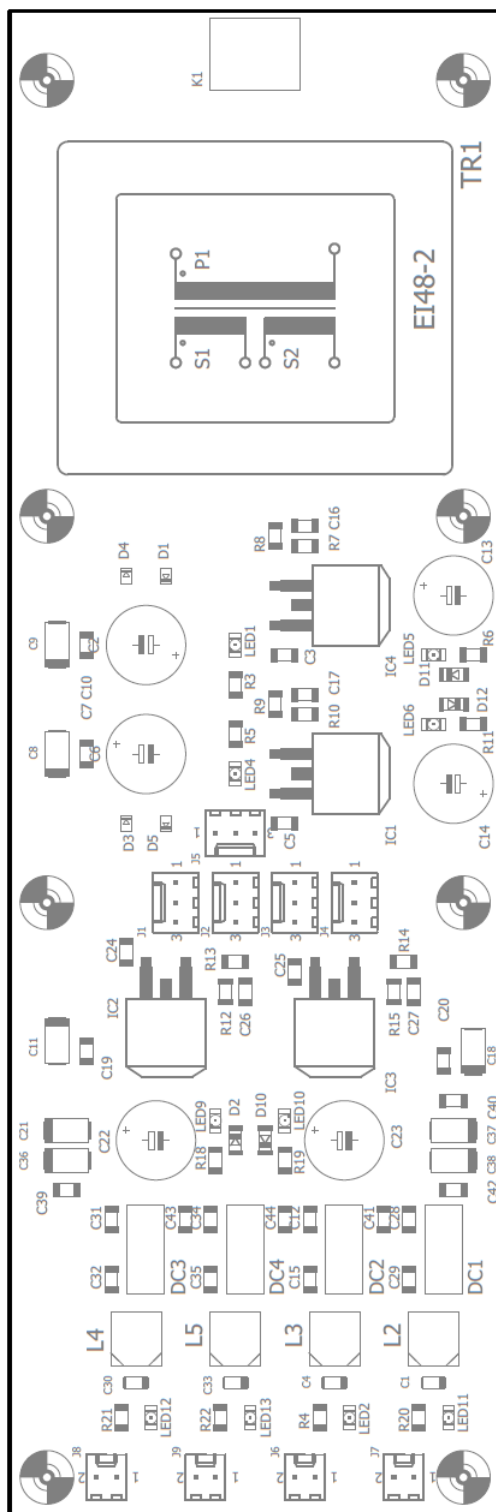
A.3 Desky plošných spojů



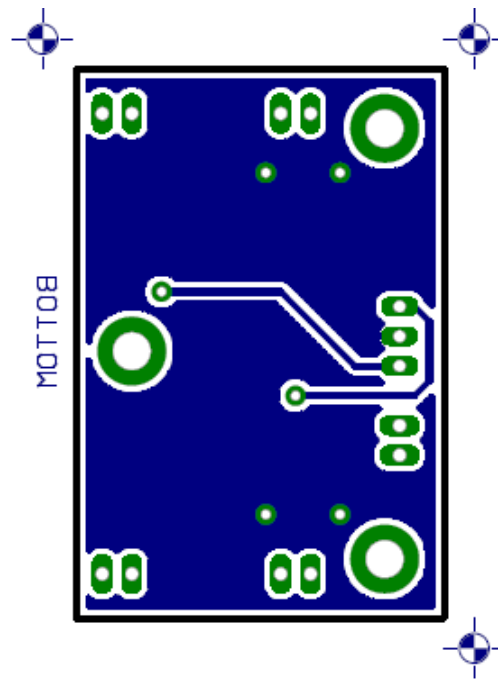
Obr. A.11: Spodní vrstva DPS pomocného napájení



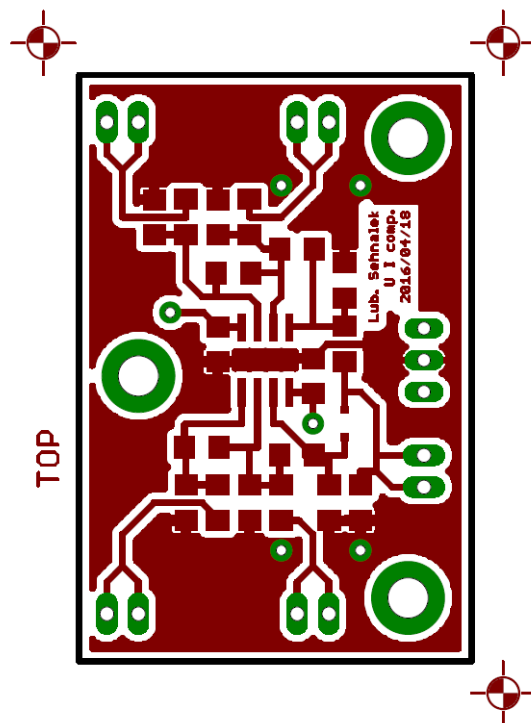
Obr. A.12: Horní vrstva DPS pomocného napájení



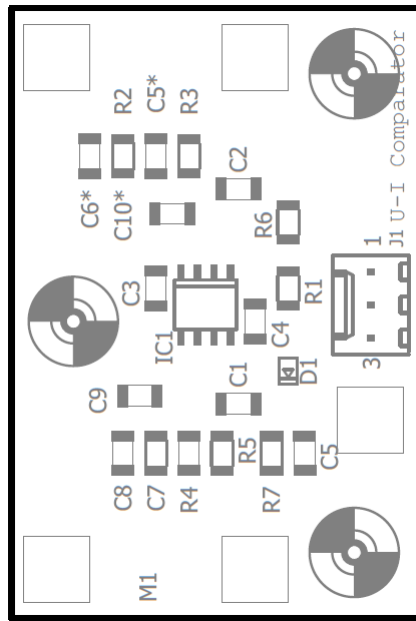
Obr. A.13: Vrstva součástek DPS pomocného napájení



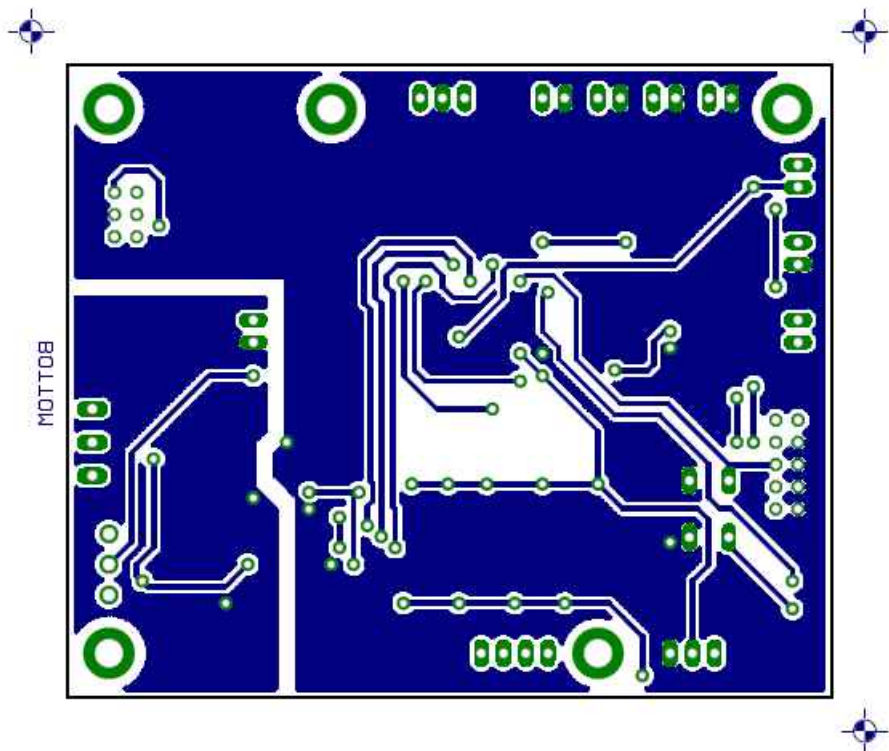
Obr. A.14: Spodní vrstva DPS regulačních komparátorů



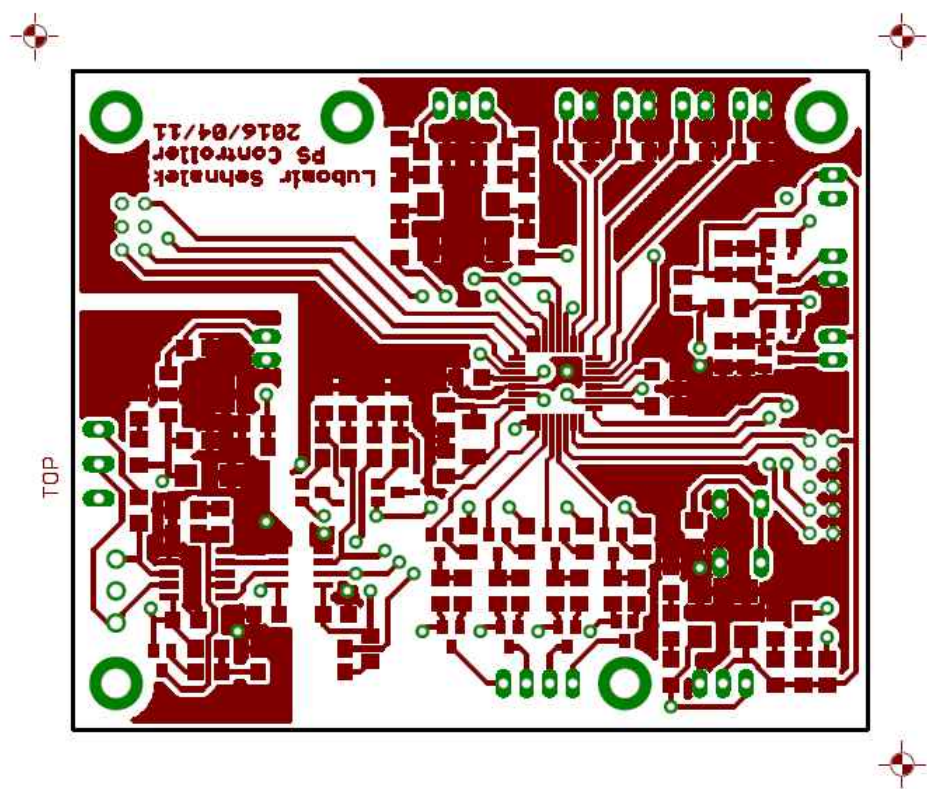
Obr. A.15: Horní vrstva DPS regulačních komparátorů



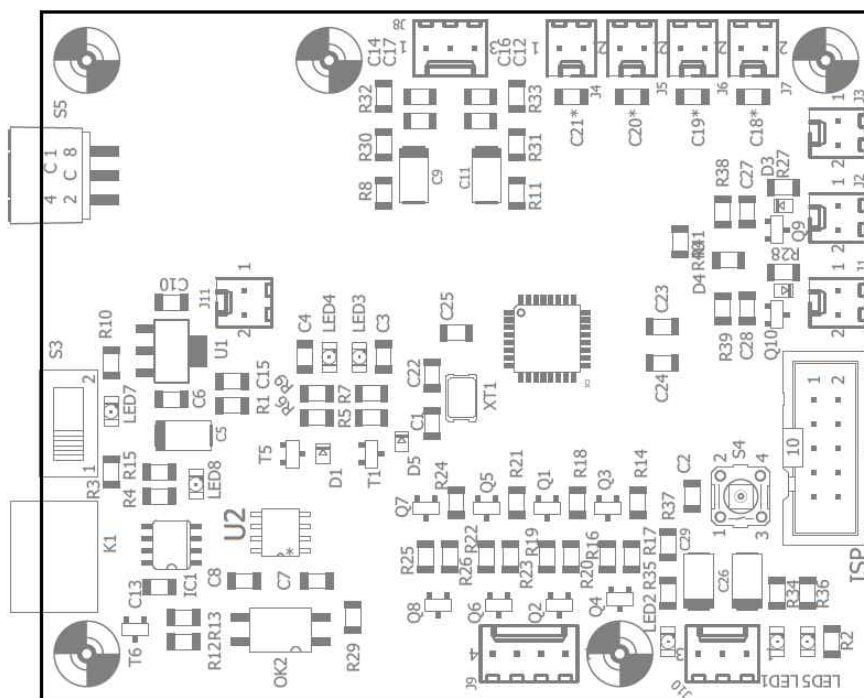
Obr. A.16: Vrstva součástek DPS regulačních komparátorů



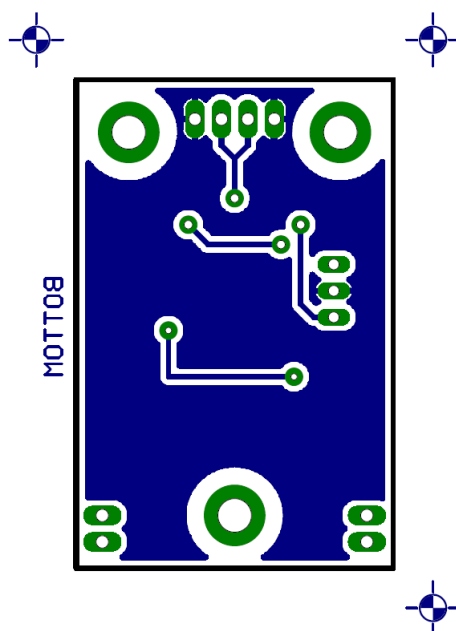
Obr. A.17: Spodní vrstva DPS kontroléru



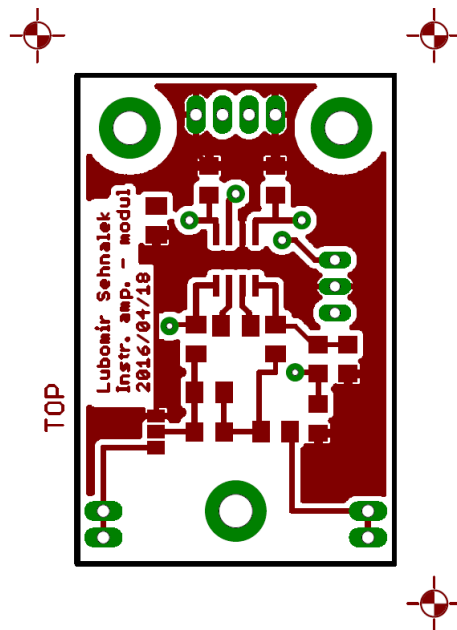
Obr. A.18: Horní vrstva DPS kontroléru



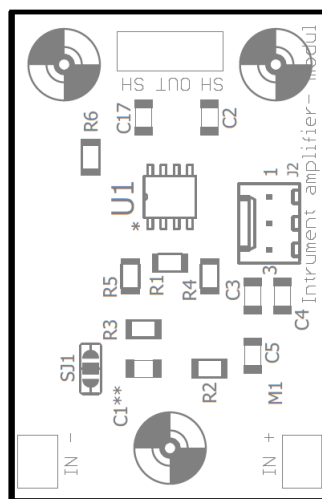
Obr. A.19: Vrstva součástek DPS kontroléru



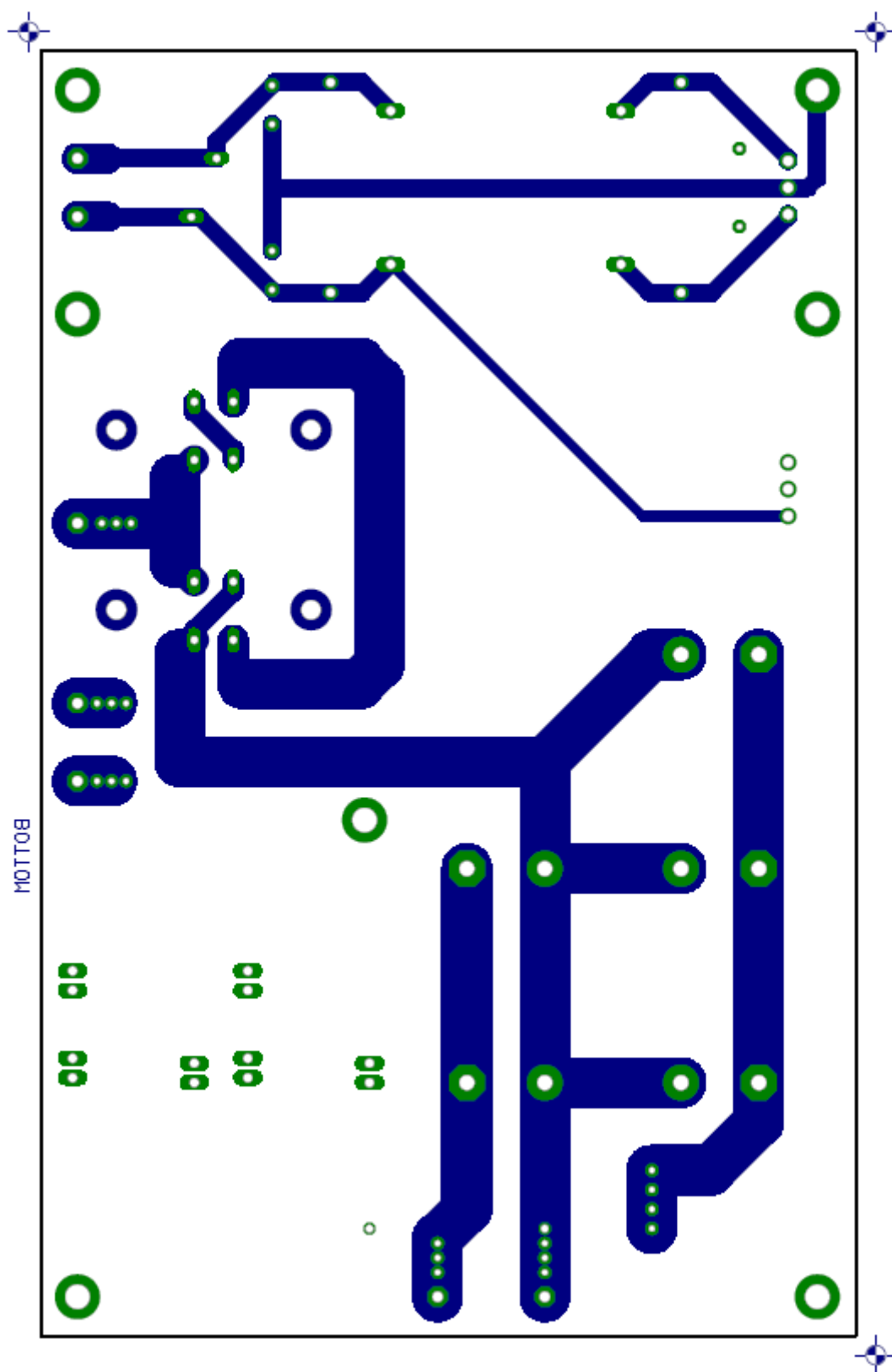
Obr. A.20: Spodní vrstva DPS instrumentálního zesilovače



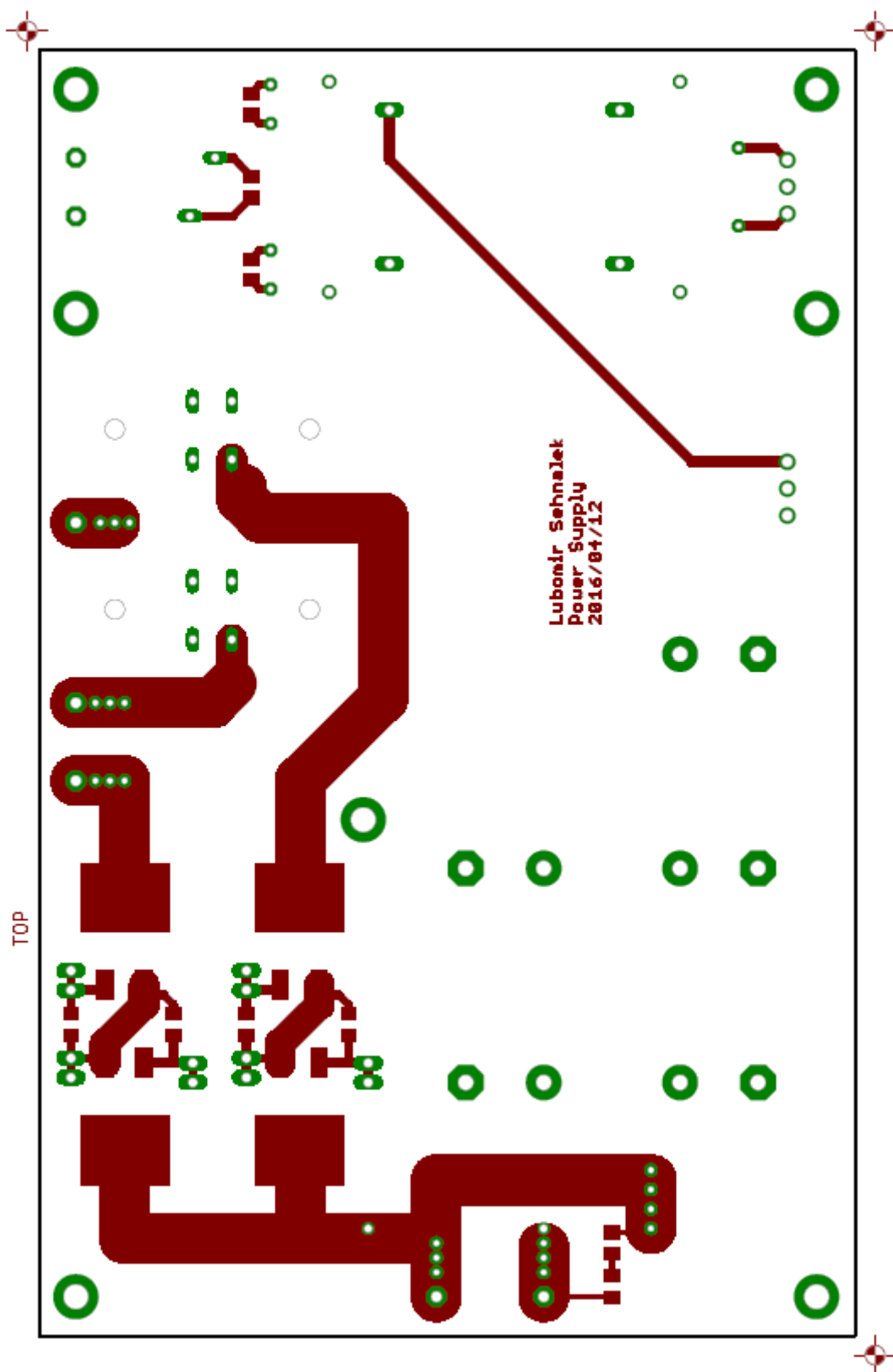
Obr. A.21: Horní vrstva DPS instrumentálního zesilovače



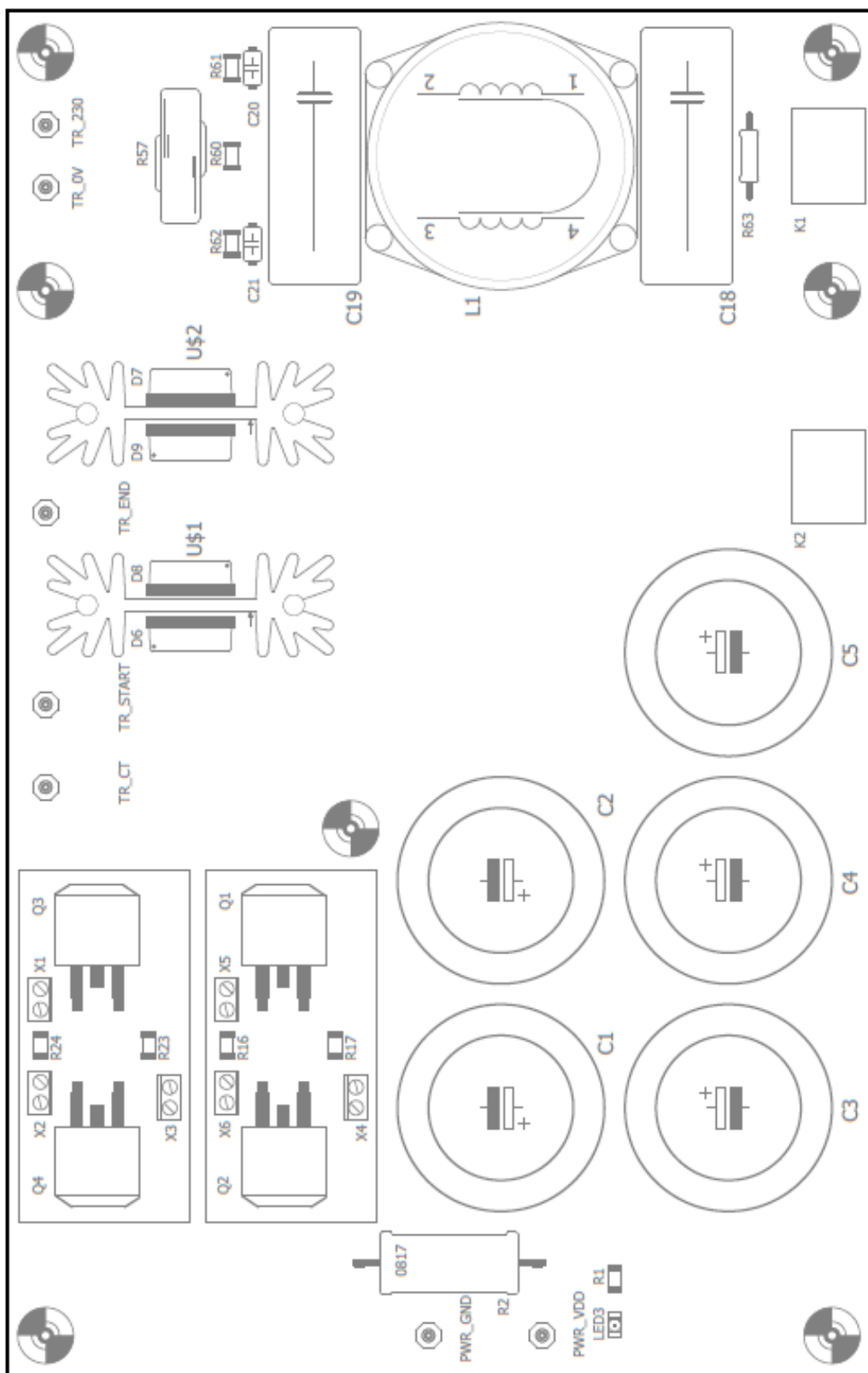
Obr. A.22: Vrstva součástek DPS instrumentálního zesilovače



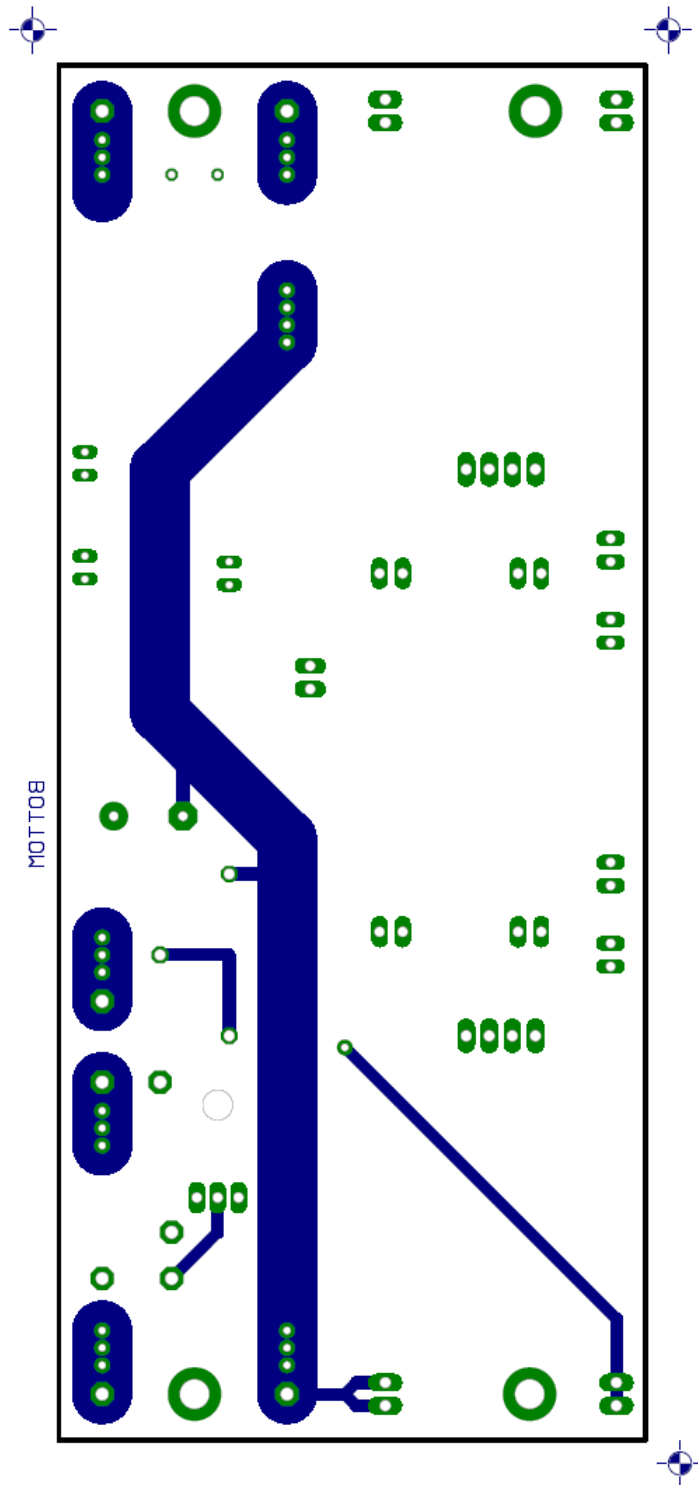
Obr. A.23: Spodní vrstva DPS hlavního zdroje napětí



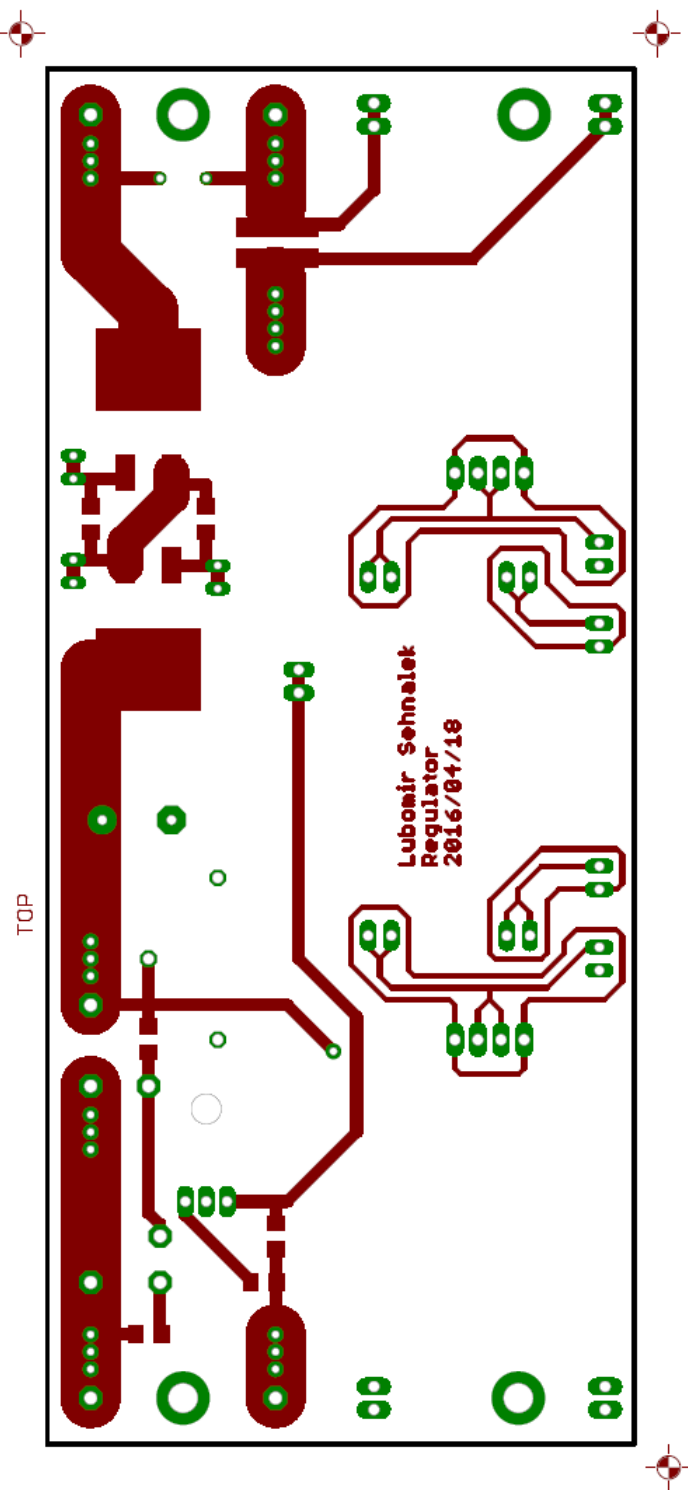
Obr. A.24: Horní vrstva DPS hlavního zdroje napětí



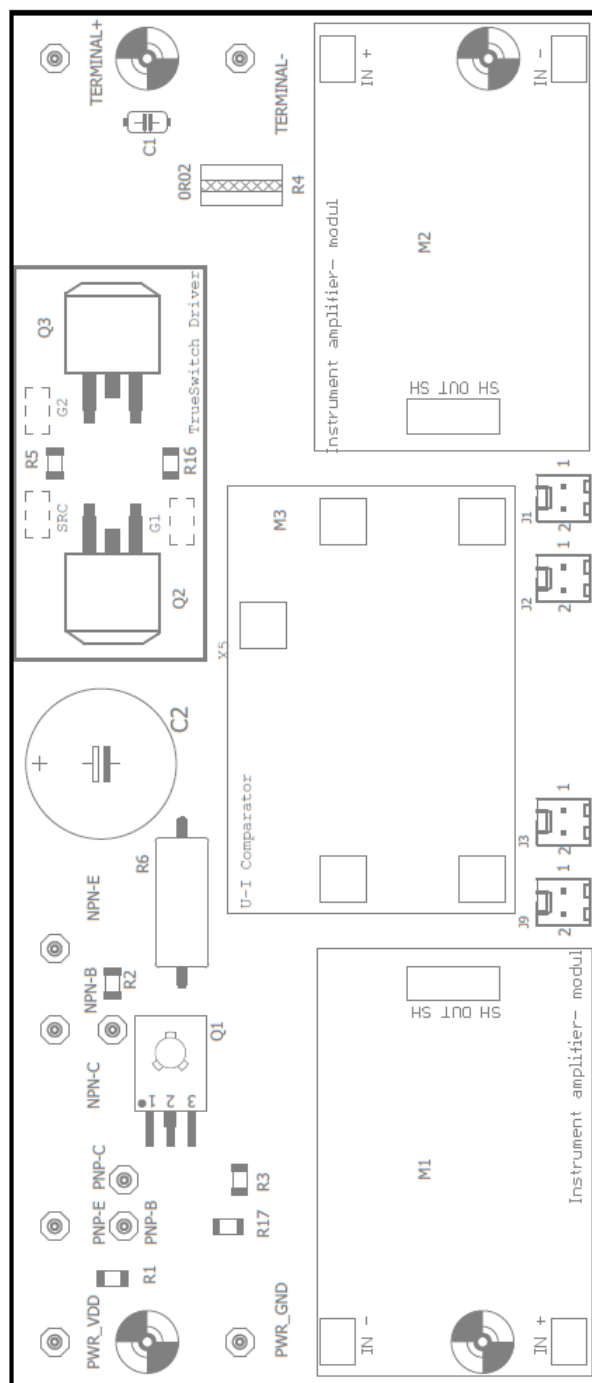
Obr. A.25: Vrstva součástek DPS hlavního zdroje napětí



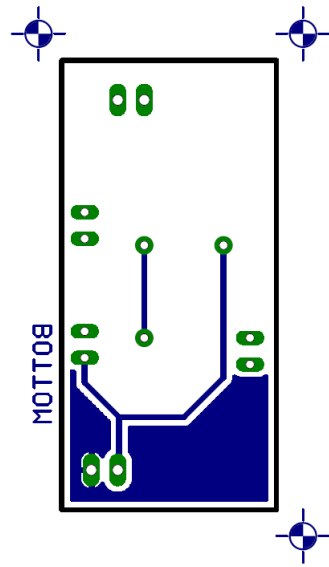
Obr. A.26: Spodní vrstva DPS regulátoru



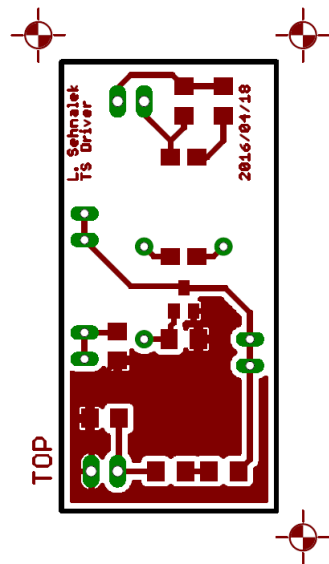
Obr. A.27: Horní vrstva DPS regulátoru



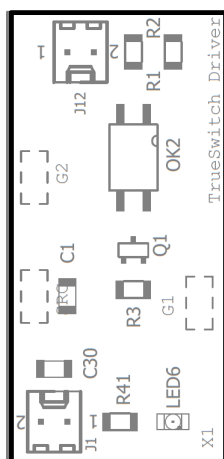
Obr. A.28: Vrstva součástek DPS regulátoru



Obr. A.29: Spodní vrstva DPS TrueSwitch



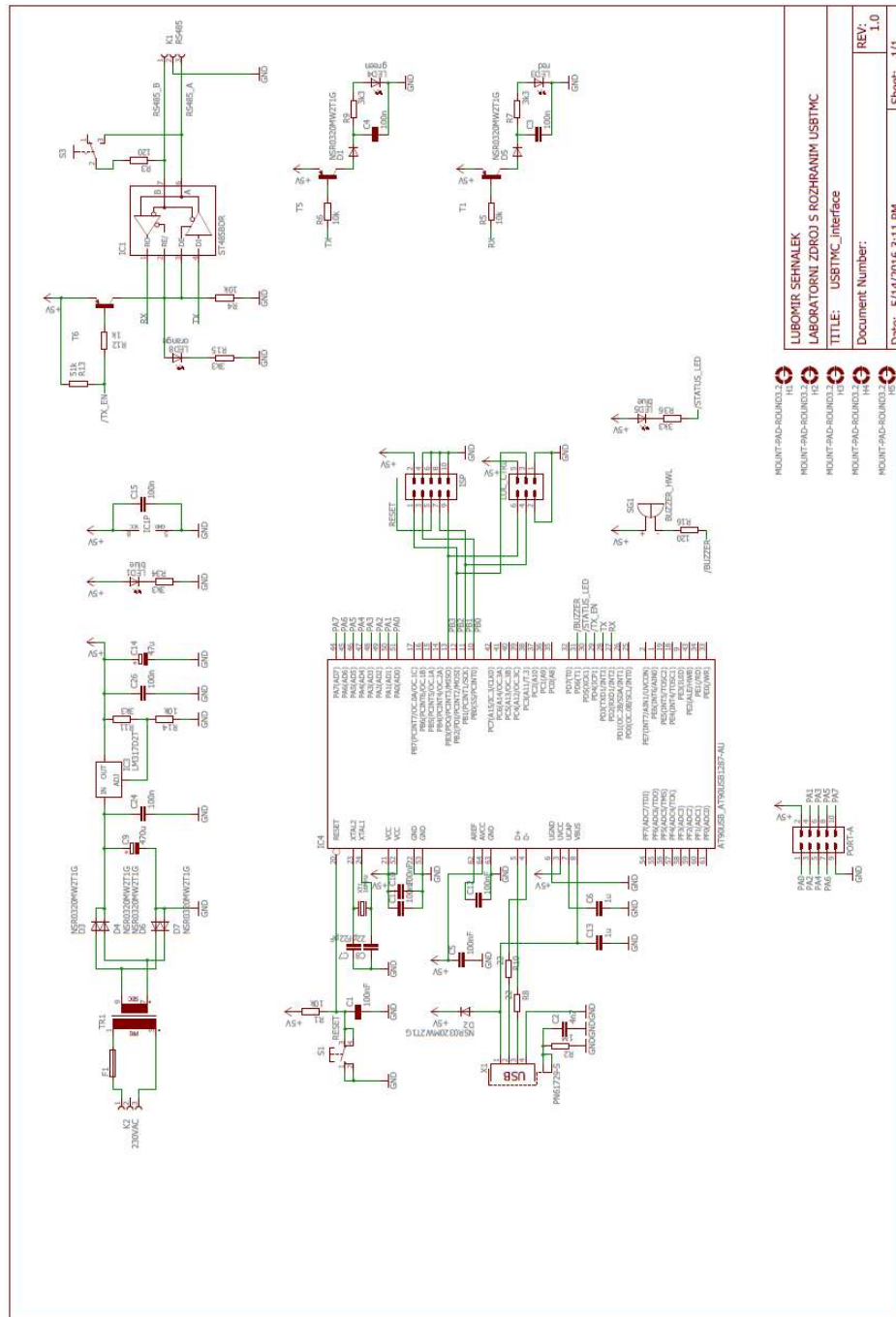
Obr. A.30: Horní vrstva DPS TrueSwitch



Obr. A.31: Vrstva součástek DPS TrueSwitch

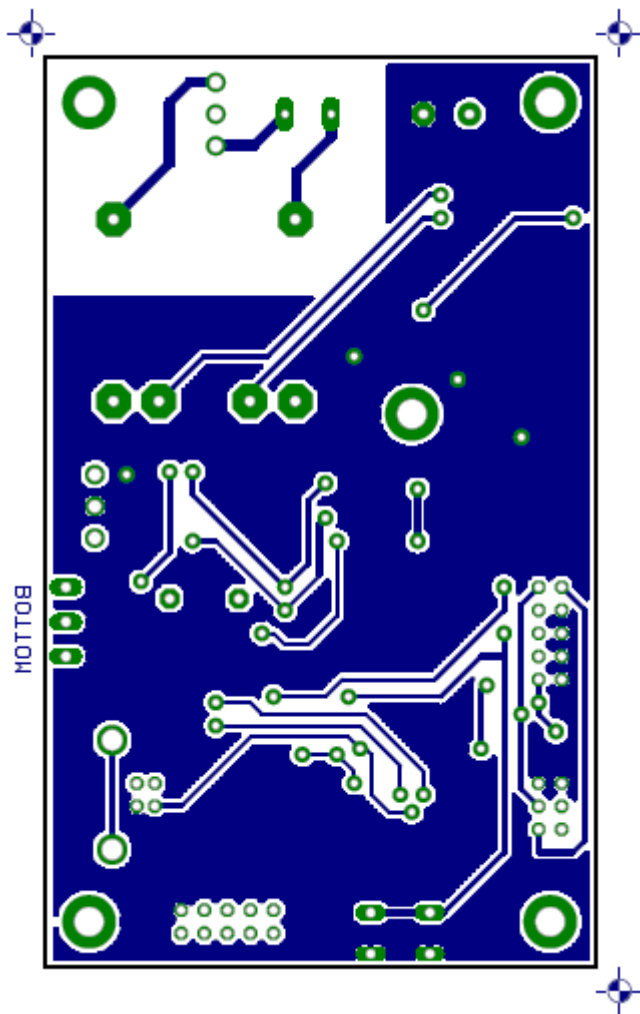
B HW MODULU OVLÁDÁNÍ

B.1 Schéma

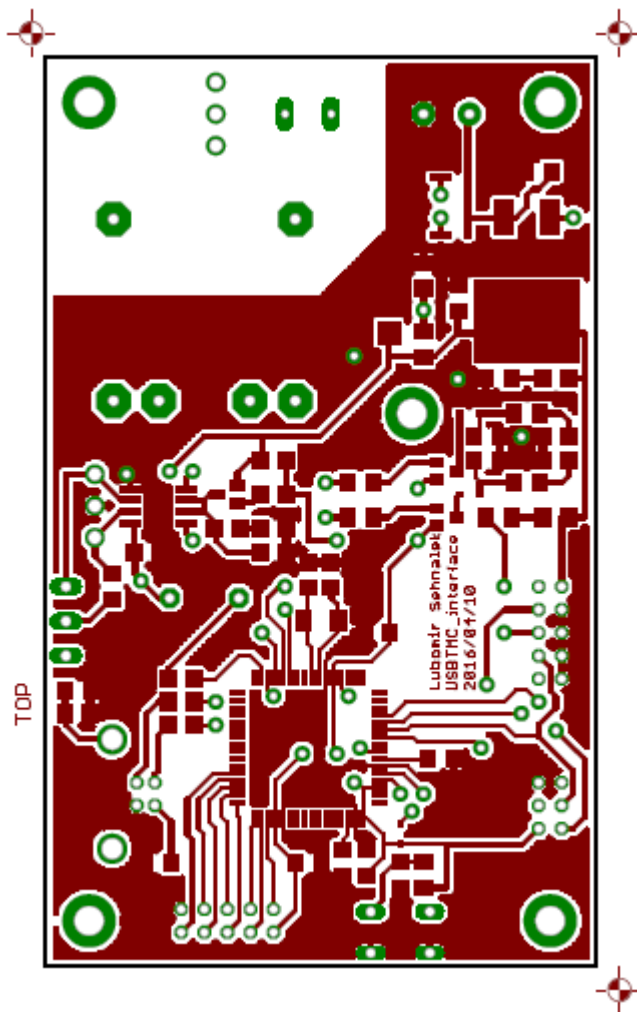


Obr. B.1: Schéma ovládacího modulu

B.2 Deska plošných spojů



Obr. B.2: Spodní vrstva DPS ovládacího modulu



Obr. B.3: Horní vrstva DPS ovládacího modulu

C OBSAH PŘILOŽENÉHO CD

/	.....	kořenový adresář přiloženého CD
realizace	.....	data potřebná ke konstrukci zařízení
DPS	.....	obsahuje data k výrobě DPS, formát Eagle
_knihovna_soucastek		
AuxSupp		
Comparator		
Controller		
OvladaciModul		
InstrOpAmp		
PowSupp		
Regulator		
TrueSwitchDrv		
FW	.....	obsahuje zdrojové kódy pro jednotlivé MCU
modul_Ovladaci		
modul_VykonovehoZdroje		
text	.....	data potřebná k vytištění DP
loga	.....	loga školy a fakulty
FEKT-spec-color.eps		
FEKT-spec-color.pdf		
logolink-op_vavpi.png		
RE-spec-color.eps		
RE-spec-color.pdf		
SIX_logo_zahlavi.png		
obrazky	.....	ostatní obrázky
Firmware		
NapajeciZdroje		
Navrh		
OvladaciModul		
Prilohy		
VykonovaCast		
Vysledky		
pdf	.....	pdf stránky generované informačním systémem
student-desky.pdf		
student-titulka.pdf		
student-zadani.pdf		
text	.....	zdrojové textové soubory
Firmware.tex		
literatura.tex		
NapajeciZdroje.tex		
navrh.tex		
OvladaciCast.tex		
prilohy.tex		
uvod.tex		


```

/..... kořenový adresář přiloženého CD
├── text ..... data potřebná k vtištění DP
│   ├── text ..... zdrojové textové soubory
│   │   ├── VykonovaCast.tex
│   │   ├── vysledky.tex
│   │   ├── zaver.tex
│   │   └── zkratky.tex
│   ├── nastaveni_udaju.tex
│   ├── sablona-prace.tex ..... hlavní soubor pro sazbu kvalifikační práce
│   ├── SehnalekUsbtmcRegZdroj.pdf ..... vygenerovaná práce
│   └── thesis.sty ..... balíček pro sazbu kvalifikačních prací

```