



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA ELEKTROTECHNIKY A KOMUNIKAČNÍCH TECHNOLOGIÍ

FACULTY OF ELECTRICAL ENGINEERING AND COMMUNICATION

ÚSTAV MIKROELEKTRONIKY

DEPARTMENT OF MICROELECTRONICS

DIGITÁLNĚ ŘÍZENÝ LINEÁRNÍ ZDROJ

DIGITALLY CONTROLLED LINEAR POWER SUPPLY

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

BACHELOR'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Martin Mikulka

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

doc. Ing. Jiří Háze, Ph.D.

BRNO 2020



Bakalářská práce

bakalářský studijní program **Mikroelektronika a technologie**

Ústav mikroelektroniky

Student: Martin Mikulka

ID: 203293

Ročník: 3

Akademický rok: 2019/20

NÁZEV TÉMATU:

Digitálně řízený lineární zdroj

POKyny PRO VYPRACOVÁNÍ:

Navrhněte a realizujte lineární zdroj, který bude řízen pomocí mikroprocesorů STM32, kde zdroj bude obsahovat dva galvanicky oddělené kanály připojené přes I2C sběrnici do centrálního modulu, který by obstaral jejich ovládání a uživatelský vstup přes grafický LCD display s dotekovým ovládáním.

Parametry zdroje jsou 0-24 V a 0-5 A, kde zapojení bude navrženo tak, aby napětí mohlo být zvětšeno při změně pouze dělicího poměru u převodníku AD a napájecího transformátoru. Na kanály zdroje by měly být připojovány i další, omezeny pouze rozsahem I2C adres případně kapacitou sběrnice.

DOPORUČENÁ LITERATURA:

Podle pokynů vedoucího práce.

Termín zadání: 3.2.2020

Termín odevzdání: 8.6.2020

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

doc. Ing. Jiří Háze, Ph.D.
předseda rady studijního programu

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

Tématem této bakalářské práce je návrh a realizace laboratorního zdroje s digitálním řízením. Zdroj obsahuje dva samostatné, galvanicky oddělené kanály s výstupními parametry 0 – 24 V a 0 – 5 A s možností řízení těchto kanálů nezávisle na sobě pomocí prvků předního panelu nebo pomocí vzdáleného ovládání. Zdroj zahrnuje možnost připojení dalších kanálů splňující podmínku galvanického oddělení a komunikaci přes rozhraní I2C. Obsahem této práce je teoretický rozbor návrhu lineárních zdrojů s následným návrhem a praktickou realizací a následným jeho měřením.

KLÍČOVÁ SLOVA:

Laboratorní zdroj; galvanicky izolovaný zdroj; STM32 ARM mikrokontrolér; lineární zdroj; digitální ovládání; modulární zdroj; měření výstupních hodnot

ABSTRACT

This bachelor thesis is focused on the design and realization of laboratory power supply with digital control. The power supply contains two separate galvanically isolated channels with output parameters in ranges of 0 - 24 V and 0 - 5 A. Output parameters are controllable independently via front panel or remote control. This power supply allows user to connect other channels meeting the condition of galvanic isolation and communication via the I2C interface. The content of this work is a theoretical analysis of the design of linear regulators, design with practical implementation and subsequent measurement.

KEY WORDS:

Laboratory power supply; galvanically isolated power supply; STM32 ARM microcontroller; linear power supply; digital control; modular power supply; output value measurement

MIKULKA, Martin. *Digitálně řízený lineární zdroj*. Brno, 2020. Dostupné také z: <https://www.vutbr.cz/studenti/zav-prace/detail/127053>. Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, Ústav mikroelektroniky. Vedoucí práce Jiří Háze.

Prohlášení autora o původnosti díla

Jméno a příjmení studenta: *Martin Mikulka*

VUT ID studenta: *203293*

Typ práce: *Bakalářská práce*

Akademický rok: *2019/2020*

Téma závěrečné práce: *Digitálně řízený lineární zdroj*

Prohlašuji, že svou závěrečnou práci jsem vypracoval samostatně pod vedením vedoucí/ho závěrečné práce a s použitím odborné literatury a dalších informačních zdrojů, které jsou všechny citovány v práci a uvedeny v seznamu literatury na konci práce. Jako autor uvedené závěrečné práce dále prohlašuji, že v souvislosti s vytvořením této závěrečné práce jsem neporušil autorská práva třetích osob, zejména jsem nezasáhl nedovoleným způsobem do cizích autorských práv osobnostních a jsem si plně vědom následků porušení ustanovení § 11 a následujících autorského zákona č. 121/2000 Sb., včetně možných trestněprávních důsledků vyplývajících z ustanovení části druhé, hlavy VI. díl 4 Trestního zákoníku č. 40/2009 Sb.

V Brně dne: *10. května 2020*

.....
Podpis autora

Poděkování

Děkuji mému vedoucímu bakalářské práce doc. Ing. Jiří Házemu, Ph.D za cenné rady a účinnou odbornou, metodickou a pedagogickou pomoc při zpracování této bakalářské práce.

OBSAH

Úvod	1
1 Lineární zdroje, regulace	2
1.1 Transformátor	2
1.2 Usměrňovač	3
1.3 Filtr.....	5
1.4 Stabilizátor	5
2 Ovládání, řízení a komunikace zdroje	8
2.1 Regulace, řízení zdroje a komunikace	8
2.2 Operační zesilovače	10
2.3 Sběrnice I2C, komunikace	11
2.4 Kontrola dat	12
2.5 LCD a doteková plocha	12
2.6 Mikrokontroléry STM32.....	12
3 Obvodový návrh modulu zdroje	14
3.1 Návrh tranzistorové kaskády jako řídicího prvku.....	15
3.2 Napájení operačních zesilovačů a řídicího mikrokontroléru STM32	18
3.3 Funkce regulátoru napětí a proudu	19
4 Obvodový návrh řízení zdroje	23
4.1 Řídicí mikrokontrolér a připojené periferie	23
4.2 Napájení řídicí desky zdroje a řízení ventilátorů	23
4.3 Komunikace I2C a UART	25
5 Návrh chlazení zdroje	28
6 Návrh šasi pro zdroj a rozmístění jeho komponent	31
7 Oživení zdroje a prvotní nastavení	33
8 Měření zdroje	34
8.1 Vliv kolísání síťového napětí na výstupní parametry zdroje	34
8.2 Vliv zátěže na výstupní parametry zdroje.....	35
8.3 Zjištění velikosti zvlnění/šumu na výstupních svorkách zdroje	36
8.4 Dynamické vlastnosti zdroje.....	37
8.5 Napěťové charakteristiky zdroje	40

8.6	Proudové charakteristiky zdroje	41
8.7	Časová stabilita výstupních hodnot zdroje	42
8.8	Kalibrace měřidel na zobrazovači zdroje.....	43
9	Závěr	47
9.1	Plány do budoucna.....	49
	Literatura	50
	Seznam symbolů, veličin a zkratk	52
	Seznam obrázků	53
	Seznam tabulek	54
	Seznam Příloh	54

ÚVOD

Každá elektrotechnická laboratoř, ať už hobby nebo profesionální, potřebuje k napájení elektronických obvodů napájecí zdroj. Zdrojem může být elektrická rozvodná síť, baterie či akumulátor nebo nejčastěji laboratorní zdroj s možností regulace napětí, proudu a případně i dalších parametrů (frekvence, střída, tvar signálu, ...), a právě návrhem a výrobou takového zdroje se tato bakalářská práce zabývá.

Parametry zdroje jsou stanoveny na výstupní napětí 0–24 V s maximálním proudem 5 A, dvěma nezávislými, galvanicky oddělenými kanály a možností připojení až 120 dalších kanálů. Napětí zdroje 24 V je plně dostačující pro většinu aplikací realizovaných v menší laboratoři či obecně dílně. Proud 5 A je nad rámec běžného používání, avšak najdou se aplikace, kde je i tato hodnota nedostatečná. Na rozdíl od průmyslově vyráběných zdrojů má tento zdroj možnost snadného rozšíření o další moduly připojené ke stejnému řídicímu modulu, čímž zajišťuje vysokou kompatibilitu a možnost řízení vícero zařízení z jednoho místa. Stejně tak nabízí snadnou možnost přestavby zdroje na výkonnější pouhou změnou napájecího transformátoru a několika málo součástí na plošném spoji, jinak celý obvykle drahý regulační modul zůstává zachován.

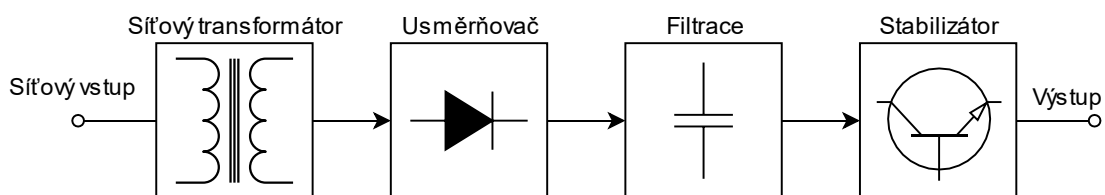
Pro ovládání zdroje je zvolen dotekový LCD display o velikosti 3.95“ pro pohodlnou a přehlednou práci. K samotnému nastavování hodnot slouží rotační inkrementální snímač nebo připojitelné vzdálené ovládání po sběrnici RS232. Velikost výstupního napětí připojitelných kanálů je omezena pouze samotnými připojenými moduly, které jsou kromě řízení plně soběstačné, a díky automatické identifikaci není nutné žádné další nastavení.

Výstupy zdroje jsou připojovány pomocí 4 mm „banánků“ k jednotlivým kanálům, které je možné digitálně propojit na společnou zem či sériově za sebe pro možnost napájení zařízení se symetrickým napájením. Svorky pro konektory jsou šroubovacího typu a krom připojení „banánků“ je možné přichytit pod ně drát či patřičný konektor určený pod šroubovací svorky.

1 LINEÁRNÍ ZDROJE, REGULACE

Lineární zdroje jsou vesměs zařízení, fungující na principu změny střídavého vstupu na stabilizovaný stejnosměrný (DC) výstup v určitém rozsahu napětí a proudu. Lineární zdroje jsou oproti zdrojům spínaným větší a těžší díky nutnosti použití velkého transformátoru, mají menší efektivitu a zpravidla menší rozsah výstupního napětí a proudu (v případě regulovatelného zdroje). Naopak mají nižší výstupní šum a stabilitu výstupního proudu (napětí).[1]

Tato práce se zabývá návrhem laboratorního napájecího zdroje ideálně s co nejmenším výstupním šumem, a právě z tohoto důvodu zdrojem lineárním. Lineární zdroj zpravidla obsahuje několik základních prvků (viz. obr. 1.1).



Obr. 1.1 Zjednodušené blokové schéma lineárního zdroje

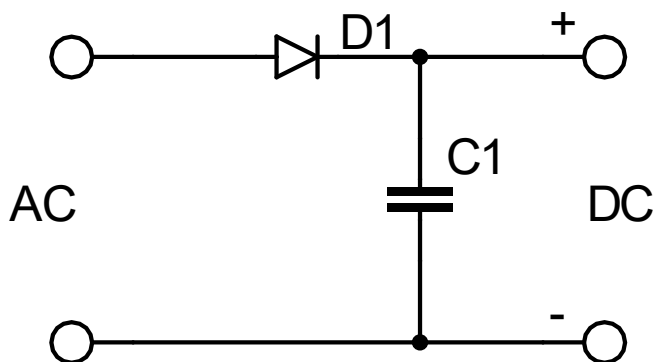
1.1 Transformátor

První a také jednou z nejdůležitějších částí je síťový transformátor, který z napájecího, obvykle síťového napětí, vytvoří napětí nižší, úměrné potřebám výstupu zdroje. Transformátor zároveň zajišťuje galvanické oddělení síťového napětí od výstupu, což zajišťuje vyšší bezpečnost zdroje. Výstupní napětí z transformátoru je závislé na poměru počtu závitů vinutí navinutého na kovovém jádře transformátoru, obvykle tvořeného ocelovými plechy. Výstupní napětí transformátoru také závisí na velikosti ztrát v transformátoru, a tedy jeho vlastní účinnosti, která u velkých transformátorů (řádově kW) může dosahovat až 90 %, to ovšem u malých transformátorů neplatí a účinnost je nižší. Transformátor má obvykle jedno primární vinutí, počet sekundárních vinutí bude záležet na jeho aplikaci.[1]

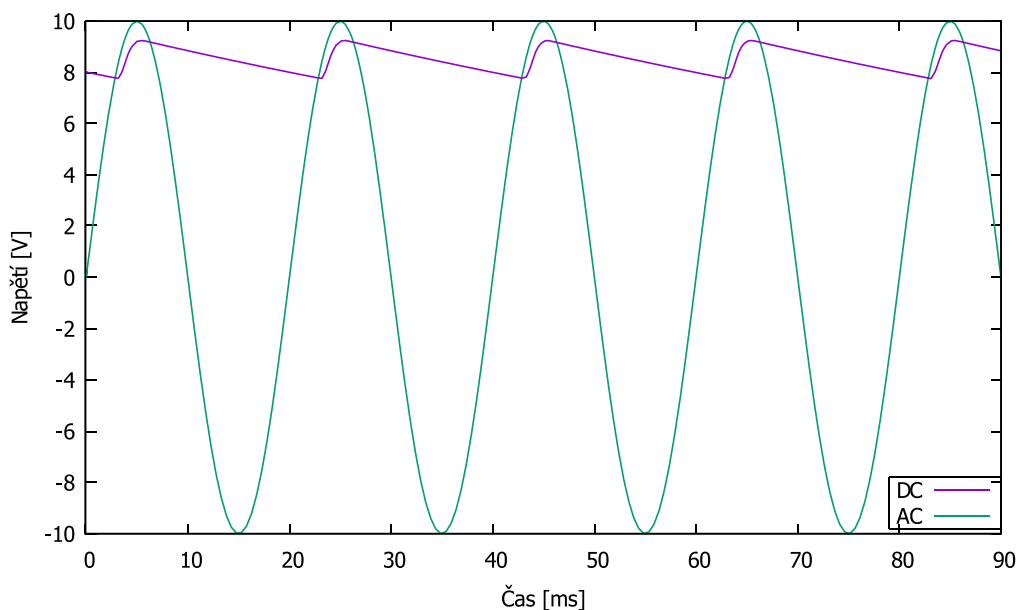
1.2 Usměrňovač

Dále je potřeba napětí z transformátoru usměrnit. K tomuto účelu se používají tzv. usměrňovače, které mohou být hned několika typů. Mezi ty nejčastější patří

- usměrňovač jednocestný [1] – jednocestný usměrňovač vezme pouze jednu polovinu sinového vstupního signálu a tu propustí na jeho výstup. Jedná se o nejlevnější a nejjednodušší způsob usměrnění, avšak jeho účinnost není nijak vysoká a pro účely výkonového lineárního zdroje se příliš nehodí.

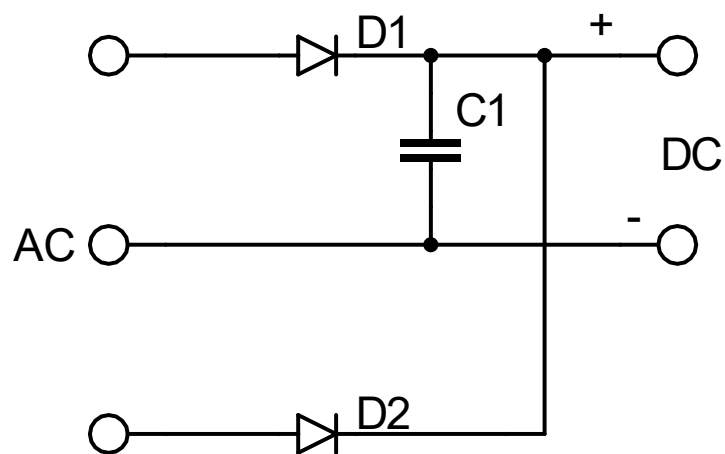


Obr. 1.2 Jednocestný usměrňovač se sběracím kondenzátorem

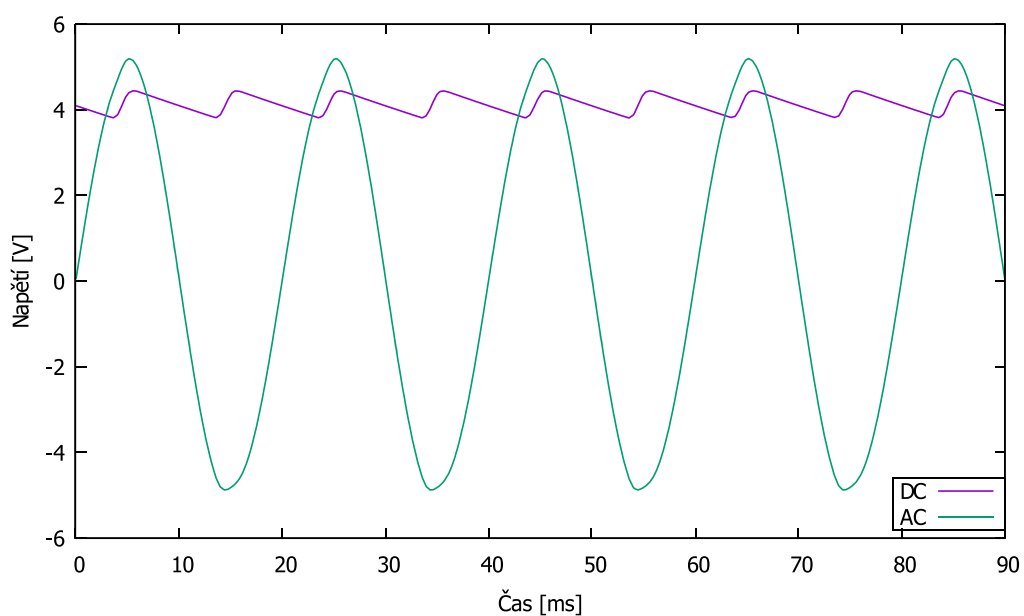


Obr. 1.3 Zvlnění napětí na výstupu jednocestného usměrňovače

- usměrňovač dvoucestný – výstupní zvlnění dvoucestného usměrňovače je již poloviční oproti usměrňovači jednocestnému, je tomu z důvodu, kdy dvoucestný usměrňovač již pracuje s oběma půlvlnami sinusového signálu. Problémem je ale vyšší cena transformátoru, jelikož pro tento typ usměrňovače je nutné použít transformátor se dvěma sekundárními vinutími, resp. sekundár s vyvedeným středem.

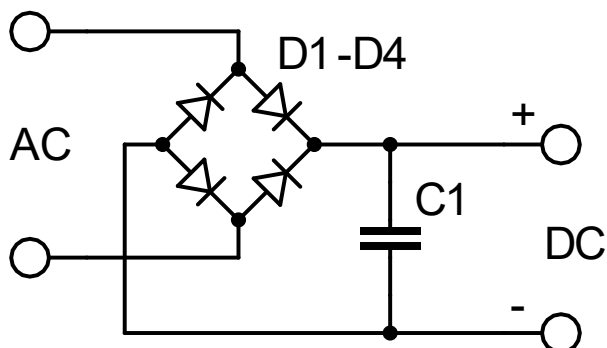


Obr. 1.4: Dvoucestný usměrňovač



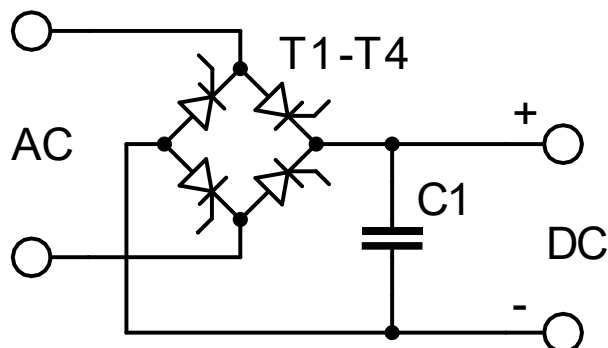
Obr. 1.5 Zvlnění napětí na výstupu dvoucestného usměrňovače

- usměrňovač můstkový [1] – můstkový usměrňovač funguje stejně jako usměrňovač dvoucestný, avšak k jeho práci stačí pouze jedno sekundární vinutí, má ale o dvě usměrňovací diody více, celkem tedy 4 diody.



Obr. 1.6 Můstkový usměrňovač (Graetzův můstek)

- řízené usměrňovače [1] – jedná se o usměrňovače složené z pokročilejších aktivních prvků, jako například tyristory či tranzistory. Tento typ usměrňovače má větší výstupní zvlnění a možnost přímé regulace napětí či proudu, avšak k jeho práci je potřeba řídicích členů, které sami potřebují napájení, a navíc se jedná o zbytečně komplikované zapojení pro účely relativně malo-výkonového regulovatelného zdroje.



Obr. 1.7 Řízený usměrňovač s tyristory

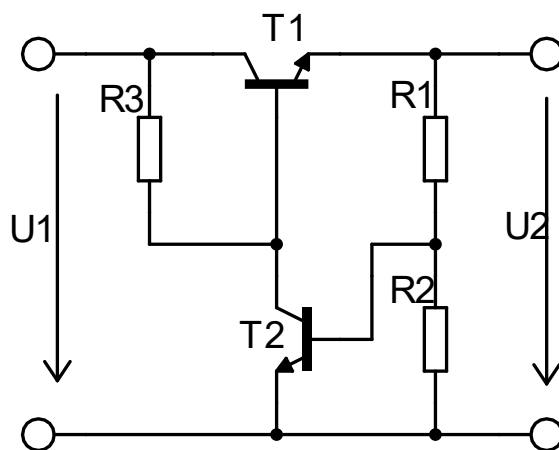
1.3 Filtr

Výstupní napětí z usměrňovače je zvlněné a není příliš vhodné pro přesný lineární zdroj. Před jeho použitím je nutné jej vyfiltrovat pomocí banky kondenzátorů, sloužící jako zásobárna energie, která je na výstup dodávána při poklesu výstupního napětí usměrňovače vlivem průchodu vstupního napětí nulou nebo když jsou diody polarizovány v závěrném směru a není možný průchod proudu ze vstupu na výstup. Filtr je možné realizovat více způsoby, různá zapojení RC či LC filtrů a jejich kombinace či pouze se sběracím kondenzátorem. [2] Přidáním tlumivky je výrazně sníženo zvlnění výstupního proudu, větším kondenzátorem je sníženo zvlnění výstupního napětí a rezistor snižuje zvlnění proudu i napětí díky úbytku na něm. Problémem ale zůstává úbytek napětí na těchto prvcích (cívka, rezistor), což vede k výkonovým ztrátám a většímu teplu, navíc jejich funkci dále plní regulační obvod, díky čemuž nejsou přímo nutné. Problémem je také fakt, že ačkoliv tlumivka sníží výstupní napětí o určitou hodnotu, například 20 V, tranzistory či jiné prvky musí být dimenzovány na maximální hodnotu, tedy včetně 20 V.

1.4 Stabilizátor

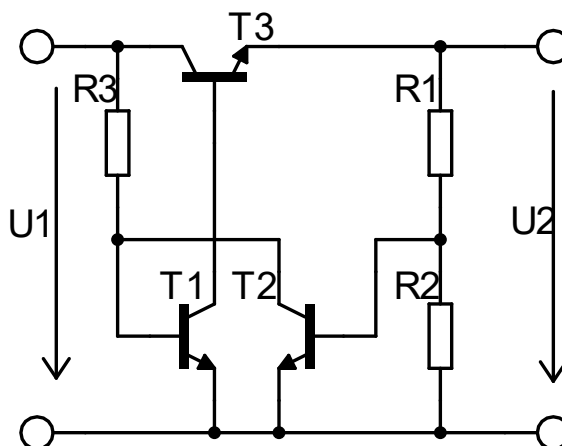
Existuje celá řada různých způsobů stabilizace, lišící se použitými komponenty, výkonovou zatížitelností, šíří napětového rozsahu, obvodovou složitostí, vlastní spotřebou aj. Lineární zdroje se dají obecně rozdělit na skupiny: parametrické stabilizátory, zpětnovazební stabilizátory, integrované stabilizátory. V této bakalářské práci je zadán požadavek na regulaci výstupního napětí a proudu a z toho důvodu bude brán zřetel pouze na zpětnovazební stabilizátory.

Zpětnovazební stabilizátory jsou realizovatelné pomocí plně tranzistorového zapojení nebo pomocí tranzistoru řízeného operačním zesilovačem. Příklad zapojení stabilizátoru s tranzistorovou zpětnou vazbou zobrazuje obr. 1.8:



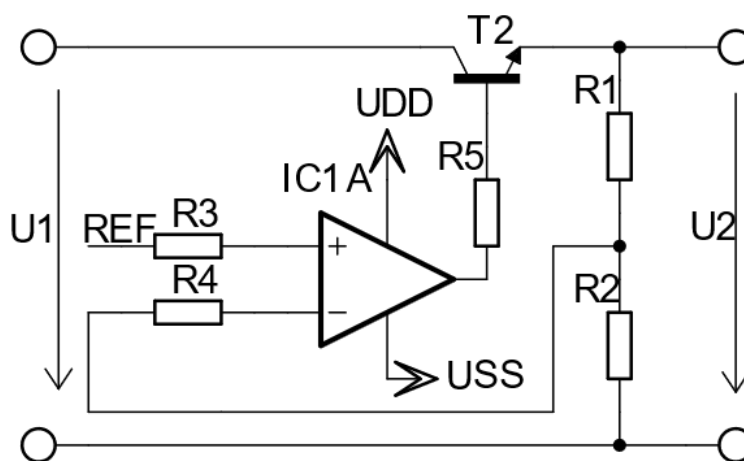
Obr. 1.8 Stabilizátor zapojení s tranzistorovou zpětnou vazbou [1]

Jedná se o zapojení stabilizátoru s tranzistorem NPN použitým jako regulační prvek. Zpětná vazba regulující výstupní napětí je tvořena děličem napětí na výstupu, což vede k nevýhodě zapojení pro malé výstupní napětí/proud – děličem protéká proud potřebný k otevření T2. Jako referenční zdroj je brán pouze úbytek U_{BE-T2} , který se může s teplotou rozcházet a tvořit nestabilitu. Pro správnou funkci obvodu je také nutno počítat s určitým úbytkem U_{CE-T1} který by měl být minimálně takový, aby pokryl vstupní zvlnění a pokryl potřebné napětí pro otevření T1. Při volbě příliš velkého vstupního napětí a malého napětí na výstup bude rozdíl tohoto napětí tvořit U_{CE-T1} což při velkém proudu bude znamenat značné zahřívání tranzistoru. [1]



Obr. 1.9 Stabilizátor malého napětí s tranzistorovou zpětnou vazbou [1]

Tento stabilizátor funguje na bázi regulace proudu regulačního tranzistoru pomocí kaskádního zapojení tranzistorů, kdy jeden omezuje proud druhému a ten přivírá hlavní, regulační, tranzistor. Při poklesu U_2 se sníží napětí na U_{BE-T3} což vyvolá uzavření tranzistoru T3. Ten přestane omezoval proud do báze tranzistoru T2 díky čemuž T2 přotevře regulační tranzistor T1 [1] a tím napětí dorovná. Takto zapojený stabilizátor může pracovat v napěťovém rozsahu omezeném maximálním napětím U_{CE-T2} a U_{CE-T1} s maximálním proudem omezeném jednak proudovým zesílením (β) tranzistoru T1 a tím i maximálním proudem I_{CT2} a samozřejmě maximálním proudem I_{C-T1} . [1]



Obr. 1.10 Stabilizátor napětí s operačním zesilovačem [1]

Stabilizovaný zdroj na bázi operačního zesilovače potřebuje pro svoji činnost vlastní napájecí napětí, ze kterého následně otevírá sériový tranzistor. Tranzistor zároveň potřebuje určité napětí U_{CE} , aby mohl korektně stabilizovat a vyrovnávat vstupní zvlnění. Pro operační zesilovač potřebuje samostatnou referenční hodnotu U_{REF} , ke které následně otevírá/zavírá tranzistor $T1$, aby dorovnal napětí na zpětné vazbě s referencí.

Pokud je mezi referenční zdroj a operační zesilovač zařazen další člen, který ovlivňuje referenční hodnotu napětí, je možné snadno ovlivňovat velikost výstupního napětí. To stejné je možné provádět změnou dělicího poměru u napěťového děliče ve zpětné vazbě. Zapojením operačního zesilovače do „rozšířeného“ sumačního zesilovače, je možné přidat další „chybový“ vstup, sloužící například k externí regulaci výstupního napětí nebo třeba ke sledování maximálního výstupního proudu a regulaci zdroje s proudovým nebo napěťovým výstupem.

2 OVLÁDÁNÍ, ŘÍZENÍ A KOMUNIKACE ZDROJE

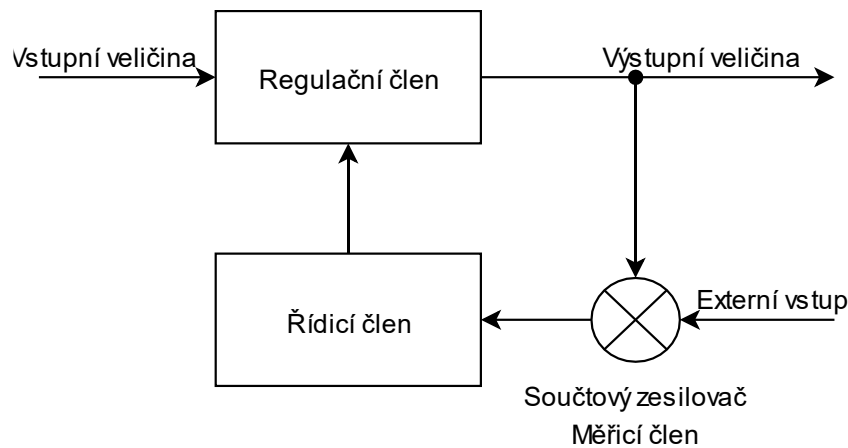
Pro ovládání zdroje pomocí digitální techniky je třeba přidat prvky pro jeho řízení. Pro tyto účely bude zdroj opatřen dotekovým LCD displejem se snadnou možností zadávání a čtení jednotlivých parametrů zdroje. K LCD displeji bude dále přidán rotační enkodér pro snadnou možnost manipulace s hodnotami. Tyto prvky zanesou digitální informaci do řídicího prvku zdroje, kde je informace dále zpracována a následně převedena na analogový signál vedoucí do regulačního prvku zdroje pro upravení výstupní hodnoty dle hodnoty nastavené. Na LCD displeji budou zobrazeny všechny potřebné informace, včetně hodnoty aktuálně nastavované (například napětí). Při nastavování dané hodnoty bude možné zapnout funkci okamžitého zrcadlení na výstupní svorky zdroje (tedy výstupní svorky zdroje budou okamžitě měněny při otáčení rotačního enkodéru). Při vypnutí této funkce bude hodnota prvně nastavena pouze číselně, aby si ji uživatel mohl nastavit a nehrozilo například neopatrné otočení na příliš vysokou hodnotu poškozující napájené zařízení, a poté stiskem tlačítka hodnotu zrcadlit na výstup zdroje. Během celého procesu nastavování budou zobrazovány aktuální hodnoty na výstupu zdroje i hodnoty kýžené, budou zobrazeny i teploty a další informace, avšak všechny tyto informace budou zobrazeny pouze pro aktuálně nastavovaný modul. Všechny informace na displeji budou zobrazeny v anglickém jazyce, bez české lokalizace.

Zdroj bude dále opatřen různými komunikacemi jako I2C nebo RS 232 pro možnost komunikace řídicího modulu s jednotlivými moduly zdrojů nebo s počítačem. Přes tyto sběrnice bude možné zdroj kompletně řídit/ovládat a zároveň bude možné připojení dalších modulů pro zobrazování aktuálních hodnot, řízení zdroje či jeho částí nebo další moduly zdrojů či zdroje celé.

2.1 Regulace, řízení zdroje a komunikace

Regulace zdroje spočívá v neustálém měření výstupní veličiny (napětí a proud) a její následné porovnávání s referenční hodnotou, ovlivněnou sledovanou veličinou upravovanou uživatelem. K regulaci zdroje slouží zpětná vazba, jež je zavedena z výstupu, přes úpravné obvody (děliče napětí apod) do regulačního členu, kde jsou data ze zpětné vazby porovnána s referenční hodnotou a následně je dle toho přizpůsoben řídicí signál pro řízený prvek v obvodu. Tento cyklus je naznačen na obr 2.1.

Zdroj má jako řízený člen výkonový tranzistor případně jejich skupinu, zapojenou do kombinace podobné Darlingtonovu zapojení nebo jiného kaskádního sestavení. Zapojením více tranzistorů je možné získat lepší parametry jako vyšší řízené napětí, větší řízený proud a větší zesílení celého řízeného členu, což vede ke snazšímu a beze ztrátovému řízení.



Obr. 2.1 Blokové schéma regulace

Naopak je zvětšován nárok na místo na chladiči (více chlazených tranzistorů), vyšší pořizovací cena a třeba i větší spotřeba/ztráty na aktivních prvcích (nutnost většího napětí U_{CE} u sériového tranzistoru, což vede k nutnosti dimenzování vstupního napětí na vyšší hodnotu, nebo naopak nižší výstupní napětí). Paralelizace tranzistorů poté znamená další přidání komponent, jako dorovnávací rezistory nebo další řídicí prvky.

Řízený člen bude zhotoven pomocí tranzistorového zapojení (viz. obr. 1.8 nebo 1.9) nebo pomocí operačního zesilovače (viz. obr. 1.10). Jako ovládací veličina pro regulační člen bude napětí z výstupu zdroje a výstup ze snímače výstupního proudu zdroje. Regulační člen má za úkol vyhodnotit tato vstupní data jejich součtem/rozdílem s referenční hodnotou a s hodnotou uživatelského zadání a následně zanesení nové ovládací veličiny do řízeného prvku (viz. obr. 2.1). Pro snadnou možnost sledování výstupních veličin z hlediska uživatele je nutné výstupní veličiny (obvykle napětí) nějakým způsobem číst. Vzhledem k potřebě posílat tato data do dalších částí zdroje (dle zadání – komunikace s PC apod), je nutné napětí převést „na číslo“ a k tomuto účelu se používá převodník AD (ADC). Aby bylo možné naopak snadno (z PC do zdroje) zadávat jiné požadavky na výstupní hodnoty, je nutné „číslo“ převést na analogovou hodnotu (obvykle napětí) k čemuž slouží převodník DA (DAC).

ADC se dělí na několik druhů podle způsobu zpracování analogového signálu. Mezi hlavní parametry ADC patří jeho kvantovací úroveň a vzorkovací kmitočet. Kvantovací úroveň udává počet bitů, na něž je rozdělena škála vstupního napětí, např. ADC s 12bitovým rozlišením znamená, že jeho maximální vstupní napětí je rovno číslu 2^{12} a každá hodnota změřeného napětí je lineárně umístěna v rozmezí $0-2^{12}$. Vzorkovací kmitočet poté udává maximální kmitočet při němž může zvolený ADC pracovat a tedy kolikrát za sekundu je možné zaznamenat vstupní analogovou veličinu jako digitální vzorek bez většího zkreslení, než je dáno samotnou konverzí na menší kvantum (analogový signál má nekonečně mnoho „bitů na vzorek“, kdežto digitální vzorek je omezen velikostí paměti a jeho kvantovací úroveň udává, kolik vzorků nakonec pojme).

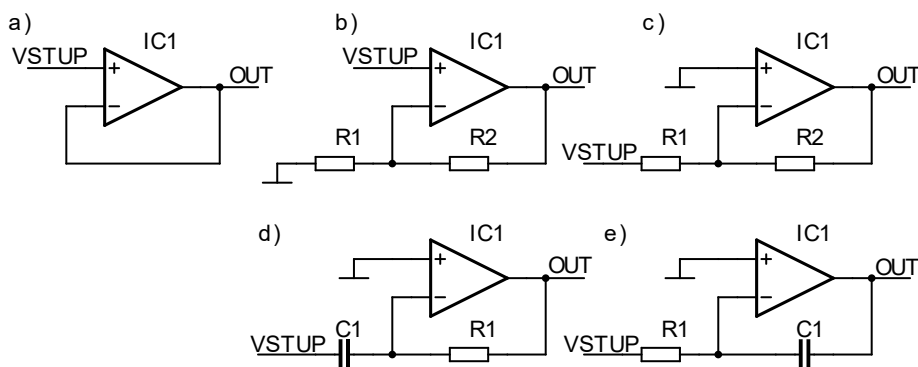
Analogových převodníků existuje celá řada typů, mezi které patří paralelní ADC, kompenzační ADC, integrační ADC nebo třeba Sigma-Delta převodník a další. Každý typ ADC se liší způsobem zpracování analogového signálu a tím i přesností, rychlostí, šumem a dalšími parametry ovlivňující kvalitu výsledku.

DAC je možné vytvořit také vícero způsoby, opět lišícími se dříve zmíněnými parametry. Mezi hlavní vlastnosti DA převodníku patří jeho rozlišení, vzorkovací kmitočet a dynamický rozsah výstupní hodnoty. Důležitým parametrem je také jeho

THDN, který ovlivňuje čistotu výstupního signálu. Mezi nejběžnější typy DAC patří paralelní (R-2R, spínané rezistory, spínané zdroje napětí/proudu), PWM, interpolační [3].

2.2 Operační zesilovače

Operační zesilovače jsou důležitou součástí zdroje, zesilovače a dalších analogových zařízení. Jejich úkol spočívá v porovnání dvou vstupních analogových signálů, jejichž rozdíl je zesílen velkým zesilovacím činitelem a zobrazen na výstup. Zesilovací činitel je dost velké číslo na to, aby byl téměř nevyužitelný pro zesílení jako takové a z toho důvodu je využíván jako komparátor, kdy při kladném výsledku rozdílu vstupů je na výstup OZ doplněno kladné napájecí napětí a opačně. Aby bylo možné operační zesilovač využít jako zesilovač, tedy s určitým zesílením, zapojuje se do různých forem s rezistorovými děliči, kapacitními obvody a dalšími součástkami, aby tvořil zapojení například invertujícího zesilovače s menší hodnotou zesílení určenou zpravidla poměrem dělicího poměru rezistorů v něm zapojených, kterou již lze rozumně využít. Původní zesílení operačního zesilovače následně v poměru s novým zesílením, nastaveným zapojením OZ určuje rychlost změny stavů operačního zesilovače a tím i maximální rychlost (frekvenci) kterou lze od daného zapojení očekávat s adekvátním zpracováním. Mezi základní zapojení patří napětřový sledovač, neinvertující zesilovač, invertující zesilovač a součtový zesilovač. Pokročilejšími zapojeními jsou například integrátor a derivátor vzniklé přidáním kapacitních prvků nebo operační usměrňovače a další zapojení, vzniklá přidáním nelineárních součástek.

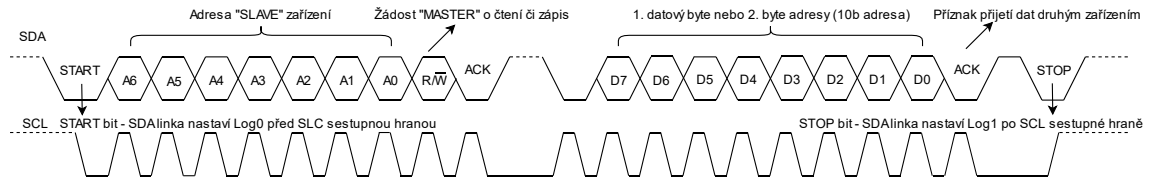


Obr. 2.2 Základní zapojení operačního zesilovače [4]

Základní zapojení operačního zesilovače se dají snadno kombinovat a tvořit tak nová zapojení s funkcí například invertujícího zesilovače a integračního článku v jednom zapojení. Takto vzniklé obvody mají různé funkce a využití podle potřeby v návrhu. Operační zesilovače jsou členěny do různých skupin dle jejich koncepce a funkce, jedná se například o komparátory, operační zesilovače s R2R výstupem, operační zesilovače s R2R vstupy, instrumentální operační zesilovače a další. Významnými parametry u operačních zesilovačů jsou jejich napájecí napětí (velikost případně symetričnost), zesílení, rychlost přeběhu (SR), napětřová nesymetrie vstupní a výstupní odpor a proudová zatížitelnost. Důležitá je také vnitřní konfigurace (R2R, instrumentální, ...) operačního zesilovače.

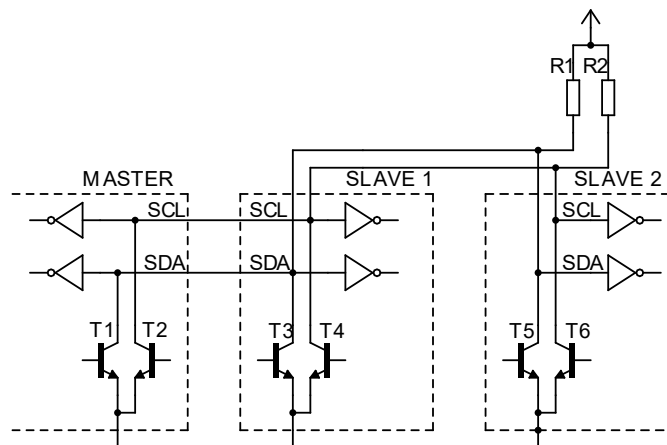
2.3 Sběrnice I2C, komunikace

Sběrnice I2C je sériová komunikační sběrnice o dvou vodičích – data a hodinový signál obvykle označované jako SDA a SCK. Tato sériová sběrnice má možnost komunikovat s vícero „slave“ zařízeními, tedy vícero zařízeními, které jsou podřízené jednomu (nebo i více) hlavnímu zařízení – „master“. Komunikace probíhá podle schématu na obr. 2.2.



Obr. 2.3 I2C komunikační protokol [5]

Nejdříve je zaslána adresa „slave“ zařízení, se kterým je potřeba komunikovat. Adresa je standardně 7bitů dlouhá, jelikož 8. bit v komunikaci je zabrán příznakem oznamujícím, zda je žádán zápis do „slave“ zařízení, nebo jeho čtení. Standardní protokol I2C umožňuje adresu rozšířit až na 10bitů. Po adrese je vyžadována odpověď od „slave“ zařízení, oznamující připravenost k práci, tato odpověď je signalizována pomocí bitů „ACK“. Následně jsou již zapsána jednotlivá data po celých bytech, kde po každém balíku dat je očekávána odpověď „ACK“. Každá komunikace je oddělena specifickým „START“ bitem a „STOP“ bitem mezi kterými zařízení komunikují.



Obr. 2.4 Příklad propojení I2C zařízení na sběrnici

Sběrnice I2C je vedena pomocí dvou vodičů, kdy každé zařízení má připojené řídicí členy pouze s otevřeným kolektorem a pull-up rezistorem. Díky této vlastnosti je možné připojit více „master“ zařízení a sběrnice poté funguje v režimu „multi-master“. Vzhledem k omezení komunikace pouze po dvou vodičích při relativně vysokých komunikačních frekvencích (I2C má standardní režimy 10 kHz, 100 kHz, 400 kHz a 1 MHz) [6] je nutné brát v úvahu délku sběrnice. Délka sběrnice je omezena díky její kapacitě, kdy při příliš dlouhém vedení je kapacita vedení dostatečně vysoká ke zkreslení signálu, který již přijímací strana nemusí vyrozumět. Z tohoto důvodu se používají různé buffery či jiné převodníky, pomáhající signál zesílit či změnit. Sběrnice I2C tedy není určena na dlouhé trasy a je využívána výhradně pro komunikaci po jedné DPS či obecně v jednom malém zařízení.

2.4 Kontrola dat

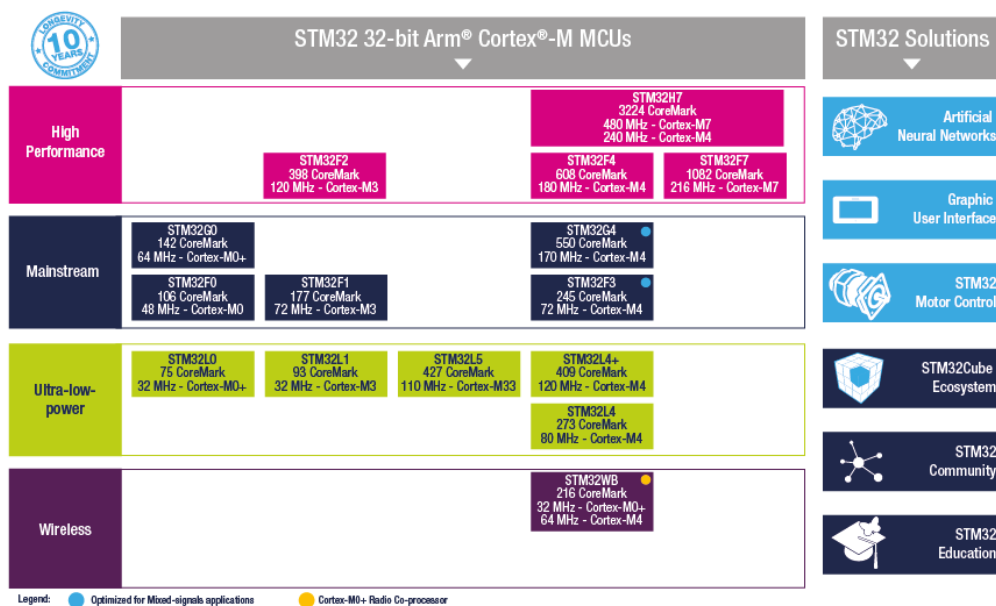
Vzdálené vedení I2C se dá vyřešit pomocí několika způsobů modifikace jejích signálů, mezi ně patří zvětšení napětí na sběrnici I2C nebo převod na diferenciální páry pomocí k tomu sloužících bufferů. Dalším způsobem je změna šířky impulsů z klasického poměru 1:1 na 16:9 (Log1:Log0) nebo jiné nespecifikované. Případně pak samotné snížení komunikační frekvence mezi jednotlivými zařízeními. Při vzdáleném vedení je nezbytné použít některý ze způsobů ověření korektnosti příchozích dat a v případě doručení poškozeného datového balíčku data zahodit a požádat o nová či pouze počkat na další. K vyhodnocení takové situace lze použít různé způsoby detekce pomocí zaslání dalších dat u datového balíčku. Tato přidaná data jsou různě dlouhá a podle toho úměrně bezpečná. Jedním ze způsobů je jednoduchá parita, kontrolující pouze zda je přijatý datový balíček v součtu sudé či liché číslo, poškozením jednoho bitu vyjde špatný výsledek a je jasné že přišla nekorektní data. Problém nastává při doručení datového balíčku se sudým počtem chyb, tyto chyby jsou nedetekovatelné. Dalším způsobem je rozsáhlé CRC, které spočítá trochu delší výsledek z celého datového balíčku (např 8bit, 16bit nebo 32bit aj.) a ten pošle s daty. Použitím 32bitového CRC je již velice malá pravděpodobnost poškození dat takovým způsobem, aby byl výsledek korektní, avšak jeho výpočet zabere určitý čas, kdy je navíc nutné poslat o 32 bitů (4byte) delší zprávu.

2.5 LCD a doteková plocha

LCD pro ovládání zdroje a přehledné zobrazení jeho aktuálních parametrů musí být dostatečně velké, aby bylo možné zobrazit všechny důležité parametry pro minimálně dva základní kanály zdroje. Také je nutné, aby měl podporu dotekové plochy pro možnost uživatelské zásahy a tím samotného řízení zdroje. Pro tyto účely bude vybrán jeden z mnoha barevných TFT displejů zajišťující vysoké rozlišení, dostatečnou velikost samotného panelu a rychlost komunikace. LCD TFT displeje jsou grafického typu a je tedy nutné opatřit paměť programu znakovou sadou a všemi prvky, které je třeba zobrazit, samostatně.

2.6 Mikrokontroléry STM32

Mikrokontroléry STM32 jsou 32bitové mikrokontroléry založené na architektuře procesorů ARM® Cortex®-M. Nabízejí různé kombinace vysoce výkonných, nízko příkonových instrukcí, instrukcí pro zpracovávání dat v reálném čase, bezdrátové připojení, analogové zpracování a mnoho dalšího [7].



Obr. 2.5 Přehled mikrokontrolerů rodiny STM32 [7]

Mikrokontroléry STM32 nabízejí různé podrodiny zaměřené přímo na různé segmenty jako bezdrátové, úsporné, pro obecné využití a vysoko výkonové. Podle jejich zaměření pracují na vysoké frekvenci jádra, což spolu s výkonnými instrukcemi tvoří silné mikroprocesory pro většinu aplikací. Při využití daných mikrokontrolerů se „správným“ zaměřením je možné vybrat takový procesor, který nabídne vše, co je pro obsluhu zdroje potřeba, například dostatek sběrnic I2C, komunikaci s LCD, převodníky AD i DA s dostatkem kanálů, výstupy PWM a mnoho dalšího. Mikrokontroléry STM32 jsou dodávány v rozmanité škále dle počtu vstupně výstupních bran, velikosti vnitřní paměti RAM i FLASH případně další. Jsou dodávány výhradně v SMD pouzdrech s nutností připojování s vyšší integritou.

Mikrokontroléry STM32 obsahují paralelní vstupně výstupní paměťovou sběrnici FSMC, ke které je možné připojit LCD s hardwarovou podporou pro přímý zápis a čtení i za pomoci DMA kontroléru, externí paměti nebo jiné adresované prvky. Hodinový signál jádra má několik možností hodinového vstupu, mezi které patří přímý vstup z externího krystalu, vnitřního RC oscilátoru nebo přímo z externího generátoru, stejně tak je možné do hodinového obvodu zařadit interní PLL násobičku s možností dosažení maximálních frekvencí daného čipu. Rychlé vícekanálové ADC mohou snímat vstupní signál v různých rychlostech s různou kvantovací úrovní podle konfigurace, kde je dokonce možné využít více převodníků AD současně k dosažení vyšší vzorkovací frekvence. Rozlišení převodníků AD je u většiny modelů 12 bitů, kde některé modely obsahují sigma-delta převodníky AD s rozlišením až 16 bitů. Převodníky DA mají obdobnou konfiguraci taktů s 12 bitovým rozlišením a dovedou pracovat současně pro vzorkování složitějších signálů. Velké množství integrovaných časovačů umožňuje nastavení do různých konfigurací, mezi které patří například přímé zpracování kvadrantního enkodéru, IC, PWM s možností různého posunu pro přímé ovládání měničů s plnými mosty, tedy konfigurace dead-time nebo různá souhra jejich postupného spínání. Velké množství komunikačních periférií I2C, SPI, USART a další zajišťují velkou flexibilitu v rámci návrhu zařízení a možnost připojení mnoha okolních prvků jako například teplotní čidla nebo zobrazovací jednotky.

3 OBVODOVÝ NÁVRH MODULU ZDROJE

Modul zdroje obsahuje hlavní regulační tranzistory, budící tranzistory čítající mimo jiné i ochranu výkonových prvků – regulačních tranzistorů. Dále zahrnuje obvody pro měření proudu a napětí na výstupu zdroje, zdroj zajišťující napájení řídicí logice a procesoru, komunikační rozhraní I2C, spínací relé a další důležité části potřebné ke správné funkci modulu plnícího všechny požadavky.

Vzhledem k požadavkům na široké spektrum výstupních hodnot napětí a proudu a jejich snadnou úpravu na větší/menší pouze změnou přívodu, není možné použít jednoduché integrované stabilizátory jako například LM317 [8]. Obvod LM317 by sice přídatným zapojením s dalšími stabilizátory pomocí tranzistorů šel posílit co se proudu i napětí týče, avšak bylo by to nevhodné a zbytečně složité. Pro regulaci zdroje bude tedy použito zapojení s NPN tranzistorem jako regulačním prvkem viz obr. 1.10. Výkonový tranzistor je nutné vybrat takový, který umí pracovat v lineární oblasti své charakteristiky s adekvátní strmostí, nelze tedy snadno použít jakýkoli tranzistor který unese dostatečný proud kolektorem a maximální napětí na U_{CE} , jelikož tyto tranzistory mohou být vyráběny s příliš strmou charakteristikou pro spínací účely a budou špatně lineárně říditelné. Tranzistor je nutno vybrat takový, který je pro lineární aplikace určený a má charakteristiku dostatečně pozvolnou.

Pro měření proudu je použito zapojení s rezistorem jako bočníkem. Tento rezistor musí mít dostatečně nízkou hodnotu odporu, aby na něm nevznikal příliš velký úbytek napětí, který by negativně ovlivňoval výstupní parametry zdroje, tedy maximální výstupní napětí, a také by tvořil příliš velký úbytek na onom bočníku, který by musel být chlazený, což by bylo problematické a zbytečné. Velikost odporu bočníku musí být zvolena tak, aby při nejmenším požadovaném výstupním proudu tvořil dostatečný napěťový úbytek, který je měřitelný v použitém zapojení, a zároveň při proudu maximálním netvořil úbytek příliš velký z důvodu velké výkonové ztráty a možnosti použití nižšího napětí v měřicích obvodech. Pro měření napětí bude použit prostý dělič napětí z velkých rezistorů, aby netvořili příliš velký klidový proud zdrojem. Napěťový dělič musí být určen tak, aby na měřeném rezistoru byl i při nejmenším požadovaném napětí na výstupu dostatečně velký napěťový úbytek pro měření, ale při napětí maximálním nesmí děličem protékat příliš velký proud a napětí na měřeném rezistoru opět nesmí být příliš velké. Měření samotné obstarávají operační zesilovače s adekvátním zesílením. Tyto operační zesilovače zároveň slouží pro řízení regulačních prvků. Pro měření hodnot pomocí převodníků AD jsou zařazeny další operační zesilovače sloužící jako oddělovače s frekvenčními filtry na výstupu, aby měřená hodnota byla přesná a nezarušená a zároveň, aby analogové obvody řízení zdroje nemohly být ovlivněny případným proudem do vstupu převodníku AD při základním nastavení nebo jiné speciální situaci.

Pro napájení těchto modulů musí být přivedeno dostatečné napájecí napětí, se kterým zdroj může pracovat a také napětí pro samostatné řízení zdroje. Napájecí napětí sloužící jako napětí výstupní, po patřičné regulaci, musí být dostatečně tvrdé, tedy i při maximálním proudovém zatížení jeho hodnota nesmí klesnout pod hodnotu maximálního výstupního napětí. Z tohoto důvodu je potřeba použít adekvátní transformátor, který takový výstupní výkon dokáže dodat s patřičným jmenovitým napětím. Filtrace tohoto napětí může výstupní, usměrněné, napětí zajistit vyšší než jmenovité (střední) díky pokrytí energií z filtrační kapacity v době mezi půlvlnami sinového signálu. Usměrnovací můstek také určité napětí pohltí, stejně tak regulační tranzistory, bočník a další části

zdroje a je tedy nutné počítat se všemi těmito hodnotami při volbě transformátoru. Vzhledem k velikosti filtrační kapacity, která není malá, je kapacitní banka umístěna mimo modul zdroje, spolu s usměrňovačem a transformátorem a do modulu zdroje je přiveden již usměrněný, vyfiltrovaný proud. Co se řízení týče, bylo by vhodné, aby zdroj byl napájen pouze silovým transformátorem, který by zajišťoval i napájení řídicí logiky a dalších potřebných částí, avšak toto řešení by neumožňovalo komunikaci s modulem zdroje v době vypnutí daného modulu (vypnutí síťového, silového transformátoru) a toto řešení je tedy nevhodné. Pro napájení logiky je tedy použit zdroj samostatný. Tento samostatný zdroj dodává napětí dostatečné k napájení operačních zesilovačů i řídicího mikroprocesoru, ale ne příliš velké, aby nevznikaly příliš velké ztráty při usměrnění a stabilizaci na napětí nižší.

3.1 Návrh tranzistorové kaskády jako řídicího prvku

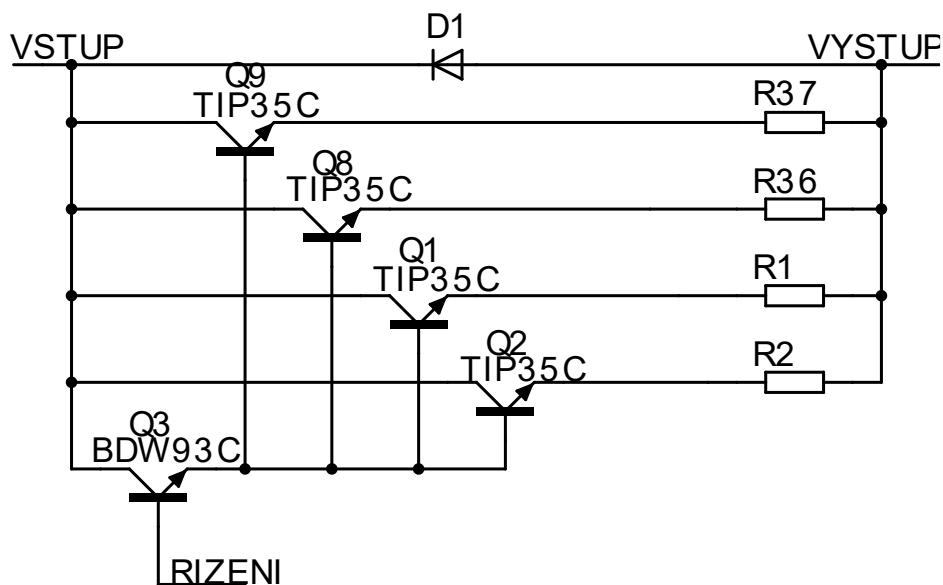
Pro účely zdroje byl vybrán tranzistor TIP35 [9] vyráběný pro aplikace v zesilovačích, tedy pro lineární aplikace. Tranzistor má maximální povolený proud kolektorem celých 25 A a v jeho nejvyšší třídě (TIP35C) je maximální povolené napětí U_{CE} až 100 V DC. Dle dokumentace [9] tranzistoru je jeho maximální výkonová ztráta 125 W, což je plně dostačující pro základní zadání zdroje 24 V a 5 A, dohromady tedy 120 W v nejhorším případě, tedy zkratu výstupu, kdy obvodem teče maximální proud a na výstupu zdroje je nulové napětí, které je celé na tranzistoru. Problémem je požadavek na snadnou možnost navýšení výstupního napětí nebo výstupního proudu, kdy by tento parametr byl velice rychle překročen. Druhým problémem je rozložení tepla z tranzistoru, kde chlazení 125 W v jednom malém bodě (čipu tranzistoru) je dost problematické, resp. problematické je i v rozložení na více míst u sebe, ale stále je tato varianta reálnější než chlazení tranzistoru samotného. Z těchto důvodů byla zvolena varianta spojení několika tranzistorů paralelně, konkrétně celkem 4 tranzistorů. Tímto navýšením bylo dosaženo teoretického maximálního výstupního proudu 100 A, které samo sebou nikdy zdrojem nepotečou. Tranzistory jsou polovodičové prvky, které je problematické, ne-li přímo nemožné, vyrobit dva úplně stejné. Díky tomuto faktu bude mít každý tranzistor nepatrně jiný napěťový úbytek U_{BE} a tím i jiné okamžité zesílení při buzení. Tento problém je možné řešit dvěma způsoby, dražší a složitější způsob by byl postavit samostatné řízení každého tranzistoru, nebo snadnější způsob umístění vyrovnávacích rezistorů do emitorů těchto tranzistorů. Umístěním rezistorů malé hodnoty do emitoru tranzistoru vznikne při průchodu proudu tranzistorem na tomto rezistoru napěťový úbytek, což povede k výkonovým ztrátám, se kterými je nutno počítat. Stejně tak ale díky napěťovému úbytku dojde k vyrovnání napětí na všech tranzistorech při jednom budícím napětí a žádný tranzistor nebude zbytečně přivíraný nebo naopak příliš ztrátový vůči ostatním.

Výkonové tranzistory mají obvykle relativně malé proudové zesílení β , pro tranzistor TIP35 se jedná o hodnotu mezi 25–75 [-]. Pro vybudění tohoto tranzistoru pro výstupní proud 5 A je tedy nutné zajistit relativně velký bázevý proud 200 mA (viz rovnice 3.1).

$$I_B = \frac{I_C}{\beta} = \frac{5 \text{ A}}{25} = 0,2 \text{ A} \quad (3.1)$$

Vybuzení tranzistorů proudem 200 mA pro každý (800 mA celkem) v zapojení, které bylo vybráno, by bylo nutné použít drahý operační zesilovač, který by tento proud na výstupní svorce byl schopen dodat. Jeho ovládání a práce s ním by byly dost složité a značně by byla navýšena výrobní cena zdroje. Z tohoto důvodu bude pro tyto účely přidán

další zesilovací prvek z tranzistoru, také pracujícího v lineárním režimu s dimenzováním také na maximální napětí U_{CE} jako u hlavních řídicích prvků, který bude zajišťovat dostatek proudu pro ovládání těchto tranzistorů. Tento přídatný tranzistor bude tvořit Darlingtonovo zapojení s koncovými tranzistory a jeho proudové zesílení β bude násobitelem proudového zesílení tranzistorů koncových. Pro tyto účely byl vybrán tranzistor BDW93C [10] který má U_{CE} ve své nejvyšší kategorii BDW93C také 100 V a unese proud až 12 A na svém kolektoru. Jedná se o menší tranzistor v pouzdře TO220 a jeho maximální ztráta je 80 W. Tento tranzistor je sám o sobě zapojen již jako Darlington a díky tomu má vysoké zesílení β v rozmezí 1000-20000 [-]. V celkovém zesílení této dvojice tranzistorů je již jasné, že proud do báze již nebude nijak velký a může být připojen přímo na řídicí operační zesilovače [11].



Obr. 3.1 Výsledné zapojení tranzistorové kaskády

Výstupní napětí zdroje je tímto zapojením sníženo o napětí na tranzistorech podle rovnice

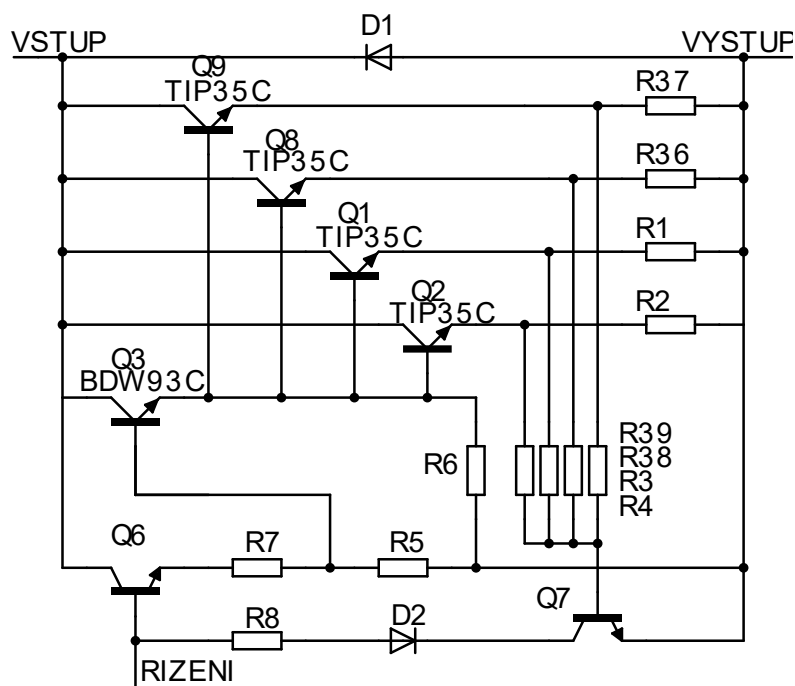
$$U_{OUT} = U_{IN} - U_{BEQ1} - U_{BEQ3} - U_{R1}. \quad (3.2)$$

Z rovnice 3.2 a zapojení na obr. 3.1 vyplývá, že pro správnou funkci je nutné zajistit napětí do báze tranzistorů o velikosti U_{OUT} , což opět povede k drahým operačním zesilovačům, které budou schopny na svém výstupu dodat napětí o velikosti U_{OUT} . Aby bylo možné budít tranzistory klasickými operačními zesilovači, které tak vysoké výstupní napětí nemají a zároveň výstupní napětí operačních zesilovačů neomezovalo maximální výstupní napětí zdroje U_{OUT} , je nutné umístit společnou elektrodu operačních zesilovačů na kladný výstup zdroje. Tímto zapojením „uzemníme“ kladný pól zdroje. Co se týče řídicí elektroniky a operačních zesilovačů, to ovšem není nijak na škodu, jelikož z hlediska zbytku zdroje se tento fakt nijak neprojeví, jelikož každý modul zdroje je galvanicky oddělen a jeho napětí tedy není v žádném vztahu vůči napětí výstupnímu a dalším částem. Zároveň díky tomuto faktu bude zajištěno splnění části zadání, která určuje možnost zvýšení výstupního napětí pouze změnou dělicího poměru rezistorů pro snímání napětí. Zapojení lze samozřejmě provést i opačně, tedy „uzemněním“ záporného konce výstupu a regulaci této záporné větve, avšak to by znamenalo použití tranzistorů PNP, které se pro takové výkony hůře shání a jsou dražší.

Řízení zdroje bude z pohledu operačních zesilovačů kladné, jelikož jejich zem bude umístěna na emitoru řízených tranzistorů. Aby byl možný snadný součet řídicích napětí je možné spojit výstupní svorky operačních zesilovačů pomocí záporně polarizované diody s pull-up rezistorem zajišťující kladné napětí pro báze tranzistorů a tím i jejich otevření v době, kdy operační zesilovače budou toto napětí ovládat opačným napětím. Tímto zapojením zároveň vytvoříme funkci „OR“, kdy řízení bude uplatňovat buď operační zesilovač zajišťující regulaci napětí anebo operační zesilovač zajišťující regulaci proudového výstupu. Operační zesilovač, který nebude aktivně řídicí bude pomocí diody odpojen a řízení převezme operační zesilovač, který aktivní je.

Vzhledem k umístění operačních zesilovačů je nutné na stejné místo umístit i bočník pro snímání výstupního proudu. Bočník bude umístěn ještě před zemní svorkou operačních zesilovačů, aby byla zachována polarizace výstupu s polarizací napětí pro řízení a nemusel být aplikován invertující zesilovač. Proud bude snímán na rezistoru o velikosti 20 mΩ diferenciálním zesilovačem se zesílením 10x. Velikost tohoto bočníku byla vybrána tak, aby splňovala požadavky na nejmenší měřitelný proud vycházející z nejmenšího měřitelného napětí zvoleným převodníkem AD a zadaným nejmenším proudem. Zároveň nesmí překročit příliš velkou hodnotu ztrátového výkonu, stanovenou odhadem na 2 W, které je bez problému možné uchladit pouze větší plochou mědi na DPS a plochou rezistoru samotného na adekvátní provozní teplotu bez nutnosti použití odporu zabírajícího polovinu plošného spoje. Snímané napětí na bočníku bude zavedeno do řídicího součtového zesilovače spolu s řídicím napětím z převodníku DA v mikrokontroléru STM32. Do druhého operačního zesilovače se stejnou funkcí bude zaveden napětíový výstup z děliče napětí snímající napětí na výstupu zdroje a také výstup z převodníku DA mikrokontroléru STM32, aby bylo možné ovládat samostatně napětí i proud. Od obou částí, tedy od děliče napětí pro čtení napětí a od diferenciálního zesilovače na proudovém bočníku bude vyvedena svorka pro převodník AD pro čtení aktuální hodnoty proudu/napětí na výstupu zdroje. Operační zesilovače byly vybrány typu OP07 [10] zajišťující dostatečné parametry pro zvolenou přesnost zdroje. Zvolené operační zesilovače mají možnost přidání externího kalibračního rezistoru (trimru) pro nastavení klidového výstupu. Lepší volba by byly například operační zesilovače OP27, OP37 nebo OPA228 či úplně jiné, avšak ty jsou již poměrově dražší a nejsou nutné pro danou aplikaci.

Operační zesilovače zapojené v části obvodu pro řízení regulačních tranzistorů jsou zapojeny jako invertující zesilovače s malou integrační kapacitou pro zhoršení jejich strmostí a tím zabránění rozkmitání zesilovače. Na vstupech operačního zesilovače pro napětíovou zpětnou vazbu je umístěna dvojice antiparalelních diod sloužící jako ochrana proti přílišné napětíové špičce a tím omezení maximálního napětíového rozdílu mezi jednotlivými vstupy OZ. Tímto je operační zesilovač chráněn proti přílišnému napětí na vstupu a zároveň i zbytek obvodu proti přílišnému přepětí, které by obvod mohlo poškodit například v okamžiku poruchy regulačního tranzistoru. Další ochranou proti této situaci je dvojice tranzistorů zapojených ke kaskádě jako další stupně sloužící k ochraně zbylé části obvodu ve chvíli průrazu tranzistorů. Tranzistor Q7 (viz. obr. 3.2) snímá napětí na vyrovnávacích rezistorech v emitorech regulačních tranzistorů a při překročení zvoleného maximálního proudu určeného velikostí vyrovnávacího rezistoru a napětí U_{BEQ7} se tranzistor otevře, čímž spojí bázi tranzistoru Q6 s napětím na výstupu a tím jej spálí. Spálením tranzistoru Q6 je zamezeno přístupu proudu z napájecí větve do výstupu OZ a tím ochrany OZ i řídicího mikrokontroléru. Tímto zapojením je dále i sníženo výstupní napětí o další bázová napětí na těchto tranzistorech.



Obr. 3.2 Tranzistorová kaskáda s ochranným obvodem [12]

3.2 Napájení operačních zesilovačů a řídicího mikrokontroléru STM32

Napájení operačních zesilovačů pro danou aplikaci zdroje je nutné zařídit dostatečně vysoké pro dostatečný zisk a zároveň symetrické, aby operační zesilovač mohl dodat jak kladné, tak i záporné napětí. Operační zesilovače pro oddělení analogového obvodu zdroje od převodníků AD mikrokontroléru STM32 již postačí napájet pouze kladným napájecím napětím při použití operačních zesilovačů R2R, výhodnější ale zůstává připojit je na kladné i záporné napájecí napětí, jelikož ve zbytku obvodu se již toto napětí rozhodně nacházet musí. Tyto operační zesilovače je lepší zvolit kvalitnější z důvodu nižšího šumu a vyšší stability výstupu, aby bylo možné přesné měření výstupu. Jako tyto operační zesilovače byly zvoleny zesilovače od fy. Texas Instruments OPA192, které jsou pro tuto funkci prakticky určeny. K napájení modulu zdroje bude použit transformátor se samostatným symetrickým vinutím 2x 12 V, které bude na desce modulu zdroje usměrněno a pomocí lineárních integrovaných stabilizátorů řady 78xx a 79xx stabilizováno na požadované napětí ± 12 V. Lepší by bylo použití LDO s vyšším potlačením šumu na výstupu, avšak v této aplikaci nejsou použity nejpřesnější analogové převodníky ani nejsou měřeny ultra malé hodnoty napětí na nich a z tohoto důvodu bylo usouzeno, že tyto stabilizátory jsou dostatečné. Z kladné větve tohoto napětí bude zároveň napájen měnič pro mikrokontrolér STM32, který bude z 12 V vytvářet napětí 3.3 V pro napájení mikrokontroléru, převodníků pro sběrnici I2C a případně dalších prvků a po patřičném vyfiltrování i analogových převodníků v mikrokontroléru. Měnič pro mikrokontrolér bude DC/DC spínaný měnič a jeho výstupní napětí bude odděleno od analogové části obvodu, aby ji nezarušilo, jediné spojení s analogovou částí skrze analogové převodníky v mikrokontroléru. Vybraný mikrokontrolér STM32 má samostatné napájení převodníků AD a DA, kam bude přivedeno napětí 3.3 V z již zmíněného spínaného měniče přes adekvátní filtr typu dolní propust tvořený feritovou perlou a kondenzátory s hodnotami určenými podle doporučení výrobce. Snímací a

oddělovací operační zesilovače zapojené v napěťové a proudové zpětné vazbě sloužící k měření aktuálních výstupních hodnot operačního zesilovače budou mít na výstupu také filtry typu dolní propust tvořené malým sériovým rezistorem a paralelním kondenzátorem k zamezení vstupu rušení do převodníků a měření korektní hodnoty výstupního napětí a proudu. Spínaný měnič pro mikrokontrolér STM32 byl vybrán od firmy Monolithic Power Systems, Inc., konkrétně typ MP1469 [13]. Měnič byl vybrán z důvodu dobré dostupnosti, dostačujících parametrů a malé velikosti pouzdra s minimem nutných součástek v obvodu. Měnič dokáže dodat proud až 1,5 A což je plně dostatečné pro napájení mikrokontroléru i okolních prvků na zdrojové DPS.

Hlavní napájení zdrojové části, respektive jejích jednotlivých modulů je řešeno průmyslovými transformátory 24 V tvořenými plechy tvaru M spleené barvou proti rezonanci. Transformátor má sekundární vinutí vinuté lakovaným drátem o průřezu 1,8 mm² a průřez středního sloupku 45 mm × 36 mm = 1620 mm² odpovídá výkonu přibližně 260 VA dle zjednodušeného výpočtu $P = S^2$ [3], což odpovídá maximálnímu výstupnímu proudu kolem 10 A na kanál. Další možností určení přibližného výkonu přes odpor primárního vinutí ukázalo opět výkon asi 260 VA, konkrétně 255 VA. Výstupní napětí je pro každý kanál dále vedeno přes výkonový usměrňovač tvořený čtveřicí diod MBR15100 [14]. Použité diody mají $U_F = 0,92$ V a jsou vždy dvě v sérii (viz. zapojení Graetzova mostu na obr 1.6), s čímž je třeba počítat při stanovení maximálního výstupního napětí zdroje. Takto zapojený Graetzův můstek je značně předimenzovaný a umožňuje snadnou změnu napájecího transformátoru tak, aby byl navýšen maximální výstupní proud nebo napětí zdroje. Za usměrňovačem je umístěna kapacitní banka z elektrolytických kondenzátorů jako sběrací kondenzátory. Velikost kapacity této banky byla stanovena na 20,4 mF pomocí rovnice 3.3 [15] avšak reálně jsou osazeny kondenzátory o celkové velikosti pouze 18,8 mF, jelikož je počítáno s vyšším výstupním napětím transformátorů, změřeného na 32 V při zátěži 11 A zatěžovaného pomocí topného tělesa s jmenovitým výkonem 200 W při jmenovitém napětí 24 V, jehož odpor jsou necelé 3 Ω. Kapacitní banka je tvořena čtveřicí kondenzátorů 4700 μF 63 V a je tedy nejslabším prvkem v obvodu co se následné možnosti změny výstupních parametrů týče, jelikož je volena tak akorát pro napětí 24 V, ale po změření transformátoru je uvažováno zvýšení proudu na 10 A.

$$C = I \cdot \frac{\Delta t}{\Delta U} = I_{MAX} \cdot \frac{10 \text{ ms}}{U_{MAX} - U_{MIN}} = 5 \cdot \frac{10 \text{ ms}}{U_{MAX} - (U_{MIN} - 4 \cdot U_{BE} - 2 \cdot U_D)} =$$

$$= 10 \cdot \frac{10 \text{ ms}}{\sqrt{2} \cdot 24 - (24 + 4 \cdot 0,8 + 2 \cdot 0,92)} \doteq 20,4 \text{ mF} \quad (3.3)$$

Ve výpočtu v rovnici 3.3 [2] je počítáno s napětím na čtyřech přechodech U_{BE} , ačkoliv v obvodu jsou ve skutečnosti pouze 3. Je tomu z důvodu zjednodušení výpočtu, aby nebylo nutné počítat s úbytky na vyrovnávacích rezistorech a dalších obvodových prvcích v obvodu (viz obr 3.2). Vyrovnávací rezistory vybaví ochranný obvod až při otevření tranzistoru Q7, tedy dalším napětí U_{BE} .

3.3 Funkce regulátoru napětí a proudu

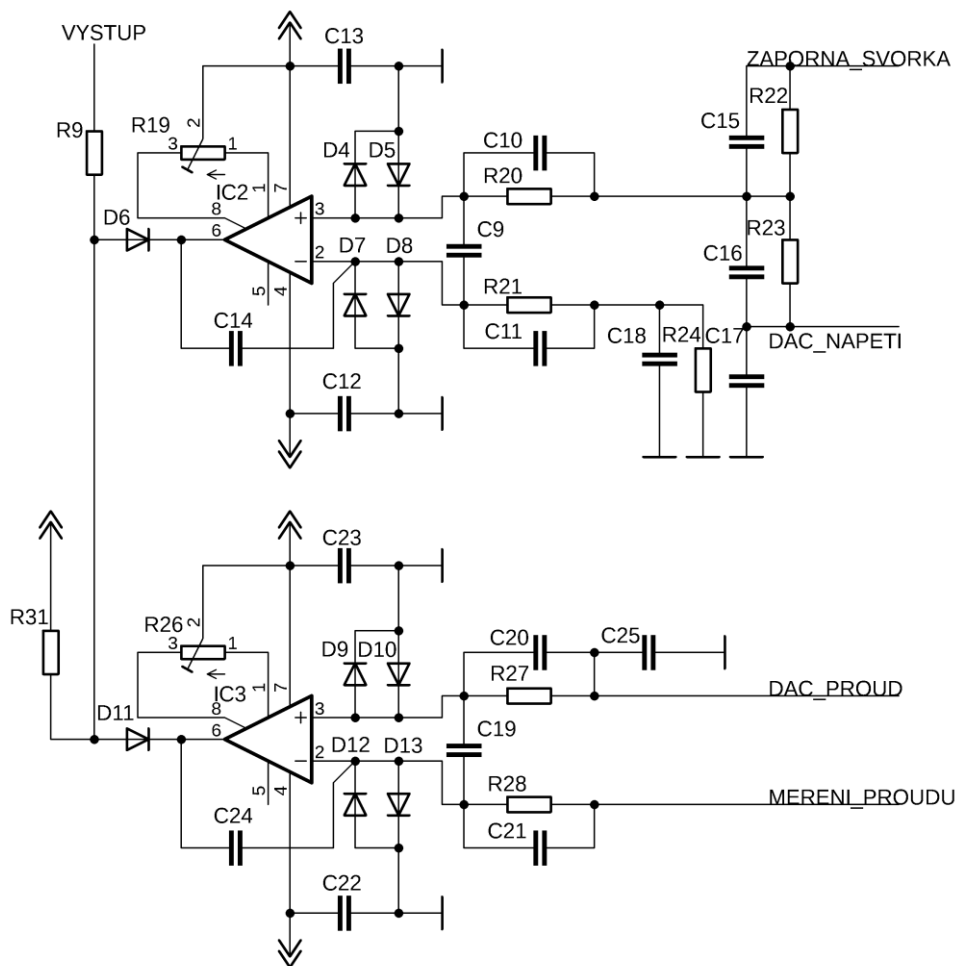
Regulátor napětí je zapojen jako diferenciální zesilovač (viz. Obr. 3.3), který se snaží dorovnat vstupní hodnoty napětí na svých vstupech tak, aby jejich rozdíl byl nulový. Dorovnání je prováděno pomocí zvyšování/snižování napětí na výstupu podle výsledku

součtu vstupních hodnot. Na invertující vstup operačního zesilovače je připojen kladný výstup zdroje, který je ale z pohledu operačního zesilovače uzemněn, a je tedy zde přivedeno napětí 0 V. Na kladný vstup operačního zesilovače je přiveden záporný vstup zdroje přes dělič napětí vůči analogovému výstupu z převodníku DA sloužící jako reference. Dělič napětí je vhodně zvolen v poměru 1:10, aby bylo možné plný rozsah ovládat převodníkem DA s maximálním výstupním napětí 3,3 V i s dobrou rezervou. Obvod funguje v jednoduché regulační smyčce, kdy při přivedení napětí na vstup, tedy nastavení napětí na výstup převodníku DA znamená nenulový rozdíl napětí na vstupech operačního zesilovače. Ten zareaguje zvyšováním napětí na svém výstupu, což zapříčiní otevírání tranzistorové kaskády a tím zvyšování napětí na výstupních svorkách. Z hlediska operačního zesilovače začne klesat napětí na záporném výstupu zdroje (jelikož má zem připojenou na kladnou svorku zdroje) a tím postupně dorovnávat napětí na středu děliče napětí tak, aby bylo rovno napětí na zemi operačního zesilovače, tedy desetinásobku (z poměru odporů děliče napětí) napětí vstupního. V této regulační smyčce vzniká chyba zapříčiněná vysokou rychlostí napětěového přeběhu operačního zesilovače vůči rychlosti reakce tranzistorové kaskády, která je pomalejší a tím je způsobeno rozkmitávání zdroje. Další zrychlení je způsobováno kondenzátory na děliči napětí jako je C15 a další. Aby kmitání v této regulační smyčce nevznikalo, je do obvodu zařazena integrační kapacita C14 na zpětné vazbě operačního zesilovače sloužící k omezení strmosti, tedy zpomalení reakce operačního zesilovače. Další pomocí proti kmitání je přidání kapacity C9 mezi vstupní svorky operačního zesilovače, čím je způsoben pomalejší nárůst rozdílu mezi nimi. Kondenzátory je třeba volit s rozvahou a spíše experimentálně, aby byl nalezen vhodný kompromis mezi rychlostí reakce obvodu na vlivy jako je zvýšení odběru, zkrat a další (co nejrychlejší) a zároveň, aby se obvod nerozkmital.

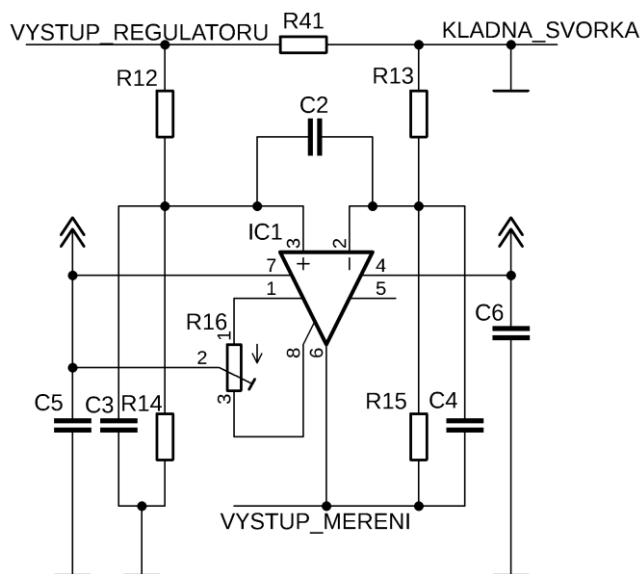
Regulátor proudu je stavěný velice podobně jako regulátor napětí. Operační zesilovač zapojený jako diferenciální zesilovač se snaží udržovat stejné napětí na svých vstupech, aby mezi nimi byl nulový rozdíl. Na svém neinvertujícím vstupu má připojen přímo převodník DA určující hranici maximálního výstupního proudu, který je snímán a přiveden na vstup invertující. Snímání proudu je zajištěno pomocí dalšího operačního zesilovače. V zapojení pro snímání proudu na obr. 3.4 je problém nutnosti osazení dvou dvojic odporů, které by měly být ideálně totožné, jedná se o odpory R12, R13 a odpory R14, R15. Tyto odpory určují zesílení operačního zesilovače v daném zapojení. Pokud je na výstupu obvodu pro měření napětí na bočníku napětí nižší, než je napětí nastavené na převodníku DA, je výstup operačního zesilovače IC3 kladný. Kladné napětí je odříznuto opačně polarizovanou diodou D11 a tranzistorová kaskáda je tedy regulována pouze operačním zesilovačem IC2, tedy napětěově. Pokud tomu tak není a výstup obvodu pro měření proudu je vyšší než vstup z převodníku DA pro nastavování maximálního proudu, je výstup operačního zesilovače IC3 záporný. Záporné napětí na jeho výstupu již přes diodu projde a tím je snižováno napětí na výstupu zapojení na obr 3.3, čímž je přizavírána regulační kaskáda zdroje a výstup zdroje je ovlivňován. Zdroj tedy pracuje v režimu proudu. V tomto zapojení vzniká další problém a tím je dvojice zesilovačů pro měření a regulaci zdroje co se proudové části týče, která tvoří příliš mnoho stupňů, a v jistých částech je na pomezí s regulací zdroje regulátorem napětí, což vyvolává kmitání. Z toho důvodu je do obvodu opět přidána integrační kapacita C24 a kondenzátory na vstupech operačních zesilovačů C19 a C2. Jsou přidány i další kondenzátory zhoršující rychlost operačního zesilovače C4 a C3 v obvodu pro měření proudu. Všechny tyto kapacity budou následně experimentálně ověřovány. Lepším řešením by bylo použití instrumentálního operačního zesilovače nebo obvodu přímo určeného pro měření proudu na bočníku, ale tyto obvody jsou drahé, a navíc nemívají velké zesílení, resp. zisk a ani

potlačení šumu. Z tohoto důvodu byla zvolena stavba měřicího obvodu manuální. V úvahu byl také vzat fakt měření proudu z hlediska přesnosti u proudů menších, kde by bylo vhodnější vyšší zesílení operačního zesilovače. Přepínatelné zesílení by bylo možné provést pomocí přepínání odporů ve zpětné vazbě například pomocí relé, ale tento nápad byl následně zavržen z důvodu zanesení dalšího šumu z kontaktů relé a z důvodu nepřesného odporu kontaktů relé, které se mohou časem i zhoršovat vlivem oxidace a dalších jevů.

Dalším důležitým bodem byl výběr bočnicku pro měření proudu. Již výše byla zvolena jeho velikost $20\text{ m}\Omega$, ale jelikož bočník se bude zahřívat, je nutno zvolit takový, který má adekvátní teplotní drift vůči požadované přesnosti. Důležitým parametrem je také jeho sériová indukčnost a maximální výkonová ztráta vůči maximálnímu proudu. Vybíráno bylo také jeho samotné provedení, konkrétně typ OAR (Open Air Resistor – rezistor v otevřené atmosféře), drátový rezistor nebo jiný nízko šumový. Drátový rezistor nebyl použit, jelikož jeho vlastní šum je příliš velký, OAR byl vyřazen z důvodu přílišné výšky nad plošným spojem a s tím spojenými obavami o zarušení z důvodu nestíněného prostředí i přes jeho velice nízký teplotní drift $20\text{ ppm}/^\circ\text{C}$. Nakonec byl vybrán rezistor přímo určený jako bočník od firmy KOA Speer Elec [16], který má sice poměrně velký teplotní drift $100\text{ ppm}/^\circ\text{C}$, ale i tato hodnota je plně dostačující pro zvolenou přesnost. Jeho výhodou je zalité provedení a tím vyšší odolnost vůči rušení a vyšší teplotní stabilita. Rezistory v obvodu kolem jsou voleny všechny ve formě SMD. Výhoda SMD oproti klasickým například uhlíkovým je řádově nižší vlastní šum díky technologii výroby a možnosti poměrně přesné jejich výroby. Z těchto hledisek padla volba na metalizované rezistory SMD s tolerancemi 0.1% v místech jako je obvod pro měření proudu nebo obvody pro regulaci proudu a napětí a pak rezistory s tolerancí 1% kolem MCU a dalších částí obvodů, kde přesná hodnota není nutná a lze na nich ušetřit.



Obr. 3.3 Schéma zapojení regulátoru napětí a proudu



Obr. 3.4 Obvod pro měření proudu na bočniku R41

4 OBVODOVÝ NÁVRH ŘÍZENÍ ZDROJE

Zdroj má jednu hromadnou řídicí DPS, která se stará o komunikaci s externím zařízením (osobní počítač, ...), komunikaci se všemi moduly zdroje, ovládací panel zdroje včetně LCD, a nakonec i řízení ventilátorů a teplot základních dvou modulů zdrojů. Požadavky na hardwarovou výbavu jsou tedy celkem jasné – zdroje pro řízení ventilátorů s možností řízení z MCU, výstupy pro ovládání reléových spínačů jednotlivých modulů, přípojka pro externí prvky jako je displej, rotační enkodér, UART a I2C modul pro komunikaci s externími zařízeními, I2C buffer pro komunikaci s větším množstvím teplotních čidel a samotnými moduly zdroje, napájecí zdroj a vstupy/výstupy pro tlačítka a LED diody. Napájecí zdroj bude rozdělen na více částí, musí čítat zdroj pro PC ventilátory 12 V, zdroj pro mikrokontrolér 3,3 V a zdroj pro podsvícení LCD. Zdroje pro ventilátory budou dvojího typu – možnost řízení ventilátorů pomocí PWM regulace (4. pin ventilátoru [17]) a pomocí změny jeho napájecího napětí.

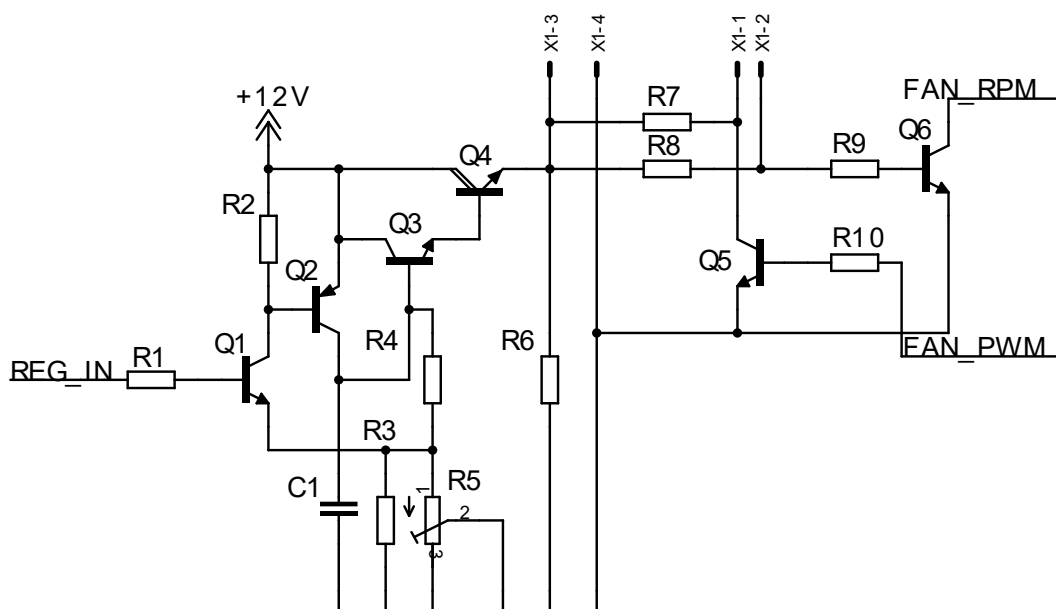
4.1 Řídicí mikrokontrolér a připojené periferie

Jádrem řídicí desky zdroje je mikrokontrolér STM32F103 v pouzdře LQFP100 taktovaný na kmitočet 72 MHz. Na jeho paralelní datové sběrnici je umístěn dotekový LCD panel s rozlišením 480x320 px o velikosti 3,95“ sloužící pro přehledné zobrazení parametrů zdroje a jeho aktuálních hodnot a zároveň pro snadné ovládání pomocí jeho dotekové plochy připojené na sběrnici SPI mikrokontroléru. Pro další ovládání z hlediska uživatele je ovládací panel vybaven rotačním enkodérem připojeným na vstupy časovače mikrokontroléru STM32, které jsou pro tento účel hardwarově připraveny. Tlačítko pro uvedení zdroje do režimu spánku (stand-by) je připojeno na vývod PA0 s funkcí wake-up pro probouzení mikrokontroléru z režimu hlubokého spánku a dalších nízko příkonových režimů. Z mikrokontroléru jsou dále vyvedeny dvě sběrnice I2C použité k řízení a ovládání zdroje. Na první z nich jsou připojena teplotní čidla dvou základních modulů zdroje a externí převodník DA pro analogové řízení ventilátorů. Ke druhé sběrnici I2C jsou připojeny jednotlivé moduly zdroje a I2C buffer P82B96 [18] sloužící k převodu sběrnice I2C na „vysokonapětovou“ pro možnost komunikace na velké vzdálenosti s dalšími moduly zdroje. Dále je na sběrnici I2C zařazen další I2C buffer sloužící k rozšíření maximální zatěžovací kapacity, kam jsou připojeny teplotní čidla.

4.2 Napájení řídicí desky zdroje a řízení ventilátorů

Řídicí deska je napájena zdrojem 12 V AC sloužících pro napájení ventilátorů chladiče. Napětí je na desce usměrněno a stabilizováno na napětí 5 V potřebné ke správné funkci modulu LCD. Zdroj 5 V je řešen pouze pomocí lineárního regulátoru 7805 jelikož ztráty při odběru nejsou příliš velké, jelikož zvolený LCD je poměrně malý a pro podsvícení nepotřebuje příliš velký proud. Dále deska musí čítat zdroj 3,3 V pro mikrokontrolér, převodník DA sloužící pro řízení ventilátorů a další periferní obvody pro komunikaci. Regulace otáček ventilátorů je tedy možná dvěma způsoby, PWM regulace na 4. pinu ventilátoru nebo napětěová regulace jeho napájecího napětí pomocí převodníku DA a malého lineárního zdroje. Pro lineární regulaci se nabízí možnost použití stabilizátoru LM317 nebo stavba vlastního malého zdroje s tranzistorem. V daném zapojení byla zvolena cesta stavby vlastního regulovatelného zdroje s výstupními parametry 0-12 V při proudu do 1 A. Pro tuto funkci byl zvolen regulační tranzistor

MJD112T4G [19]. Tento tranzistor je Darlingtonového zapojení a je plně dostačující pro danou aplikaci. Zapojení regulátoru pro ventilátor na obr 4.1 dále obsahuje další tranzistory zajišťující jeho regulaci, celé zapojení odpovídá zapojení na obr. 1.8. K zapojení zdroje jsou přidány další tranzistory zajišťující PWM regulaci ventilátoru nezávislou na velikosti napětí na PWM pinu způsobeného interním pull-up rezistorem ve ventilátoru. Zapojení dále čítá trimr R5 sloužící k nastavení maximální hodnoty výstupního napětí, tedy 12 V. Regulace je zajištěna pomocí tranzistoru Q4 posilovaném tranzistory Q2 a Q3 jako dalšími stupni s vazbami na referenci. Zapojení je poměrně jednoduché a neobsahuje pořádnou zpětnou vazbu pro napětí, jelikož ventilátory jsou poměrně nenáročné a výsledná hodnota není tolik kritická (není potřeba regulace otáček na otáčku přesně). Zpětná vazba tedy pouze reguluje skrze úbytky napětí na U_{BE} tranzistorů Q4 a Q3. Zdroj je ovládán pomocí tranzistoru Q1 přivedeného na převodník DA. Vybraný mikroprocesor bohužel obsahuje pouze dva kanály převodníku DA, a z toho důvodu byl zvolen převodník DA MCP4728 [20], který má 4 vlastní kanály s rozlišením 12 bitů a komunikací přes rozhraní I2C.



Obr. 4.1 Zapojení ventilátoru do obvodu s regulací napětí a PWM

Řízení ventilátorů pomocí PWM regulace je jednoduché a velice efektivní. Na rozdíl od řízení ventilátoru za pomoci změny napájecího napětí je stabilnější a přesnější, jelikož samotné řízení otáček hlídá sám ventilátor svým integrovaným čipem. Napěťové řízení není tak přesné hlavně z důvodu, kdy změnou vstupního napětí je způsobena změna napětí pro integrovaný regulátor ventilátoru čímž vzniká riziko uvedení do nefunkčního stavu vlivem nedostatečného napájení. Výhodou oproti PWM regulaci je cena ventilátorů, jelikož 3-vodičové ventilátory jsou levnější díky řízení a nevhodnosti do moderních (například) počítačových sestav.

Pro napájení mikrokontroléru je použit DC/DC měnič MP1469 [13] měnící napětí 12 V na 3,3 V. Na řídicí desce je dále umístěn piezoelektrický měnič pro možnost akustického projevu zdroje například při přechodu z režimu napětěového do režimu proudového nebo při zapnutí zdroje a další. Dále jsou na DPS umístěny tranzistorové spínače pro ovládání relé sloužících k spínání napájení pro jednotlivé transformátory modulů zdrojů a také pro LED diody indikující stav zdroje (zapnutý / vypnutý modul, porucha a další).

Další důležitou částí řídicí desky jsou I2C buffery sloužící k oddělení sběrnice I2C a jejímu rozdělení na dvě části. Toto oddělení zajistí možnost většího celkového kapacitního zatížení sběrnice čímž je umožněno připojit více teplotních čidel. Deska je připravena na připojení teplotních čidel typu LM75 [21]. Teplotní čidla jsou plánována pro měření teploty na transformátorech, ve volném prostředí šasi, na chladiči pro tranzistory a na Graetzův můstek pro hlídání maximálních teplot.

4.3 Komunikace I2C a UART

Pro komunikaci mezi jednotlivými moduly zdroje je použita již zmíněná sběrnice I2C. Z podstaty sběrnice I2C vyplývá, že každý připojený modul musí mít vlastní adresu o velikosti 7 bitového čísla (0-127) nebo 10-bitového čísla (0-1023) kde adresa 0 je obsazena zařízením master a nelze ji využít. Aby bylo možné snadno identifikovat jednotlivé připojené moduly zdroje, je nutné kromě adresy zařízení zavést ještě další identifikaci. Pro tento účel byl vytvořen komunikační protokol popsáný v tabulce 1. Komunikační protokol obsahuje pravidelnou obálku o velikosti 28 B, ke které samotná periferie I2C přidá adresu zařízení, s níž je komunikováno a ke každému zaslanému byte ještě ověřovací ACK/NACK bit a start a stop bity. Velikost 28 B byla zvolena záměrně, aby bylo možné všechna zařízení obsloužit v dostatečně rychlém čase. Jako vzorkovací čas byla zvolena tak, aby každý modul měl na dotázání se od řídicí desky vyhotovenou a odeslanou odpověď s patřičným datovým obsahem do maximálně 30 ms, připočte-li se komunikace a zaslaná data od řídicí desky do modulu zdroje, celková doba komunikace řídicí desky s modulem nesmí překročit 80 ms. Tyto časy jsou zvoleny ze znalosti rychlosti komunikace a velikosti datového balíčku s mírným přídavkem na dobu zpracování dat v MCU případně jeho probuzení apod. Celková doba pro obsloužení všech modulů v případě připojení všech standardně podporovaných 127 modulů je tedy ohromných 10 s, z tohoto důvodu je snaha dosažení co největší rychlosti a dosáhnutí co nejkratších časů. Jednou z možností zrychlení je zvýšení komunikační rychlosti I2C ze 100 kHz na 400 kHz, což ale zvyšuje nároky na kapacitní zatížitelnost sběrnice. Z tohoto důvodu je sběrnice nastavená na frekvenci 100 kHz s přiznáním faktu, že hodnoty budou aktualizované jedenkrát za 10 s. Pro zvýšení rychlosti komunikace na nejmenší možnou, tedy 60 ms je u každého modulu použito rozhraní DMA s ukazatelem na obálku. Obálka je připravena hned dvakrát, kdy jedna je připravena pro odeslání a druhá je přepisována novějšími daty, jakmile k přepisu dojde, ukazatel se přesune. Přijatá data také okamžitě přebere sběrnice DMA a data přesune na bezpečné místo s tím, že ihned po přijetí se vyhodnotí jen nejdůležitější části – příkaz pro zapnutí / vypnutí modulu. Další data jsou zpracována (zapsána na převodníky DA, relé, ...) až po skončení komunikace a nová data jsou tedy měřena až pro další I2C přenos.

Tabulka 1 Komunikační protokol komunikace I2C

Velikost	Význam při příjmu SLAVE	Význam při příjmu MASTER
32 bit	požadované výstupní napětí	aktuální výstupní napětí
32 bit	-	velikost vstupního napětí 1
32 bit	-	velikost vstupního napětí 2
32 bit	požadovaný výstupní proud	aktuální výstupní proud
32 bit	požadovaná výstupní frekvence	aktuální výstupní frekvence
8 bit	-	aktuální teplota chladiče
8 bit	-	aktuální teplota transformátoru
8 bit	ventilátor zapnuto/vypnuto	aktuální otáčky ventilátoru
8 bit	ovládání relé, zapnutí, vypnutí...	stav modulu (chyba, OK, ...)
32 bit	CRC	CRC

Pro identifikaci modulů zdroje je použit stejný komunikační protokol s následujícími změnami uvedenými v tabulce 2.

Tabulka 2 Komunikační protokol pro identifikaci modulu

Velikost	Význam při příjmu SLAVE	Význam při příjmu MASTER
32 bit	-	maximální výstupní napětí
32 bit	-	velikost vstupního napětí 1
32 bit	-	velikost vstupního napětí 2
32 bit	-	maximální výstupní proud
32 bit	-	maximální výstupní frekvence
8 bit	byte určující požadavek na identifikaci (0xAA)	rozlišení převodníků DA
8 bit	byte určující požadavek na identifikaci (0x55)	rozlišení převodníků AD
8 bit	-	možnosti modulu (relé, ...)
8 bit	-	stav modulu (chyba, OK, ...)
32 bit	CRC	CRC

Komunikace UART probíhá z důvodu jednoduchosti a snadné obsluhy z jakéhokoli zařízení s komunikačním rozhraním RS 232 pouze s ASCII znaky nikoli binárně pro zajištění rychlejší a bezpečnější komunikace. Protokol pro sběrnici RS 232 je také velice jednoduchý – uživatel zašle příkaz zdroji s danou syntaxí, která je pro uživatele přehledně vypsaná po zadání požadavku nebo ihned při zapnutí zdroje. Z důvodu jednoduchosti a větší kompatibility nejsou pro RS 232 přivedeny doplňující modemové piny RTS, CTS a další, které by komunikaci řídily, ale jsou připojeny pouze piny pro vysílání a příjem. Z tohoto důvodu zdroj nemá žádnou kontrolu, zda je na této sběrnici někdo připojen nebo není a stále tuto sběrnici kontroluje, resp. čeká na přerušení od periferie UART oznamující příjem dat. Komunikace má pouze několik jednoduchých příkazů, které jsou vypsané v tabulce 3:

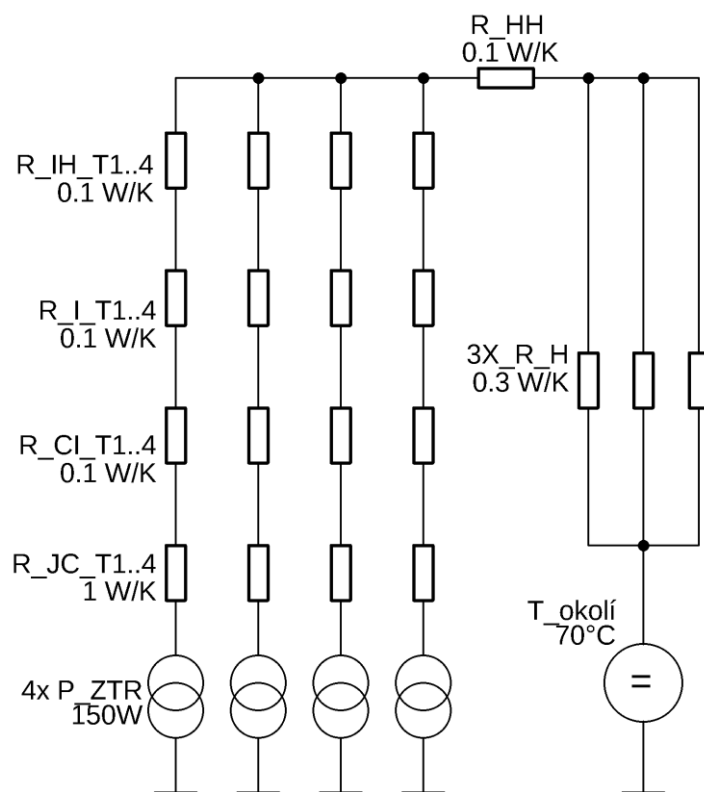
Tabulka 3 Komunikační protokol RS232 sběrnice

Symbol	Syntaxe příkazu	Význam
U	U[ch][u]V	nastaví výstupní napětí na kanále [ch] na velikost [u]
I	I[ch][i]A	nastaví výstupní proud na kanále [ch] na velikost [i]
f	f[ch][f]Hz	nastaví výstupní frekvenci na kanále [ch] na velikost [f]
R	R[ch]	vypíše aktuální hodnoty z kanálu [ch]
L	L	vypíše seznam všech připojených zařízení s jejich adresami
?	?	zobrazí nápovědu, resp. seznam příkazů

5 NÁVRH CHLAZENÍ ZDROJE

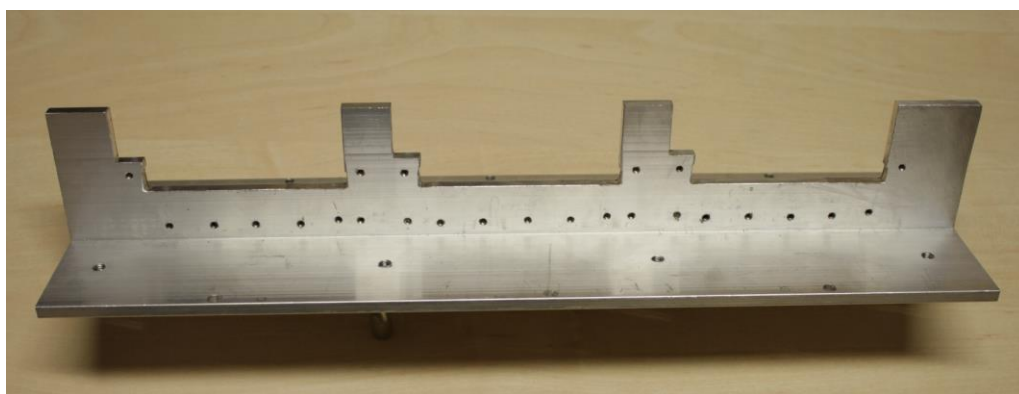
Výkonové prvky zdroje, tedy regulační kaskádu modulu zdroje, je třeba řádně chladit, jelikož na ní vzniká velká výkonová ztráta. Maximální výkonová ztráta na zdroji je při nastavení proudu na maximální možnou hodnotu při zkratovaném výstupu, tedy ideálně 0 V na výstupu. V takovém případě je na tranzistorové kaskádě, podle měření, úbytek napětí přibližně 30 V a výstupní proud činí 5 A. Tento výpočet odpovídá ztrátě 150 W, což není malá hodnota ke chlazení. Vzhledem k vysokým výkonovým ztrátám byla zvolena aktivní metoda chlazení, tedy chlazení pomocí ventilátorů. Jako hlavní chladiče byly zvoleny staré boxové chladiče od procesorů AMD Phenom II se stanoveným TDP 125 W a jim podobný boxový chladič od procesorů AMD FX se stejným TDP. Dané chladiče lze použít i při mírném taktování procesoru za předpokladu řádného větrání skříně. Je-li počítáno s teplotou okolí 70 °C, měl by tento chladič stačit pro uchlazení tranzistorů se ztrátou 150 W na teplotu menší než 150 °C udávanou výrobcem jako maximální. Problémem jsou ale teplotní odpory mezi čipem tranzistoru, jeho pouzdrem a chladičem. Tranzistorové moduly budou na chladiči odizolované, aby byla snadno splnitelná podmínka galvanické izolace zdroje, a tedy i izolace tranzistorů od šasi. Z výše zmíněných důvodů bylo usouzeno jako efektivnější umístění dvou modulů na společný velký chladič s třemi těmito boxovými chladiči a prostorem pro umístění třetího interního modulu. Jako společný vodič tepla byl zvolen hliníkový profil tvaru T o šířce materiálu 5 mm, který bude sloužit jako spojnice těchto tranzistorů a chladičů. Tepelná vodivost tohoto profilu není příliš vysoká, ale pro tento účel postačující. Navíc tranzistory jsou umístěny těsně u hrany, kde jsou umístěny i chladiče a z toho důvodu byla ve výpočtu tepelná vodivost tohoto profilu zanedbána. Celkový tepelný odpor bude součtem tepelných odporů mezi čipem a pouzdrem, pouzdrem a hliníkovým profilem, kde bude odpor složený ze součtu tepelného odporu přechodu a izolační podložky. Dále samozřejmě tepelný odpor přechodu profilu a chladiče a pak samotného chladiče. Podle specifikací výrobce [22] je tepelný odpor 0,3 K/W. Na tepelné přechody mezi komponenty je použita kvalitní teplo vodivá pasta s tepelnou vodivostí asi 10 W/mK. Celkové tepelné schéma je vyobrazeno na obrázku 5.1. Z rovnice 5.1 vyplývá, že výsledná teplota bude o 78,75 °C vyšší než teplota okolí.

$$\Delta T = P \cdot \sum R_{TH} = 150 \cdot \left(\frac{1}{4} + \frac{3 \cdot 0,1}{4} + 0,1 + \frac{0,3}{3} \right) = 78,75 \text{ } ^\circ\text{C}$$



Obr. 5.1 Tepelné schéma chladiče a prvků jednoho modulu

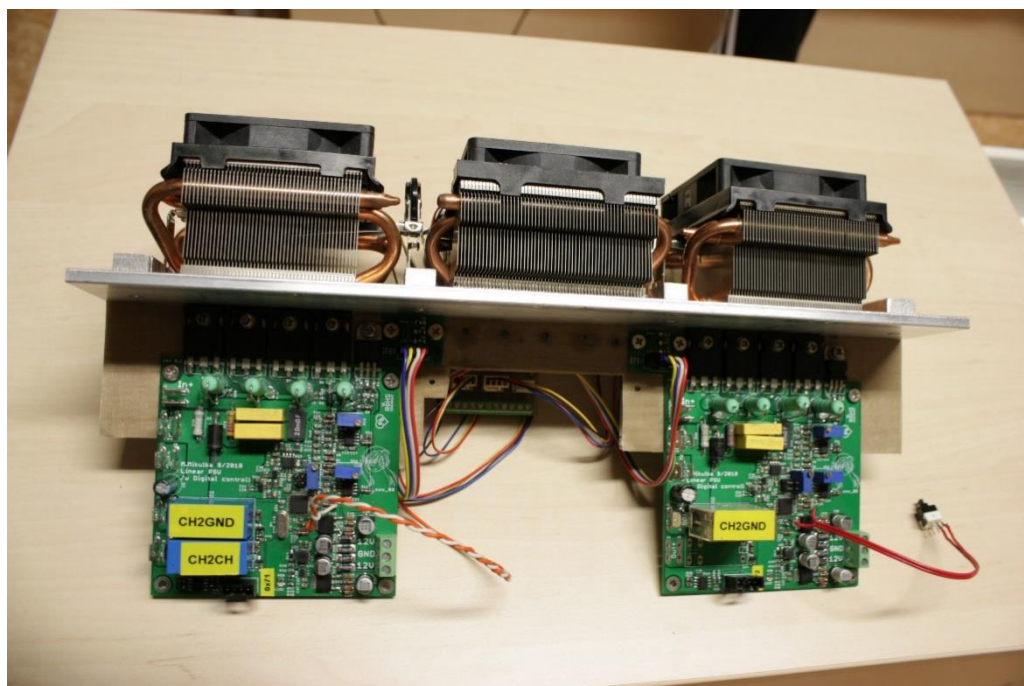
Vezme-li se v potaz teplota okolí 70 °C, znamenalo by to teplotu na tranzistorech téměř 150 °C, což je dostatečné. Bylo rozhodnuto, že dimenzování je dostatečné, a to ze dvou důvodů, jednak jsou osazeny ventilátory s větším průtokem vzduchu, než mají chladiče originálně, teplota okolí s největší pravděpodobností nebude 70 °C, jelikož sání je umístěno mimo zdroj a je tedy nasáván chladnější vzduch, než je uvnitř konstrukčního boxu. Poslední fakt určující dostatečnost je, že není předpokládán dlouhodobý provoz ve zkratovaném stavu. Aby nedošlo k poškození součástek příliš vysokou teplotou, je nastavena hraniční teplota 125 °C, kterou jakmile procesor zaznamená na jednom z teplotních čidel, tak okamžitě vypne daný napájecí modul a zobrazí na displeji chybovou hlášku. Již při teplotě 85 °C, která je ještě plně bezpečná, zobrazí na displeji oranžové upozornění upozorňující na vysokou teplotu v prostoru zdroje.



Obr. 5.2 Fotografie tepelného vodiče pro spojení chladičů a modulů zdroje

Na obr. 5.2 je vidět hliníkový profil připravený pro osazení 3 modulů zdrojů

po 4 tranzistorech s teplotními čidly mezi jednotlivými moduly. Zdroje budou připojeny pouze dva osazené na krajních polohách chladiče (viz. obr. 5.3) aby se jejich teploty příliš neovlivňovaly. Prostřední místo pro modul zůstane prozatím volné. V budoucím podání by zde měl být umístěn modul zajišťující DDS vzorkování střídavých signálů s napětím z modulů zde popisovaných.

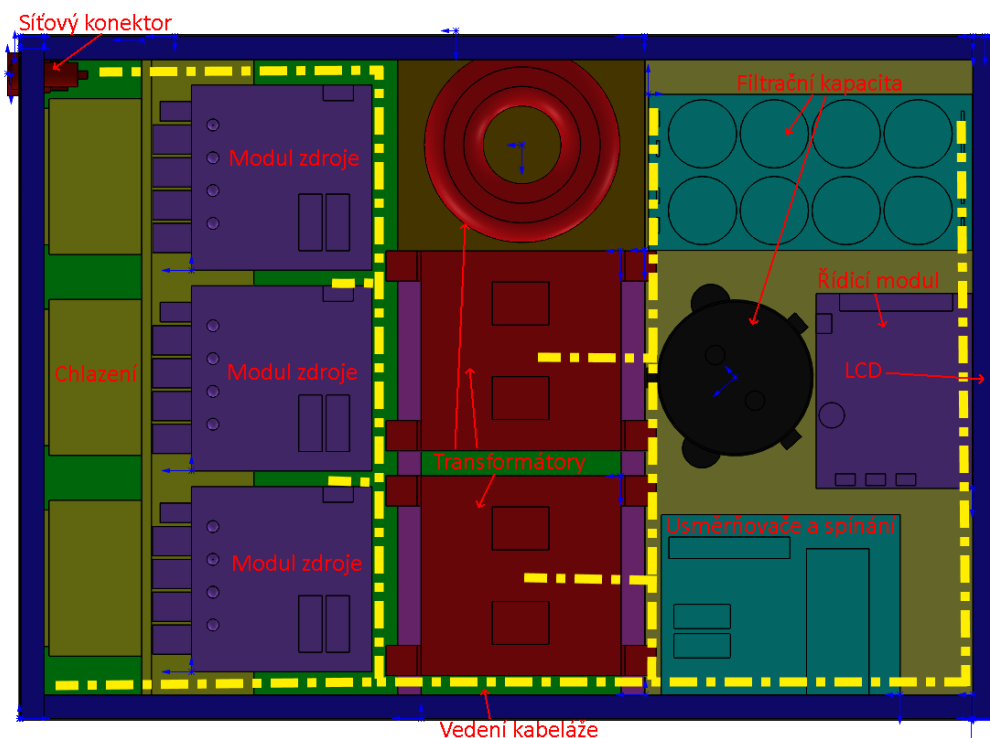


Obr. 5.3 Fotografie chladiče s osazenými moduly zdrojů

6 NÁVRH ŠASI PRO ZDROJ A ROZMÍSTĚNÍ JEHO KOMPONENT

Zdroj bude umístěn v hliníkovém šasi o rozměrech již stávajících přístrojů, kde bude zdroj následně používán. Vzhledem k poměrně netradičním velikostem těchto přístrojů a nutnosti pohodlného umístění všech komponent, byla zvolena cesta návrhu šasi vlastního. Šasi bude tvořeno hliníkovými hranoly o velikostech 12x6 mm. Z důvodu chlazení budou na zadní stěně šasi umístěny otvory pro tři ventilátory a zároveň v krajích budou umístěny konektory pro síťový vstup s pojistkou se síťovým vypínačem a také konektor pro připojení dalších, externích, modulů. Na předním panelu šasi bude umístěn vybraný LCD displej, ovládací prvky, konektor pro připojení PC a výstupní svorky zdroje. Boční panely zdroje zůstanou prázdné, bez uší pro nošení zdroje a dalších částí, jelikož zdroj je nutné umístit do prostoru kde pro ně nezbyvá prostor. Na vrchní a spodní straně zdroje budou průduchy pro výfuk teplého vzduchu ze zdroje. V přední části zdroje je zároveň místo připravené pro případný ventilátor umístěný na vrchní straně šasi pro odvod teplého vzduchu od transformátorů a usměrňovače, avšak zatím nebude osazen.

Šasi bylo navrženo v programu Solidworks, výsledné rozmístění komponent a předpokládané vedení kabeláže je na obrázku 6.1.



Obr. 6.1 Předpokládané rozmístění komponent v šasi

Komponenty jsou v šasi rozmístěny tak, aby filtrační kondenzátory byly umístěny, co možná nejdále od zdrojů tepla a bylo možné je dimenzovat na nižší teploty. Zároveň je nutné je umístit do cesty napájecího napětí, což se podařilo jejich „sériovým“ připojením do vedení. Na přední straně zdroje je umístěna celá řídicí deska, jelikož je zde umístěn i LCD displej a je to tedy nejvhodnější umístění pro tuto desku. Transformátory jsou poměrně nešťastně umístěny do středu šasi i přes to že jsou to nejtěžší prvky celého zdroje, ale jejich umístění je dáno jejich tepelnými vlastnostmi, kdy nemohou být zaměněny s chladičem.

Kabeláž ve zdroji je vedena tak, aby co nejvíce umožňovala přístup k jednotlivým komponentám zdroje a zároveň nevytvářela zbytečně dlouhé smyčky na vedení. Nevýhodou vedení hromadnými kanály je fakt, že datové vedení je umístěno hned u silového vedení a může být snadno zarušeno. Aby bylo tomuto faktu zabráněno, jsou pro datové vedení zvoleny stíněné kabely.

Vedení tepla je zprostředkováno pomocí trojice ventilátorů umístěných přímo na chladičích. Ventilátory nasávají vzduch ze zadní části zdroje, vzduch je foukán směrem do zdroje, kde se odráží od základny chladičů a míří směrem do horní a spodní části zdroje, kde jsou umístěny průduchy pro přímý výfuk vzduchu ven.



Obr. 6.2 Návrh předního panelu zdroje

Přední panel byl navržen tak, aby bylo ideálně využito místo na celém panelu a všechny prvky byly dostatečně vzdálené, aby si vzájemně nepřekážely při používání. Panel LCD se všemi informacemi je umístěn dominantně na středu celého panelu a kolem něho jsou nejdůležitější dva prvky – výstupy zdroje a rotační enkodér pro nastavování. Na okraji panelu je umístěn stand-by vypínač a konektor pro připojení komunikace RS 232 s PC. Na celém panelu je dále umístěno celkem 6 ks LED diod indikující nejdůležitější stavy i přes to, že jsou zobrazeny na LCD panelu. Tyto stavy jsou: Propojení modulu s PE, propojení modulů mezi sebou a LED indikující proudový chod daného modulu. Nakonec je vedle rotačního enkodéru umístěna LED dioda indikující poruchu ve zdroji nebo kritické přehřátí (teplota překročila 125 °C).

7 OŽIVENÍ ZDROJE A PRVOTNÍ NASTAVENÍ

Po osazení všech komponent zdroje byl čas na jeho postupné ožívání. Jako první byl ožíván modul zdroje. Po připojení zdroje je nutné nastavit výchozí hodnotu napětí a proudu. Nastavení probíhá pomocí trimrů na patřičných pinech operačních zesilovačů (viz. obr 3.3 a 3.4). Jednotlivými trimry nastavíme postupně minimální výstupní napětí (mělo by být kolem 0,5 V) a poté minimální proud. Nastavování proudu probíhá ve dvou krocích – prvním krokem je nastavení korektního výstupu ze zesilovače na proudovém bočniku, který je v klidu protékán proudem ideálně 0 A a tuto hodnotu je tedy třeba nastavit i na výstup operačního zesilovače. Ověření správného nastavení provedeme měřením na výstupu operačního zesilovače například pomocí připojeného AD převodníku v řídicím mikrokontroleru. Následně nastavujeme minimální proudovou pojistku pomocí trimru R26 (viz. obr. 3.3). Po nastavení těchto základních hodnot je možné nahrát do mikrokontroléru finální verzi software a zdroj ověřit přímými příkazy přes I2C rozhraní.

Ožívání řídicí desky probíhá podobným způsobem. Na řídicí desce je nejprve nutné nastavit velikosti maximálních napětí na výstupech pro ventilátory. Nastavíme tedy maximální hodnotu na DA převodníku MCP4728 nebo jej nastavíme do stavu vysoké impedance a zkratujeme propojky SJ1 – SJ3 (viz schéma v příloze A1). Napětí nastavujeme pomocí trimrů R56, R58 a R60 tak, aby na výstupních konektorech pro ventilátory bylo 12 V nebo napětí pro daný ventilátor.

Posledním krokem při ožívání je kontrola I2C rozhraní, zda není kapacitně přetíženo. Tato kontrola je provedena připojením osciloskopu na patřičné I2C sběrnice a sledováním probíhající komunikace, zda má korektní délky náběžných hran či zda jsou signály stále ještě tvaru obdélníka. V případě problému s příliš vysokou kapacitou je třeba snížit velikost pull-up rezistorů, snížit rychlost komunikace nebo zkrátit délku vedení.

8 MĚŘENÍ ZDROJE

Pro osazené moduly zdrojů byly změřeny jejich dynamické a statické charakteristiky a chování za daných okolností. Měření bylo provedeno na zdroji bez vrchního víka a měřicí vodiče nebyly dokonale odstíněné, reálné parametry by to ale příliš ovlivnit nemělo, jelikož ke zdroji nebude připojován stíněný vodič k napájení zařízení ale pouze obyčejná kabeláž. Takovéto měření tedy více odpovídá chování v reálném nasazení zdroje.

Tabulka 4 Seznam použitých měřicích přístrojů

Uplatnění	Přístroj
voltmetr	Fluke 289
ampérmetr	Fluke 289
osciloskop	Owon SDS7102V
voltmetr/ampérmetr s RS232	Voltcraft M3650D
zátěž	vlastní stavba přesné zátěže se zatěžovacími režimy typu CC, CV a konstantního odporu

8.1 Vliv kolísání síťového napětí na výstupní parametry zdroje

Cílem tohoto měření bylo změřeni vlivu povoleného kolísání síťového napětí na výstupní parametry zdroje. Měření bylo provedeno při napájení zdroje pomocí oddělovacího jednofázového transformátoru o výkonu 3,8 kW. Za oddělovacím transformátorem byl připojen autotransformátor Křížík RA20, na kterém bylo nastavováno vstupní napětí do síťového přívodu zdroje a na výstupu zdroje byly zaznamenávány příslušné hodnoty při maximálním výstupu zdroje. Naměřené hodnoty jsou uvedeny v tabulce 5.

Tabulka 5 Vliv kolísání vstupního napětí zdroje na jeho výstupní parametry

Síťové napětí	Výstupní napětí v režimu CV 24 V, 4 A	Výstupní proud v režimu CC 24 V, 4 A
207 V	24,010 V	4,0317 A
230 V	24,013 V	4,0315 A
255 V	24,016 V	4,0318 A

8.2 Vliv zátěže na výstupní parametry zdroje

Cílem tohoto měření bylo ověření kvality napěťového a proudového regulátoru zdroje a zjištění jeho vnitřního odporu v daných režimech CC a CV při různé zátěži, resp. výstupní hodnotě (hodnotách).

Tabulka 6 Vliv zátěže na výstupní parametry v režimu CV

Nastavené napětí	Zatěžovací proud			
	0 A	1 A	2 A	3 A
12 V	12,00 V	11,99 V	11,96 V	11,91 V
24 V	23,99 V	23,98 V	23,98 V	23,97 V

Tabulka 7 Vliv zátěže na výstupní parametry v režimu CC

Nastavený proud	Napětí na zátěži			
	5 V	10 V	20 V	24 V
1 A	1,0332 A	1,0313 A	1,0314 A	1,0309 A
3 A	3,0109 A	3,0111 A	3,0112 A	3,0111 A

Z naměřených hodnot je možné určit vnitřní odpor zdroje. Vnitřní odpor zdroje v režimu CV by měl být ideálně co nejmenší a v režimu CC naopak co největší. Z naměřených hodnot byla dále určena chyba výstupní hodnoty, respektive odchylka od hodnoty nastavené. Rovnice 7.1 ukazuje vypočtenou hodnotu výstupního odporu v napěťovém režimu zdroje a rovnice 7.3 dále pro režim konstantního proudu. Rovnice 7.2 resp. 7.4 dále ukazují vypočtené odchylky od nastavených hodnot v příslušném režimu.

$$R_{V_{CV}} = \frac{\Delta U}{\Delta I} = \frac{12 - 11,99}{1 - 0} + \frac{11,99 - 11,96}{2 - 1} + \frac{11,96 - 11,91}{3 - 2} = 0,03 \Omega \quad (7.1)$$

$$s = \frac{\Delta U}{U_{nastavene}} \cdot 100 \% = \frac{(24 - 23,97)}{24} \cdot 100 \% = 0,125 \% \quad (7.2)$$

$$R_{V_{CV}} = \frac{\Delta U}{\Delta I} = \frac{(5 - 10) + (10 - 20) + (20 - 24)}{3} = 95 \text{ k}\Omega \quad (7.3)$$

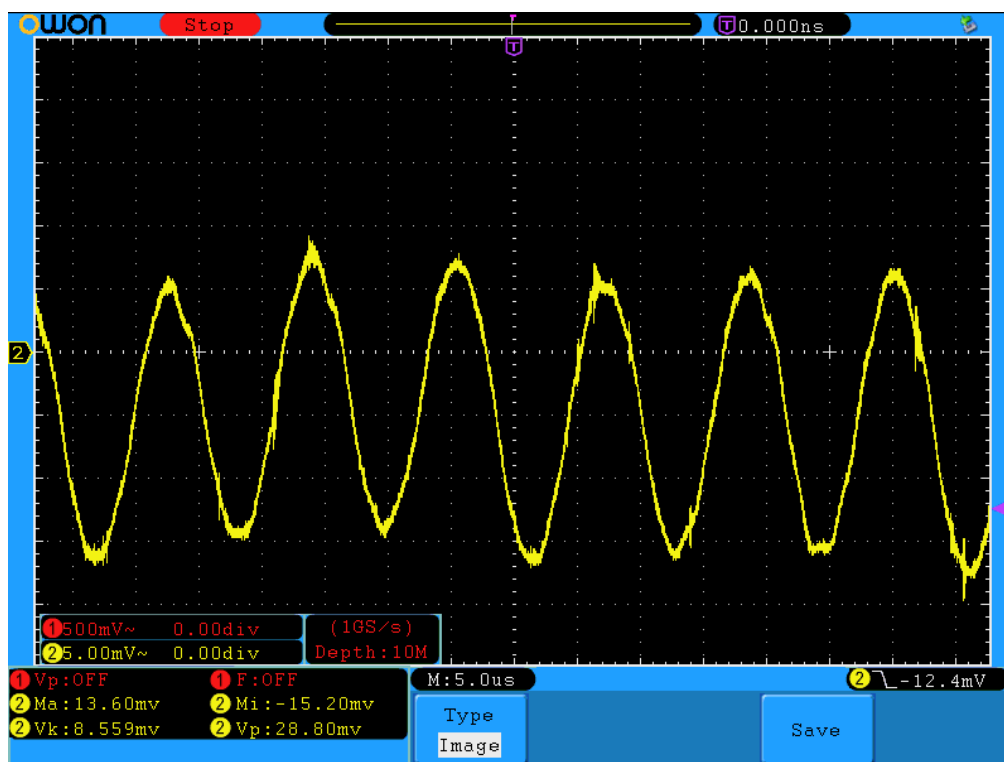
$$s = \frac{\Delta I}{I_{nastavene}} \cdot 100 \% = \frac{(3,0111 - 3)}{3} \cdot 100 \% = 0,37 \% \quad (7.4)$$

8.3 Zjištění velikosti zvlnění/šumu na výstupních svorkách zdroje

Cílem tohoto měření bylo stanovení velikosti šumu a zvlnění na výstupních svorkách zdroje. Výstupní šum v režimu konstantního napětí byl měřen pomocí osciloskopu a pomocí multimetru.

Tabulka 8 Zvlnění výstupního napětí v režimu CV

Proud	Napětí	RMS – multim.	RMS – osc.	PkPk – osc.
1 A	12 V	8,16 mV	4,121 mV	30,12 mV
1 A	24 V	19,72 mV	8,559 mV	28,80 mV
3 A	12 V	8,13 mV	4,052 mV	29,81 mV
3 A	24 V	19,78 mV	11,17 mV	47,43 mV



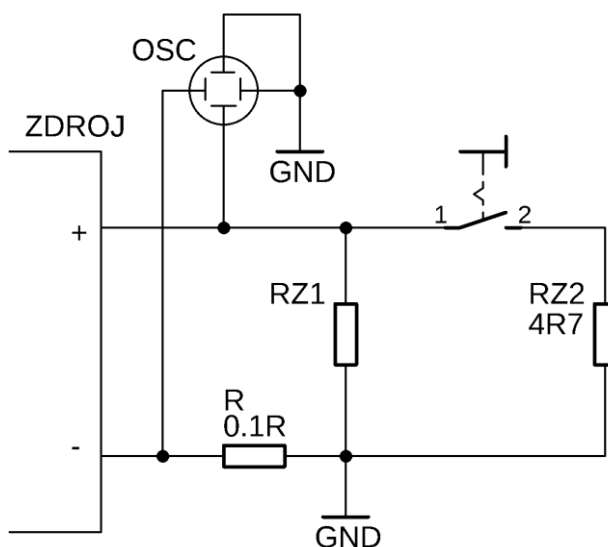
Obr. 8.1 Oscilogram ukazující šum na výstupu zdroje v režimu CV

Tabulka 9 Zvlnění výstupního proudu v režimu CC

Proud	Napětí	RMS – multim.	RMS – osc.	PkPk – osc.
1 A	12 V	451 μ A	490 μ A	1,031 mA
1 A	24 V	477 μ A	512 μ A	1,252 mA
3 A	12 V	815 μ A	901 μ A	1,760 mA
3 A	24 V	912 μ A	1,122 mA	1,923 mA

8.4 Dynamické vlastnosti zdroje

Cílem tohoto posledního měření bylo zjištění, jak zdroj reaguje na změny výstupních parametrů, resp. zvětšení či zmenšení zatěžovacího proudu v režimu CV a zmenšení či zvětšení napětí na zátěži v režimu CC. Měření probíhalo na osciloskopu OWON SDS7102V a jako zátěž byl použit rezistor o velikosti 4,7 Ω a umělá zátěž z předchozích kapitol. Měřicí aparatura byla zapojena podle schématu na obr. 8.2 a relé bylo spínáno s frekvencí 5 Hz.

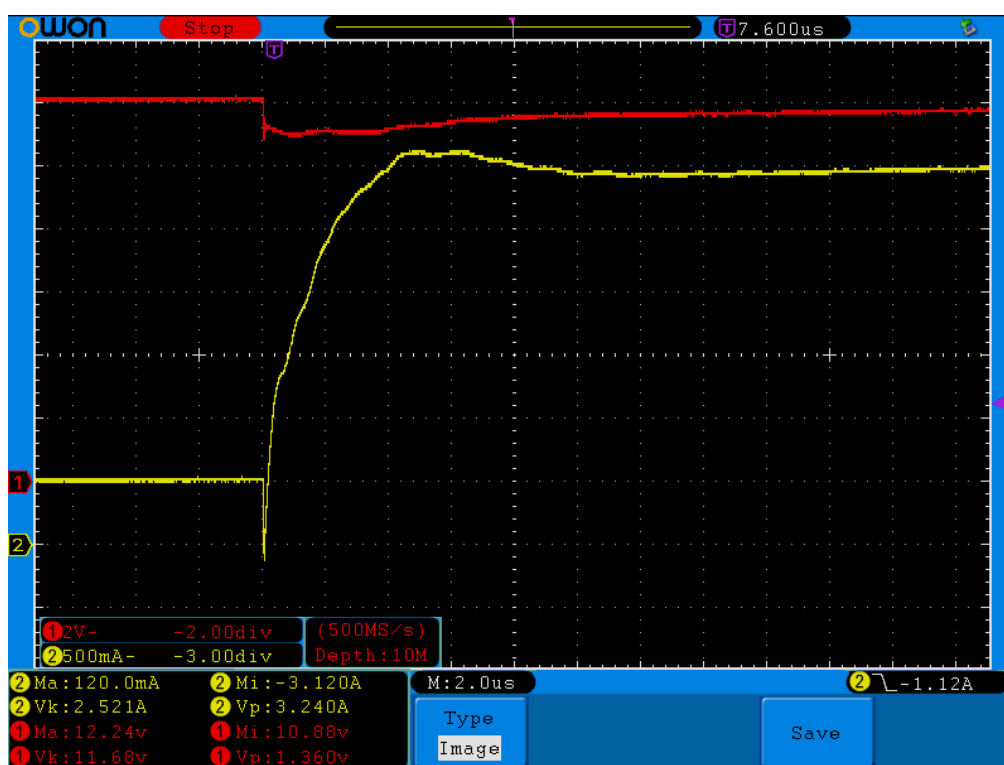


Obr. 8.2 Schéma zapojení pro měření dynamických vlastností zdroje

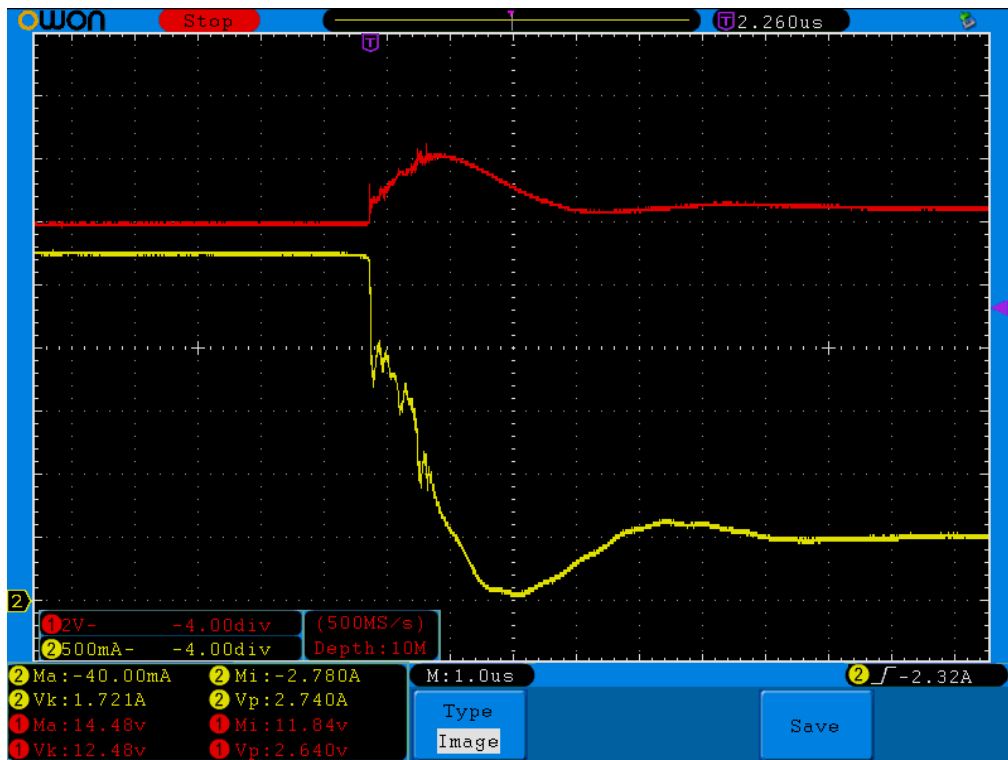
V první části měření bylo na zdroji nastaveno napětí 12 V pro maximální proud zdroje (5 A). Jako zátěž byla připojena umělá zátěž s nastavením pro zatěžování konstantním proudem 500 mA. Pomocí relé byl v pravidelných intervalech připojen rezistor o velikosti 4,7 Ω , který vytvořil zátěž dalších přibližně 2,55 A. Na obrázku 7.3 je vidět reakce zdroje na připnutí této zátěže, kdy napětí prudce kleslo na hodnotu přibližně 11 V (červená sonda osciloskopu, invertované zobrazení) a následně narůstalo zpět na hodnotu 12 V sníženou o úbytek na bočníku. Proud při této reakci klidně narůstal a nedošlo k žádným zákrmitům znamenajícím problém či nestabilitu, mimo prvotního v době sepnutí tvořeného zřejmě zákrmitem kontaktu relé (žlutá sonda relé připojená na bočník R s automatickým přepočtem na proud).

Na obrázku obr. 7.4 je dále zachycena reakce zdroje na odpojení zmíněné zátěže, rezistoru $4,7 \Omega$. Na oscilogramu jsou opět vidět zátky v počátku odpojení způsobené kontaktem relé nebo rušením vedení díky obdélníkovému pulzu přivedenému do indukčnosti relé. Po tomto rušivém pulzu je již spád proudu rovný tvořený kapacitou na výstupu zdroje. Napětí se při této změně příliš nezmění, jeho velikost vzroste na dobu $3 \mu\text{s}$ o přibližně 2 V (obr. 8.4, červená sonda) a následně je ustáleno na původní hodnotě s odchylkou způsobenou bočníkem. Tento napěťový překmit by byl odstranitelný přidáním například sériového RC článku na výstupní svorky zdroje, což by ale zhoršilo zbylé parametry jako právě měřenou dobu ustálení.

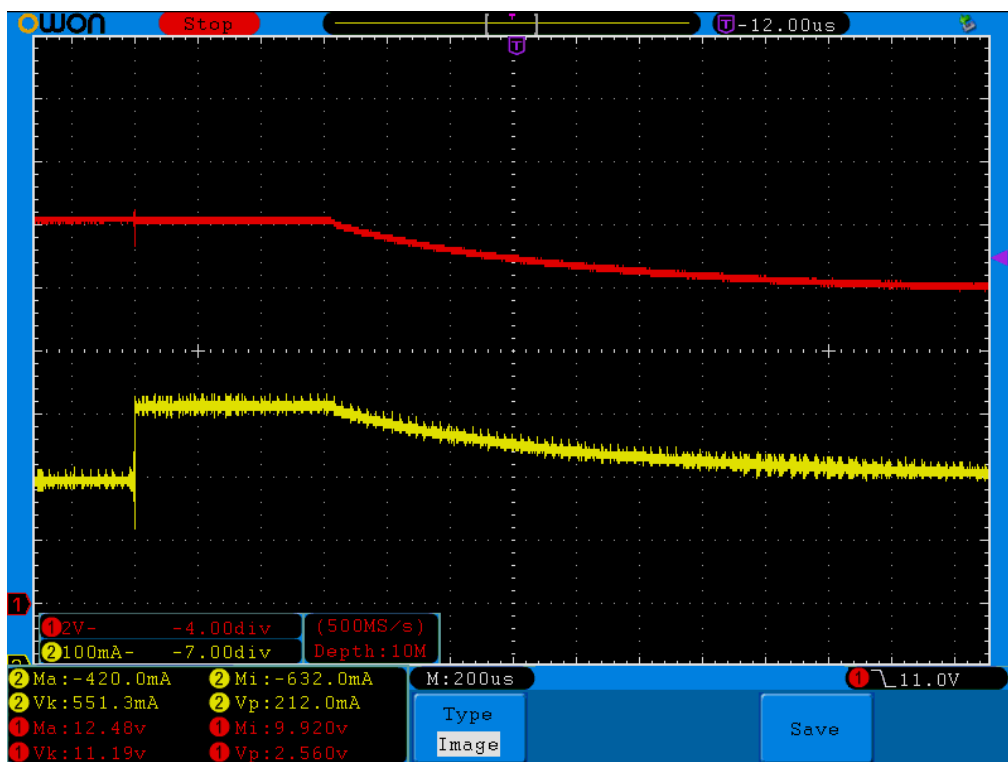
V režimu konstantního proudu se zdroj chová vůči zátěži poměrně klidně a reaguje na ni o dost pomaleji. Jako zátěž byl použit rezistor 100Ω , jelikož připojením rezistoru $4,7 \Omega$ při nastavení proudového omezení na $0,5 \text{ A}$ klesalo napětí příliš nízkou a na oscilogramech nebyl patřičně vidět důležitý průběh díky nutnosti velkého oddálení. Při jejím připojení postupně klesá výstupní napětí a zátěži teče vyšší proud, než je proud povolený. Tato reakce zdroje samozřejmě ovlivňuje i rychlost pádu napětí na výstupních svorkách, která je tím pozdržena. Doba ustálení po připojení zátěže činí necelé $2,2 \text{ ms}$ (viz. obr. 8.5), reakce při odpojení zátěže je pomalejší a trvá necelé $3,5 \text{ ms}$ (viz. obr. 8.6).



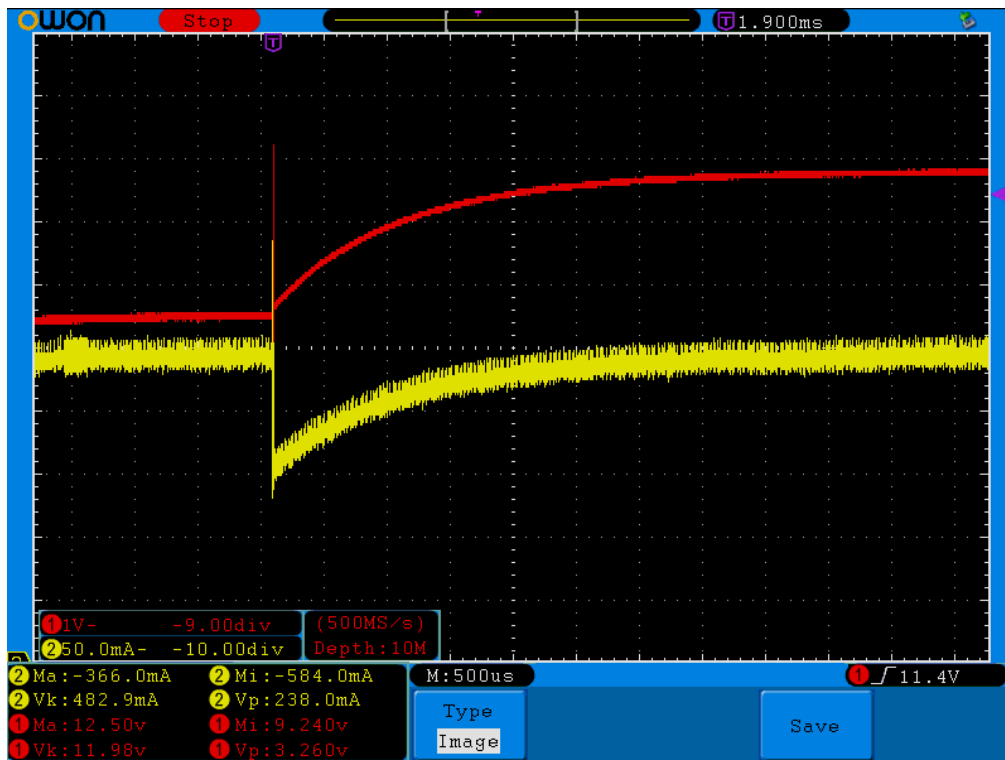
Obr. 8.3 Průběh na výstupu zdroje při připojení zátěže v režimu CV



Obr. 8.4 Průběh na výstupu zdroje při odpojení zátěže v režimu CV



Obr. 8.5 Průběh na výstupu zdroje při připojení zátěže v režimu CC



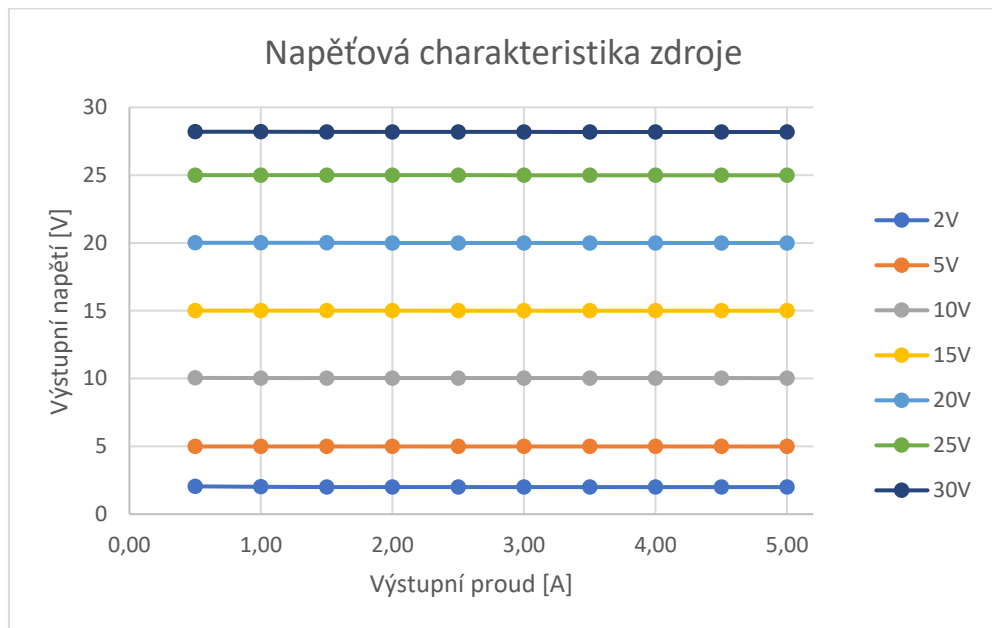
Obr. 8.6 Průběh na výstupu zdroje při odpojení zátěže v režimu CC

8.5 Napět'ové charakteristiky zdroje

Měření napět'ových charakteristik probíhalo při nastaveném maximálním zatěžovacím proudu zdroje, tedy bez proudové ochrany, při čemž bylo nastavováno výstupní napětí v rozsahu 2 – 30 V v krocích po 5 V s výjimkou prvního kroku, kdy kvůli minimálnímu výstupnímu napětí zdroje (0,6 V) a minimálnímu napětí pro umělou zátěž, byla volena hodnota 2 V. Samotné měření probíhalo nastavováním zatěžovacího proudu na umělé zátěži a po nastavení kýžené hodnoty bylo odečteno výstupní napětí zdroje. Hodnoty byly zaznamenány do tabulky 10, ze které byl následně vytvořen graf (viz. obr. 8.7).

Tabulka 10 Naměřené hodnoty při měření napět'ových charakteristik

U _{OUT} [V]	I _{SET} [A]									
	0.50	1.00	1.50	2.00	2.50	3.00	3.50	4.00	4.50	5.00
2	2,054	2,019	2,000	1,999	1,999	1,998	1,998	1,996	1,996	1,995
5	4,994	4,994	4,993	4,993	4,992	4,992	4,992	4,991	4,991	4,99
10	10,05	10,04	10,04	10,04	10,04	10,04	10,04	10,04	10,04	10,03
15	15,01	15,01	15,01	15,01	15,00	15,00	15,00	15,00	15,00	15,00
20	20,01	20,01	20,01	20,00	20,00	20,00	20,00	20,00	20,00	20,00
25	25,00	25,00	25,00	25,00	25,00	24,99	24,99	24,99	24,99	24,99
30	28,2	28,2	28,19	28,19	28,19	28,19	28,18	28,18	28,18	28,18



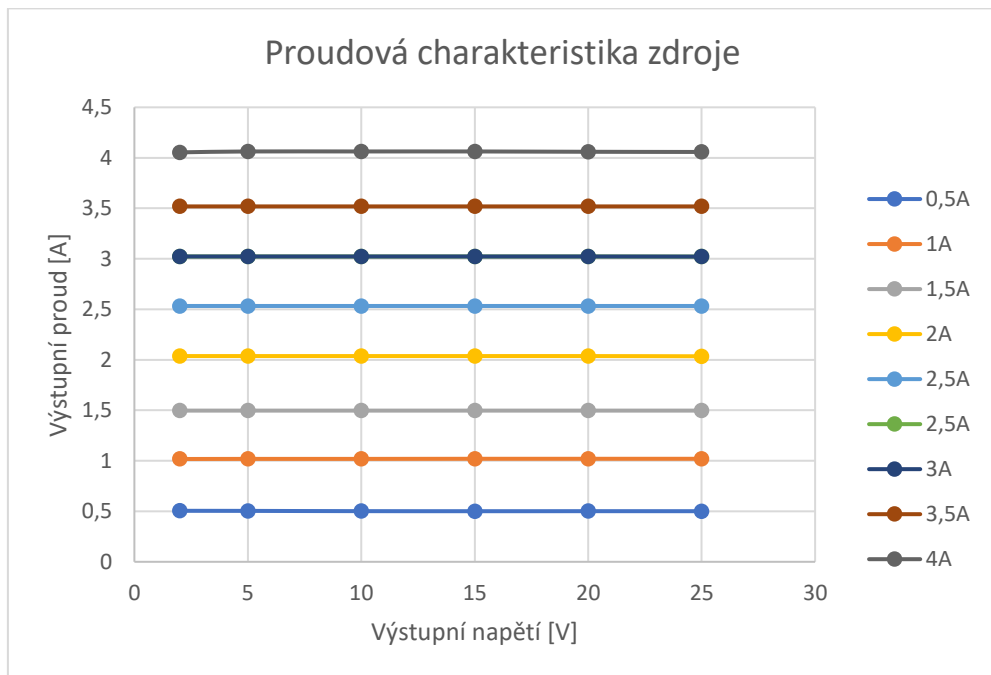
Obr. 8.7 Napěťová charakteristika zdroje

8.6 Proudové charakteristiky zdroje

Při měření proudové charakteristiky bylo postupováno totožně jako u měření charakteristiky napěťové, jen na zdroji bylo naopak nastavené maximální výstupní napětí 30 V a postupně byl nastavován proudový limit od minima (0,5 A) po 4 A, tedy maximum použité zátěže. Na zátěži bylo nastavováno zatěžovací napětí a do tabulky byly zaznamenávány hodnoty zatěžovacího proudu. Z tabulky byl následně vynesena graf (viz. obr. 8.8).

Tabulka 11 Naměřené hodnoty při měření proudových charakteristik

I_{OUT} [A]	U_{SET} [V]					
	2	5	10	15	20	25
0,5	0,5050	0,5041	0,5015	0,5009	0,5013	0,501
1	1,018	1,019	1,019	1,020	1,020	1,020
1,5	1,497	1,497	1,497	1,497	1,497	1,497
2	2,037	2,037	2,037	2,037	2,037	2,035
2,5	2,533	2,533	2,533	2,533	2,533	2,533
3	3,023	3,023	3,023	3,023	3,023	3,022
3,5	3,519	3,519	3,519	3,519	3,519	3,519
4	4,054	4,063	4,063	4,063	4,060	4,058



Obr. 8.8 Proudová charakteristika zdroje

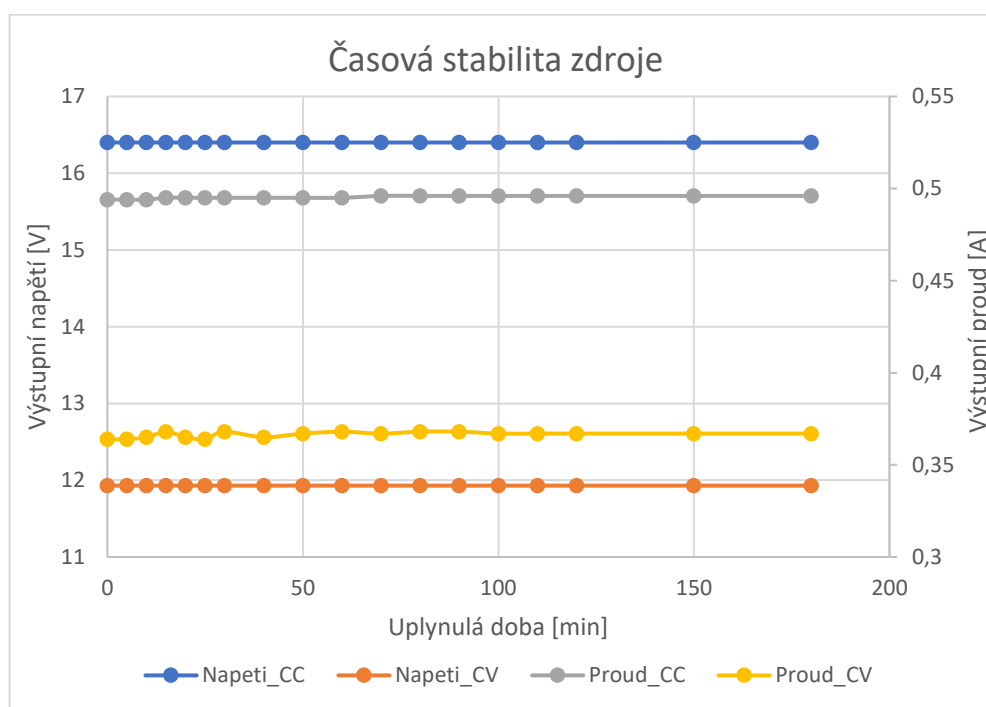
8.7 Časová stabilita výstupních hodnot zdroje

Důležitým parametrem zdroje je stabilita jeho výstupních hodnot po dlouhou dobu jejich použití, tedy nezávisle na době nastavení a teplotě zdroje. Při měření těchto parametrů byl použit kanál 1 k měření stability výstupního napětí a proudu v režimu CC a kanál 2 byl použit k měření časové stability v režimu CV. Naměřené parametry byly zaznamenány do tabulky 12. Pro měření v režimu CC byl použit rezistor $33 \Omega / 50 \text{ W}$ a pro měření v režimu CV byla použita jako zátěž paralelní kombinace dvou rezistorů $68 \Omega / 50 \text{ W}$. Z naměřených hodnot byl vytvořen přehledný graf (viz. obr. 8.9).

Tabulka 12 Naměřené hodnoty při měření časové stability zdroje

CC	Čas [min]								
	0	5	10	15	20	25	30	40	50
U_{OUT}	16,40	16,40	16,40	16,40	16,40	16,40	16,40	16,40	16,40
I_{OUT}	0,494	0,494	0,494	0,495	0,495	0,495	0,495	0,495	0,495
Teplota	21,0	26,0	28,0	29,0	29,0	29,5	29,5	29,5	29,5
CV	0	5	10	15	20	25	30	40	50
U_{OUT}	11,93	11,93	11,93	11,93	11,93	11,93	11,93	11,93	11,93
I_{OUT}	0,364	0,364	0,365	0,368	0,365	0,364	0,368	0,365	0,367
Teplota	21,0	26,0	27,5	29,0	29,0	29,5	30,0	30,5	30,5

CC	Čas [min]								
	60	70	80	90	100	110	120	150	180
U_{OUT}	16,40	16,40	16,40	16,40	16,40	16,40	16,40	16,40	16,40
I_{OUT}	0,495	0,496	0,496	0,496	0,496	0,496	0,496	0,496	0,496
Teplota	29,5	29,5	29,5	29,5	29,5	29,5	29,5	29,5	29,5
CV	60	70	80	90	100	110	120	150	180
U_{OUT}	11,93	11,93	11,93	11,93	11,93	11,93	11,93	11,93	11,93
I_{OUT}	0,368	0,367	0,368	0,368	0,367	0,367	0,367	0,367	0,367
Teplota	30,5	30,5	30,5	30,5	30,5	30,5	30,5	30,5	30,5

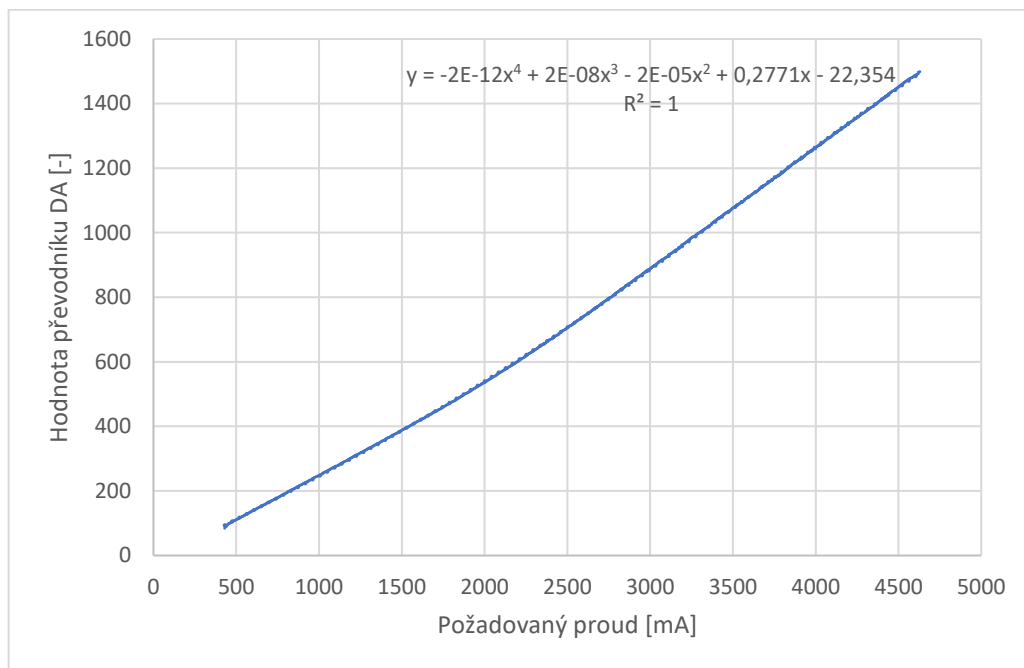


Obr. 8.9 Stabilita výstupních veličin v závislosti na čase při zatížení zdroje

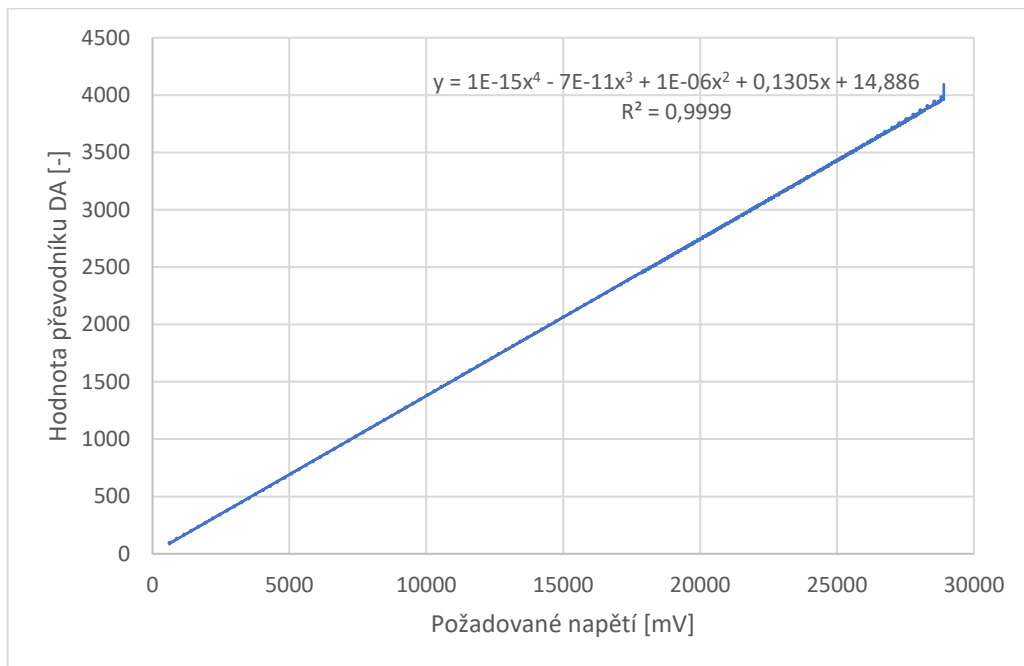
8.8 Kalibrace měřidel na zobrazovači zdroje

Pro přesné nastavení měřidel zdroje (měření napětí a proudu) bylo nutné změřit jeho výstupní hodnoty v závislosti na nastavení DA převodníku. Ze změřených hodnot byly následně udělány grafy (viz obr. 8.10 – 8.13), u kterých byly pomocí excelu vytvořeny rovnice pro výpočet přesné hodnoty výstupního napětí z hodnoty převodníku AD. Utvořené rovnice byly následně zapsány do mikrokontroléru. Vzhledem k použití výkonného ARM mikrokontroléru nebyla potřeba žádná jejich úprava, jelikož mikrokontrolér dokáže data bez problému s vysokou rychlostí vypočítat díky integrované hardwarové násobičce. Pro nižší řady mikrokontroléru, které takové nástroje nemají bylo nutné / vhodné rovnice zjednodušit vytýkáním konstant a aplikací bitového posunu namísto násobení či dokonce dělení. Hardwarová dělička není ani v použitém mikrokontroléru, a proto byly použity malá desetinná čísla a jejich násobení namísto dělení.

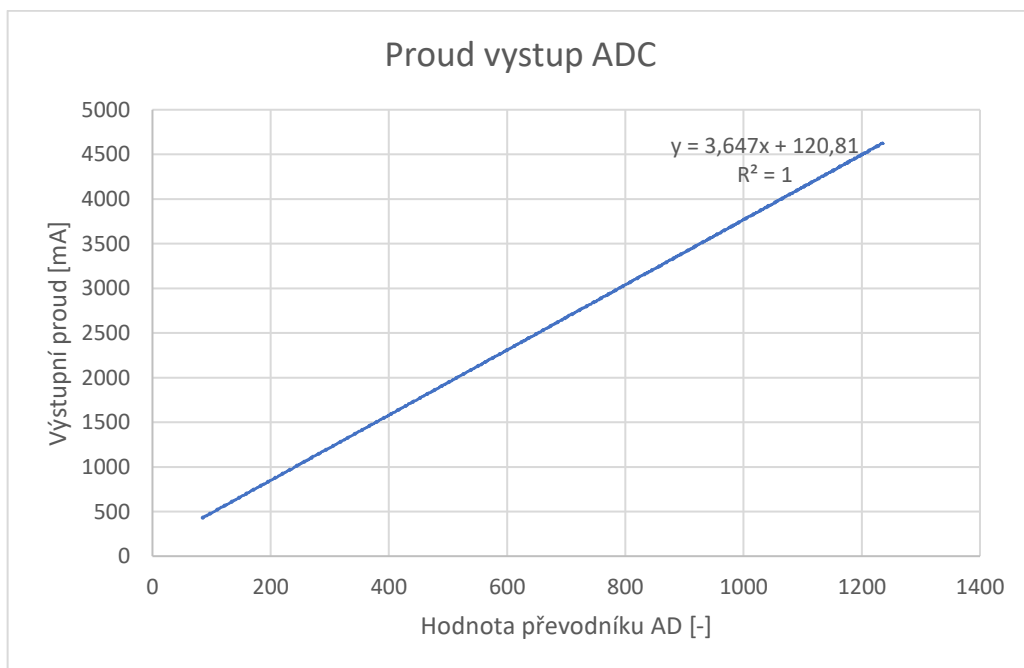
Pro přesné nastavení byly hodnoty zaznamenávány automaticky měřicí aparaturou. Mikrokontrolér inkrementoval hodnotu nastavující DA převodník v jeho patřičném rozsahu od 0 do 4095 [-] danou jeho rozlišením. Zadaná hodnota byla ve zdroji zapsána na výstupní převodník a zároveň byla zaznamenána do souboru na SD kartě. S touto hodnotou byly zároveň zaznamenány hodnoty výstupu z převodníků AD a reálné výstupní hodnoty z multimetru s digitálním výstupem přes RS232 sběrnici. Z uložených dat byly v programu Excel sestaveny grafy (viz obr. 8.10-8.13) a v nich automaticky vygenerovány zmíněné rovnice.



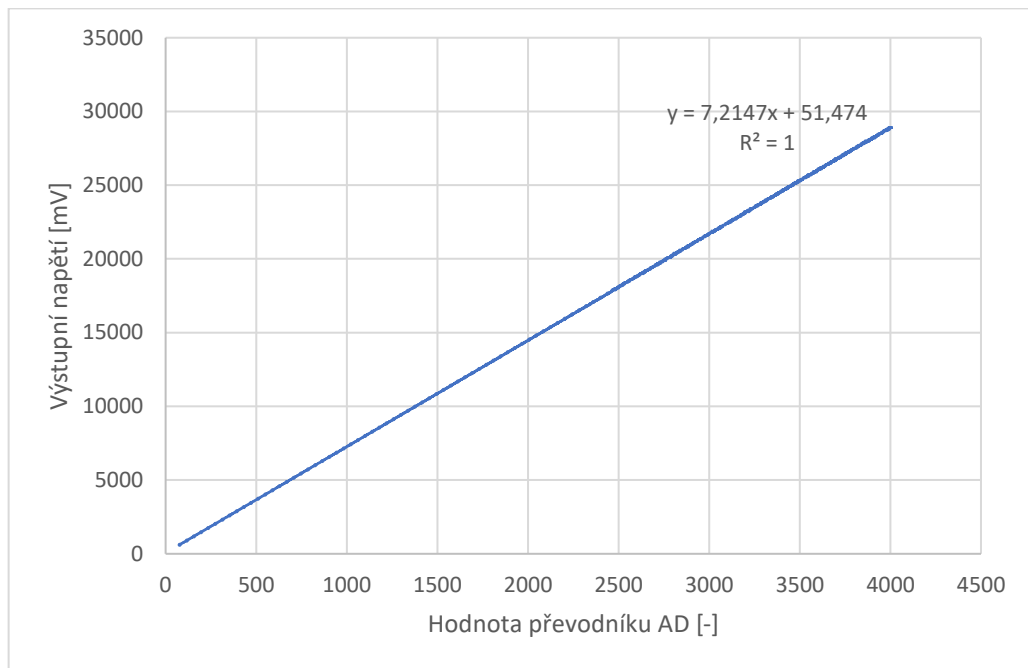
Obr. 8.10: Křivka popisující závislost hodnoty v převodníku DA na velikosti zadaného proudu s vytvořenou rovnicí a hodnotou její spolehlivosti



Obr. 8.11 Křivka popisující závislost hodnoty v převodníku DA na velikosti zadaného napětí s vytvořenou rovnicí a hodnotou její spolehlivosti



Obr. 8.12 Křivka popisující závislost hodnoty výstupního proudu na hodnotě změřené převodníkem AD



Obr. 8.13 Křivka popisující závislost hodnoty výstupního napětí na hodnotě změřené převodníkem AD

9 ZÁVĚR

Cílem této bakalářské práce je uvedení čtenáře do problematiky návrhu a následné realizace stavby laboratorního zdroje. V rámci bakalářské práce jsem prozkoumal základní princip fungování lineárního zdroje od síťového transformátoru, přes usměrnění až k samotnému stabilizátoru, jeho řízení a regulace. Následně jsem rozebral několik možností stavby samotného zdroje z hlediska složitosti, ceny a také říditelnosti pomocí analogového signálu z převodníku DA v dané topologii. V práci jsem také probíral mikrokontrolér STM32, jeho vlastnosti, hardwarové vybavení a možnosti propojování s dalšími perifériemi jako LCD, externí převodníky AD a DA, nebo moduly komunikující přes sériových sběrnicích I2C a SPI. V práci jsem se také zabýval problematikou komunikace mezi jednotlivými moduly zdroje a její komunikační protokoly. Komunikace s externím ovládacím systémem, například osobním počítačem nebo identifikace jednotlivých připojitelných modulů po připojení ke zdroji. Je také popsána komunikace po sběrnici I2C, její funkce a správné zacházení s ní.

V práci jsem popisoval postup návrhu zdroje jako takového. Nejprve jsem vytvořil základní schéma regulační části zdroje a jejího řízení pomocí operačních zesilovačů spojených s mikrokontrolérem. Zdroj v tomto základním zapojení byl postaven na pokusných plošných spojích a experimentálně ověřen. Změřené parametry a experimentální změny ukázaly několik faktů vedoucích k úpravám základního schématu, jako je přidání integračních kapacit a jejich velikost u operačních zesilovačů nebo přidání kondenzátorů k některým rezistorům z důvodu potlačení jejich šumu a zvýšení stability. Další objevenou důležitou částí bylo zarušení výstupního analogového signálu vedoucí do převodníků AD v mikrokontroléru, z tohoto důvodu jsem přidal vazební operační zesilovače s pátičnými filtry typu dolní propust. Po úspěšném ověření funkčnosti a zjištění zmíněných nedostatků jsem navrhl finální schéma práce dle kterého byly navrženy a vyrobeny plošné spoje. Plošné spoje byly vyrobeny firmou JLCPCB v Číně, jedná se o oboustranné prokovené plošné spoje s potiskem a HAL finalizací.

Po osazení vyrobených plošných spojů byl zdroj postupně zabudován do navrženého šasi, kterým se má bakalářská práce okrajově také zabývat, a zdroj byl postupně odměřován, testován, a byly nastaveny jeho nulové parametry. Při testování systému chlazení jsem zjistil mírný nedostatek v chlazení transformátorů ve skříni, které se ohřívají na vyšší teploty. Tento problém zatím není vyřešen, jelikož teploty nejsou kritické a zdroj není plánován do provozu 24/7. Řešením tohoto problému bude umístění dalšího ventilátoru tvořícího proud vzduchu přes prostor s transformátory a výkonným usměrňovačem pro jejich chlazení. Řídicí deska zdroje je dokonce vybavena konektorem pro další ventilátor. Teploty ve zdroji jsou hlídány na třech místech pomocí teplotních čidel LM75 zajišťující přesnou teplotu s přesností na 0,5 °C. Dvě tato čidla jsou umístěna na chladiči modulů zdrojů pro řízení jejich chlazení, aby byl zdroj tichý v nezátíženém stavu a mohly být ventilátory zapnuti jen v nutnou dobu. Poslední čidlo jsem umístil na chladič usměrňovacích můstků. Řídicí modul má možnost připojení dalších tří čidel – po jednom na každý transformátor a jedno do volného prostoru šasi pro měření teploty ve zdroji obecně. Tato čidla jsem zatím neosadil, jelikož zatím nejsou potřeba.

Při měření parametrů zdroje jsem objevil další chybu se špatně navrženým integračním kondenzátorem na operačním zesilovači, který zajišťuje řízení zdroje v proudovém režimu. Tento problém se projevoval kmitáním zdroje v proudovém režimu na frekvenci asi 55 kHz a byl vyřešen jeho jednoduchou výměnou za kondenzátor s větší kapacitou. Dalším problémem bylo zarušení výstupního vedení ze zdroje při malém

výstupním napětí od komunikace přes I2C rozhraní ve zdroji. Tento problém jsem také snadno vyřešil, a to přidáním feritového kroužku na výstupní vedení zdroje. Posledním, a největším zjištěným problémem ve zdroji byl resetující pulz vznikající připojením nebo odpojením silového transformátoru pomocí relé. Transformátor je indukčního charakteru a při odpojení se jeho indukčnost snaží udržet proud a tvoří velké, záporně polarizované napětí, které vytvořilo dostatečně velké EMC rušení a restartovalo mikrokontroler řídicí desky, kolem které vede napájecí vedení zdroje. Tento problém byl vyřešen návrhem nové desky s usměrňovači, kde jsou mimo jiné umístěny i spínací relé pro silové transformátory a pojistky pro jejich jištění. Řešením problému bylo umístění EMI filtru před každý spínaný transformátor.

Při měření zdroje se zdroj ukázal jako velice tvrdý a přesný zdroj. Jeho napětí i při maximální zátěži klesne maximálně o několik setin voltu v napětíovém režimu a stejně tak i v režimu proudovém, což se výstupního proudu týče. Zdroj jsem testoval na rozsahu 0 – 30 V při proudu 0 – 7 A, což je více než má zdroj zvládat. Šum na výstupu zdroje je poměrně malý, v řádu několika milivoltů. V proudovém módu je již rušení větší, řádově ve stovkách mikroampér, ale není nijak závratně velké, aby byl zdroj nepoužitelný k napájení přesnějších zařízení. Zdroj byl testován i na dlouhodobou stabilitu, měření probíhalo celkem 3 hodiny a za celou dobu se změnila pouze hodnota výstupního proudu o 1 mA, přičemž tato změna byla způsobena nejspíše měřicím rozsahem multimetru, který byl zvolen příliš vysoko (2 A) jelikož použitý multimetr vhodnější rozsah neměl.

Výsledkem práce je plně funkční dvoukanálový zdroj s možností rozšíření o další moduly. Zdroj pracuje v rozmezí 0,6 – 24 V s výstupním proudem 0,3 – 5 A s prostorem pro zvýšení těchto hodnot. Nejkritičtější část při zvyšování parametrů je filtrační kapacita, která je zvolena dost těsně kapacitě potřebné a pro použití zdroje například s proudem do 10 A bude nutné tuto kapacitu zvětšit. Zbylé části zdroje jsou přímo připravené na proud 10 A.

Vnitřní odpor zdroje v režimu konstantního proudu činí, dle naměřených hodnot, 95 k Ω . Tato hodnota bude v realitě o něco větší, jelikož změřené parametry, ze kterých jsem vnitřní odpor počítal, byly změřeny s nedostatečnou přesností a s vysokou chybou měření. Hodnota vnitřního odporu zdroje v režimu konstantního napětí činí hodnotu 0,3 Ω , kde opět i tato hodnota má potenciál být o dost nižší, jen je změřena s velkou chybou vlivem nepřesné měřicí aparatury, která byla použita. Stejnou chybou výpočtu, resp. měření je zatížena i hodnota směrodatné odchylky, z těchto hodnot vyplývající. Přesnost zdroje je poměrně vysoká i přes méně vhodný layout plošného zdroje, hlavně co se měření proudu týče. Použití lepších operačních zesilovačů jako například OP27 nebo jiné by mohli zvednout přesnost zdroje i jeho tvrdost, tedy zlepšit vnitřní odpory, ale jejich nákup by byl drahý a pro tento zdroj nejspíše nepotřebný, jelikož se nejedná o stavbu zdroje nízko-šumového.

9.1 Plány do budoucna

Do budoucna plánuji zprovoznění střídavého modulu zdroje s možností vzorkování střídavých signálů různých frekvencí a tvarů se vstupem formou těchto dvou modulů, kterých se bakalářská práce týče. Střídavý modul je již navržen a experimentálně ověřován s napětími ± 30 V, ale výsledný modul by měl zvládat vzorkování i síťového napětí 400 V při proudu 1 – 2 A. Dále plánuji externí moduly s vysokým výstupním napětím pro zajištění vysokého anodového napětí pro elektronkové konstrukce do napětí několika jednotek kilovoltů. V úvahu ke zlepšení zdroje připadá i možnost přestavby stávajících modulů na moduly s přepínáním odboček transformátorů pro zajištění vyššího napěťového rozsahu s vyšší účinností a snazším chlazením, než mají moduly stávající. Dalšími plány pro zlepšení je výměna transformátorů za jinou modelovou řadu s výstupním napětím 48 V ale stejnými rozměry a proudem. Experimenty budou probíhat i se zmíněným zvyšováním výstupního proudu s měřením maximálního oteplení transformátorů pro jejich bezpečný provoz. Co se změn samotného zdroje týče, bylo by záhodno vyměnit nastavovací rotační enkodér s větším počtem impulzů na otáčku a použití většího hmatníku pro dosažení vyšší přesnosti a příjemnosti nastavování hodnot.

Externí moduly zdroje jsou v režimu návrhu hned dva, jeden slouží čistě ke sledování výstupních parametrů zdrojů a jejich ovládání a bude sloužit jako informační panel při ožívování zařízení, které není možné/vhodné umístit na pracovní stůl. Druhým vyvíjeným modulem je již zmíněný vysokonapěťový modul pro napájení elektronkových konstrukcí, co se anodových napětí týče.

V úvahu připadá i výroba novější revize již existujících a fungujících modulů zdrojů s potřebnými úpravami, na které jsem v rámci návrhu zapomenul, nebyly brány v potaz nebo byly objeveny až při měření zdroje a jeho vlastním sestavování. Tyto úpravy byly již vesměs zmíněny, jedná se o 4 vodičové měření výstupních hodnot zdroje, lepší layout pro měření proudu na malém bočníku, přidání hardwarově detekovatelné revize modulu pro možnost univerzálnosti SW, hardwarově volitelná adresa sběrnice I2C, řízení ventilátorů a sledování teploty přímo na modulu zdroje nebo důkladnější zpracování software pro řízení celého zdroje přes DMA sběrnice, aby procesory mohly rychleji reagovat. V úvahu připadá i původně nechtěná změna operačních zesilovačů za lepší s větším SR a nižším šumem. Dalším zlepšením jistě bude použití kvalitnější izolační podložky pod tranzistory. Aktuálně použitá teflonová izolace zajišťuje dobré vlastnosti, co se tepelné odolnosti týče, ale její tepelná vodivost se zdá být nižší, než by měla být a napěťová odolnost není nijak závratná. Podložky pod tranzistory budou určitě nahrazeny za slídivé nebo keramické vložky. Další vhodnou úpravou, kterou plánuji bude přidání svorek „sense“ na přední panel, které budou sloužit k připojení vedení pro 4 vodičové měření přímo na zařízení, aby bylo dosaženo přesné hodnoty výstupního napětí / proudu na napájeném zařízení bez úbytku na vedení nebo například na sériově zařazenému odporu (například pro externí snímání proudu).

LITERATURA

- [1] KREJČIŘÍK, Alexandr. *Lineární napájecí zdroje* [CD-ROM]. Praha: BEN technická literatura, 2001. ISBN 978-80-7300-297-8.
- [2] NEČÁSEK, Sláva. *Radiotechnika do kapsy*. Praha: SNTL - Nakladatelství technické literatury, 1972. Řada elektrotechnické literatury.
- [3] MAREK, Josef. Základní funkční principy A-D a D-A převodníků. [online]. [cit. 2020-06-04]. Dostupné z: fei-learn.upceucebny.cz
- [4] PUNČOCHÁŘ, Josef. *Operační zesilovače v elektronice*. 5. vyd. Praha: BEN - technická literatura, 2002. ISBN 80-730-0059-8.
- [5] I2C: SparkFun Electronics [online]. 2013 [cit. 2019-12-09]. Dostupné z: <https://learn.sparkfun.com/tutorials/i2c/all>
- [6] *Understanding the I 2C Bus: Application Report*. Texas Instruments [online]. 2015 [cit. 2019-12-09]. Dostupné z: <http://www.ti.com/lit/an/slva704/slva704.pdf>
- [7] *STM32 32-bit Arm Cortex MCUs* [online]. STMicroelectronics [cit. 2019-12-09]. Dostupné z: <https://www.st.com/en/microcontrollers-microprocessors/stm32-32-bit-arm-cortex-mcus.html>
- [8] *LM317: datasheet*. Texas Instruments [online]. [cit. 2019-09-12]. Dostupné z: <http://www.ti.com/lit/ds/slvs044x/slvs044x.pdf>
- [9] *TIP35A: datasheet. ON Semiconductor* [online]. [cit. 2019-09-12]. Dostupné z: <https://www.onsemi.com/pub/Collateral/TIP35A-D.PDF>
- [10] *OP07: datasheet. Analog Devices* [online]. [cit. 2019-09-12]. Dostupné z: <https://www.analog.com/media/en/technical-documentation/data-sheets/OP07.pdf>
- [11] BELKE, R.E., CLEARY, J.F., ed. *GE transistor manual*. 7 ed. Syracuse, N.Y.: Semiconductor Products Dept. General Electric, 1964.
- [12] POSPÍŠIL, FRANTIŠEK. *Laboratorní zdroj* [online]. [cit. 2019-09-12]. Dostupné z: <http://ok2jnj.ok2kld.cz/ok2jnj/2015/11/laboratorni-zdroj-uvod/>
- [13] *MP1469: datasheet. Monolithic Power Systems* [online]. [cit. 2019-09-12]. Dostupné z: https://www.monolithicpower.com/en/documentview/productdocument/index/version/2/document_type/Datasheet/lang/en/sku/MP1469/document_id/324
- [14] *MBR15100: datasheet. Galaxy Microelectronics* [online]. [cit. 2019-09-12]. Dostupné z: <http://pdf.dzsc.com/130319/MBR1520-MBR15100 TO-220AC.pdf>
- [15] PATOČKA, Miroslav a Petr PROCHÁZKA. *Nerízené diodové usměrňovače*. Brno: FEKT VUT BRNO, 2013.
- [16] *SL2TTE20L0F: datasheet* [online]. [cit. 2020-20-05]. Dostupné z: https://datasheet.lcsc.com/szlcsc/1810170422_KOA-Speer-Elec-SL2TTE20L0F_C144419.pdf
- [17] *4 drátové ventilátory* [online]. 2008 [cit. 2019-12-09]. Dostupné z: <http://www.pavouk.org/hw/fan/fan4wire.html>
- [18] *P82B96: datasheet. NXP Semiconductors* [online]. [cit. 2019-09-12]. Dostupné z: <https://www.nxp.com/docs/en/data-sheet/P82B96.pdf>

- [19] *MJD112T4G: datasheet. ON Semiconductor* [online]. [cit. 2019-09-12].
Dostupné z: <https://www.onsemi.com/pub/Collateral/MJD112-D.PDF>
- [20] *MCP4728: datasheet* [online]. [cit. 2020-20-05]. Dostupné z:
<http://ww1.microchip.com/downloads/en/devicedoc/22187e.pdf>
- [21] *LM75: datasheet* [online]. [cit. 2020-20-05]. Dostupné z:
<https://datasheets.maximintegrated.com/en/ds/LM75.pdf>
- [22] *Chladič pro AMD Phenom II x4 965BE: specifikace* [online]. [cit. 2020-20-05].
Dostupné z: <https://www.delta-fan.com/products/heat-sinks/amd-phenom-ii.html>

SEZNAM SYMBOLŮ, VELIČIN A ZKRATEK

AC	Střídavý proud (Alternating current)
ACK	Potvrzovací bit „slave“ zařízení (Acknowledge)
ADC, AD	Analogově digitální převodník (Analog to digital converter)
ARM	Architektura procesorů
C	Kondenzátor (Capacitor)
CC	Režim konstantního proudu (Constant current)
CRC	Cyklický redundantní součet (Cyclic redundancy check)
CV	Režim konstantního napětí (Constant voltage)
D	Dioda
DAC, DA	Digitálně analogový převodník (Digital to analog converter)
DC	Stejnoseměrný proud (Direct current)
DMA	Sběrnice přímého adresování paměti (Direct memory addressing)
DPS	Deska plošných spojů
FSMC	Sběrnice pro externí paměti (flexible static memory controller)
GND	Společná zem, nulový potenciál (Ground)
I2C	Multi-masterová sériová sběrnice
I_c	Proud kolektorem tranzistoru
IC	Záznam vstupního signálu pro měření periody (Input capture)
kHz	kilo-hertz, jednotka frekvence
LCD	Displej z tekutých krystalů (Liquid crystal display)
MHz	Mega-hertz, jednotka frekvence
OZ	Operační zesilovač
OSC	Osciloskop
PWM	Pulsně šířková modulace (Pulse width modulation)
R	Rezistor
R/W	Bit oznamující čtení nebo zápis
R2R	Schopnost OZ pracovat v mezích od VDD až po VSS (Rail to Rail)
R_xx	Tepelný odpor na přechodu xx (JC – přechod na pouzdro, CI – pouzdro na izolaci, I – izolace, IH – izolace na chladič, HH – mezi dvěma chladiči, H – chladiče)
SCK	Vodič s hodinovým signálem (Serial clock)
SDA	Datový vodič sériové sběrnice (Serial data)
SPI	Sériová periferní sběrnice (Serial peripheral interface)
SR	Rychlost přeběhu (Slew rate)
β	„Beta“ tranzistoru – proudový zesilovací činitel H_{21E}
STM32	Rodina mikrokontrolerů firmy STMicroelectronics
T	Tranzistor/Tyristor
TDP	Vyzařovaný tepelný výkon (Thermal Design Power)
TFT	Tenkovrstvý tranzistor (Thin film transistor) u LCD panelu
THDN	Harmonické zkreslení a šum (Total harmonic distortion and noise)
TS	Doteková plocha (Touch screen)
U1	Vstupní napětí
U2	Výstupní napětí
U_{BE}	Napětí mezi bází a emitorem tranzistoru
U_{CE}	Napětí mezi kolektorem a emitorem tranzistoru
U_D	Napětí na diodě v propustném směru
USART	Synchronní/asynchronní seriové rozhraní (Universal synchronous / asynchronous receiver and transmitter)
VDD	Kladné napájecí napětí (Voltage drain-drain)
VSS	Záporné napájecí napětí (Voltage source-source)

SEZNAM OBRÁZKŮ

Obr. 1.1 Zjednodušené blokové schéma lineárního zdroje.....	2
Obr. 1.2 Jednocestný usměrňovač se sběracím kondenzátorem	3
Obr. 1.3 Zvlnění napětí na výstupu jednocestného usměrňovače.....	3
Obr. 1.4: Dvoucestný usměrňovač.....	4
Obr. 1.5 Zvlnění napětí na výstupu dvoucestného usměrňovače	4
Obr. 1.6 Můstkový usměrňovač (Graetzův můstek).....	4
Obr. 1.7 Řízený usměrňovač s tyristory	5
Obr. 1.8 Stabilizátor zapojení s tranzistorovou zpětnou vazbou [1].....	6
Obr. 1.9 Stabilizátor malého napětí s tranzistorovou zpětnou vazbou [1].....	6
Obr. 1.10 Stabilizátor napětí s operačním zesilovačem [1]	7
Obr. 2.1 Blokové schéma regulace	9
Obr. 2.2 Základní zapojení operačního zesilovače [4]	10
Obr. 2.3 I2C komunikační protokol [5]	11
Obr. 2.4 Příklad propojení I2C zařízení na sběrnici	11
Obr. 2.5 Přehled mikrokontrolerů rodiny STM32 [7]	13
Obr. 3.1 Výsledné zapojení tranzistorové kaskády.....	16
Obr. 3.2 Tranzistorová kaskáda s ochranným obvodem [12].....	18
Obr. 3.3 Schéma zapojení regulátoru napětí a proudu.....	22
Obr. 3.4 Obvod pro měření proudu na bočníku R41	22
Obr. 4.1 Zapojení ventilátoru do obvodu s regulací napětí a PWM	24
Obr. 5.1 Tepelné schéma chladiče a prvků jednoho modulu.....	29
Obr. 5.2 Fotografie tepelného vodiče pro spojení chladičů a modulů zdroje.....	29
Obr. 5.3 Fotografie chladiče s osazenými moduly zdrojů	30
Obr. 6.1 Předpokládané rozmístění komponent v šasi.....	31
Obr. 6.2 Návrh předního panelu zdroje	32
Obr. 8.1 Oscilogram ukazující šum na výstupu zdroje v režimu CV	36
Obr. 8.2 Schéma zapojení pro měření dynamických vlastností zdroje.....	37
Obr. 8.3 Průběh na výstupu zdroje při připojení zátěže v režimu CV	38
Obr. 8.4 Průběh na výstupu zdroje při odpojení zátěže v režimu CV	39
Obr. 8.5 Průběh na výstupu zdroje při připojení zátěže v režimu CC	39
Obr. 8.6 Průběh na výstupu zdroje při odpojení zátěže v režimu CC.....	40
Obr. 8.7 Napěťová charakteristika zdroje.....	41

Obr. 8.8 Proudová charakteristika zdroje	42
Obr. 8.9 Stabilita výstupních veličin v závislosti na čase při zatížení zdroje.....	43
Obr. 8.10: Křivka popisující závislost hodnoty v převodníku DA na velikosti zadaného proudu s vytvořenou rovnicí a hodnotou její spolehlivosti.....	44
Obr. 8.11 Křivka popisující závislost hodnoty v převodníku DA na velikosti zadaného napětí s vytvořenou rovnicí a hodnotou její spolehlivosti	45
Obr. 8.12 Křivka popisující závislost hodnoty výstupního proudu na hodnotě změřené převodníkem AD.....	45
Obr. 8.13 Křivka popisující závislost hodnoty výstupního napětí na hodnotě změřené převodníkem AD.....	46

SEZNAM TABULEK

Tabulka 1 Komunikační protokol komunikace I2C	26
Tabulka 2 Komunikační protokol pro identifikaci modulu	26
Tabulka 3 Komunikační protokol RS232 sběrnice.....	27
Tabulka 4 Seznam použitých měřicích přístrojů	34
Tabulka 5 Vliv kolísání vstupního napětí zdroje na jeho výstupní parametry	34
Tabulka 6 Vliv zátěže na výstupní parametry v režimu CV	35
Tabulka 7 Vliv zátěže na výstupní parametry v režimu CC	35
Tabulka 8 Zvlnění výstupního napětí v režimu CV.....	36
Tabulka 9 Zvlnění výstupního proudu v režimu CC	37
Tabulka 10 Naměřené hodnoty při měření napěťových charakteristik	40
Tabulka 11 Naměřené hodnoty při měření proudových charakteristik	41
Tabulka 12 Naměřené hodnoty při měření časové stability zdroje	42

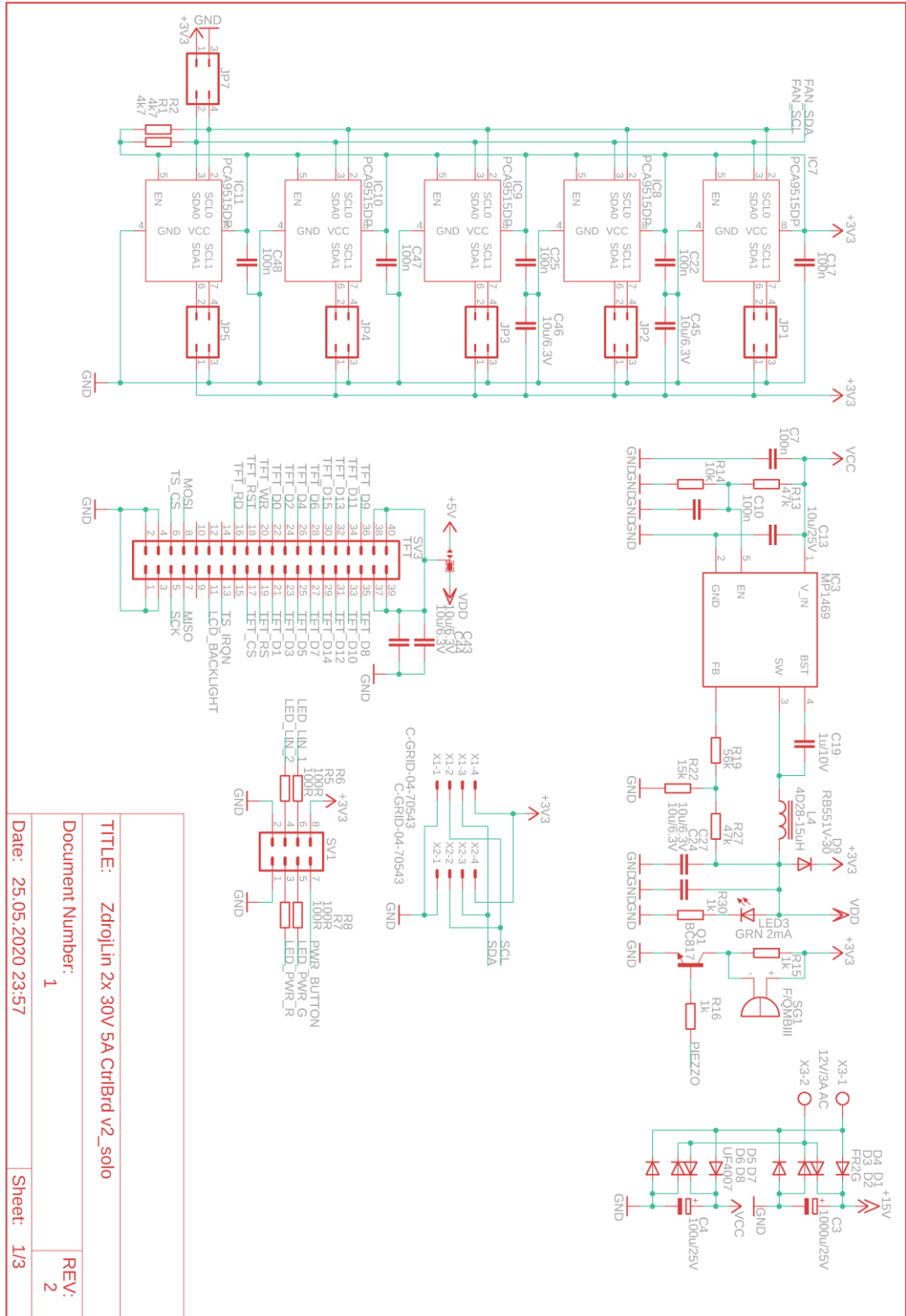
SEZNAM PŘÍLOH

A. Návrh zařízení	56
A.1 Schéma zapojení řídicího modulu.....	56
A.2 Schéma zapojení modulu zdroje	59
A.3 Schéma zapojení desky usměrňovače.....	61
A.4 Schéma zapojení desky s komunikačními interfejsy	62

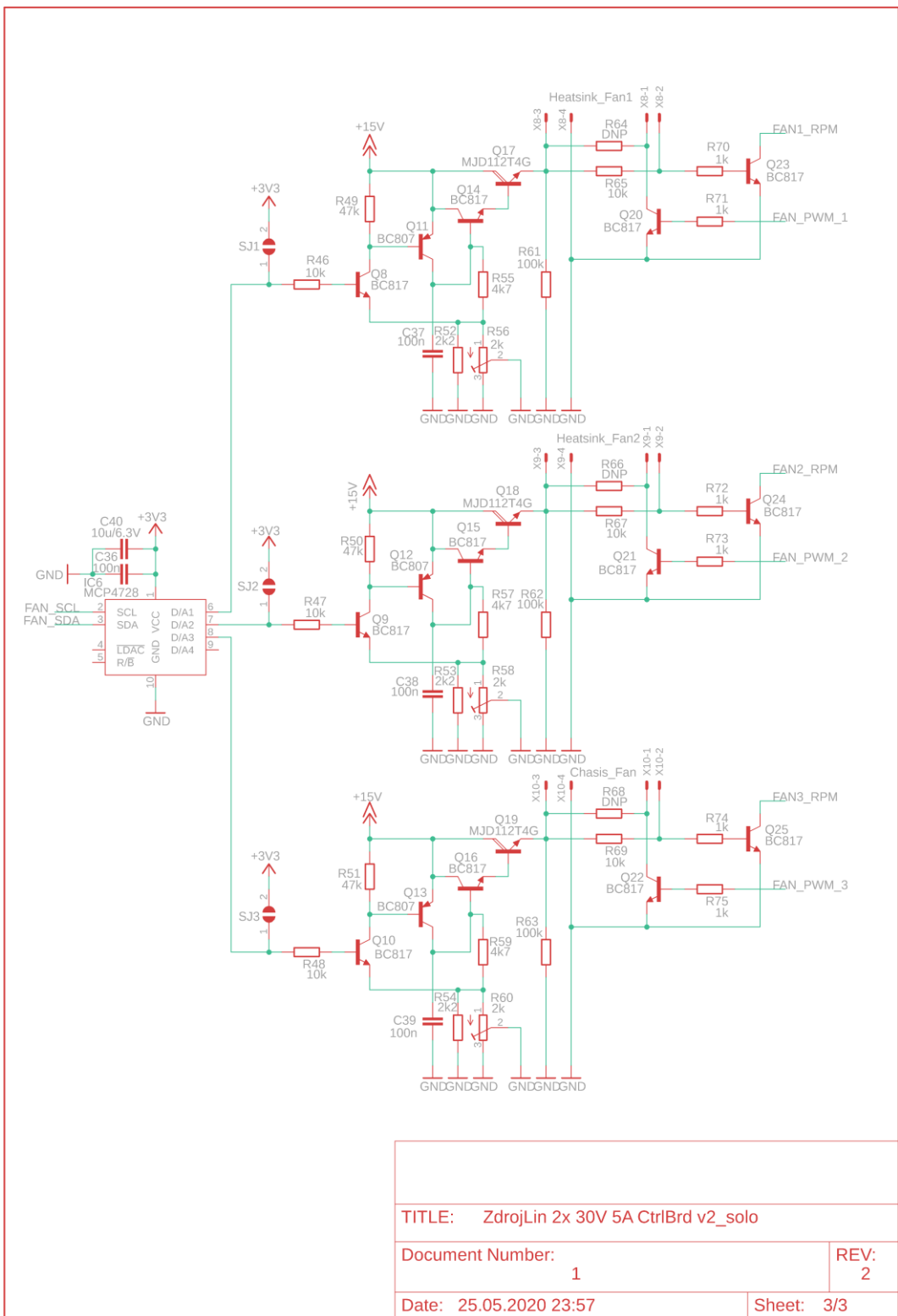
A.5	Schéma zapojení desky pro ventilátory a teplotní čidla	62
A.6	Schéma zapojení desky s filtračními kondenzátory	63
A.7	Schéma zapojení desky teplotního čidla	63
A.8	Deska teplotního čidla – motiv plošného spoje	63
A.9	Deska teplotního čidla – osazovací plán a potisk	63
A.10	Deska filtračních kondenzátorů – motiv plošného spoje	64
A.11	Deska filtračních kondenzátorů – osazovací plán a potisk	64
A.12	Deska pro ventilátory a teplotní čidla – motiv plošného spoje	65
A.13	Deska pro ventilátory a teplotní čidla – osazovací plán a potisk	65
A.14	Deska komunikačních interfejsů – motiv plošného spoje	65
A.15	Deska komunikačních interfejsů – osazovací plán a potisk	66
A.16	Deska usměřovače – motiv plošného spoje	66
A.17	Deska usměřovače – osazovací plán a potisk	67
A.18	Řídicí deska – motiv plošného spoje	68
A.19	Řídicí deska – osazovací plán a potisk	68
A.20	Deska modulu zdroje – motiv plošného spoje	69
A.21	Deska modulu zdroje – osazovací plán a potisk	70
B.	Schéma propojení desek plošných spojů	71
C.	Seznam součástek a použitých komponent	72
D.	Popis konektorů	79
D.1	Deska modulu zdroje	79
D.2	Deska řídicího modulu	79
D.3	Deska usměřovače	80
D.4	Deska pro ventilátory a teplotní čidla	80
D.5	Deska filtračních kondenzátorů	80
D.6	Deska komunikačních interfejsů	80
D.7	Deska s teplotním čidlem	80
E.	Fotodokumentace	81

A. Návrh zařízení

A.1 Schéma zapojení řídicího modulu

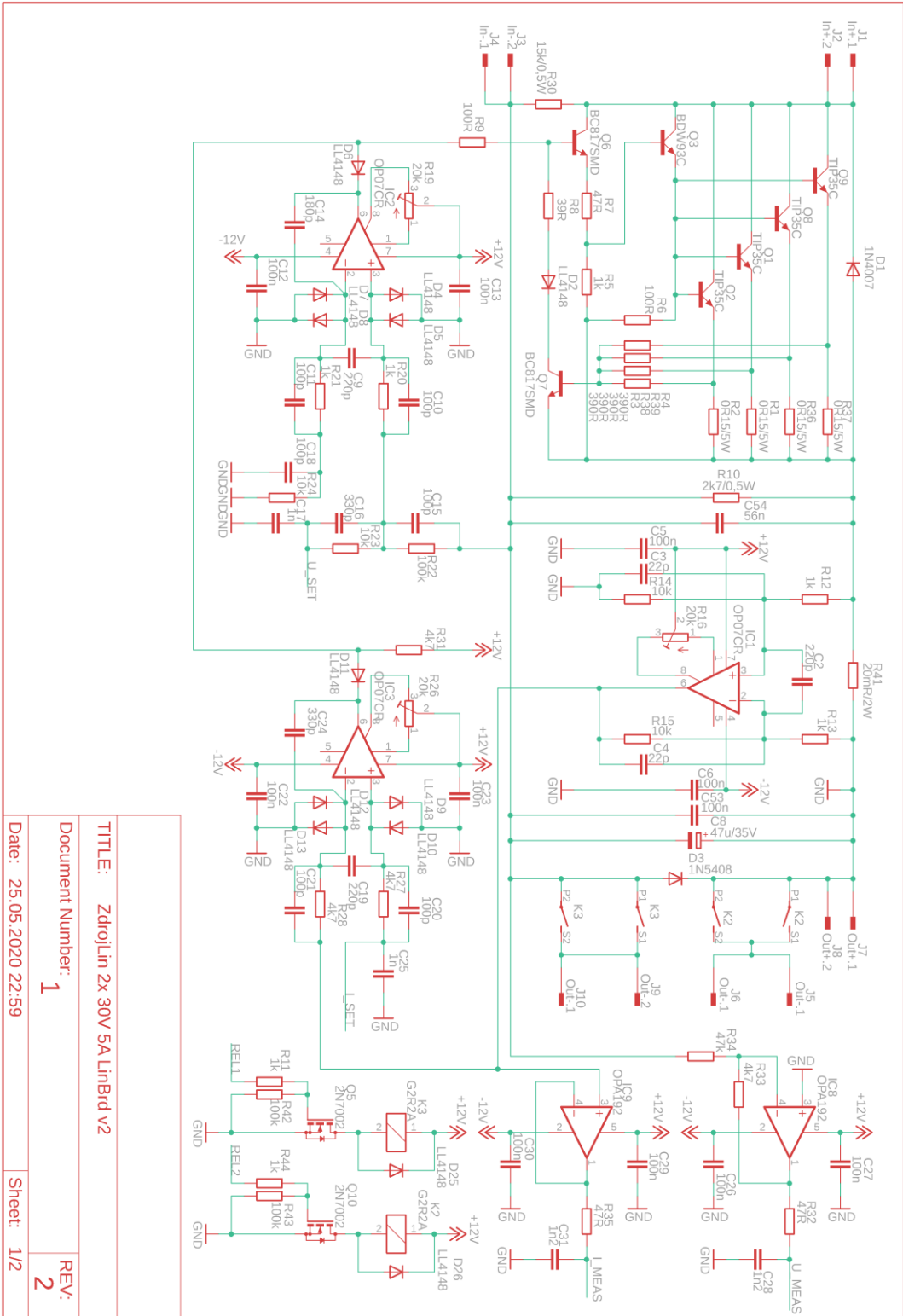


TITLE: Zdrojlin 2x 30V 5A CtrlBrd v2_solo
 Document Number: 1
 Date: 25.05.2020 23:57
 REV: 2
 Sheet: 1/3

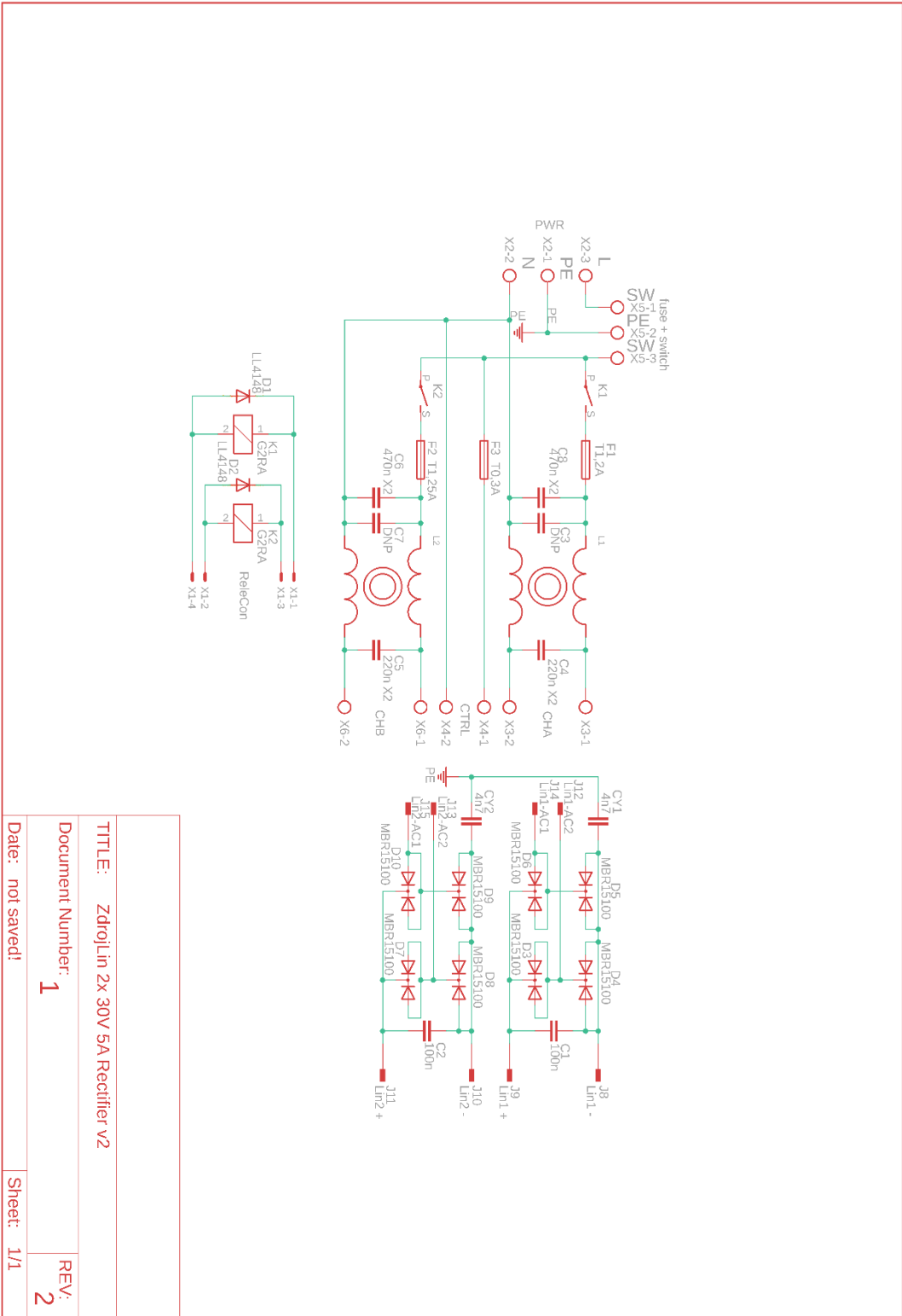


TITLE: ZdrojLin 2x 30V 5A CtrlBrd v2_solo	
Document Number: 1	REV: 2
Date: 25.05.2020 23:57	Sheet: 3/3

A.2 Schéma zapojení modulu zdroje



A.3 Schéma zapojení desky usměrňovače



TITLE: Zdrojlin 2x 30V 5A Rectifier v2

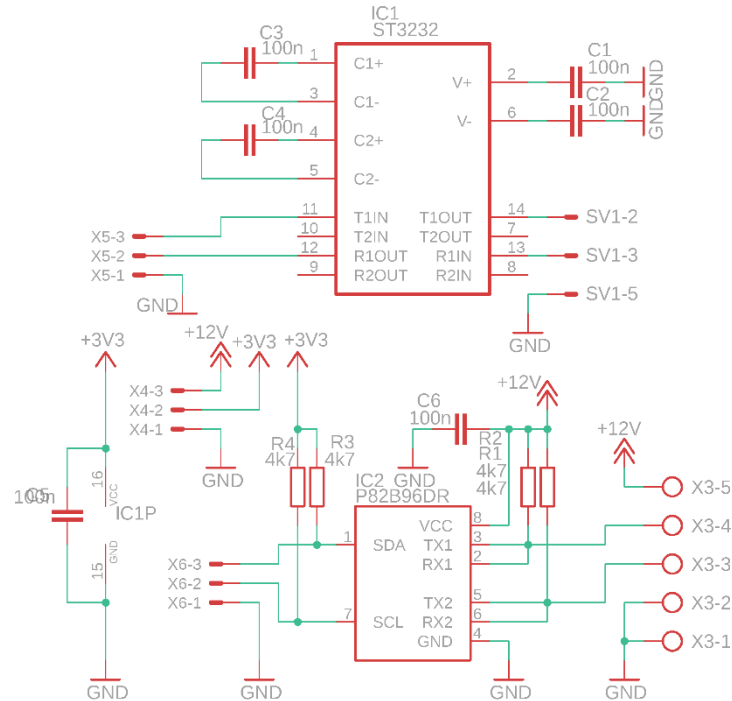
Document Number: 1

Date: not saved!

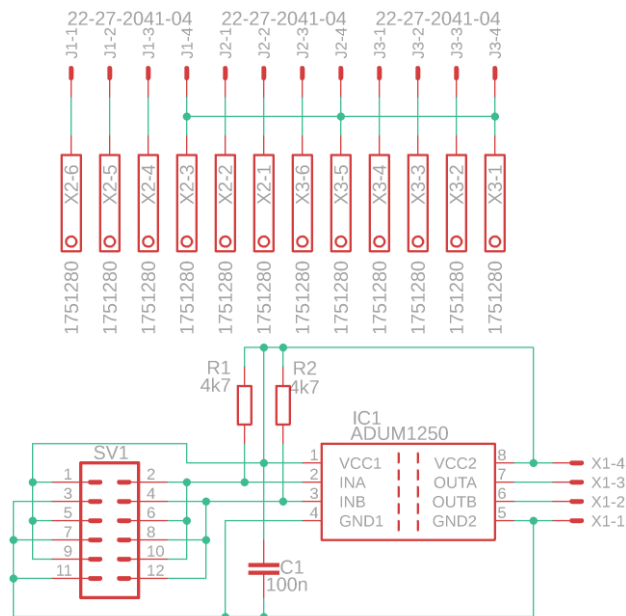
Sheet: 1/1

REV: 2

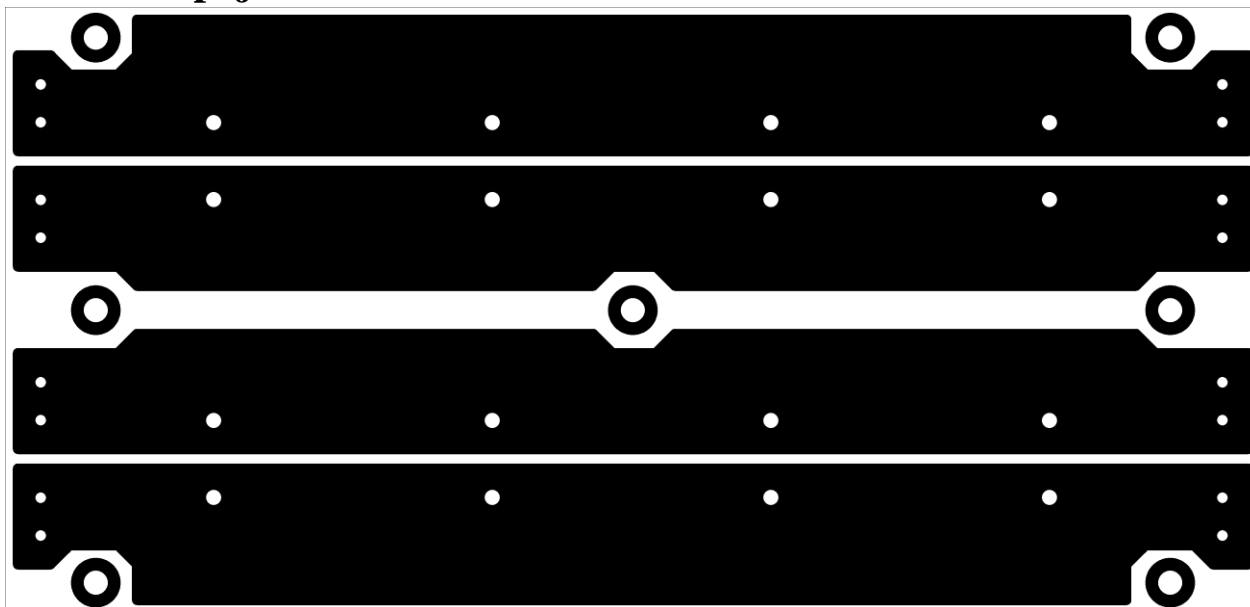
A.4 Schéma zapojení desky s komunikačními interfejsy



A.5 Schéma zapojení desky pro ventilátory a teplotní čidla

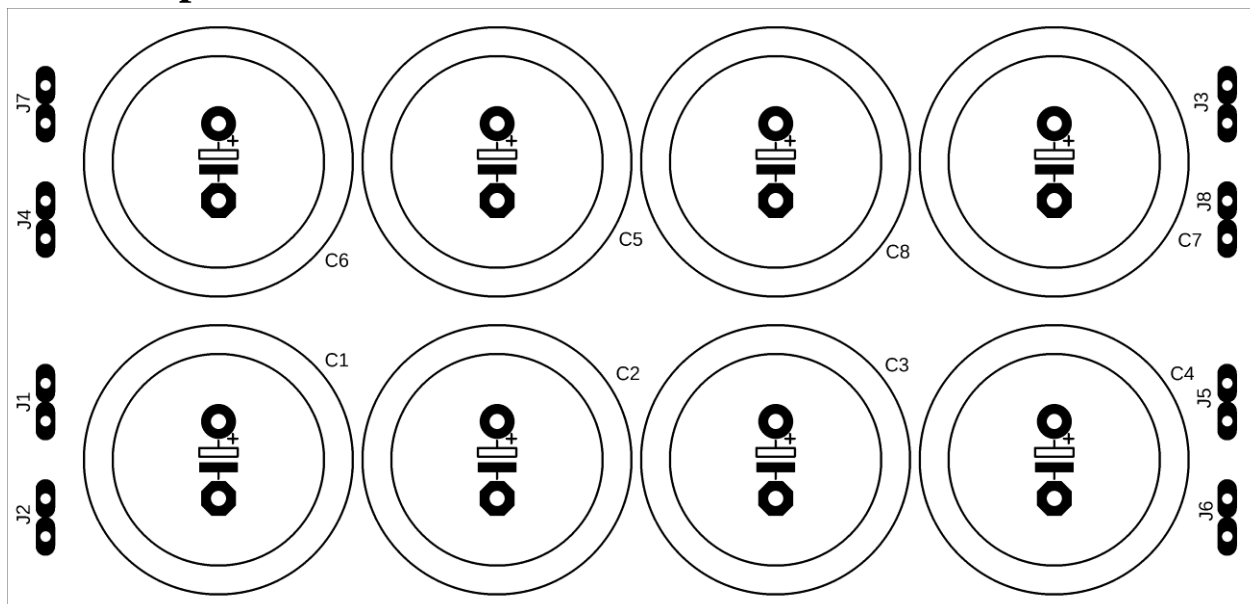


A.10 Deska filtračních kondenzátorů – motiv plošného spoje

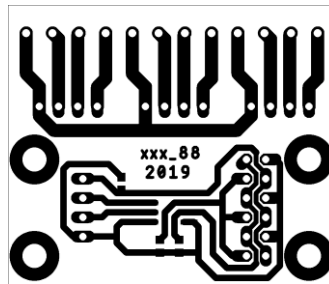


Měřítko 1:1, velikost desky: 166 x 80 mm

A.11 Deska filtračních kondenzátorů – osazovací plán a potisk

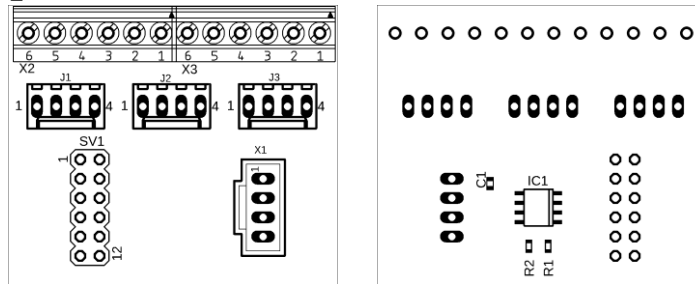


A.12 Deska pro ventilátory a teplotní čidla – motiv plošného spoje

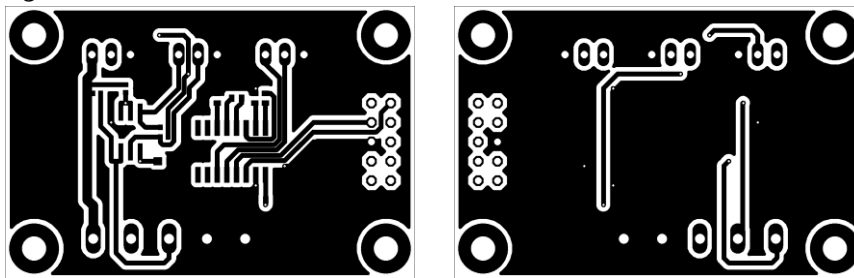


Měřítko 1:1, velikost desky: 44 x 37 mm

A.13 Deska pro ventilátory a teplotní čidla – osazovací plán a potisk

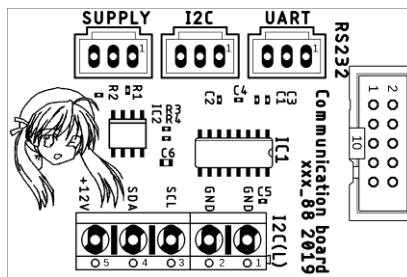


A.14 Deska komunikačních interfejsů – motiv plošného spoje

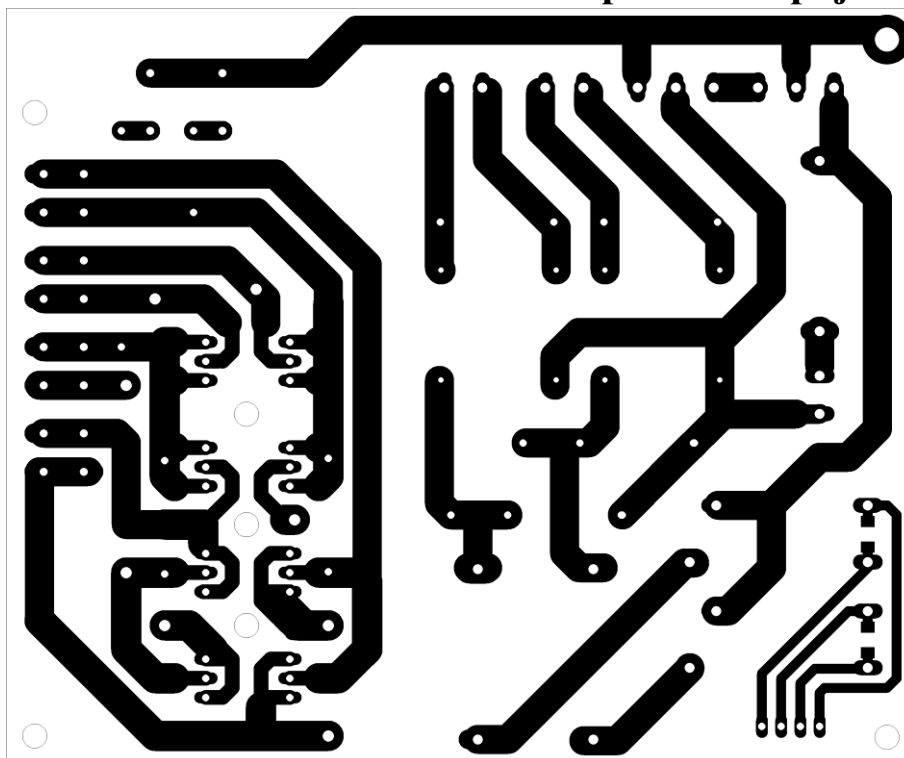


Měřítko 1:1, velikost desky: 54 x 36 mm

A.15 Deska komunikačních interfejsů – osazovací plán a potisk



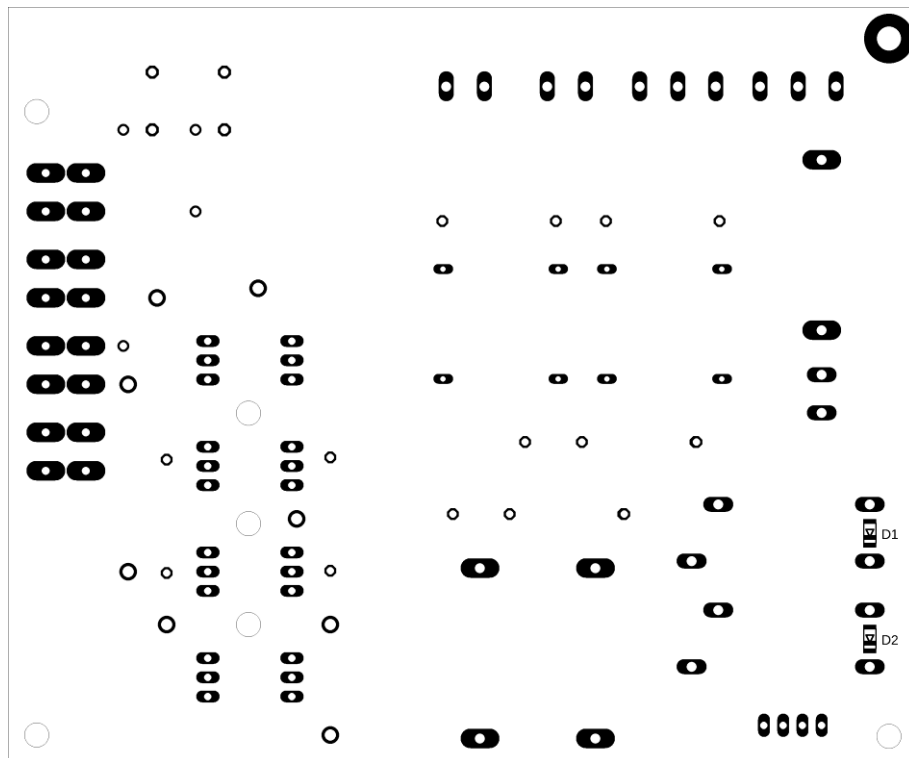
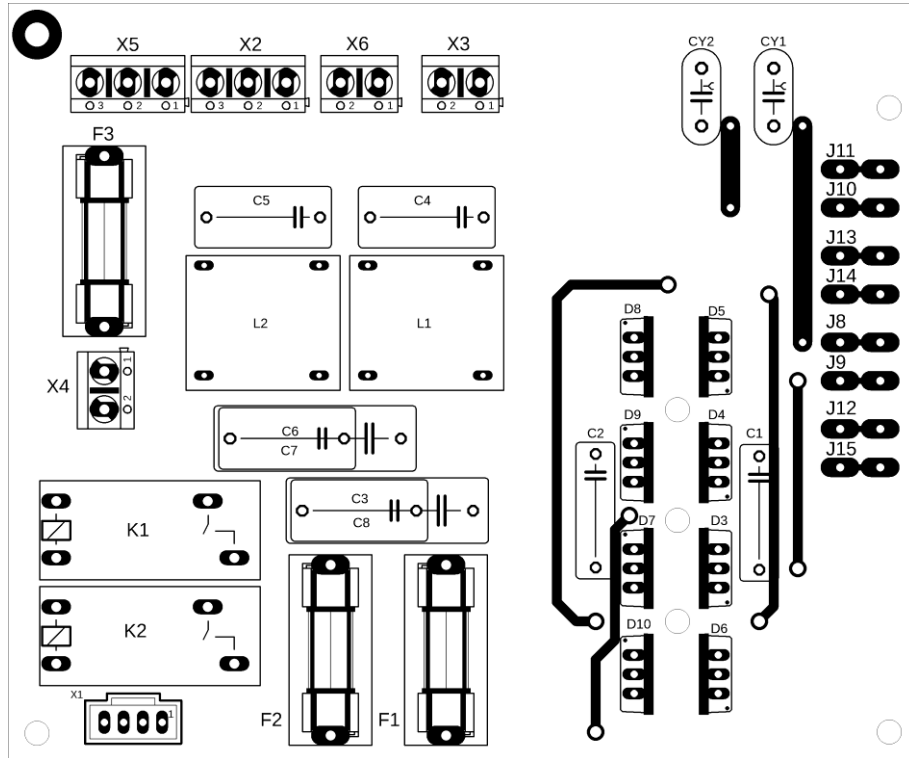
A.16 Deska usměrňovače – motiv plošného spoje



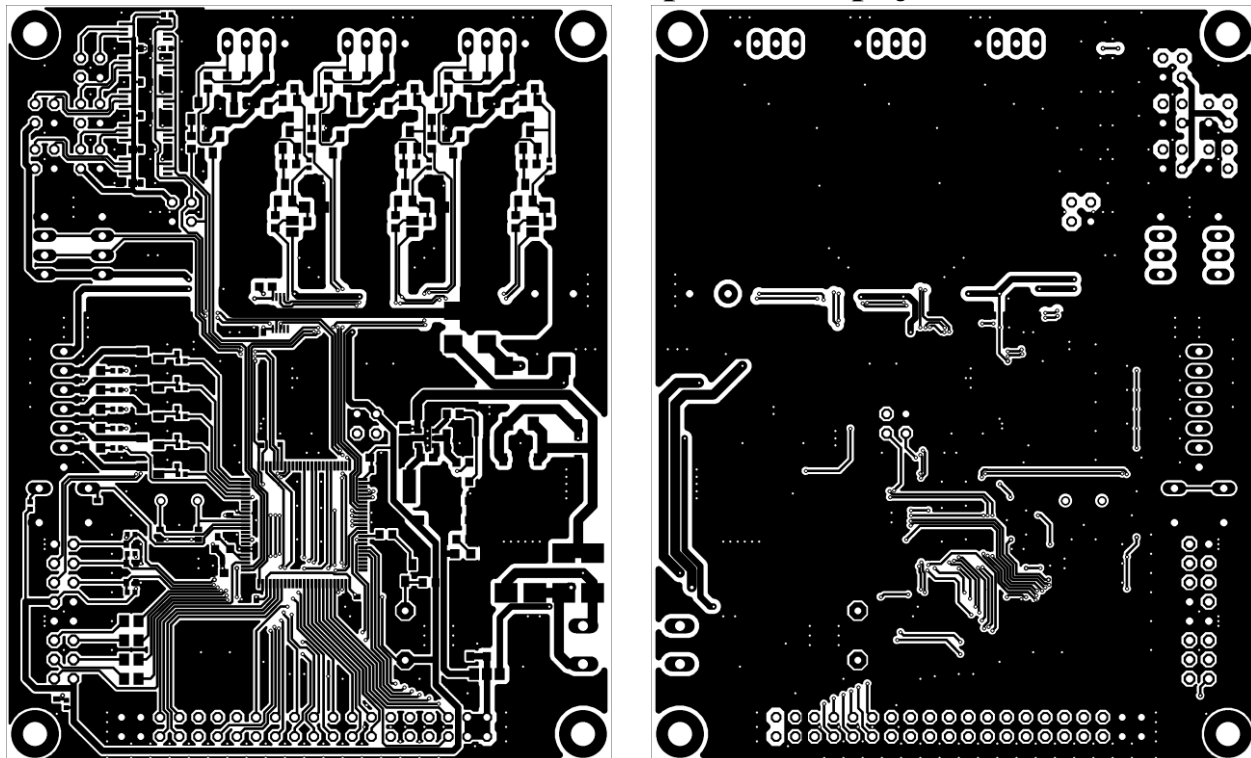
Měřítko 1:1, velikost desky: 120 x 100 mm

Pro větší proudy (více než 5 A) je plošky nutno pocínovat – výroba bez masky

A.17 Deska usměrňovače – osazovací plán a potisk

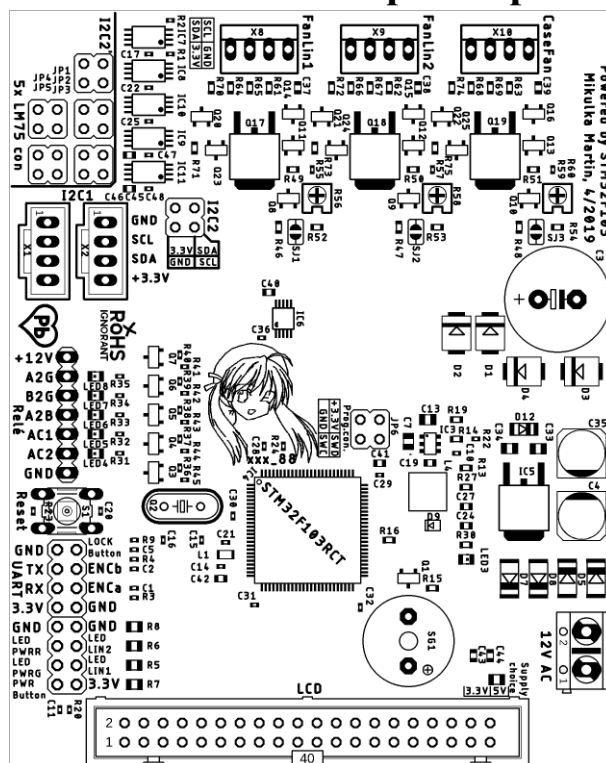


A.18 Řídicí deska – motiv plošného spoje

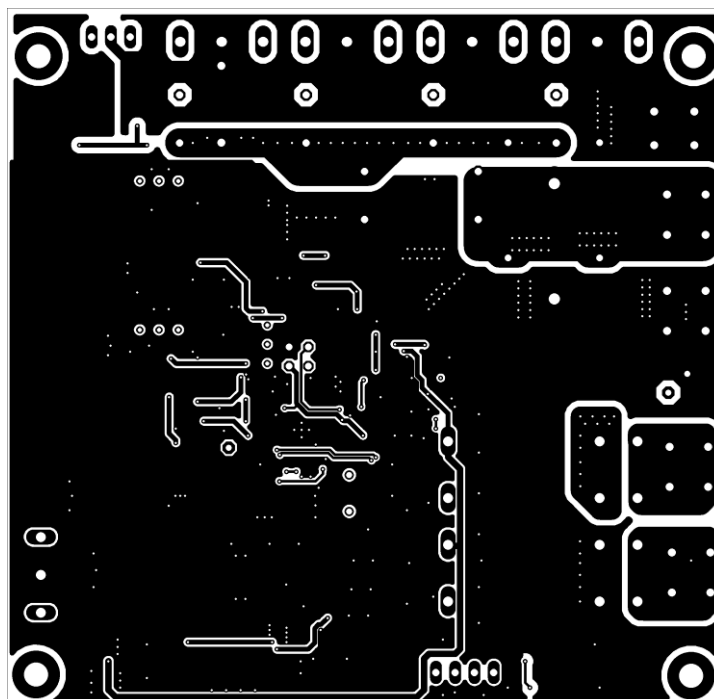
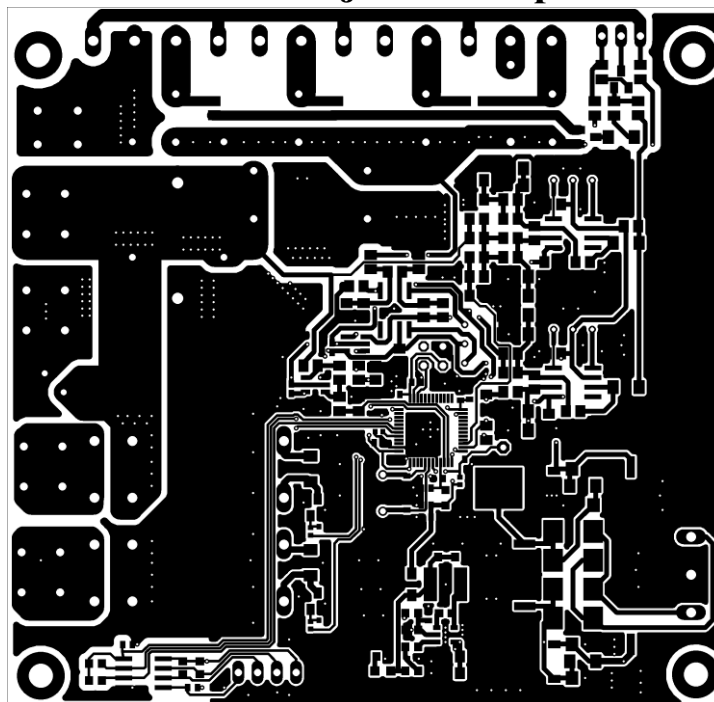


Měřítko 1:1, velikost desky: 100 x 80 mm

A.19 Řídicí deska – osazovací plán a potisk

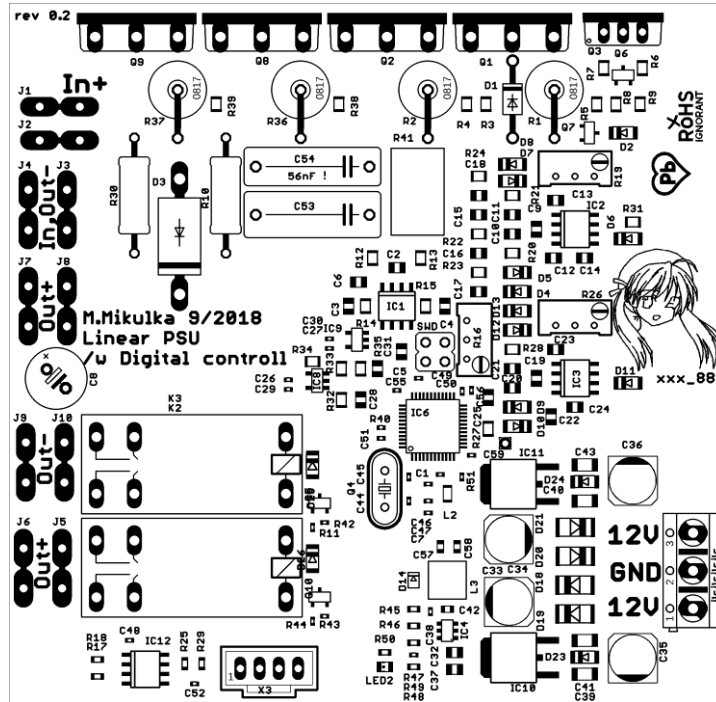


A.20 Deska modulu zdroje – motiv plošného spoje

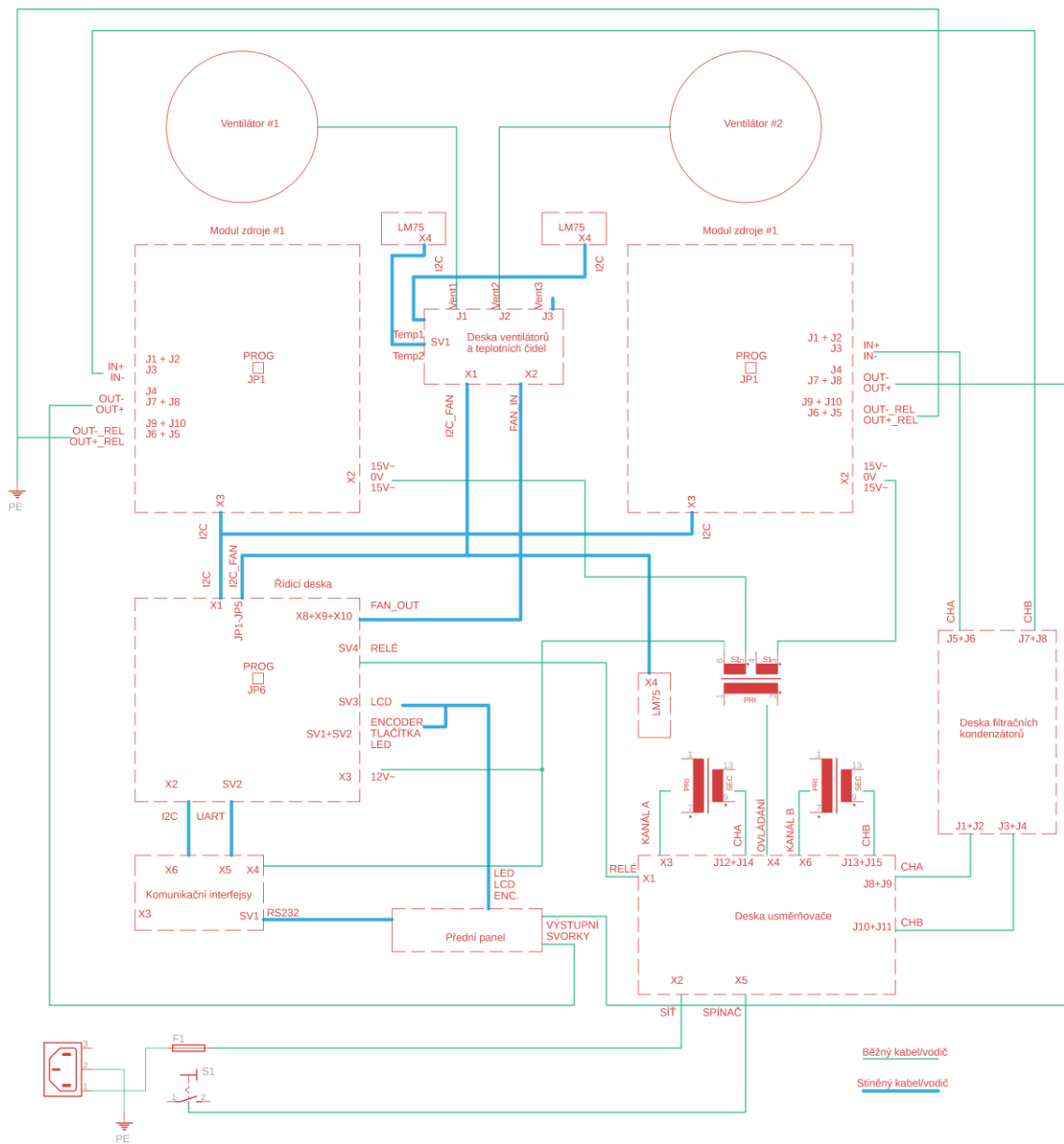


Měřítko 1:1, velikost desky: 95 x 92 mm

A.21 Deska modulu zdroje – osazovací plán a potisk



B. Schéma propojení desek plošných spojů



C. Seznam součástek a použitých komponent

Deska filtračních kondenzátorů				
Počet	Označení	Hodnota	Pouzdro	Popis
8	C1, C2, C3, C4, C5, C6, C7, C8	4700 μ F / 63 V	CPOL-EUE10-35	Kondenzátor elektrolytický
8	J1, J2, J3, J4, J5, J6, J7, J8		Faston do DPS, 6.3 mm	Konektor

Deska komunikačních interfejsů				
Počet	Označení	Hodnota	Pouzdro	Popis
1	X3		AK500/5	Svorkovnice
1	SV1		ML10	Konektor
5	C1, C2, C3, C4, C5	100 nF	C0402	Kondenzátor keramický
1	C6	100 nF	C0603	Kondenzátor keramický
4	R1, R2, R3, R4	4.7 k Ω	R0402	Rezistor
3	X4, X5, X6		70543-03	Konektor
1	IC2	P82B96DR	SO08	Integrovaný obvod
1	IC1	ST3232	SO16	Integrovaný obvod

Deska teplotního čidla				
Počet	Označení	Hodnota	Pouzdro	Popis
3	A0, A1, A2	0 Ω	R0603	SMD jumper
1	C8	100 nF	C0402	Kondenzátor keramický
2	R10, R17	1 k Ω	R0402	Rezistor
1	X4		70543-04	Konektor
1	IC1	LM75	SO08	Integrovaný obvod

Deska pro ventilátory a teplotní čidla				
Počet	Označení	Hodnota	Pouzdro	Popis
1	SV1		MA06-2	Konektor
1	C1	100 nF	C0603	Kondenzátor keramický
2	X2, X3		1751280	Konektor
3	J1, J2, J3		6410-04	Konektor
2	R1, R2	4.7 k Ω	R0603	Rezistor
1	IC1	ADUM1250	SO-08	Integrovaný obvod
1	X1		70543-04	Konektor

Deska usměrňovače				
Počet	Označení	Hodnota	Pouzdro	Popis
2	L1, L2	EMI Filtr	UU 9.8 /10.5	Cívka pro EMI filtr
2	C1, C2	100 nF	C150-054X183	Kondenzátor fóliový X2
2	C4, C5	220 nF X2	C150-084X183	Kondenzátor fóliový X2
2	C3, C6	470 nF X2	C150-084X183	Kondenzátor fóliový X2
2	CY1, CY2	4.7 nF	YC7B5	Kondenzátor Y2
3	X3, X4, X6		AK500/2	Svorkovnice
2	C7, C8	DNP	C225-087X268	Kondenzátor fóliový X2
2	K1, K2		G2RA	Relé
2	D1, D2	LL4148	MINIMELF	Dioda
1	J8, J9, J10, J11, J12, J13, J14, J15		Faston do DPS, 6.3 mm	Konektor
8	D3, D4, D5, D6, D7, D8, D9, D10	MBR15100	TO220	Dioda
2	X2, X5		AK500/3	Svorkovnice
1	X1		70543-04	Konektor
1	F3	T 0.3 A	SH22,5A	Pojistka přístrojová
2	F1, F2	T 1.25 A	SH22,5A	Pojistka přístrojová

Řídicí modul				
Počet	Označení	Hodnota	Pouzdro	Popis
1	S1		B3F-10XX	Tlačítko
6	JP1, JP2, JP3, JP4, JP5, JP7		JP2Q	Konektor
2	SV1, SV2		MA04-2	Konektor
1	SV4		MA07-1	Konektor
3	SJ1, SJ2, SJ3		SJ	Konektor
1	JMP1	0 Ω	R0603	SMD jumper
1	C3	1000 μF / 25 V	E5-13	Kondenzátor elektrolytický
4	R5, R6, R7, R8	100 Ω	R0805	Rezistor
3	R61, R62, R63	100 kΩ	R0603	Rezistor
15	C10, C14, C17, C20, C21, C22, C25, C28, C29, C30, C31, C32, C36, C47, C48	100 nF	C0402	Kondenzátor keramický
3	C37, C38, C39	100 nF	C0603	Kondenzátor keramický
3	C7, C33, C34	100 nF	C0805	Kondenzátor keramický
2	C4, C35	100 μF / 25 V	UD-6,3X7,7_NICHICON	Kondenzátor elektrolytický SMD

7	R23, R24, R36, R37, R38, R39, R40	10 k Ω	R0402	Rezistor
7	R14, R46, R47, R48, R65, R67, R69	10 k Ω	R0603	Rezistor
1	C13	10 μ F / 25 V	C0805	Kondenzátor keramický
9	C24, C27, C40, C41, C42, C43, C44, C45, C46	10 μ F / 6.3 V	C0603	Kondenzátor keramický
1	Q2	12 MHz	HC49/S	Krystal
1	X3		AK500/2	Svorkovnice
1	R22	15 k Ω	R0402	Rezistor
5	R41, R42, R43, R44, R45	1 k Ω	R0402	Rezistor
9	R15, R16, R30, R70, R71, R72, R73, R74, R75	1 k Ω	R0603	Rezistor
1	L1	1 k Ω / 1 MHz	L0603	Feritová perla SMD
4	C1, C2, C5, C11	1 nF	C0402	Kondenzátor keramický
1	C19	1 μ F / 10 V	C0603	Kondenzátor keramický
2	C15, C16	22 pF	C0402	Kondenzátor keramický
5	Q3, Q4, Q5, Q6, Q7	2N7002	SOT23	Tranzistor
3	R56, R58, R60	2 k Ω	RTRIM3304W	Trimr
3	R52, R53, R54	2.2 k Ω	R0603	Rezistor
5	R13, R27, R49, R50, R51	47 k Ω	R0603	Rezistor
1	L4	15 μ H	4D28	Cívka
10	R1, R2, R31, R32, R33, R34, R35, R55, R57, R59	4.7 k Ω	R0402	Rezistor
1	R19	56 k Ω	R0603	Rezistor
1	IC5	LM7805	TO252	Integrovaný stabilizátor
3	Q11, Q12, Q13	BC807	SOT23	Tranzistor
13	Q1, Q8, Q9, Q10, Q14, Q15, Q16, Q20, Q21, Q22, Q23, Q24, Q25	BC817	SOT23	Tranzistor
2	X1, X2		70543-04	Konektor
3	X8, X9, X10		22-23-2041	Konektor
4	R3, R4, R9, R20	DNP	R0402	Rezistor
3	R64, R66, R68	DNP	R0603	Rezistor

1	SG1	F/QMBIII	F/QMBIII	Piezo měnič
4	D1, D2, D3, D4	FR2G	SMB	Dioda
6	LED3, LED4, LED5, LED6, LED7, LED8	Green 2 mA	LED0805	LED Dioda
1	D12	LL4148	SOD80C	Dioda
1	IC6	MCP4728	MSOP10	Integrovaný obvod
3	Q17, Q18, Q19	MJD112T4G	DPAK	Tranzistor
1	IC3	MP1469	SOT23-6	Integrovaný obvod
5	IC7, IC8, IC9, IC10, IC11	PCA9515DP	TSSOP8	Integrovaný obvod
1	D9	RB551V-30	SOD323-W	Dioda
1	IC4	STM32F103VCT	LQFP100	Mikrokontrolér
1	JP6		JP2Q	Konektor
1	SV3		ML40	Konektor
4	D5, D6, D7, D8	UF4007	MELF	Dioda

Deska modulu zdroje				
Počet	Označení	Hodnota	Pouzdro	Popis
1	X2		AK500/3	Svorkovnice
4	R1, R2, R36, R37	0.15 Ω / 5 W	P0817V	Rezistor
2	R6, R9	100 Ω	M0805	Rezistor
1	R22	100 kΩ	M0805	Rezistor
2	R42, R43	100 kΩ	R0402	Rezistor
1	C53	100 nF	C150-064X183	Kondenzátor fóliový
13	C26, C27, C29, C30, C38, C46, C47, C48, C49, C50, C51, C52, C59	100 nF	C0402	Kondenzátor keramický
7	C5, C6, C12, C13, C22, C23, C37	100 nF	C0805	Kondenzátor keramický
4	C39, C40, C41, C43	100 nF	C1206	Kondenzátor keramický
6	C10, C11, C15, C18, C20, C21	100 pF	C0805	Kondenzátor keramický
4	C33, C34, C35, C36	100 μF / 25 V	UD-6,3X7,7_NICHICON	Kondenzátor elektrolytický SMD
4	R14, R15, R23, R24	10 kΩ	M0805	Rezistor
2	R40, R51	10 kΩ	R0402	Rezistor
1	R46	10 kΩ	R0603	Rezistor
1	C32	10 μF / 25 V	C0805	Kondenzátor keramický
4	C1, C7, C55, C56	10 μF / 6.3 V	C0402	Kondenzátor keramický

2	C57, C58	10 μ F / 6.3 V	C0603	Kondenzátor keramický
1	Q4	12 MHz	HC49/S	Krystal
1	R49	15 k Ω	R0402	Rezistor
1	R30	15 k Ω / 0.5 W	0411/15	Rezistor
1	C14	180 pF	C0805	Kondenzátor keramický
1	D1	1N4007	DO41-10	Dioda
1	D3	1N5408	DO201-15	Dioda
5	R5, R12, R13, R20, R21	1 k Ω	M0805	Rezistor
2	R11, R44	1 k Ω	R0402	Rezistor
1	R50	1 k Ω	R0603	Rezistor
1	L2	1 k / 1 MHz	L0603	Feritová perla SMD
2	C17, C25	1 nF	C0805	Kondenzátor keramický
2	C28, C31	1.2 nF	C0805	Kondenzátor keramický
1	C42	1 μ F / 10 V	C0603	Kondenzátor keramický
3	R16, R19, R26	20 k Ω	RTRIM64W	Trimr 20-ti otáčkový
1	R41	20 m Ω / 2 W	SL2	Rezistor
3	C2, C9, C19	220 pF	C0805	Kondenzátor keramický
2	C44, C45	22 pF	C0402	Kondenzátor keramický
2	C3, C4	22 pF	C0805	Kondenzátor keramický
2	Q5, Q10	2N7002	SOT23	Tranzistor
1	R10	2.7 k Ω / 0.5 W	0411/15	Rezistor
2	C16, C24	330 pF	C0805	Kondenzátor keramický
4	R3, R4, R38, R39	390 Ω	M0805	Rezistor
1	R8	39 Ω	M0805	Rezistor
3	R7, R32, R35	47 Ω	M0805	Rezistor
1	R34	47 k Ω	M0805	Rezistor
2	R45, R48	47 k Ω	R0603	Rezistor
1	C8	47 μ F / 35 V	E3,5-8	Kondenzátor elektrolytický
1	L3	6.8 μ H	4D28	Cívka
4	R27, R28, R31, R33	4.7 k Ω	M0805	Rezistor
4	R17, R18, R25, R29	4.7 k Ω	R0603	Rezistor
1	R47	56 k Ω	R0603	Rezistor
1	C54	56 nF	C150-054X183	Kondenzátor fóliový
1	IC12	ADUM1250	SO-08	Integrovaný obvod
2	Q6, Q7	BC817SMD	SOT23	Tranzistor
1	Q3	BDW93C	TO220AV	Tranzistor
1	X3		70543-04	Konektor
4	D18, D19, D20, D21	FR2G	MELF-MLL41	Dioda
2	K2, K3		G2R2A	Relé

1	37257	Green 2 mA	LED0805	LED Dioda
10	J1, J2, J3, J4, J5, J6, J7, J8, J9, J10		Faston do DPS, 6.3mm	Konektor
15	D2, D4, D5, D6, D7, D8, D9, D10, D11, D12, D13, D23, D24, D25, D26	LL4148	MINIMELF	Dioda
1	IC10	MC78M12CDTG	DPACK_3	Integrovaný stabilizátor
1	IC11	MC79M12CDTG	DPACK_3	Integrovaný stabilizátor
1	IC4	MP1469	SOT23-6	Integrovaný obvod
3	IC1, IC2, IC3	OP07CR	SO08	Integrovaný obvod
2	IC8, IC9	OPA192	SOT23-5	Integrovaný obvod
1	D14	RB551V-30	SOD323-W	Dioda
1	IC6	STM32F071C8T	LQFP48	Mikrokontrolér
1	JP1		JP2Q	Konektor
4	Q1, Q2, Q8, Q9	TIP35C	TOP3AV	Tranzistor

Mimo plošné spoje				
Počet	Označení	Hodnota	Pouzdro	Popis
1			D-SUB9	Konektor RS232
1			C091-U (T 3400 001)	Konektor průmyslový kulatý
5		Green 20 mA	LED 5 mm 20 mA	LED kulatá
1		Red 20 mA	LED 5 mm 20 mA	LED kulatá
1			PEC11R-4225F-S0024	Rotační enkodér
1		480x320 px	LCD TFT 3.95"	LCD zobrazovač
4			TESLA konektor	Konektor do panelu
1		Zelené podsvícení	HBGQ16F-10E/G/12V/S	Spínač do panelu
3		AMD Phenom II Stock cooler		Chladič
1		340 mm	Profil T 100x60x5 mm	Hliníkový profil
4		476 mm	Hliníková tyč 12x6 mm	Hliníkový profil
10		113 mm	Hliníková tyč 12x6 mm	Hliníkový profil
2		500 mm	Hliníková tyč 20x6 mm	Hliníkový profil
8		350 mm	Hliníková tyč 12x6 mm	Hliníkový profil
1		350 x 125 mm	Hliníkový plech 0.8 mm	Hliníkový plech
1		350 x 125 mm	Hliníkový plech 5 mm	Hliníkový plech
1		500 x 350 mm	Hliníkový plech 0.8 mm	Hliníkový plech
1		500 x 500 mm	Hliníkový plech 0.8 mm	Hliníkový plech
		"Přířezy"	Hliníkový plech 0.8 mm	Hliníkový plech
1			GSD3	EURO konektor do panelu
1			FIO SCHURTER FI	Pojistkový držák do panelu
1			SPST AC 3A/250V	Kolébkový vypínač do panelu

3		80 mm	SEPA FG80	Mřížka ventilátoru
1		230 V, 69 VA, 3x 9-0-9 V/0.5 A + 12 V / 3,5 A		Toroidní transformátor
2		220 V, 120 VA, 24 V/5 A		Průmyslový transformátor

Další položky				
		Kabel stíněný 4x 0.5mm ²		
		Vodič 2.5 mm ²	Různé barvy	
		Vodič 4 mm ²	Různé barvy	
		Kabel plochý 10žil		
		Kabel plochý 40žil		
		Kabel 3x 0.5 mm ²		
		Šroub M3x6 mm	ISO 7380FL	
		Šroub M3x20 mm	ISO7991	
		Šroub M4x10 mm	ISO 7985	
		Šroub M4x10 mm	ISO 4762	
		Šroub M5x15 mm	ISO 4762	
		Sloupek M3x10 mm	BN 7375	
		Teplo vodivá pasta	NOCTUA NH-H1	
		Izolační podložky	TO220	
		Izolační podložky	TO247	
		Konektor Faston 6.3 mm na kabel		
		Konektory se zámkem 4 pin		
		Konektory se zámkem 3 pin		
		Konektory pro ploché kabely 40 pin		
		Konektory pro ploché kabely 10 pin		
		Smršťovací bužírky	Různé průměry	
		Dutinky na dráty	Různé průměry	
		Svorkovnice s přišroubováním		
		Stahovací pásy		
		Hmatník		

D. Popis konektorů

D.1 Deska modulu zdroje

J1, J2	Silový vstup, kladný pól
J3, J4	Silový vstup, záporný pól a výstup, záporný pól
J7, J8	Silový výstup, kladný pól
J9, J10	Spínaný silový výstup, záporný pól
J5, J6	Spínaný silový výstup, kladný pól
X3	I2C izolovaný vstup
X2	Pomocné napájení 2x 12 V~
JP1	Programovací konektor

D.2 Deska řídicího modulu

X8, X9, X10	Výstupy pro ventilátory
JP1, JP2, JP3, JP4, JP5	Výstupy pro I2C teplotních čidel
X1, X2	Výstup I2C pro práci s moduly
X3	Napájecí konektor 12 V~
JP7	Přímý výstup pro teploměr v šasi
SV4	Výstup pro signalizační LED a relé
SV2	Výstup UARTu, vstup enkodéru a tlačítka zámku displeje
SV1	Výstup pro LED a vstup STBY tlačítka
SV3	Výstup pro LCD
JP6	Programovací konektor

D.3 Deska usměrňovače

X1	Vstup pro ovládání relé
X5	Vstup síťového vypínače
X2	Síťový vstup 230 V~
X6, X3	Výstup spínaného napětí pro výkonové transformátory
X4	Výstup síťového napětí pro pomocný transformátor
J12, J13, J14, J15	Vstup 24 V~ ze silových transformátorů
J8, J10	Výstup usměrněného napětí – záporný pól
J9, J11	Výstup usměrněného napětí – kladný pól

D.4 Deska pro ventilátory a teplotní čidla

X2, X3	Vstup pro napájení ventilátorů
X1	Vstup I2C pro teploměry
SV1	Výstup I2C pro teploměry
J1, J2, J3	Přípojky pro jednotlivé ventilátory

D.5 Deska filtračních kondenzátorů

J1, J3, J5, J7	Kladné póly kapacitní banky
J2, J4, J6, J8	Záporné póly kapacitní banky

D.6 Deska komunikačních interfejsů

X5	UART vstup
X4	Napájecí konektor +12 V a +3.3 V
X6	I2C vstup
X3	I2C výstup na úrovni 12 V
SV1	RS232 výstup

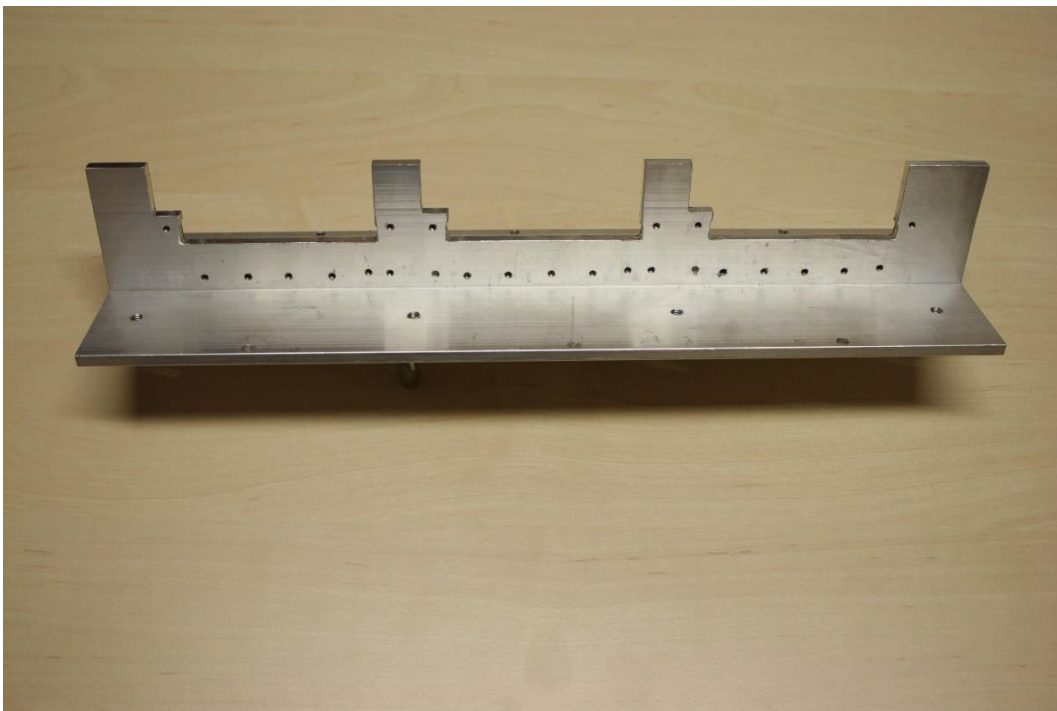
D.7 Deska s teplotním čidlem

X4	I2C vstup
----	-----------

E. Fotodokumentace



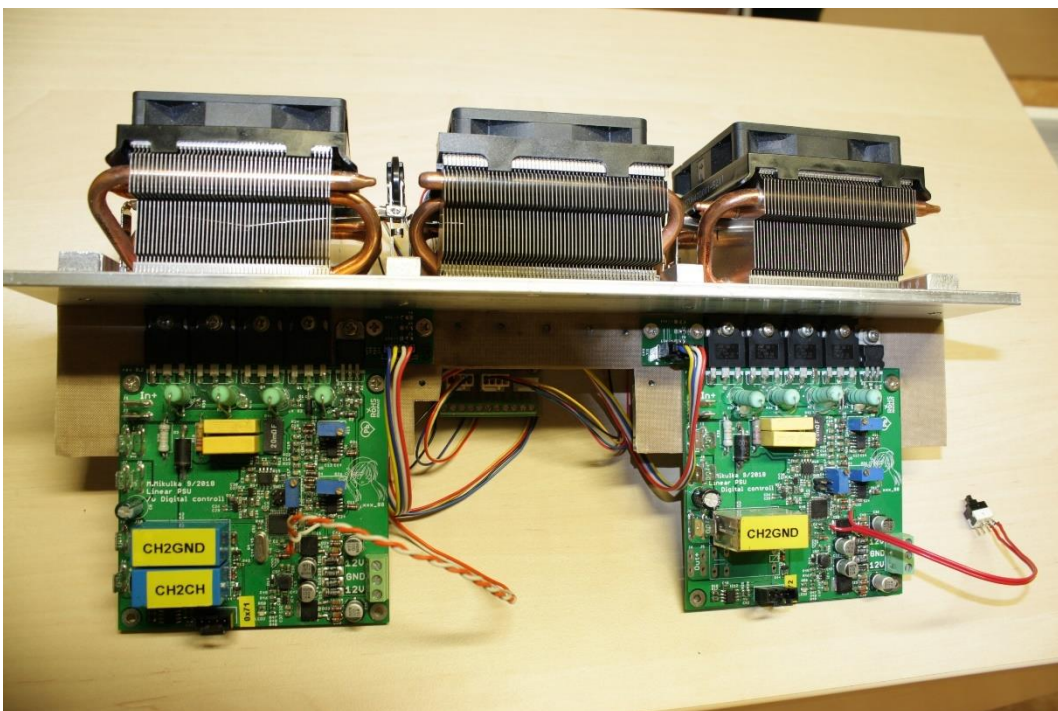
Příloha obr. 1: T-profil jako vodič tepla s montážními prvky pro chladiče z CPU (tištěné a frézované)



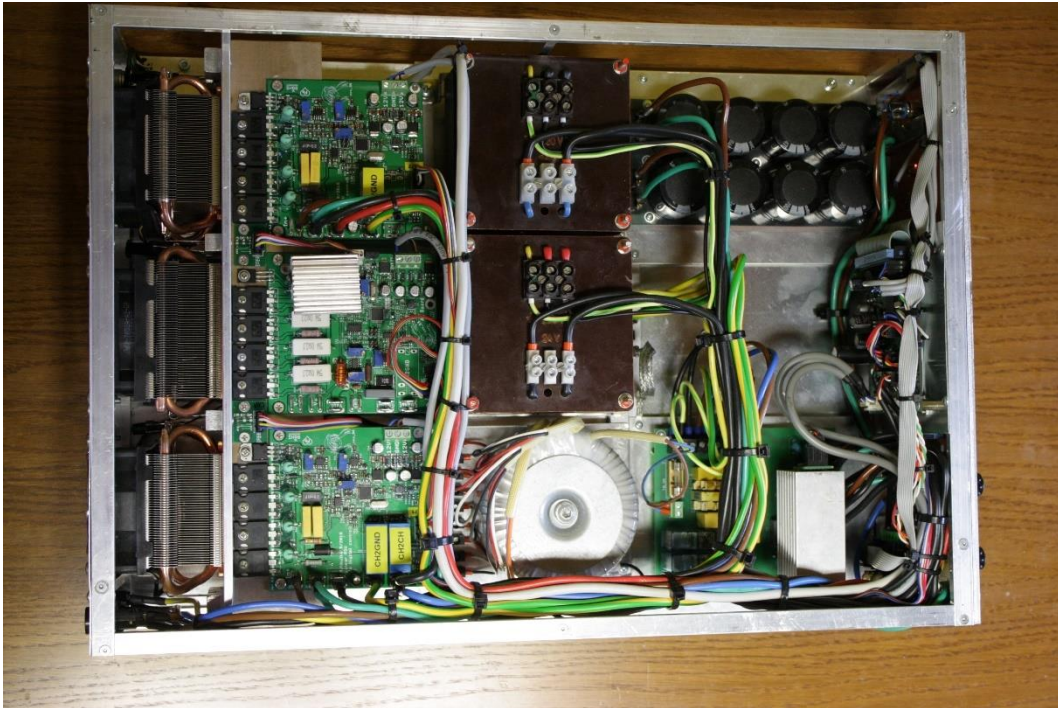
Příloha obr. 2: T-profil jako vodič tepla s přípravou na osazení desek s výkonnými tranzistory



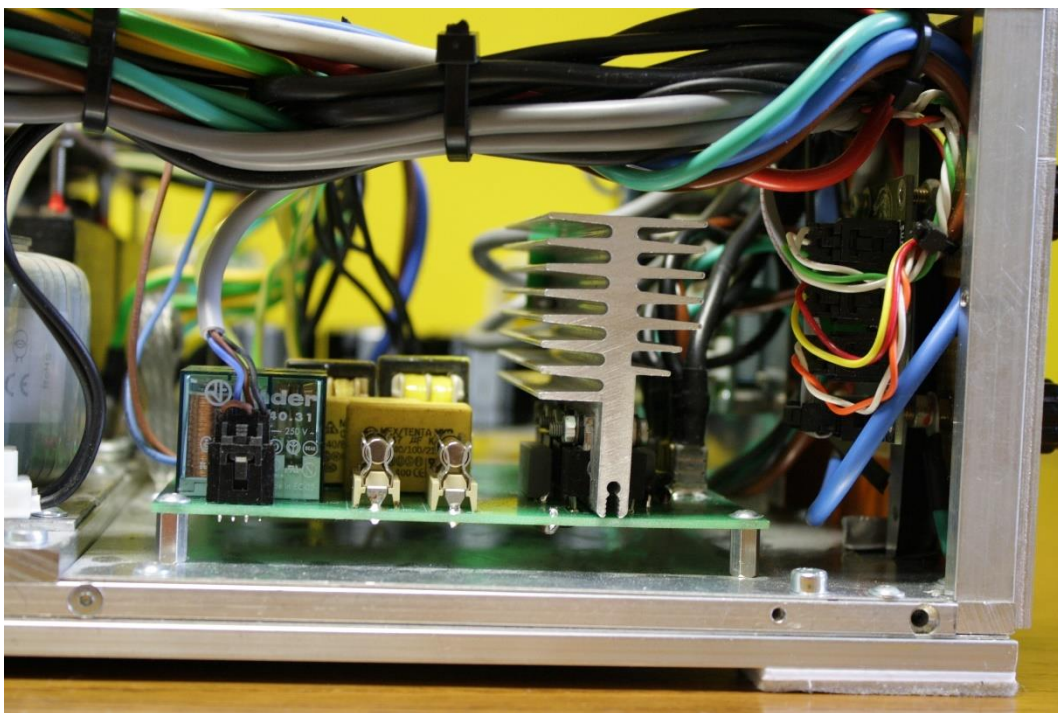
Příloha obr. 3: T-profil jako vodič tepla s osazenými chladiči



Příloha obr. 4: T-profil jako vodič tepla s osazenými moduly zdrojů a deskou pro ventilátory a teplotní čidla



Příloha obr. 5: Záběr kompletně sestaveného zdroje bez vrchního krytu



Příloha obr. 6: Detail na desku se spínacími relé, jištěním a výkonnými usměrňovači



Příloha obr. 7: Detail přední části zdroje



Příloha obr. 8: Detail zadní části zdroje s napájecím kabelem a konektorem pro připojení externích modulů



Příloha obr. 9 Záběr zdroje s výstupem v režimu CV



Příloha obr. 10: Záběr zdroje v režimu CC