



STŘEDOŠKOLSKÁ ODBORNÁ ČINNOST

Obor SOČ: 10. Elektrotechnika, elektronika a telekomunikace

Procesorem řízený napájecí zdroj

Pavel Šafář

Liberecký kraj

Liberec 2017

STŘEDOŠKOLSKÁ ODBORNÁ ČINNOST

Obor SOČ: 10. Elektrotechnika, elektronika a telekomunikace

Procesorem řízený napájecí zdroj

MCU controlled power supply

Autor: Pavel Šafář

Škola: Střední průmyslová škola strojní a elektrotechnická a Vyšší odborná škola,
Liberec 1, Masarykova 3, příspěvková organizace

Kraj: Liberecký kraj

Konzultant: Miroslav Mach

Liberec 2017

Čestné prohlášení

Prohlašuji, že jsem svou práci vypracoval samostatně, použil jsem pouze podklady (literaturu, SW atd.) citované v práci a uvedené v příloženém seznamu a postup při zpracování práce je v souladu se zákonem č. 121/2000 Sb., o právu autorském, o právech souvisejících s právem autorským a o změně některých zákonů (autorský zákon) v platném znění.

Prohlašuji, že tištěná verze a elektronická verze soutěžní práce SOČ jsou shodné.

Nemám závažný důvod proti zpřístupňování této práce v souladu se zákonem č. 121/2000 Sb., o právu autorském, o právech souvisejících s právem autorským a o změně některých zákonů (autorský zákon) v platném znění.

V Liberci dne 31. 3. 2017

podpis:.....

Poděkování

Děkuji panu Miroslavu Machovi zejména za vedení této práce SOČ, pomoc při řešení problémů a podnětné připomínky k formální stránce práce. Dále bych rád poděkoval Technické univerzitě v Liberci a zejména panu Ing. Leoši Petržílkovi za vstřícnost při výrobě plošného spoje pro modul nabíjení Li-Pol akumulátorů. Děkuji také oddělení zakázkového vývoje firmy JABLOTRON ALARMS a. s. za vytištění štítků na čelní panel.

Anotace

Práce se zabývá návrhem a výrobou laboratorního napájecího zdroje řízeného mikroprocesorem. Zařízení umožňuje nastavení požadovaných hodnot výstupního napětí a proudového omezení před připojením výstupu. Je zde také řešena otázka zvýšení účinnosti, a tedy i menší zahřívání celého zařízení, pomocí spínané předregulace. Výrobek má také několik výstupů s pevnými napětími.

Klíčová slova

Napájecí zdroj, lineární stabilizace, DC-DC měnič, mikroprocesor, ARM[®] Cortex[®]-M4, STM32F373

Annotation

This work deals with a design and production of the laboratory power supply controlled by the microprocessor. Device allows to set required values of the output voltage and current limitation before connect of output. There is also solved the issue of increasing efficiency by switching converter. The product also has several outputs with fixed voltages.

Keywords

Power supply, linear stabilization, DC-DC converter, microprocessor, ARM[®] Cortex[®]-M4, STM32F373

Obsah

Úvod	6
1 Teoretická část	7
1.1 Požadavky na laboratorní zdroje.....	7
1.2 Ovládací prvky	7
1.2.1 Potenciometry	7
1.2.2 Rotační enkodéry	8
1.2.3 Klávesnice.....	8
1.3 Usměrňovače.....	8
1.4 Omezení proudové špičky po zapnutí.....	9
1.5 Lineární zdroje.....	10
1.6 Spínané zdroje.....	10
2 Praktická část	12
1.7 Hardware.....	12
1.7.1 Síťová část	12
1.7.2 Transformátor	13
1.7.3 Použité usměrňovače	14
1.7.4 Spínaná předregulace.....	14
1.7.5 Modul pevných napětí pro čelní panel.....	16
1.7.6 Pomocný napájecí zdroj.....	18
1.7.7 Sedmisegmentové displeje.....	18
1.7.8 LCD displej.....	19
1.7.9 Modul lineární stabilizace.....	19
2.1.1 Procesorová deska.....	22
1.7.10 Převodník USB / UART	23
1.7.11 Čelní panel	24
1.7.12 Nabíjecí obvod pro jednočlánkové Li-Pol akumulátory.....	24
1.7.13 Kompletace výrobku.....	25
1.8 Software pro řízení zdroje.....	26
1.9 Technické parametry výrobku.....	29
3 Závěr	30
4 Seznam obrázků	31
5 Seznam použité literatury	32
6 Seznam příloh	33

Úvod

Cílem této práce je vytvořit napájecí laboratorní zdroj, který bude splňovat základní požadavky pro běžné použití v slaboproudé dílně a pohodlnou obsluhu. Ve velké části použití je dostatečný rozsah výstupního napětí 1-25 V a proud do 5 A. Velmi důležité ale je, aby zdroj měl možnost omezení maximálního proudu a nepoškodil se zkratem na výstupu. Práci podstatně zjednodušuje zejména možnost přesně nastavit proudové omezení před připojením zátěže. To je jedna z hlavních výhod procesorem řízených zdrojů oproti čistě analogovým, které je možné nastavit typicky jen podle stupnice u ovládacího prvku, ale skutečnou hodnotu zjistíme až zkratováním výstupu.

Dalšími požadavky jsou výstupy s běžně používanými pevnými napětími nezávislé na hlavním nastavitelném výstupu, přehledný čelní panel s dobře viditelnými hodnotami a také samozřejmě co nejvyšší účinnost zejména kvůli zmenšení chladiče. Z tohoto důvodu se v této práci také zabývám návrhem spínané předregulace.

1 Teoretická část

1.1 Požadavky na laboratorní zdroje

Základním požadavkem při návrhu laboratorního zdroje je regulace výstupního napětí a proudu v dostatečném rozsahu. Maximální hodnoty závisí na plánovaném použití, v praxi jsou pro běžné použití často dostatečné zdroje s napětím nastavitelným v rozsahu do 30-40 V a proudem regulovatelným do 3-5 A. Mělo by být možné napětí i proud nastavovat plynule od nuly. Zdroj musí být schopný dlouhodobě vydržet zkrat na výstupu i maximální výstupní výkon. Velmi důležitá je také možnost odpojení výstupu tlačítkem. Při odpojeném výstupu by mělo být možné nastavit výstupní hodnoty. Nastavení by se mělo zobrazovat na displeji bez nutnosti zkratovat výstupní svorky pro zjištění zkratového proudu. Výstupy mají být galvanicky odděleny od sítě a ani výstupní zem nespojena s kostrou přístroje. Tohoto se hojně využívá u dvojitých zdrojů, protože to umožňuje zapojit je sériově, paralelně či symetricky. Dále jsou kladeny nároky na přední panel. Zde je důležité dostatečné množství výstupních svorek, které by měly umožňovat připojení různých typů zakončení vodičů. Pohodlnou obsluhu zajistí vhodné rozmístění a vhodné typy ovládacích prvků. U rotačních ovládacích prvků je důležité zvolit kompromis mezi přesností nastavení a počtem otáček potřebných pro nastavení v celém výstupním rozsahu. U digitálně řízených zdrojů jsou širší možnosti způsobu realizace. Často se využívá rotačních enkodérů či klávesnice. Velký význam má volba vhodného typu zobrazování. Zde je nutné brát v úvahu zejména preference obsluhy. Pro indikaci proudu mohou být stále výhodná ručková měřidla. Obecně je vhodné preferovat způsoby zobrazení, které samy vydávají světlo a nejsou závislé na okolním osvětlení, což je nevýhodou například LCD displeje s reflexní vrstvou místo podsvícení. Dobré viditelnosti dosahují zejména segmentové displeje, OLED a dobře podsvícené (zejména barevné) grafické LCD.

1.2 Ovládací prvky

1.2.1 Potenciometry

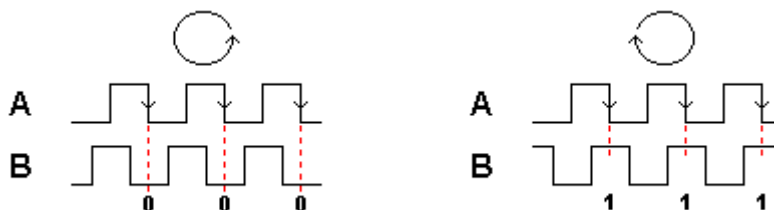
V případě potenciometrů není vhodné použít jednobáňový (rozsah okolo 270°), protože zejména pro napětí je nastavení příliš hrubé. V praxi se to často řeší použitím dvou, kdy jeden slouží pro hrubé nastavení v celém rozsahu a druhý pro jemné doladění v rozmezí typicky 10 % maxima. Lze sice dosáhnout dostatečně přesné regulace, ale při práci se zdrojem to není praktické. Často se stává, že požadovaná hodnota se nalézá těsně za hranicí možnosti doladění jemným potenciometrem. V tomto případě se musí potenciometr nastavit zhruba do středu rozsahu, napětí naladit hrubě a následně jemně. Tento fakt velice zneprůjemňuje a zpomaluje

práci. Pokud použijeme jeden víceotáčkový (zhruba deset otáček), je nutné pro větší změnu napětí točit knoflíkem dlouho.

1.2.2 Rotační enkodéry

Na první pohled se často podobají jednootáčkovým potenciometrům, ale místo odporového děliče obsahují dva mechanické nebo optické spínače. Na jejich výstupu získáváme dva signály posunuté o 90° . V závislosti na směru otáčení se jedná o fázový posun $+90^\circ$ nebo -90° . U často používaných typů s mechanickými kontakty je nutno dbát na jejich životnost. Důležité je minimalizovat proud tekoucí přes jejich kontakty. Z tohoto důvodu není příliš vhodné používat na ošetření zákmitů kondenzátory, ale použít softwarové řešení.

Jejich předností je otáčení bez dorazu. Bohužel kvůli omezenému počtu impulsů na otáčku je nutné inteligentní řízení, které mění velikost přírůstku nastavované veličiny v závislosti na rychlosti otáčení. V praxi se to projevuje tak, že při pomalém otáčení se hodnota zvyšuje po nejnižším možném kroku, ale jakmile začneme točit rychle, začne se nastavovat hodnota ve vyšším řádu. Rotační enkodéry mají často integrované tlačítko, které lze také použít na změnu rychlosti nastavování.



Obrázek 1 Výstupní signály rotačních enkodérů v závislosti na směru otáčení

1.2.3 Klávesnice

Na digitálně řízených zdrojích často nalezneme klávesnici. Umožňuje snadné a přesné zadání v celém rozsahu během krátké doby. Problém nastává, pokud chceme regulovanou veličinu nastavovat plynule. Zde se klávesnice stává prakticky nepoužitelná. Proto se často kombinuje s rotačními enkodéry nebo dvěma tlačítky pro zvýšení nebo snížení hodnoty. Vzhledem k její velikosti se používá pro nastavení proudu i napětí jedna a je nutné vyřešit názorné přepínání funkce.

1.3 Usměrňovače

Usměrňovače se používají pro přeměnu střídavého proudu na stejnosměrný. Nejčastěji se k tomuto účelu využívají diody, ale existují i usměrňovače s tranzistory a dříve se používaly

selenové, rtuťové či mechanické. Podle principu činnosti je dělíme na jednocestné, dvoucestné, můstkové a vícefázové.

Jako dvoucestný usměrňovač se nejčastěji používají dvě diody se spojenými katodami. Nevýhodou je nutnost použití transformátoru, který má dvě oddělená vinutí nebo vinutí s vyvedeným středem. Oproti jednocestnému usměrňování dosáhneme nižšího zvlnění při zachování stejné filtrační kapacity a také je transformátor namáhán rovnoměrně při obou půlvlnách. Na rozdíl od můstkového usměrňovače dochází k průchodu elektrického proudu pouze jednou diodou místo dvou, což vede k polovičním ztrátám.

Můstkové usměrňovače umožňují usměrnit obě půlvlny i z jednoho vinutí. Proud prochází vždy přes dvě diody, což vede ke dvojnásobné ztrátě než u předchozích typů. Všechny čtyři diody často bývají integrovány do jednoho pouzdra.

Při návrhu usměrňovače je důležité zvolit vhodné diody. Musíme brát ohled na velikost usměrňovaného napětí, maximální proud a jeho frekvenci. U NF usměrňovačů nejsou rozdíly zotavovacích časů mezi různými typy diod patrné, ale pro spínané zdroje jsou díky kratším spínacím časům lepší schottkyho diody. Ty se také hodí pro zvýšení účinnosti, jelikož v propustném směru se na nich ztrácí menší napětí než na klasických diodách. Z bezpečnostního hlediska volíme maximální dovolené závěrné napětí typicky alespoň dvojnásobek usměrňovaného napětí. To samé platí i u proudu. U schottkyho diod je volba správného závěrného napětí velice důležitá, protože při nedostatečném dimenzování může dojít k jejímu proražení, ale ani zbytečně naddimenzovaná hodnota není ideální. Rapidně roste cena diody a také napětí, které se ztratí na diodě v propustném směru, což negativně ovlivňuje účinnost.

1.4 Omezení proudové špičky po zapnutí

V každém stejnosměrném stabilizovaném napájecím zdroji se nacházení filtrační kondenzátory. Ty se v okamžiku zapnutí chovají prakticky jako zkrat a dochází k velkým proudovým špičkám. Pro jejich eliminaci se do obvodu zařazuje tzv. soft-start obvod. Ten je možné umístit na primární i sekundární stranu. Při umístění na sekundární stranu musíme obvod dimenzovat na řádově větší proud, ale naopak na menší napětí. Obvykle se k tomuto účelu používá výkonový NTC termistor, který se vlivem průchodu elektrického proudu zahřívá, čímž klesá jeho odpor a postupně se přestává v obvodu uplatňovat. Jeho odpor však nikdy nebude nulový a vždy zde budou vznikat jisté ztráty. Proto je možné jej překlenout pomocí relé s opožděným sepnutím. Výhodou tohoto zapojení je odpor v řádu maximálně desítek miliohmů po sepnutí.

1.5 Lineární zdroje

Sériové lineární zdroje stabilizují výstupní napětí za pomoci změny napětí na tranzistoru. Nejjednodušším lineárním zdrojem je tranzistor v zapojení se společnou bází a se zenerovou diodou, zapojenou v závěrném směru mezi bází a zemí. Mezi bází a kolektorem je ještě rezistor, zajišťující otevření tranzistoru a klidový proud diodou. Zenerova dioda zde slouží jako zdroj referenčního napětí. Protože napětí mezi bází a emitorem je konstantní, je výstupní napětí rovno napětí na bázi snížené o napětí na přechodu báze – emitor. Pokud chceme nastavitelný zdroj, použijeme nastavitelnou referenci místo zenerovy diody. Tranzistor zde plní funkci proudového zesilovače. Pro menší proudy (typicky do 2 A) bývá toto zapojení integrováno do jednoho pouzdra. Pro větší proudy se většinou používají externí výkonové tranzistory.

1.6 Spínané zdroje

Na rozdíl od lineárních mohou být spínané zdroje i zvyšující. Může se jednat o zapojení bez cívky, tedy o nábojové pumpy nebo měniče s cívkou. Ve všech zapojeních ale nalezneme spínací prvek, pracující na frekvenci od jednotek kilohertz až do jednotek megahertz a také řídicí obvod, ačkoliv ten může být v nejjednodušším případě tvořen pouze oscilátorem řízeným zpětnou vazbou.

Snižující DC-DC měniče oproti lineárním zdrojům dosahují vysoké účinnosti. Nevýhodou bývá vyšší zvlnění výstupu, větší filtrační kapacita na výstupu a vyzařování vysokofrekvenčního elektromagnetického pole. Jsou založeny na principu spínání vstupního napětí do cívky zapojené sériově s výstupem. V okamžiku sepnutí začne cívku procházet proud, který nabíjí filtrační kondenzátor za ní. Jakmile dojde k nabití kondenzátoru nad mez danou zpětnou vazbou, řídicí obvod rozepne výkonový tranzistor. Na cívce se začne indukovat napětí opačné polarity. Nyní je konec cívky spojen se zemí buď pomocí diody nebo komplementárního tranzistoru. Díky tomu se energie akumulovaná v jádru cívky přenesou do kondenzátoru. Tento proces se neustále opakuje. Regulace napětí se provádí změnou střídý spínaného průběhu.

U tohoto typu spínaných zdrojů jsou kladeny vysoké nároky na kvalitu použitých součástek. Jedná se zejména o filtrační kondenzátory na výstupu, cívku, výkonový tranzistor a jeho budící obvod. Výstupní kondenzátory volíme s nízkým ESR, na teplotu 105°C a s velkým maximálním povoleným proudem. Je vhodné zapojit dva nebo více paralelně pro snížení ESR. Také dostatečně dimenzujeme jejich maximální napětí. Důležitá je zejména cívka, protože přes ní se přenáší celý výstupní výkon. Volíme jádro vhodné pro použití ve vysokofrekvenčních spínaných zdrojích a pracovní proud násobně větší, než je očekávaný výstupní. Používáme výhradně toroidní jádra, aby se omezilo vyzařování vysokofrekvenčního

magnetického pole. Pokud je to možné, preferujeme stíněné SMD cívky. U diody mezi výstupem tranzistoru a zemí je důležité ji dimenzovat na alespoň dvojnásobek nebo lépe trojnásobek výstupního napětí. Kvůli rychlejšímu zotavovacímu času upřednostňujeme schottkyho diody. Pro spínání jsou vhodné zejména MOSFET tranzistory. Při volbě klademe důraz na minimálně dvojnásobné U_{DS} než je vstupní napětí, dostatečně velký maximální proud a co možná nejnižší náboj hradla. Ačkoliv MOSFET tranzistory jsou řízené elektrickým polem, musí dojít při jejich sepnutí k nabití parazitních kapacit. Při vysokých frekvencích tedy již řídicí elektrodou, začíná protékat ne zcela zanedbatelný proud. Kvalita budícího obvodu velmi ovlivňuje rychlost sepnutí tranzistoru. Je důležité, aby doba přepnutí byla co možná nejkratší, protože v době přechodu mezi sepnutým a rozepnutým stavem je tranzistor v analogovém režimu a značně se zahřívá. Spínané zdroje vyžadují dodržení jistých pravidel při návrhu DPS. Výkonové cesty navrhujeme co nejsilnější a nejkratší. Tranzistor, cívka a výstupní kondenzátor by měly být co nejbliže u sebe. Zpětnou vazbu připojujeme co nejbliže k výstupním svorkám a po desce ji vedeme dál od výkonových cest a zejména co nejdále od cívky. Ideální je ji obklopit velkou plochou mědi připojené na zem.

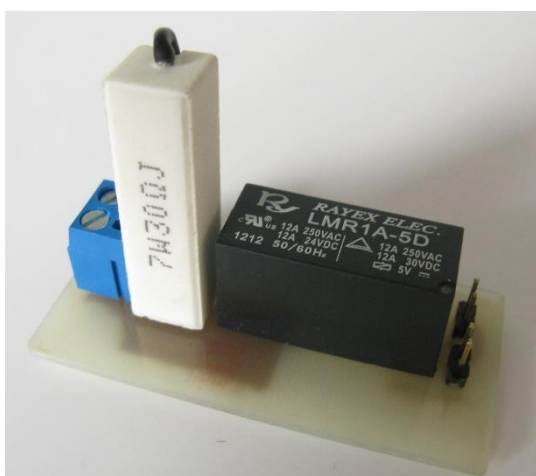
2 Praktická část

1.7 Hardware

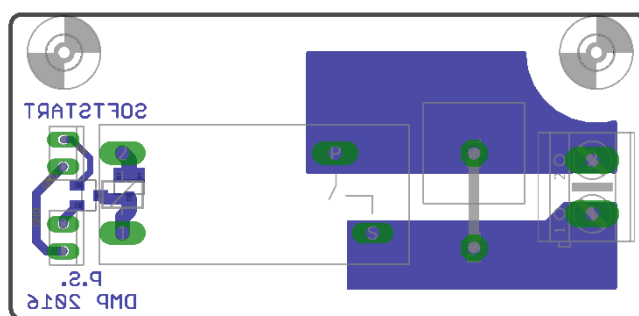
Při návrhu laboratorního zdroje je nutné zvolit vhodný typ stabilizace napětí. Musí se brát ohled na zvlnění výstupního napětí, odolnost vůči zkratu, velikost kapacity filtračního kondenzátoru na výstupu, který ovlivňuje rychlost reakce proudového omezení, účinnost a komplikovanost řízení výstupního proudu a napětí pomocí napětí z DA převodníku. Ve většině z těchto parametrů jsou lepší lineární stabilizátory, jejichž podstatnou nevýhodou je nízká účinnost při nízkém výstupním napětí. V případě návrhu zdroje dimenzovaného na 5 A se vstupním napětím 40 V musí být zařízení dlouhodobě schopné uchladit až 200 W ztrátového výkonu. Z tohoto důvodu jsem zvolil koncepci dvoustupňové stabilizace. Napětí je nejprve sníženo pomocí spínaného zdroje s relativně vysokou účinností na napětí o zhruba 4 V vyšší, než je výstupní napětí. Následně je stabilizováno lineárním zdrojem na požadovanou hodnotu na výstupu.

1.7.1 Síťová část

Vzhledem k tomu, že zařízení je umístěno v kovovém krytu a jedná se o spotřebič třídy I, je nutné pro jeho připojení využít třívodičový napájecí přívod. Ochranný vodič je ke krytu zařízení připojen samostatným šroubem M4. Pro lepší elektrický kontakt a zamezení samovolného povolení matky jsou použity vějířové podložky. Samozřejmě je síťový vypínač a pojistka (F 1,8 A/ 250 V). Na sekundární straně transformátoru jsou pro vyhlazení napětí kondenzátory o celkové kapacitě zhruba 40 000 μF . Proto je vhodný obvod soft-startu. Rozhodl jsem se ho zapojit před primární vinutí, protože v tomto případě můžeme obvod dimenzovat na nižší proud.



Obrázek 2 Obvod soft -start



Obrázek 3 Návrh DPS pro soft-start

Pro tuto práci jsem zvolil rezistor přemostovaný pomocí relé. Aby byly potlačeny případné napěťové špičky ze sítě 230 V i špičky generované zařízením, je zde zapojen varistor, jehož jmenovité napětí je 275 V AC. (K jeho sepnutí nesmí dojít do nejvyšší přípustné hodnoty síťového napětí, která je 230 V + kladná tolerance 10 %, což je 253 V. Podle této hodnoty volíme nejbližší vyšší vyráběnou nominální hodnotu varistoru.) Dalším odrušovacím prvkem je kondenzátor 220 nF / 275 VAC mezi fázovým a nulovým vodičem, připájený přímo na síťové zásuvce.

Při vývoji zdroje jsem pro napájení jednotlivých modulů používal laboratorní zdroj s bezpečným napětím. Zapojení síťové části bylo zkontrolováno a následně vyzkoušeno osobou s dostatečnou kvalifikací.

1.7.2 Transformátor

Z hlediska bezpečnosti je nutné výstup galvanicky oddělit od sítě. Jeho další funkcí je snížení síťového napětí na hodnotu lehce vyšší, než je maximální požadované napětí výstupu. Zvolil jsem zapojení s nízkofrekvenčním 50Hz transformátorem, jehož hmotnost a rozměry jsou oproti vysokofrekvenčním transformátorům násobně větší, ale ve výsledku byla jeho cena nižší než použití průmyslového spínaného zdroje. Obvykle také je nízkofrekvenční transformátor oproti spínaným zdrojům odolnější vůči zkratu na výstupu. (K přerušení síťové pojistky dojde typicky dříve než k jeho zničení.)



Obrázek 4 Použitý síťový transformátor

Použitý transformátor má následující sekundární vinutí: 2× 35 V se společným středem a 2× 13,5 V a dále vinutí 1× 15 V a 2× 35 V se společným středem, která jsou navinuta slabším drátem. Jedná se toroidní transformátor, který má oproti obdobnému transformátoru z EI plechů vyšší účinnost, menší rozměry, nižší hmotnost a menší vyzařování elektromagnetického pole.

1.7.3 Použité usměrňovače

Vzhledem k tomu, že hlavní sekundární vinutí $2 \times 35 \text{ V}$ má vyvedený společný střed, je výhodné použít dvoucestné usměrnění. Je realizováno dvojitou schottkyho diodou se společnou katodou MBR20100. Její maximální povolené napětí v závěrném směru je 100 V . Maximální povolený proud vybraného usměrňovače 10 A na každou diodu je také více než dostačující.

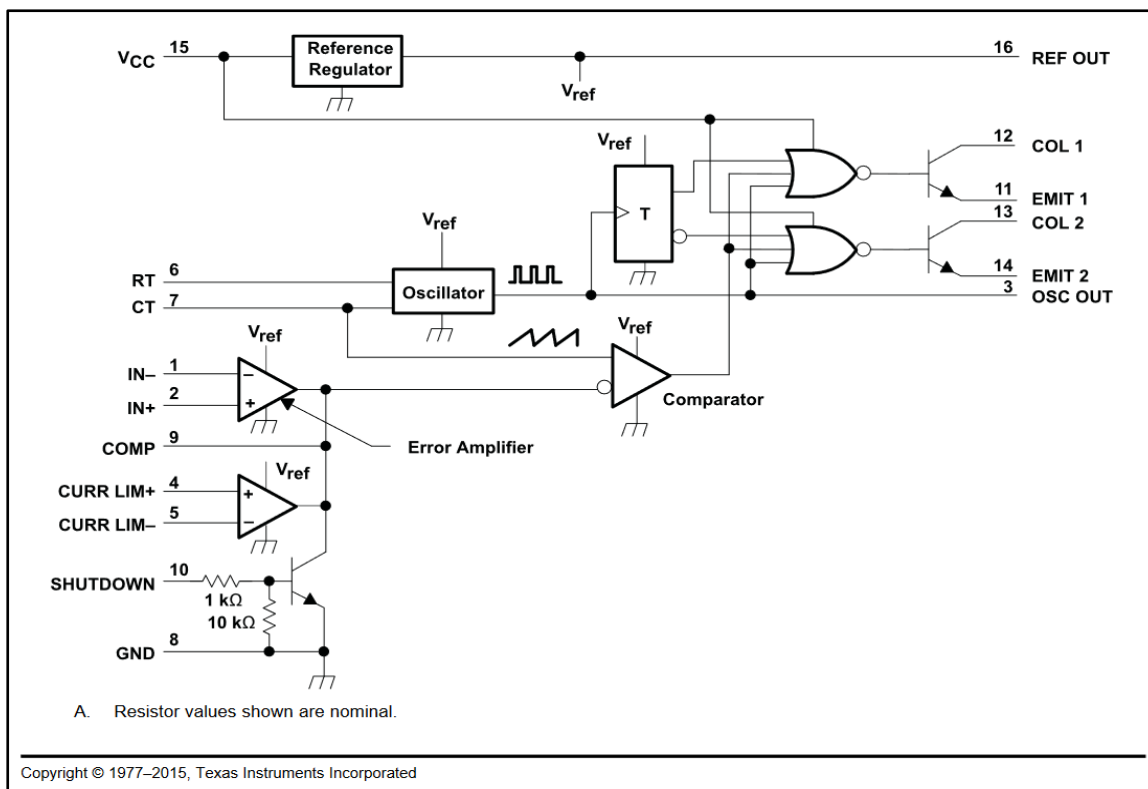
Pro zdroje pevných napětí, které jsou přivedené do zdírek na čelním panelu, je napětí usměrněno ze dvou $13,5 \text{ V}$ vinutí pomocí dvou můstkových usměrňovačů GBJ10D. Jsou to můstkové usměrňovače složené ze standardních diod pro napětí do 200 V a proudu do 10 A . Hodnoty jsou násobně naddimenzované, za dostatečné lze považovat $40 \text{ V} / 5 \text{ A}$, avšak pořizovací cena použitých usměrňovačů byla v době objednávky nižší než cena slabších, tudíž nebyl důvod je nepoužít. Jeden z usměrňovačů je použit pro kladné zdroje $+3,3 \text{ V}$, $+5 \text{ V}$ a $+12 \text{ V}$ a druhý pro záporné -12 V a -5 V . Všechny tyto usměrňovače jsou přišroubované na zadním hliníkovém panelu, který slouží jako chlazení. Jejich zahřívání není tak velké, aby kryt nebezpečně ohřálo. Při provozu je oteplení krytu neznatelné. Napětí pro pomocný zdroj lineárního zdroje je usměrněno přímo na desce pomocí samostatných diod.

1.7.4 Spínaná předregulace

Předregulace pro lineární stabilizátor se v praxi řeší několika způsoby. Můžeme přepínat vinutí transformátoru, což ovšem vyžaduje vhodně navinutý transformátor. Dále lze přepínat způsob usměrnění nebo lze použít fázovou regulaci. Pro přepínání se typicky používají relé či triaky. Pokud místo NF transformátoru použijeme spínaný zdroj, lze předregulaci realizovat pomocí modifikace jeho zpětné vazby. Další možností, kterou jsem využil v tomto případě, je DC-DC step-down měnič.

Základním požadavkem při návrhu koncepce předregulace byla možnost ji napájet ze vstupního napětí minimálně 40 V s dostatečnou bezpečnostní rezervou. Požadovaný maximální proud jsou minimálně 4 A . Zejména kvůli vysokému vstupnímu napětí jsem nenalezl vhodný obvod, který by v sobě integroval jak řídicí elektroniku, tak i spínací prvek za přijatelnou cenu. Tento typ obvodů bývá výhodný zejména pro zmenšení rozměrů a vysoké spínací frekvence. V konečném řešení je použit řídicí obvod SG3524D s externím P-channel MOSFET tranzistorem IRF5210. Pro napájení řídicího obvodu je zde sníženo napětí pomocí jednoduchého stabilizátoru z tranzistorů a zenerovy diody. Zenerova dioda je zapojena mezi bází tranzistoru Q2 a zem. (Označení součástek vychází ze schématu v příloze č. 2.) Díky zvedacímu rezistoru R22 přes ni protéká proud a je na ní napětí 10 V . Tranzistor Q2 slouží jako proudový zesilovač pro buzení báze tranzistoru Q1. Mezi jeho kolektor a kladné napájecí napětí je zapojen ochranný rezistor R20, který omezí velikost maximálního proudu do báze Q1.

Tranzistor Q1 je druhý proudový zesilovač. Oproti jednostupňové stabilizaci může přes zenerovu diodu téct menší proud a obvod se méně zahřívá.

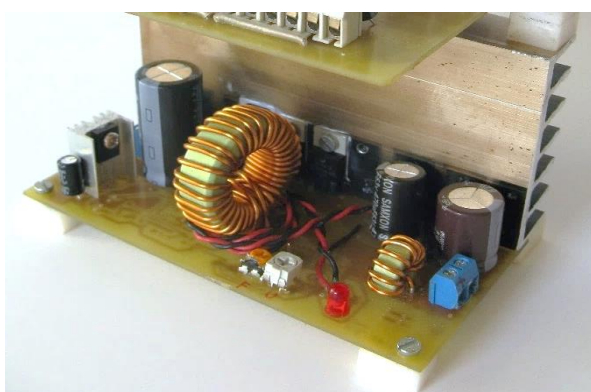


Obrázek 5 Blokové schéma obvodu SG3524

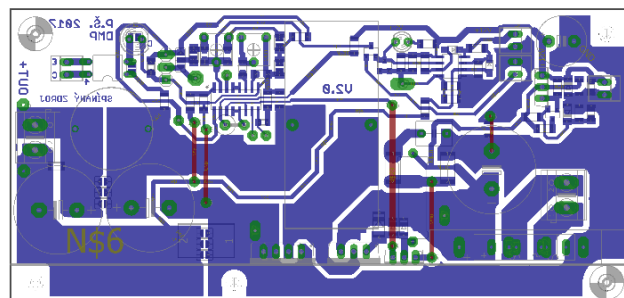
Řídící obvod SG3524 obsahuje oscilátor s nastavitelnou frekvencí, operační zesilovače pro zapojení zpětné vazby, zdroj referenčního napětí 5 V, obvod pro možnost vypnutí výstupu, klopný obvod T a výstupní tranzistory pro buzení výkonového tranzistoru.

V použitém zapojení je na neinvertující vstup operačního zesilovače (pin 2) připojeno přes dělič napětí z výstupu lineárního zdroje. Tento dělič ovšem není zapojen přímo proti zemi, ale na výstup druhého děliče z referenčního napětí. Druhý dělič má zhruba desetkrát menší hodnoty rezistorů než dělič z výstupu. Tím je dosaženo minimálního napětí zhruba 0,76 V na vstupu zpětné vazby. Vzhledem k tomu, že na invertující vstup je připojen dělič 1:10 z výstupu předregulace jako druhá zpětná vazba, je napětí na výstupu předregulace rovno desetinasobku napětí na neinvertujícím vstupu. Díky předpětí 0,76 V je po zapnutí na výstupu předregulace napětí 7,6 V, což umožní zapnutí lineárního stabilizátoru. Pokud by zpětná vazba byla udělána pouze jednostupňovým děličem, nebylo by možné zapnout lineární stabilizátor, protože obvod předregulace by na svém výstupu udržoval nulové napětí. Vzhledem k tomu, že v této fázi návrhu se nejedná o výrobek pro sériovou výrobu, je zde pro nastavení více rezistorů a propojek, než je nezbytně nutné. V budoucí variantě by zapojení zpětné vazby mělo být zredukováno na čtyři přesné rezistory.

Aby byl proud pro buzení hradla výkonového tranzistoru dostatečný, jsou voleny hodnoty rezistorů R3, R6, R11 relativně malé. Strmost hrany budícího signálu je vylepšena kondenzátorem C1, který v okamžiku sepnutí připojí rezistor R3 a zvýší tak krátkodobě budící proud. V okamžiku rozepnutí tranzistoru Q4 se začne v cívce L1 indukovat napětí opačné polarity. Toto napětí je nutné připojit k zemi, aby došlo k přenosu energie indukované v cívce do filtračního kondenzátoru C3. Pulzující napětí z výkonového tranzistoru je pomocí LC členu vyhlazeno. Pro toto připojení lze využít diody zapojené anodou na zem nebo místo jednoho výkonového tranzistoru použít komplementární dvojici tranzistorů. Zapojení s dvojicí tranzistorů může dosahovat vyšší účinnosti, ale to má význam spíše pro zdroje s výstupním proudem v řádu desítek ampér. Deska je navržena tak, aby bylo možné osadit jednoduchou i dvojitou diodu. V případě dvojitě diody se společnou katodou jsou obě diody spojeny paralelně díky čemuž se rozdělí proud protékající přes ně. Vzhledem k tomu, že obě diody nemají stejné napětí na přechodu v propustném směru, nedojde k rovnoměrnému rozdělení proudu a jedna z nich je namáhána více. Nelze se spolehnout na to, že dvojitá dioda zvládne dvojnásobné zatížení. Proto v případě použití dvojitě diody je vhodné ji dimenzovat tak, aby každá z diod byla sama o sobě dostatečná. To sice zvýší cenu, ale i životnost. Protože jsem chtěl vyzkoušet maximální možnosti zařízení, použil jsem dvojitou Schottkyho diodu MBR20200. (Její maximální povolené napětí v závěrném směru je 200 V a proud v propustném směru 2×10 A) Aby bylo potlačeno zvlnění na výstupu předregulace, je zde zapojen ještě jeden LC filtr. V návrhu dále nalezneme konektor pro vypnutí výstupu, indikaci napětí na výstupu i obvod pro vypnutí v případě přetížení. Ten nebyl nakonec osazen, jelikož proudové omezení se nachází na lineárním stabilizátoru.



Obrázek 7 Modul spínané předregulace



Obrázek 6 Návrh DPS pro modul spínané předregulace

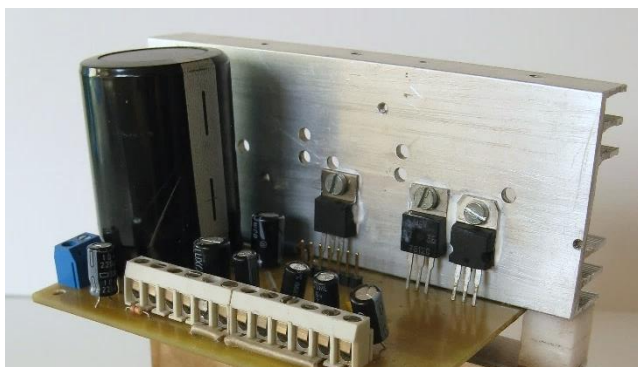
1.7.5 Modul pevných napětí pro čelní panel

Při práci s laboratorním zdrojem často narážíme na potřebu pevných napájecích napětí běžných hodnot, typicky +3,3 V, +5 V, +12 V, -5 V, -12 V. Proto jsem kromě hlavního regulovatelného zdroje vytvořil i modul s pevnými lineárními stabilizátory. Každý z nich je

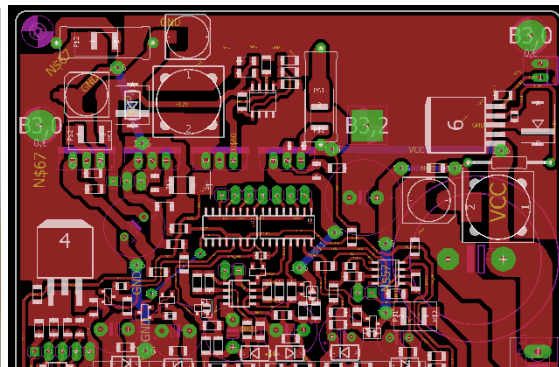
chráněn vratnou polymerovou pojistkou, která je trochu netradičně umístěná na jeho vstupu. Toto řešení jsem zvolil, jelikož proud tekoucí do zemnicího pinu stabilizátoru je oproti nominálnímu proudu pojistky zanedbatelný, tudíž k odpojení výstupu nedojde dříve, než kdyby pojistka byla na výstupu a zároveň takto dojde ke snížení výstupní impedance. Při zapojení pojistky na výstup může dojít při plném zatížení k poklesu napětí i o několik desetin voltu. Aby byly lineární stabilizátory pro +5 V a -5 V méně teplotně namáhané, umístil jsem na jejich vstup předřadný rezistor 2,2 Ω /4 W. V případě 3,3V stabilizátoru LM1117 v SMD provedení již není možné ztrátový výkon při napájení z 15 V a proudu 1 A uchladiť, proto je napájen z 5V spínaného stabilizátoru LM2596S a ještě je připojen přes diodu, která toto napětí sníží o dalších zhruba 0,7 V. Protože 5V spínaný zdroj dokáže poskytovat proud až 3 A, je ve výsledku použit i pro modul nabíječky Li-Pol akumulátorů a jako další samostatný výstup.

Pro případ, že bychom celý modul napájeli pouze z kladného napětí, je na desce navržen invertor napětí s obvodem MC34063AD. Vzhledem k přítomnosti dvou 13,5V vinutí na transformátoru, je výhodnější z hlediska ceny a účinnosti tuto část neosadit a záporné napětí přivést z druhého vinutí.

Na každém kladném výstupu je navržen obvod pro měření výstupního proudu a skutečného napětí. V této variantě zatím není osazen. Užitečnou vlastností je možnost odpojení každého z napětí. V návrhu je to řešeno N-channel MOSFET tranzistorem na všech výstupech. N-channel MOSFET tranzistory se většinou používají ke spínání zátěže proti zemi. Pro tento případ to však není vhodné, jelikož musíme počítat s tím, že na čelním panelu dojde k propojení všech zemí a tím i k překlenutí a vyřazení tranzistorů z funkce. Nechtěl jsem používat P-channel MOSFET kvůli jejich horším elektrickým vlastnostem, z toho ale vyplývá nutnost budít hradla N-channel tranzistorů vyšším napětím, než je spínané. Toto napětí je na desce k dispozici, pro jeho přivedení na hradla se jeví jako nejjednodušší použít optočlen. Jeho použití mi dále umožní ovládat výstupy z procesoru, který je v zařízení zapojen na potenciálu o až 45 V vyšším, než je zem tohoto modulu.



Obrázek 9 Zdroje pevných napětí



Obrázek 8 Návrh DPS pro zdroje pevných napětí

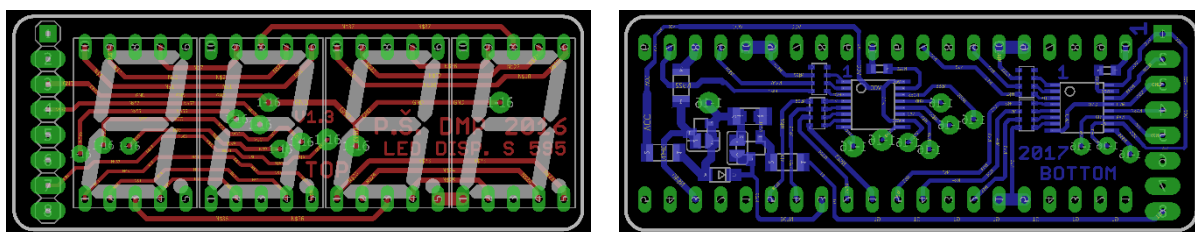
1.7.6 Pomocný napájecí zdroj

Pro operační zesilovače a buzení výkonových tranzistorů v modulu lineárního stabilizátoru jsou zapotřebí napětí +12 V a -12 V. Rozhodl jsem se tyto zdroje umístit na samostatnou desku. Kromě výše uvedených napětí jsou zde i stabilizátory pro +5 V a +3,3 V. Větev +5 V byla navržena pro napájení operačních zesilovačů, které zvyšovaly napětí z proudového bočnicku kvůli měření procesorem. Nakonec zde ale nejsou osazeny, protože použitý procesor je má integrované. Napětí 3,3 V z tohoto zdroje používám pro napájení sedmissegmentových displejů na čelním panelu, aby bylo sníženo zahřívání stabilizátorů na desce s procesorem.

Na této desce je integrován i usměrňovač ze Schottkyho diod, který je navržen tak, aby bylo možné použít transformátor s jedním vynutím i se dvěma vynutími se společným středem. Při připojení jednoho vynutí se chová jako zdvojovač napětí a kladné i záporné napětí je usměrňováno jednocestně. Zapojením dvou vinutí dosáhneme dvoucestného usměrňování.

1.7.7 Sedmissegmentové displeje

Pro zobrazení měřeného napětí a proudu jsem místo LCD zvolil sedmissegmentové displeje kvůli lepší viditelnosti. Vzhledem k jejich značné energetické náročnosti není vhodné je připojovat přímo k mikroprocesoru. Jako budiče jsou zde použity posuvné registry 74HC595. Na každém zobrazovacím modulu jsou čtyři displeje řízené dvěma posuvnými registry. Pomocí spínání společné katody jsou do multiplexu zapojeny dvojice. Pro přepínání se používají MOSFET tranzistory. Z mikrokontroléru je ovládáno pouze hradlo prvního, hradlo druhého je zvedáno pull-up rezistorem, takže v klidovém stavu je sepnutý. Pokud dojde k sepnutí prvního tranzistoru, je přes diodu uzemněno hradlo a druhý tranzistor rozeptne. Tímto zapojením byl ušetřen jeden pin na mikrokontroléru. Kromě proudového posílení má použití integrovaného obvodu 74HC595 také výhodu spočívající v úspoře pinů mikrokontroléru. Z modulu displeje je vyveden sedmý bit druhého posuvného registru, který jsem v konečném zapojení připojil na datový vstup druhého modulu. Všechny ostatní řídicí signály jsou paralelně spojené, což nám v kombinaci s multiplexováním umožňuje pomocí čtyř pinů mikrokontroléru ovládat 64 segmentů. Jedna z velkých výhod integrovaného obvodu 75HC595 je přítomnost klopného obvodu D na každém z výstupů. Díky tomu nedochází k problikávání na displeji při posouvání

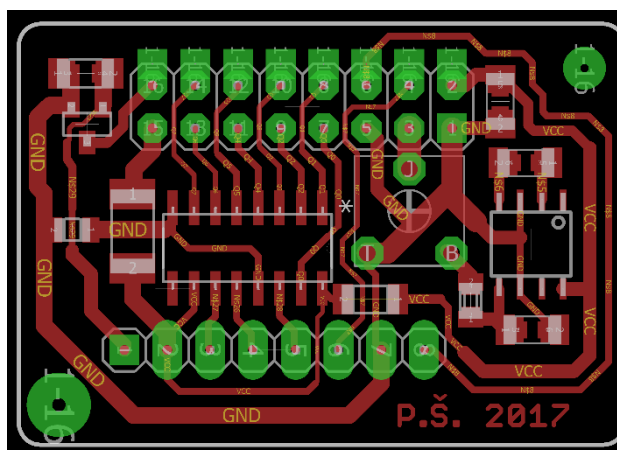


Obrázek 10 Návrh DPS pro segmentové LED displeje

dat skrz registry. Toho je docíleno tím, že až do vzestupné hrany na hodinovém signálu klopných obvodů D zůstává na výstupu předchozí hodnota. Typická maximální frekvence řídicích signálů je 100 MHz, což umožňuje velmi rychlý zápis. Deska je navržena jako dvoustranný plošný spoj a je jen o trochu větší, než jsou samotné displeje. To nám umožňuje jednotlivé zobrazovací moduly skládat blízko k sobě.

1.7.8 LCD displej

Pro zobrazování podrobnějších informací jsem zvolil alfanumerický LCD displej o velikosti 40 x 2 znaků. Modul obsahuje řadič kompatibilní s HD44780. Aby došlo ke zkrácení času potřebného pro zápis jednoho znaku a zjednodušil se software, používám místo čtyřbitového komunikačního rozhraní osmibitové. Vzhledem k tomu, že řadič je řádově pomalejší než použitý mikroprocesor, je rychlejší odeslat sériově data do posuvného registru 74HC595 a následně osmibitově do LCD, než provádět dva čtyřbitové zápisy do displeje. Jak je již z předchozího textu patrné, vytvořil jsem pro připojení LCD desku s integrovaným obvodem 74HC595. Je na ní umístěn také obvod ICL7660, což je nábojová pumpa, zde zapojená jako invertor napětí. Použitý LCD totiž potřebuje záporné napětí pro nastavení kontrastu. Na desku lze také osadit N-channel MOSFET pro spínání podsvícení. V tomto výrobku jsem se ale rozhodl nechat displej pro lepší čitelnost trvale podsvícený, což je zajištěno trvalým připojením na napájení.



Obrázek 11 Návrh DPS pro expandér a zdroj záporného napětí pro LCD

1.7.9 Modul lineární stabilizace

Při návrhu modulu lineární stabilizace jsem vycházel ze zapojení, zveřejněného na serveru Svetelektro.com. (Viz zdroje použité literatury.)

Na vstupu napájení se nacházejí filtrační kondenzátory pro potlačení vysokofrekvenčního zvlnění ze spínané předregulace. Vzhledem k vysoké frekvenci spínání

v řádu desítek kHz je možné místo 12 000 μF použít i podstatně nižší kapacitu. Vyšší hodnota však sníží zvlnění. Dalším důvodem pro tuto volbu byla aktuální dobrá dostupnost. Toto zapojení má společnou zem vstupu a výstupu. (Ve schématu značená jako 0V.) Regulace je zajištěna výkonovými NPN tranzistory TIP35C. Dle požadavků na maximální velikost výstupního proudu a zejména s ohledem na maximální projektovaný ztrátový výkon lineárního modulu je možno osadit jeden až čtyři tyto tranzistory. Aktuálně jsou zde osazeny dva, což v kombinaci s předregulací a aktivním chlazením se v praxi ukázalo jako dostatečné pro proud do 10 A. Emitory těchto tranzistorů jsou spojeny přes výkonové rezistory s odporem 0,15 Ω . V kombinaci s tranzistorem Q5, jehož báze je na ně přes ochranné rezistory R5 – R8 připojena, tvoří zápornou proudovou zpětnou vazbu pro ochranu výkonového stupně. (Označení součástek vychází ze schématu v příloze č. 7) Jejich druhou funkcí v obvodu je kompenzace rozdílu v zesílení tranzistorů. Ty by měly kvůli paralelnímu zapojení být vybírány co nejpodobnější, avšak nikdy nelze vybrat naprosto stejné. Protože zesílení výkonových NPN tranzistorů je relativně malé (typicky v řádu desítek), není možné je budít přímo pomocí použitých operačních zesilovačů. Společně s tranzistorem Q6 (darlingtonův tranzistor) a tranzistorem Q7 tvoří čtyřstupňové darlingtonovo zapojení. Báze tranzistoru Q7 je přes zvedací rezistor R40 přivedena na +12 V z pomocného zdroje. Při odpojení zpětné vazby dojde k plnému otevření tranzistorů. Regulace napětí je zajištěna operačním zesilovačem IC3, který přes diodu D11 stahuje napětí na bázi tranzistoru Q7 vůči -12 V. Na jeho neinvertující vstup je přivedeno napětí z děliče z výstupního napětí. Oproti zemi operačních zesilovačů je toto napětí záporné. Konec výstupního děliče je proto připojen na DA převodník a díky tomu je napětí na děliči posunuto nad zem operačního zesilovače. Změnou napětí na DA převodníku tedy ovlivňujeme zpětnou vazbu, a tak řídíme výstupní napětí. Invertující vstup je zapojen přes dělič na zem. Na schématu vedou oba jeho konce na výstup, což je zem operačních zesilovačů. Toto zapojení slouží zejména pro snížení vnitřního odporu zdroje, jelikož jeden konec děliče bude připojen blízko operačního zesilovače a druhý co nejblíže k výstupu. Tímto dojde ke kompenzaci úbytku napětí na výkonovém vedení při velkém výstupním proudu. Protože operační zesilovač reaguje na změny mnohem rychleji než výkonové tranzistory, je jeho rychlost snížena kondenzátorem C25 ve zpětné vazbě. Rychlost je dále snížena i kondenzátorem C26 mezi vstupy operačního zesilovače. Kondenzátory C27 a C28 zvyšují rychlost reakce na prudké změny napětí. Kapacity všech výše uvedených kondenzátorů se musí doladit pro konkrétní výrobek. Jsou závislé na výrobních odchylkách součástek i na provedení DPS. Diody D4, D5, D9 a D10 mají funkci ochrany vstupů zesilovače před vyšším napětím.

Regulace proudového omezení je realizována pomocí operačních zesilovačů IC2 a IC3. IC2 je zapojen jako invertující zesilovač, snímající napětí na $20\text{m}\Omega$ proudovém bočníku, tvořeným dvěma 3W rezistory R9 a R10. Ty jsou zapojeny paralelně, aby v případě přerušení jednoho z nich nedošlo ke zničení zesilovače. Signál z IC2 je přiveden na invertující vstup zesilovače IC3, který jej porovnává s napětím z druhého DA převodníku. Jeho reakce musí být opět zpomalena. Pro tento účel slouží kondenzátory C32 a C33. Proudové omezení je na rozkmitání náchylnější než regulace napětí. Při nedokonalém nastavení dochází ke kmitání na frekvenci zhruba 1MHz . (V případě tohoto výrobku docházelo ke kmitání na frekvenci $1,016\text{MHz}$) Při přechodu do režimu zdroje proudu klesne napětí na výstupu zesilovače IC6 pod jeho zem, čímž dojde k otevření PNP tranzistoru Q10. Jeho sepnutím je rozsvícena LED dioda LED2 pro vizuální signalizaci a je sepnut výstup optočlenu OK3. Pomocí sepnutí optočlenu OK2 může být externí řídicí elektronikou vypnut výstup zdroje.

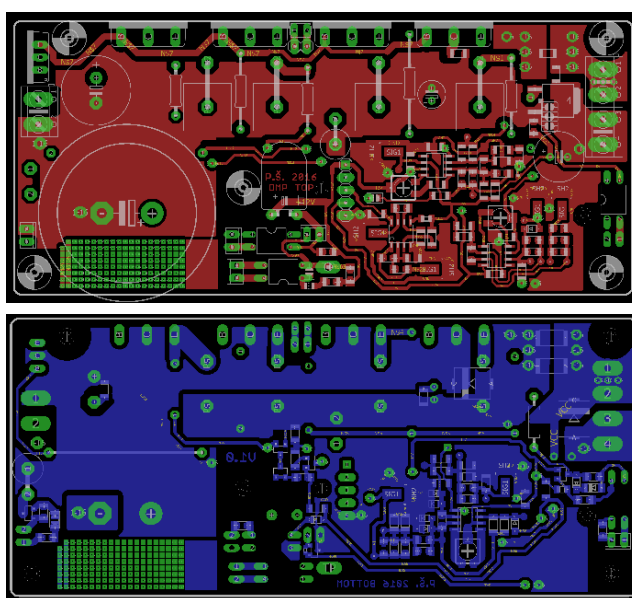
Na výstup zesilovače IC2 se pomocí stíněného vodiče připojuje AD převodník mikroprocesoru na řídicí desce. Pro zvýšení přesnosti měření malých proudů je v návrhu počítáno se zesílením tohoto signálu pomocí dvojitého operačního zesilovače IC1. V této variantě však není osazen, jelikož vybraný mikroprocesor již má integrovaný zesilovač s programovatelným zesílením.

Na desce je dále umístěn N-channel MOSFET Q11 pro rychlé odpojení výstupu. Je ovládán pomocí optočlenu OK1. Aktuálně se pro odpojení používá pouze nastavení výstupního napětí na nulu.

Modul je realizován na oboustranné DPS. Výkonové tranzistory jsou umístěné podél okraje delší strany tak, aby je bylo možno snadno připevnit k chladiči.



Obrázek 13 Modul lineární stabilizace řízený potenciometrem a připevněný na zkušební chladiči



Obrázek 12 Návrh DPS pro modul lineární stabilizace

2.1.1 Procesorová deska

Procesorová deska je článek spojující ovládací panel s ostatní elektronikou. Jejím jádrem je STM32F737V8T6, což je 32bitový mikroprocesor ARM Cortex-M4 pracující na frekvenci až 72 MHz. Z nabízených pouzder je pro ruční pájení nejvhodnější LPFQ100, avšak i v tomto případě jsou vzhledem k maximální šířce vodivých cest 0,254 mm kladeny velké nároky na výrobu desky i na pájení.

V této práci jsem chtěl vyzkoušet řízení zdroje jen pomocí integrovaných AD a DA převodníků. To je jeden z hlavních důvodů pro výběr mikroprocesoru ARM, protože zde jsou relativně kvalitní převodníky běžnější než u jiných typů procesorů. Konkrétní procesor byl vybrán zejména právě pro nadstandardní analogovou výbavu. Obsahuje jeden 12bitový AD převodník vzorkující rychlostí až 1 MS/s, tři pomalejší, ale přesnější 16bitové sigma-delta AD převodníky se zesilovačem na vstupu s programovatelným zesílením a možností nastavení jako diferenciálního zesilovače či neinvertujícího zesilovače s jedním vstupem. Tyto sigma-delta převodníky také disponují funkcí pro automatickou kalibraci ofsetu vstupního zesilovače. Obsahuje i dva 12bitové DA převodníky. Jeden z převodníků má dva kanály a tím získáváme celkem tři výstupy. Na každém z výstupů může být pro snížení výstupní impedance aktivován buffer. Mikroprocesor obsahuje i komparátory, ty ale nevyužívám. Analogová část má oddělené napájecí piny. Při nižších nárocích na přesnost mohou být spojeny i s napájením digitální části, já je však zapojil na samostatný stabilizátor. Ještě podstatnějšího zvýšení přesnosti dosáhneme použitím externí napěťové reference místo interní. Deska umožňuje variantní osazení dvou typů referencí, a to konkrétně REF5025AID nebo MAX6071BAUT25. Parametry obou jsou srovnatelné, zvolil jsem REF5025AID. (Schéma je v příloze č. 8)

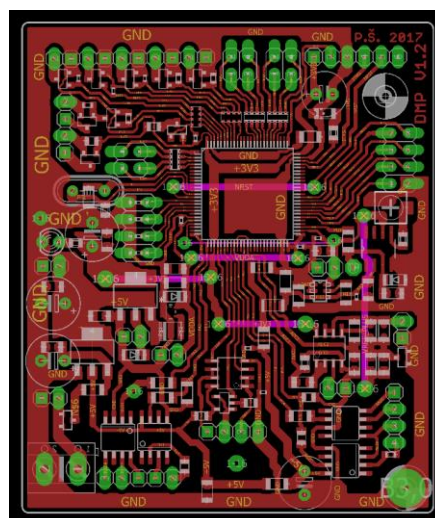
Bohužel ofset interních zesilovačů DA převodníků byl natolik značný (okolo 50 mV), že bylo nutné je vypnout a použít externí umístěné na procesorové desce. Při propojení s modulem lineární stabilizace původní ofset zapříčinil nemožnost snížit proudové omezení pod zhruba 0,25 A, což je pro laboratorní zdroj nepřijatelné. Úpravou zapojení bylo docíleno snížení této hodnoty až prakticky k nule.

Přesnost AD převodníků je mimo jiné závislá na impedanci zdroje měřeného napětí. Z tohoto důvodu je zde provedeno impedanční oddělení operačními zesilovači IC8A a IC8B, na jejichž výstupy jsou přes ochranné rezistory připojeny proti zemi kondenzátory o kapacitě 1 nF pro další snížení impedance. Na desce jsou dále vyvedeny piny mikroprocesoru na pinové lišty, aby bylo možné připojit další periferie umístěné mimo desku. Pro tento účel je zde dále pět N-Channel MOSFET tranzistorů a dva P-Channel tranzistory. Dvě ze tří rozhraní UART jsou galvanicky oddělena pomocí optoinvertorů SFH6721. Protože potřebují na části

s invertorem napájecí napětí minimálně 4,5 V, musí být k procesoru připojeny přes dělič napětí, aby nedošlo k jeho poškození vlivem rozdílných napěťových úrovní. UART1 slouží pro komunikaci s počítačem. Pro UART2 není galvanické oddělení zatím osazeno, protože je navrženo zejména z důvodu propojení s řídicí elektronikou čelního panelu, která by byla použita v případě dvoukanálového zdroje.



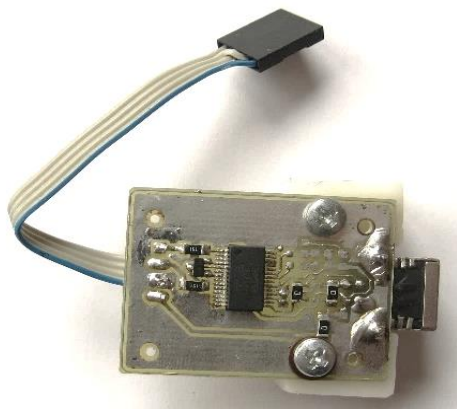
Obrázek 15 Řídicí deska propojená s výkonovou částí



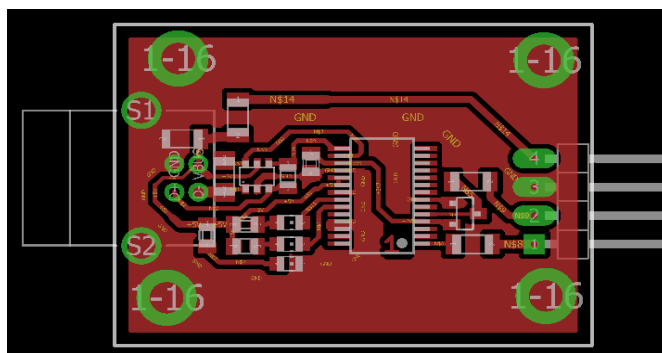
Obrázek 14 Návrh DPS pro řídicí desku

1.7.10 Převodník USB / UART

Pro zjednodušení softwaru a galvanického oddělení jsem se rozhodl pro připojení k počítači nevyužit USB portu integrovaného v mikroprocesoru. Navrhl jsem převodník z USB na UART s integrovaným obvodem FT232RL. Modul je připevněn k zadnímu panelu zdroje a je od něj odizolován pomocí plastových podložek. K procesorové desce je připojen pomocí čtyřžilového plochého vodiče. Pro propojení s počítačem slouží USB konektor typu B. Maximální přenosová rychlost jsou 3 MBd.



Obrázek 17 Převodník USB/UART



Obrázek 16 Návrh DPS pro převodník USB/UART

1.7.11 Čelní panel

Na čelním panelu jsou připevněny moduly s LED displeji, u kterých se nacházejí rotační enkodéry pro nastavení výstupního napětí a proudu. Vedle displeje zobrazujícího hodnotu proudu se také nachází LED dioda indikující režim konstantního proudu. Pod ním je tlačítko pro připojení nebo odpojení regulovatelného výstupu, jehož svorky jsou umístěny pod tímto tlačítkem. Vpravo od enkodéru pro nastavení proudu je černé tlačítko sloužící pro volbu režimu zdroje proudu nebo funkce elektronické pojistky. Dominantním prvkem je LCD displej v pravé horní části čelního panelu. Pod ním se nachází výstup nabíječky Li-Pol akumulátorů, která umožňuje nastavení nabíjecího proudu pomocí knoflíku vedle zdírek.

Dále jsou zde svorky s pevnými napětími +3,3 V, +5 V, +12 V a barevně odlišené svorky se zápornými napětími -5 V a -12 V. Přítomnost těchto napětí je u každého z nich indikována zelenou LED diodou. Všechna pevná napětí a nabíječku lze připojit nebo odpojit červeným tlačítkem nad zdírkami se záporným napětím. U pravého okraje je zdírka spojená s kostrou přístroje.



Obrázek 18 Přední strana čelního panelu



Obrázek 19 Vnitřní strana čelního panelu

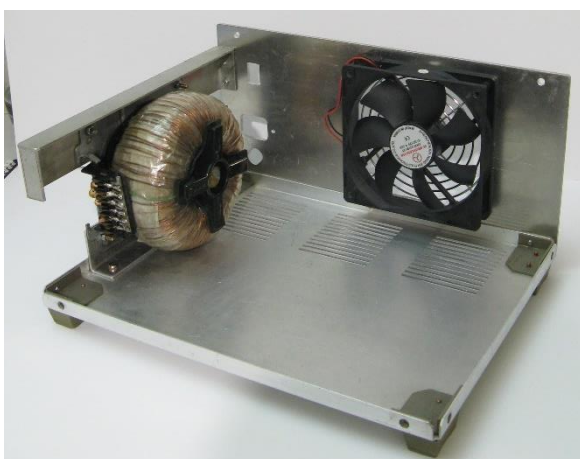
1.7.12 Nabíjecí obvod pro jednočlánkové Li-Pol akumulátory

V dnešní době se při stavbě elektrických zařízení stále častěji setkáváme s Li-Pol akumulátory. Jejich nabíjení musí být prováděno správně dle charakteristických vlastností a doporučení výrobce. Oproti jiným typům akumulátorů jsou na špatný průběh nabíjení citlivější, což se projevuje zkracováním životnosti a v horším případě může dojít i k výbuchu. Pro eliminaci rizika chyby programu jsem se rozhodl nabíjení řešit specializovaným integrovaným obvodem MCP73834-FCI/UN s vestavěnými ochranami. Obvod kromě omezení proudu a napětí také omezuje maximální čas nabíjení na zhruba šest hodin. Pokud se i po uplynutí této doby akumulátor stále nabíjí, je z bezpečnostních důvodů odpojen. Na modulu jsou i tři indikační LED diody. Modrá LED indikuje přítomnost napájecího napětí, červená nabíjení a blikající zelená plné nabití. Na čelní panel je světlo z LED vedeno jedním společným světlovodem. Na modulu je i montážní potenciometr pro nastavení nabíjecího proudu. Vzhledem k nutnosti dobrého odvodu tepla od integrovaného obvodu je prakticky nezbytné

použít minimálně dvouvrstvou DPS s dostatečným množstvím prokovů. Z tohoto důvodu byla vyrobena v Laboratoři pro vývoj a výrobu desek plošných spojů na Technické univerzitě v Liberci.

1.7.13 Kompletace výrobku

Výrobek je umístěn do hliníkového krytu od nepoužívaného zdroje. Čelní a zadní panel jsem musel vyrobít nový, aby rozmístění děr odpovídalo ovládacím prvkům. Vrchní kryt a zadní panel jsou nalakovány černým lakem. Přední panel je polepen lesklou černou samolepicí tapetou. Bylo také nutné zesílit vnitřní rám, aby k němu mohl být připevněn těžký toroidní transformátor. Předregulace a zdroje pevných napětí jsou v přední části nad sebou. Kolmo k nim u pravého boku je modul lineární stabilizace. Všechny chladiče musí být od stěn izolovány plastovými distančními prvky. Cirkulaci vzduchu zajišťuje ventilátor na zadním panelu. Jeho umístění jsem navrhl tak, aby ochlazoval moduly s nejvyšším ztrátovým teplem, ale i pomocný zdroj. Pro propojení řídicích signálů a napájení modulů s malou spotřebou jsou použity slabé vodiče zakončené dutinkami. Pro spojení výkonových prvků použijeme pro minimalizaci vnitřního odporu vodiče s průřezem minimálně $1,5 \text{ mm}^2$. Na propojení čelního panelu se zdroji pevných napětí je vhodný průřez od $0,75 \text{ mm}^2$. Závěrečnou fází kompletace bylo označení čelního panelu. Jednotlivé popisky byly vytištěny na tiskárně štítků na 12 mm širokou samolepicí pásku. Při tisku jsou štítky automaticky zalaminovány ochrannou fólií, čímž je docíleno lesklého povrchu a relativně vysoké odolnosti proti mechanickému poškození potisku.



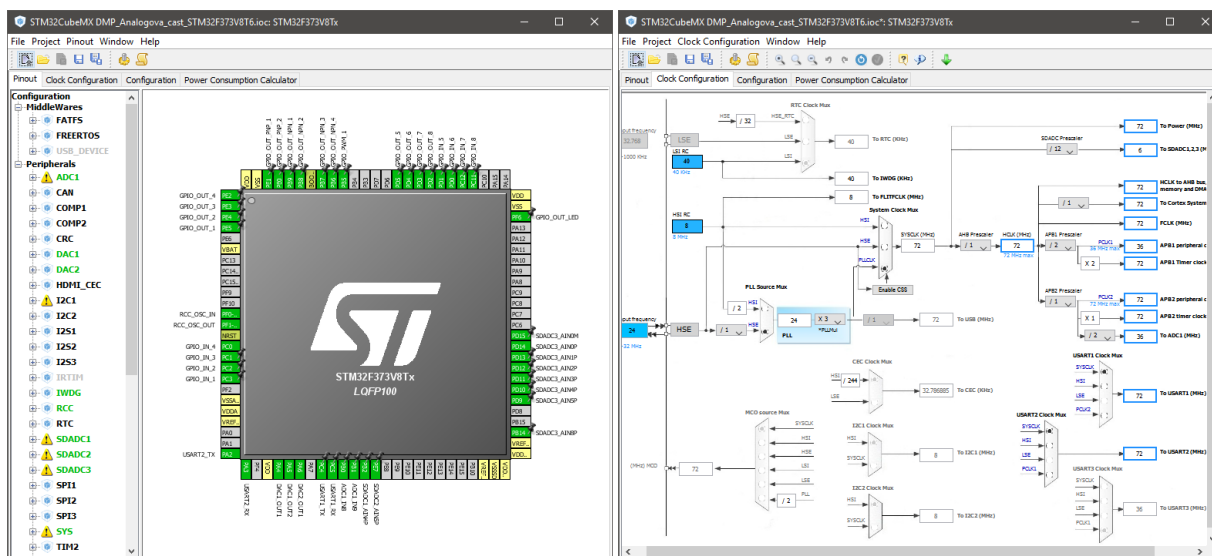
Obrázek 21 Část krytu s transformátorem a ventilátorem



Obrázek 20 Kryt s osazenou elektronikou a ventilátorem

1.8 Software pro řízení zdroje

Software pro mikroprocesor řady STM32F373 jsem tvořil v prostředích Atollic TrueSTUDIO for ARM 7.0 a počáteční konfigurace včetně vrstvy HAL (verze 1.4.0) v nástroji STM32CubeMX 4.19.0. Díky použití vygenerované vrstvy HAL nemusíme při programování k hardwaru přistupovat pomocí nastavování registrů, ale můžeme využít její podprogramy. Programování je abstraktnější, jednodušší, ale výsledný kód může být méně optimalizovaný. Části generovaného kódu jsou v Assembleru, ale jeho většina a mnou psaný kód je v jazyce C.



Obrázek 22 Program CubeMX sloužící pro konfiguraci mikroprocesoru

Na začátku souboru main.c jsou vloženy knihovny main.h a stm32f3xx_hal.h. Dále jsou zde vytvořeny soukromé proměnné pro práci s hardwarem, prototypy funkcí, tabulky pro přepočítání dat zobrazovaných na LED displejích, definovány konstanty a uživatelské proměnné.

Ve funkci main () jako první po startu proběhne inicializace vrstvy HAL pomocí volání HAL_Init () a konfigurace hodinových signálů pomocí SystemClock_Config (). Dále jsou inicializovány GPIO porty a DA převodník DAC1. Aby se minimalizovala doba, kdy napětí na výstupu zdroje může být nekontrolované, je ještě před inicializací dalších periférií spuštěn DA převod a následně je výstupní hodnota DA převodníku nastavena na 0. Tímto způsobem je nyní nakonfigurován i druhý převodník. Následně se nakonfigurují sigma-delta AD převodníky, USART1, USART2 a AD převodník ADC1. Procesor vstoupí do čekací smyčky, čímž se zajistí nabití filtračních kondenzátorů. Během tohoto čekání proběhne i kalibrace všech sigma-delta AD převodníků a je sepnut výstup se sirénou pro akustickou indikaci zapnutí. Po sepnutí relé soft-start obvodu se na LCD displej zapíše šablona pro zobrazování dat. Jakmile se načtou stavy pinů připojených na rotační enkodéry, spustí se hlavní smyčka. Při každém průběhu se kontroluje, zda je nastavené napětí a proud v definovaných mezích. Pokud je požadovaná

hodnota mimo rozsah, je změněna na nejbližší povolenou hodnotu a obsluha je akusticky upozorněna. Následně jsou nastavené hodnoty přepočítány na data pro DA převodníky. V případě napětí se jedná o lineární funkci, ale u regulace proudu nebylo možné přepočet převést na lineární funkci s dostatečnou přesností. Kromě těchto rovnic se započítává i zpětná vazba, vypočtená na základě hodnot naměřených AD převodníkem. Proto je použito osm přepočtů s různými koeficienty na menších částech rozsahu. V programu při naměření vyššího výstupního proudu, než jsou 2 A, nebo při připojení výstupů s pevným napětím dojde k sepnutí ventilátoru. Do této doby byl jeho výkon omezen předřadným rezistorem, nyní se roztočí na maximální otáčky.

Z hlediska návrhu algoritmu běží paralelně s touto smyčkou ještě dalších pět. Jedna z nich je realizována pomocí přerušení systémovým časovačem SysTick, další jsou implementovány softwarově tak, že jejich kód je spuštěn jednou za daný počet průběhů hlavní smyčky.

Přerušení systémovým časovačem má na starosti nastavování hodnot DA převodníku podle dat vypočtených v hlavní smyčce. V případě, že je aktivován režim elektronické pojistky, je kontrolováno i překročení nastaveného proudu. Umístněním tohoto kódu do přerušení dosáhneme zrychlení reakce. Při programování funkce elektronické pojistky (i při jejím hardwarovém řešení) je nutno zvolit kompromis mezi ideální pojistkou, která sepne okamžitě po překročení nastaveného proudu a praktickým využitím, kdy k odpojení výstupů nedojde vlivem nabíjení filtračních kondenzátorů.

Protože LED displeje jsou zapojeny multiplexovaně, je nutné pravidelně přepínat společné elektrody. Pokud by toto bylo řešeno v hlavní smyčce, jejíž rychlost nemusí být konstantní, byl by viditelný rozdíl mezi jasem dvojic displejů. Proto je jejich obsluha umístěna v přerušení. Pomocí konstantních polí se jednotlivé číslice přepočítají na data pro displeje. Aby docházelo k úplnému zhasnutí neaktivních segmentů, je nutné před přepnutím společných elektrod displej zhasnout a nová data nahrát až po přepnutí.

Další ze smyček má na starost obsluhu rotačních enkodérů, tlačítek, bzučáku a kontroly režimu proudové pojistky. Svoji samostatnou smyčku mají i měření proudu a napětí. Aby nedošlo k rozkmitání zpětné vazby, musí být v naměřených hodnotách eliminováno zvlnění. Toho jsem dosáhl průměrováním několika set naměřených hodnot. Poslední smyčka v pravidelných intervalech přepisuje neměnný text na LCD, aby v případě chyby zápisu hodnot nebyly zobrazeny náhodné znaky po delší dobu.

Komunikace s počítačem probíhá obousměrně. Data se přenášejí v rámcích s pevnou délkou 8 B. Poslední dva znaky jsou konec řádku (CR+LF) a první znak identifikuje typ přenášených dat. Celkem jsou implementovány čtyři identifikátory:

- U – Používá se pro napětí. Mikroprocesor takto označuje hodnotu aktuálního výstupního proudu. Počítač používá symbol U pro nastavení napětí. Data jsou kódována jako desítkové číslo v ASCII kódu. Hodnota je v milivoltech.
- I – Používá se pro proud. Data jsou kódována stejně, jako v předchozím případě. Jednotkou jsou miliampéry.
- S – Používá se pro přenos řídicích instrukcí. Bezprostředně za ním následuje instrukce C (režim konstantního proudu) nebo F (režim elektronické pojistky), na dalším místě 0 nebo 1 pro odpojení / připojení hlavního výstupu a následně 0 nebo 1 pro odpojení / připojení pomocných výstupů. Na předposledním místě může být instrukce L, která odpojí výstupy a zablokuje ovládání zdroje. Poslední pozice je nevyužita, ale musí zde být uveden libovolný znak. Tento identifikátor odesílá pouze počítač.
- D – Slouží pro potvrzení přijetí dat mikroprocesorem. Indikuje úspěšné dekódování identifikátoru. Protože se komunikuje pomocí rámců s fixní délkou, je pro lepší čitelnost v konzoli odesílán jako text „DataOK“. Tento identifikátor odesílá pouze mikroprocesor.

U rámců s identifikátorem S dochází k provedení akce jen pokud je detekován znak označující danou instrukci. V případě, že se zde nachází jiná hodnota, je ignorována. To nám umožňuje odesláním tohoto typu rámce měnit pouze část nebo všechny funkce. U identifikátoru D se kontroluje pouze první znak rámce, ve zbytku může být libovolný text.

1.9 Technické parametry výrobku

Rozsah regulace napětí	0 – 25 V
Rozsah regulace proudu	0 – 5 A
Režimy omezení proudu	Zdroj konstantního proudu nebo odpojení výstupu
Výstupy s pevným napětím	-12 V / 1 A -5 V / 1 A +3,3 V / 1 A* +5 V / 1 A +5 V / 2 A* (nejištěno) +12 V / 1 A
Odpojení výstupů	Samostatná tlačítka pro regulovaný výstup a fixní výstupy
Nabíjecí proud jednočlánkových Li-Pol akumulátorů	Nastavitelný do 1 A
Omezení nabíjecího času Li-Pol / Li-Ion akumulátorů	6 hodin
Indikace nabíjení / plného nabití	Červená kontrolka / blikající zelená kontrola
Zobrazování nastaveného napětí a proudu	LCD, při vypnutém výstupu i LED displeje
Zobrazení hodnot	1× Alfnumerický LCD displej 40×2 znaků 1× červený čtyřmístný sedmissegmentový LED displej 1× modrý čtyřmístný sedmissegmentový LED displej 8 indikačních LED
Výška znaků LED displejů	14,2 mm
Informace zobrazované na LCD	Nastavené napětí, nastavený proud, aktivní typ proudového omezení, stav regulovaného výstupu, stav pevných výstupů, výstupní výkon
Akustická signalizace	Zapnutí Připojení / odpojení výstupů Nastavení maximální hodnoty Vypnutí výstupu v režimu proudové pojistky
Komunikace s PC	USB 2.0, zpětně kompatibilní s USB 1.1 Galvanicky oddělené Virtuální sériový port <ul style="list-style-type: none"> • Rychlost 1,5 MBd • 8 bitů • 1 stop bit, žádná parita Konektor USB B na zadním panelu
Vstupní napětí	230 V AC / 50 Hz
Síťová pojistka	1,8 A / 250 V 6,3 × 32 mm
Rozměry (V×Š×H)	170×272×337 mm
Hmotnost	7,5 kg

* Součet výstupních proudů na větvích +3,3 V, +5 V / 2 A a nabíjení Li-Pol akumulátorů nesmí překročit 3 A.

3 Závěr

Vyrobený napájecí zdroj splňuje základní požadavky pro práci s elektronikou. Ačkoliv existují podobná komerční řešení, vlastní konstrukce nám umožňuje přizpůsobení parametrů a zejména způsobu ovládání a zobrazení našim individuálním požadavkům. Jedním z mých cílů bylo ověřit použitelnost integrovaných DA a AD převodníků pro řízení zdroje. Potvrdil se předpoklad, že jejich kvalita je nižší, ale pokud nevyžadujeme přesnost nastavení na tři desetinná místa, lze je zkalibrovat pro dosažení dostatečné přesnosti. V konečném výrobku je z tohoto důvodu omezeno maximální výstupní napětí na 25 V. Možnosti výkonové části jsou značně vyšší, omezení umožní lepší přesnost nastavení. Oproti původnímu předpokladu jsem zvýšil maximální výstupní proud na 5 A. Krátkodobě při zkouškách zdroj zvládá i 10 A, ale pro trvalý provoz s takovýmto zatížením by bylo nutné použít větší cívku v předregulaci. Ačkoliv se může jednat o subjektivní pocit, připadá mi způsob nastavování hodnot příjemnější než u části komerčních zdrojů. Dosáhl jsem toho automatickou změnou rychlosti ladění podle rychlosti otáčení. Tento algoritmus není u zdrojů zcela běžný. Obsluha díky tomu nemusí řešit volbu rozsahu. V průběhu konstrukce jsem se rozhodl zařízení rozšířit o možnost ovládat jej z počítače. V současné době je plně funkční ovládání textovými příkazy z konzole. Do budoucna plánuji naprogramovat aplikaci s grafickým uživatelským rozhraním.



Obrázek 23 Hotový výrobek

4 Seznam obrázků

Obrázek 1 Výstupní signály rotačních enkodérů v závislosti na směru otáčení	8
Obrázek 2 Obvod soft -start	12
Obrázek 3 Návrh DPS pro soft-start	12
Obrázek 4 Použitý síťový transformátor	13
Obrázek 5 Blokové schéma obvodu SG3524	15
Obrázek 6 Návrh DPS pro modul spínané předregulace	16
Obrázek 7 Modul spínané předregulace	16
Obrázek 8 Návrh DPS pro zdroje pevných napětí	17
Obrázek 9 Zdroje pevných napětí.....	17
Obrázek 10 Návrh DPS pro segmentové LED displeje	18
Obrázek 11 Návrh DPS pro expandér a zdroj záporného napětí pro LCD	19
Obrázek 12 Návrh DPS pro modul lineární stabilizace	21
Obrázek 13 Modul lineární stabilizace řízený potenciometrem a připevněný na zkušební chladiči.....	21
Obrázek 14 Návrh DPS pro řídicí desku	23
Obrázek 15 Řídicí deska propojená s výkonovou částí	23
Obrázek 16 Návrh DPS pro převodník USB/UART	23
Obrázek 17 Převodník USB/UART	23
Obrázek 18 Přední strana čelního panelu	24
Obrázek 19 Vnitřní strana čelního panelu.....	24
Obrázek 20 Kryt s osazenou elektronikou.....	25
Obrázek 21 Část krytu s transformátorem a ventilátorem	25
Obrázek 22 Program CubeMX sloužící pro konfiguraci mikroprocesoru	26
Obrázek 23 Hotový výrobek	30

5 Seznam použité literatury

FT232R USB UART IC Datasheet. *Ftdichip.com: Future Technology Devices International Ltd* [online]. United Kingdom.: Future Technology Devices International, 2015 [cit. 2016-03-28].

Dostupné z: http://www.ftdichip.com/Support/Documents/DataSheets/ICs/DS_FT232R.pdf

Použití rotačních enkodérů. *Kvalitne.cz: elektronika.kvalitne.cz* [online]. Česká republika, 2007 [cit. 2017-03-15]. Dostupné z:

<http://www.elektronika.kvalitne.cz/ATMEL/necoteorie/tutorial/RotaryEncoder/RotaryEncoder.html>

SGx524 Regulating Pulse-Width Modulators. *TI.com* [online]. Dallas (Texas): Texas Instruments, 2013, 2015 [cit. 2017-03-15].

Dostupné z: <http://www.ti.com/lit/ds/symlink/sg2524.pdf>

STM32F373. *STMicroelectronics* [online]. USA: STMicroelectronics, 2017 [cit. 2017-03-15]. Dostupné z:

<http://www.st.com/en/microcontrollers/stm32f373.html?querycriteria=productId=LN10>

OK2JNJ, František a Michal OK2HAZ. Laboratorní zdroj - 2. část: Volba součástek a návrh modulu zdroje. ZÁVODSKÝ, Ondrej a Ľuboš FABO. *Svetelektro* [online]. Česká republika: svetelektro, 2016 [cit. 2017-03-29]. Dostupné z: <https://svetelektro.com/clanky/laboratorni-zdroj-2-cast-794.html>

6 Seznam příloh

Příloha 1: Schéma a návrh obvodu soft-start

Příloha 2: Schéma a návrh spínané předregulace

Příloha 3: Schéma a návrh modulu pevných napětí

Příloha 4: Schéma a návrh pomocného zdroje

Příloha 5: Schéma a návrh modulu se sedmissegmentovými LED displeji

Příloha 6: Schéma a návrh expandéru pro LCD

Příloha 7: Schéma a návrh modulu lineární stabilizace

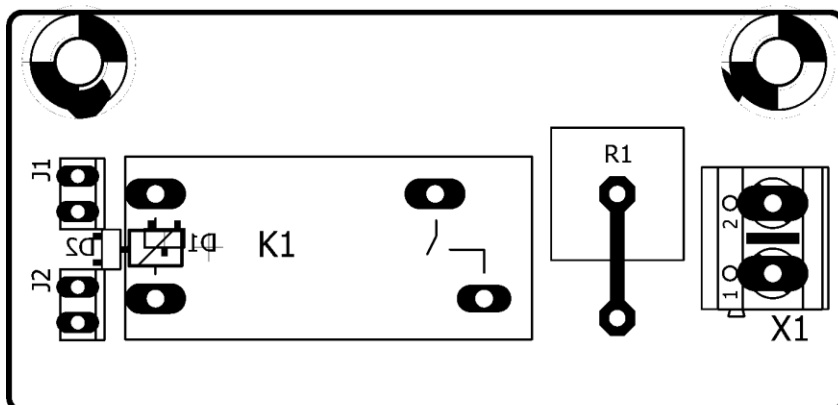
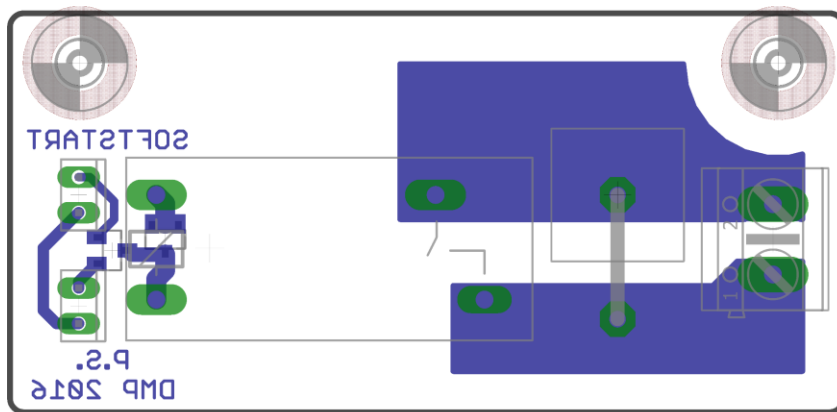
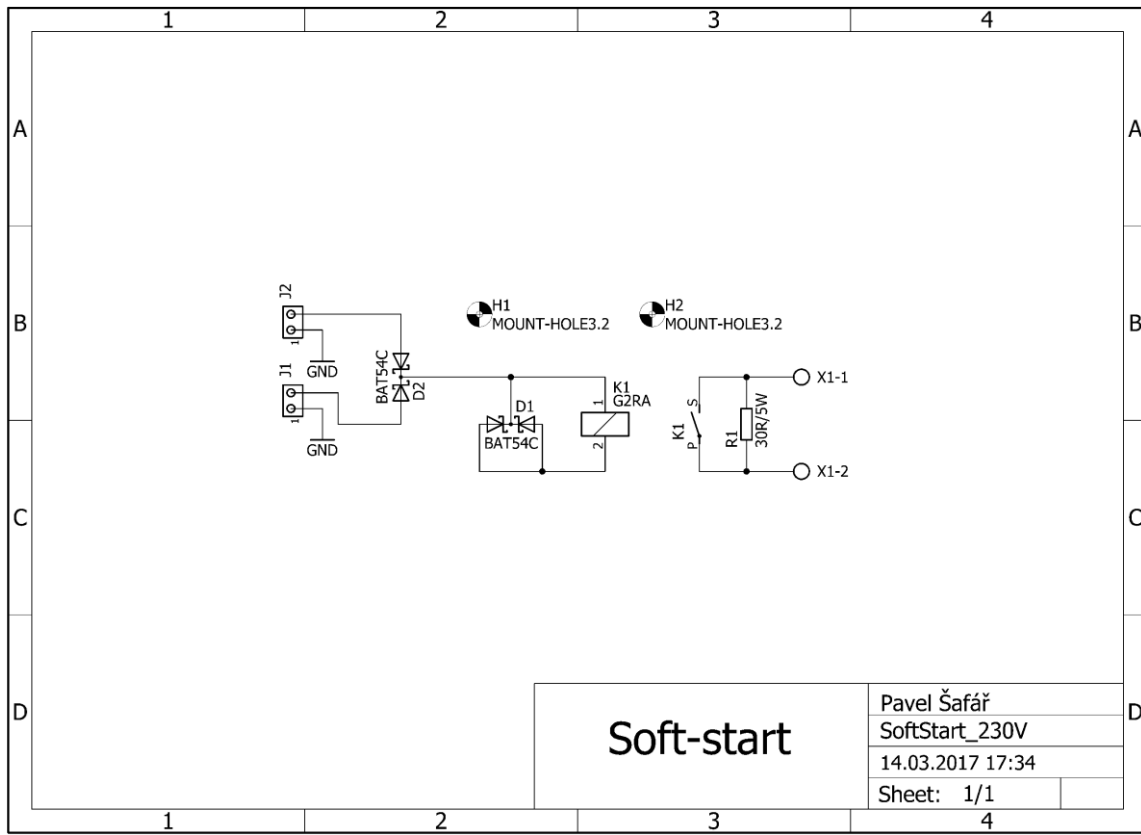
Příloha 8: Schéma a návrh procesorové desky

Příloha 9: Schéma a návrh modulu s převodníkem USB/UART

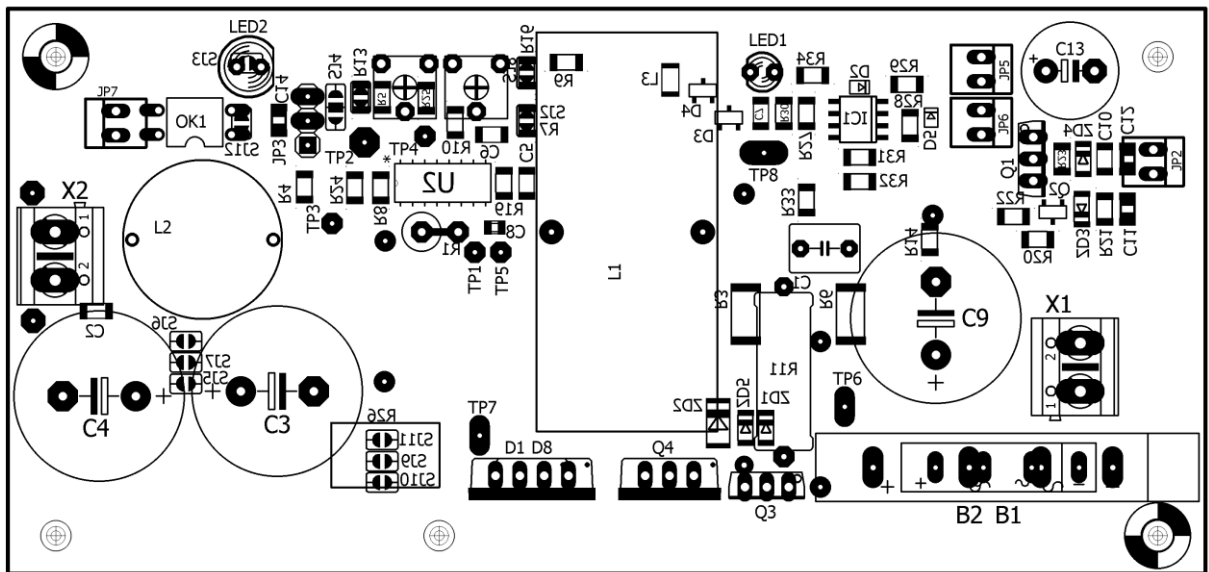
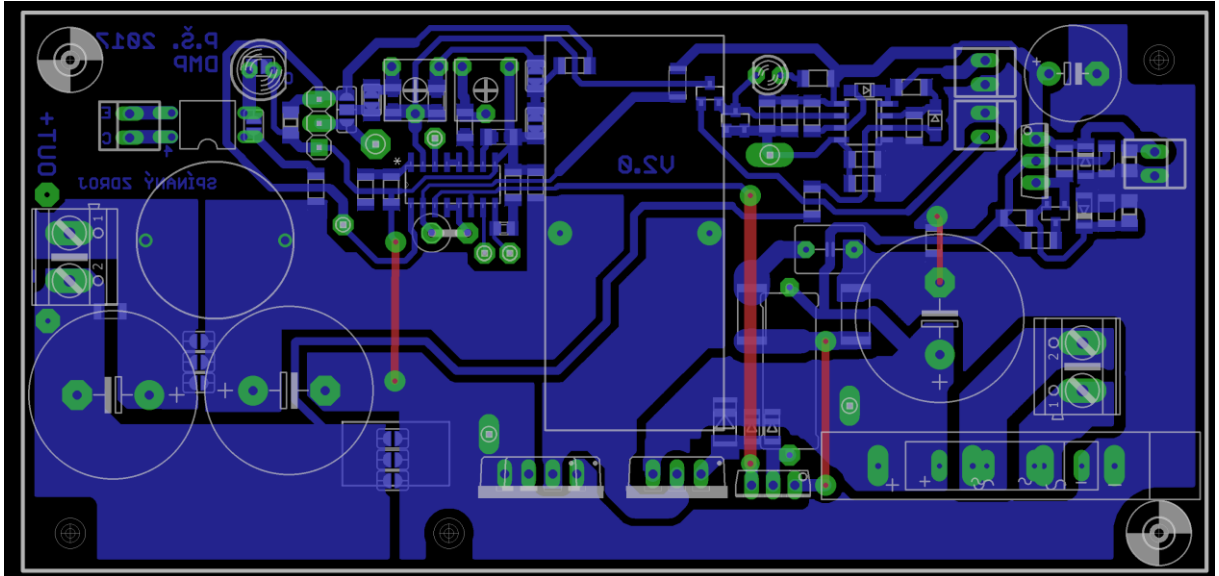
Příloha 10: Schéma a návrh nabíjecího obvodu pro jednočlánkové Li-Pol akumulátory

Příloha 11: Blokové schéma zdroje

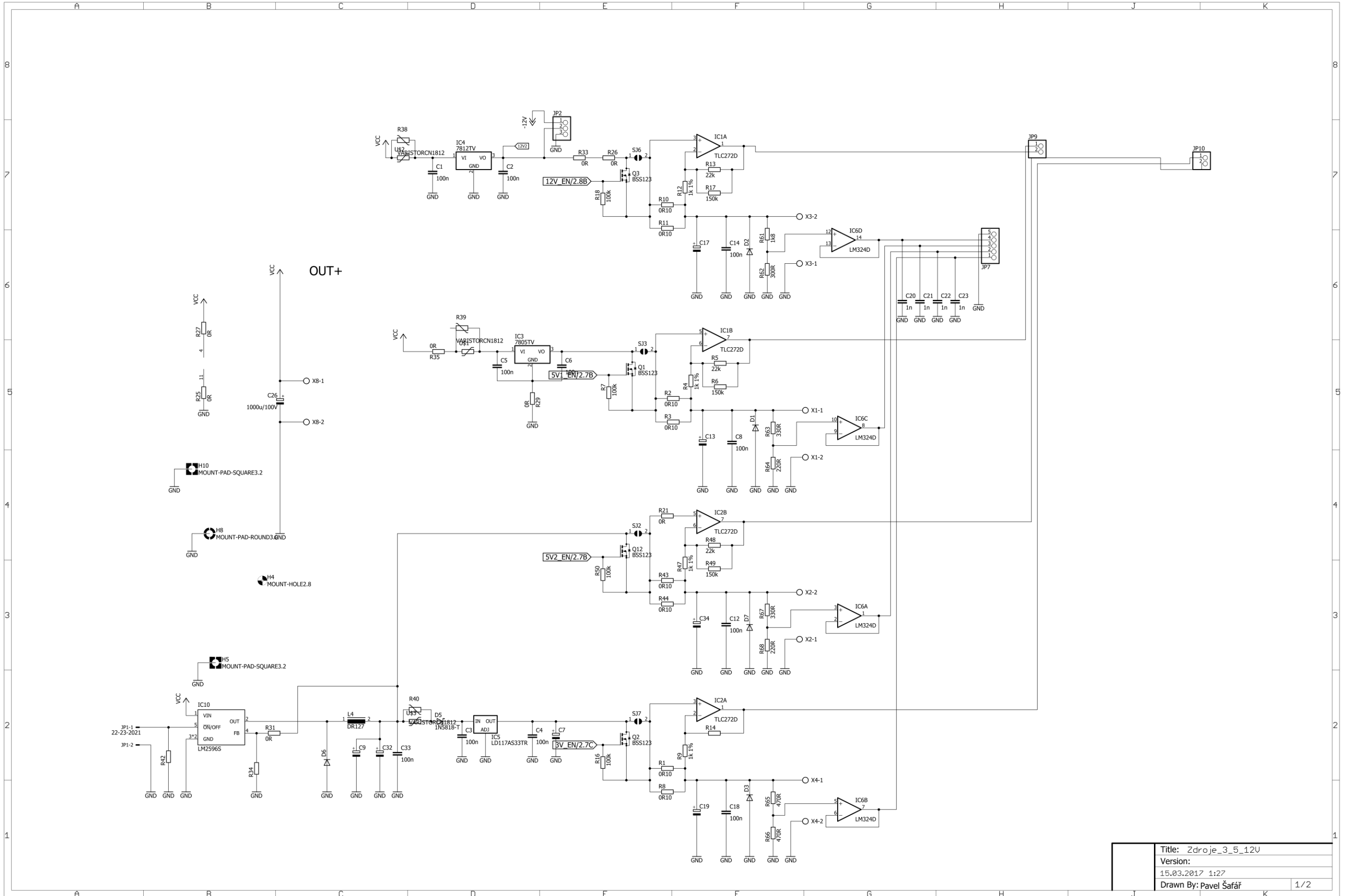
Příloha 1: Schéma a návrh obvodu soft-start



Příloha 2: Schéma a návrh spínané předregulace

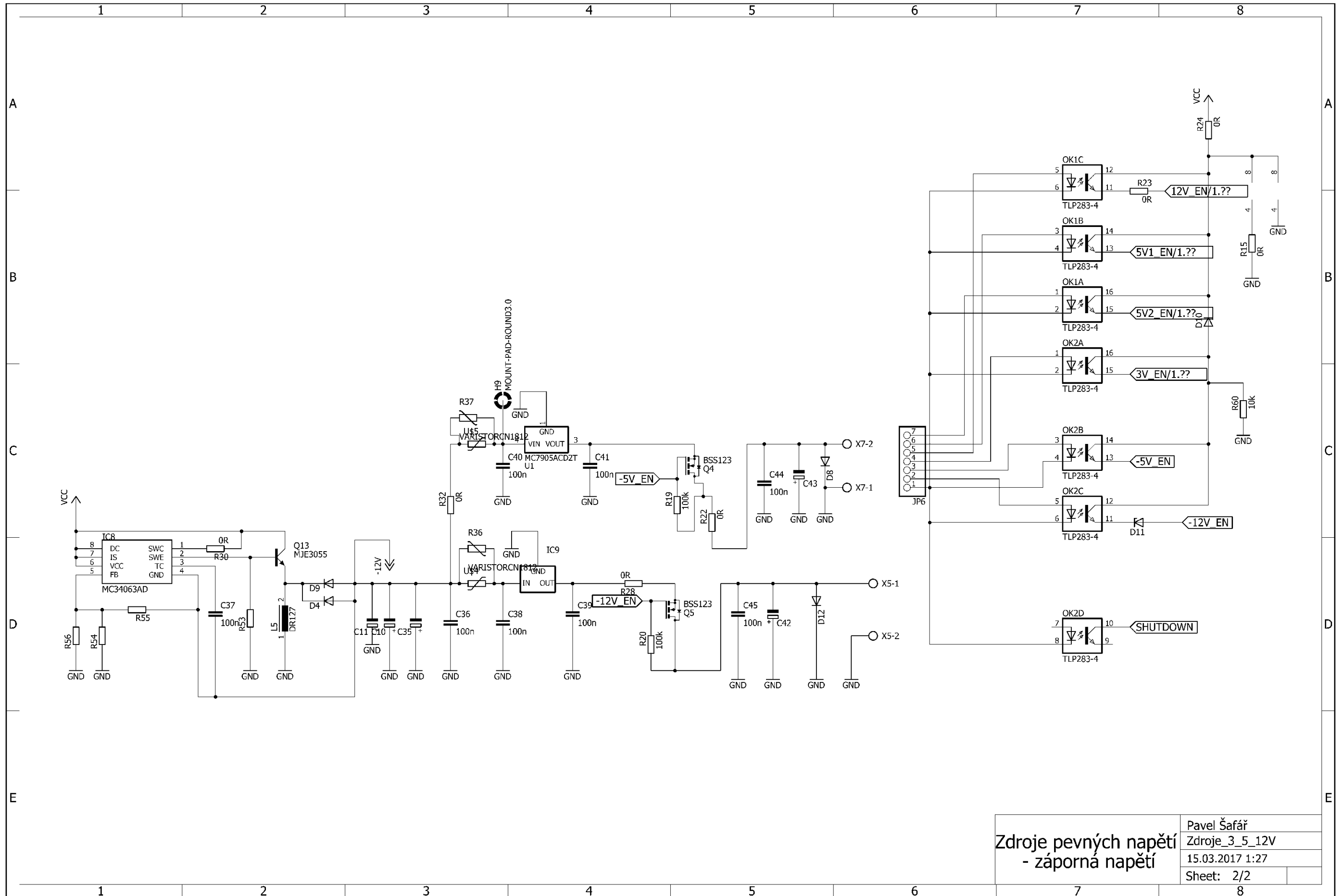


Příloha 3: Schéma a návrh modulu pevných napětí



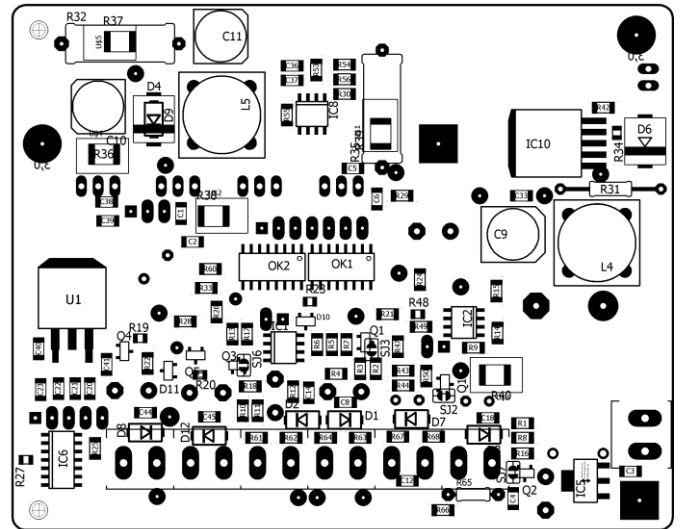
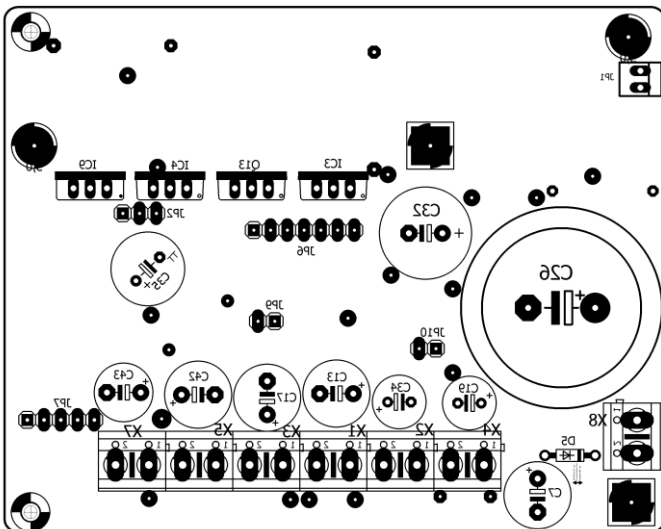
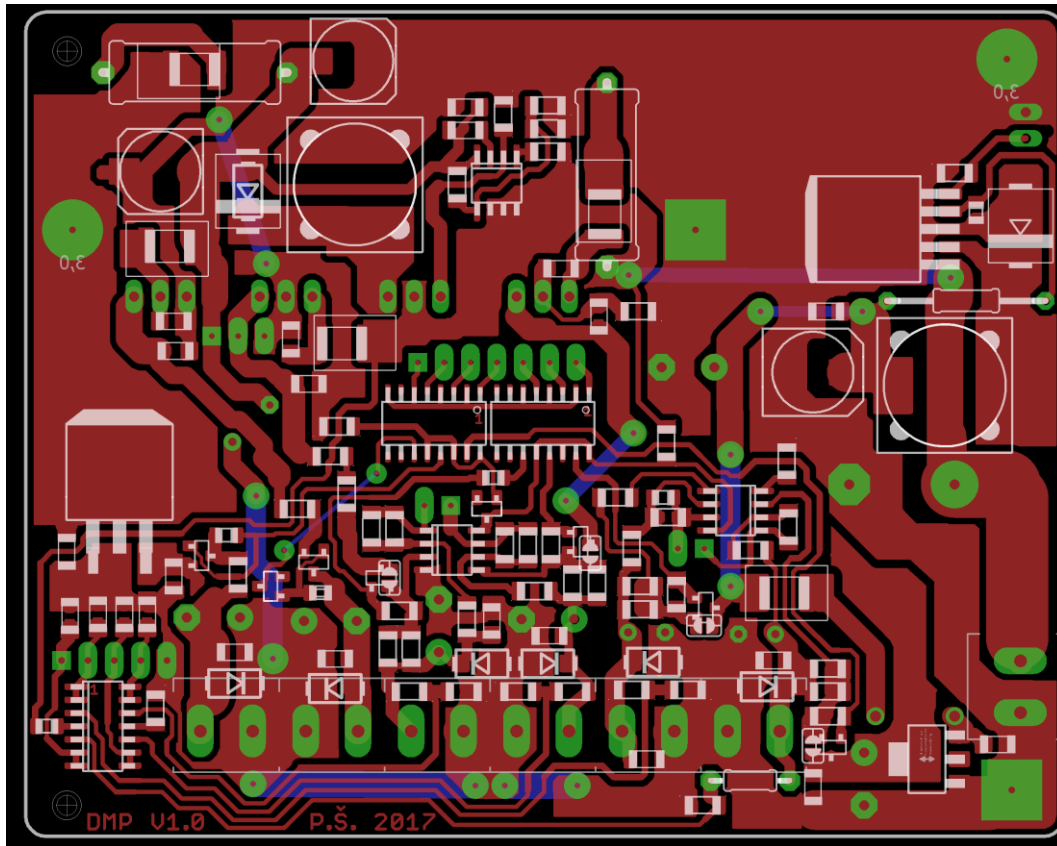
Title: Zdroje_3_5_12U
Version: 15.03.2017 1:27
Drawn By: Pavel Šafář
1/2

Příloha 3: Schéma a návrh modulu pevných napětí

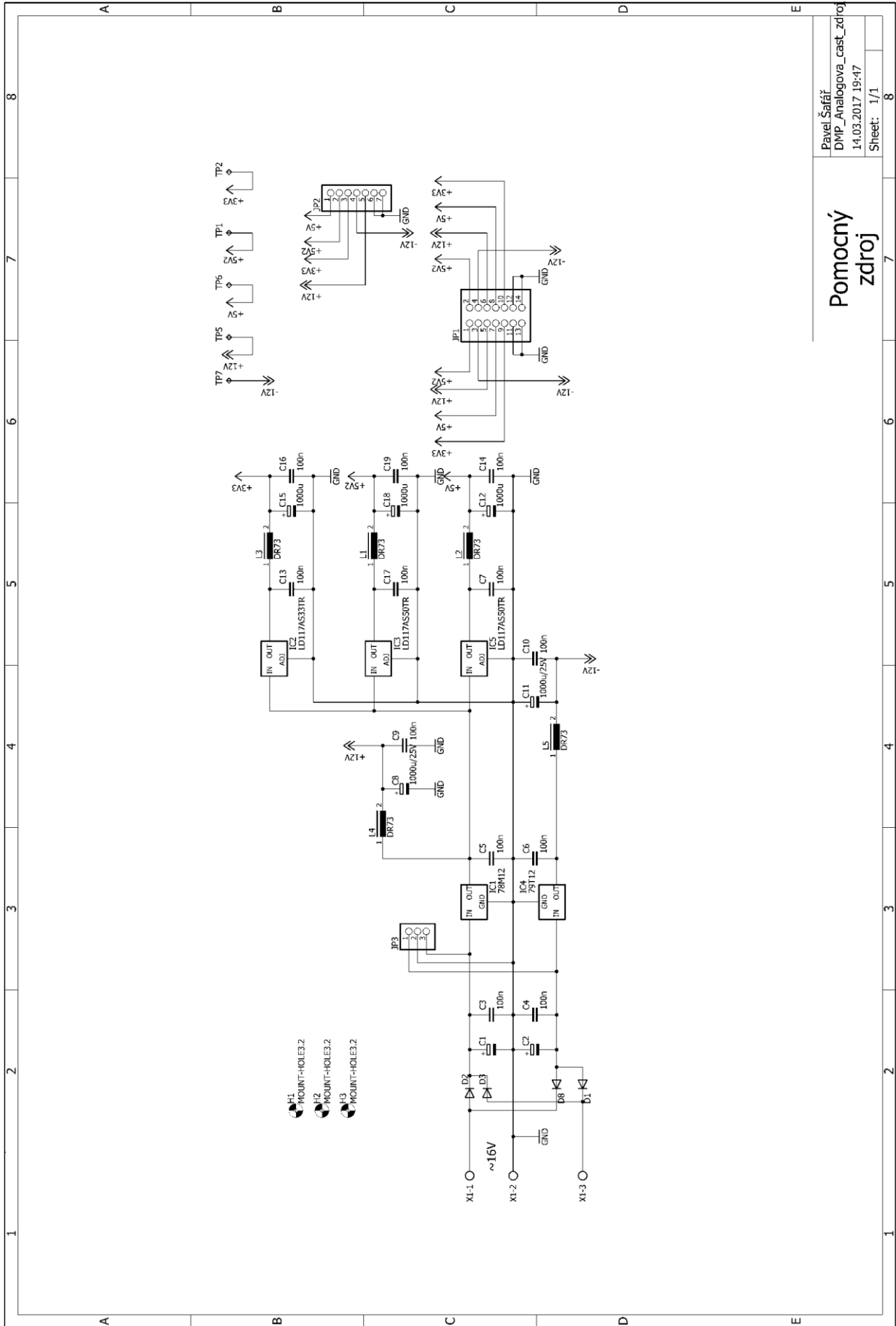


Zdroje pevných napětí - záporná napětí	Pavel Šafář
	Zdroje_3_5_12V
	15.03.2017 1:27
Sheet: 2/2	

Příloha 3: Schéma a návrh modulu pevných napětí



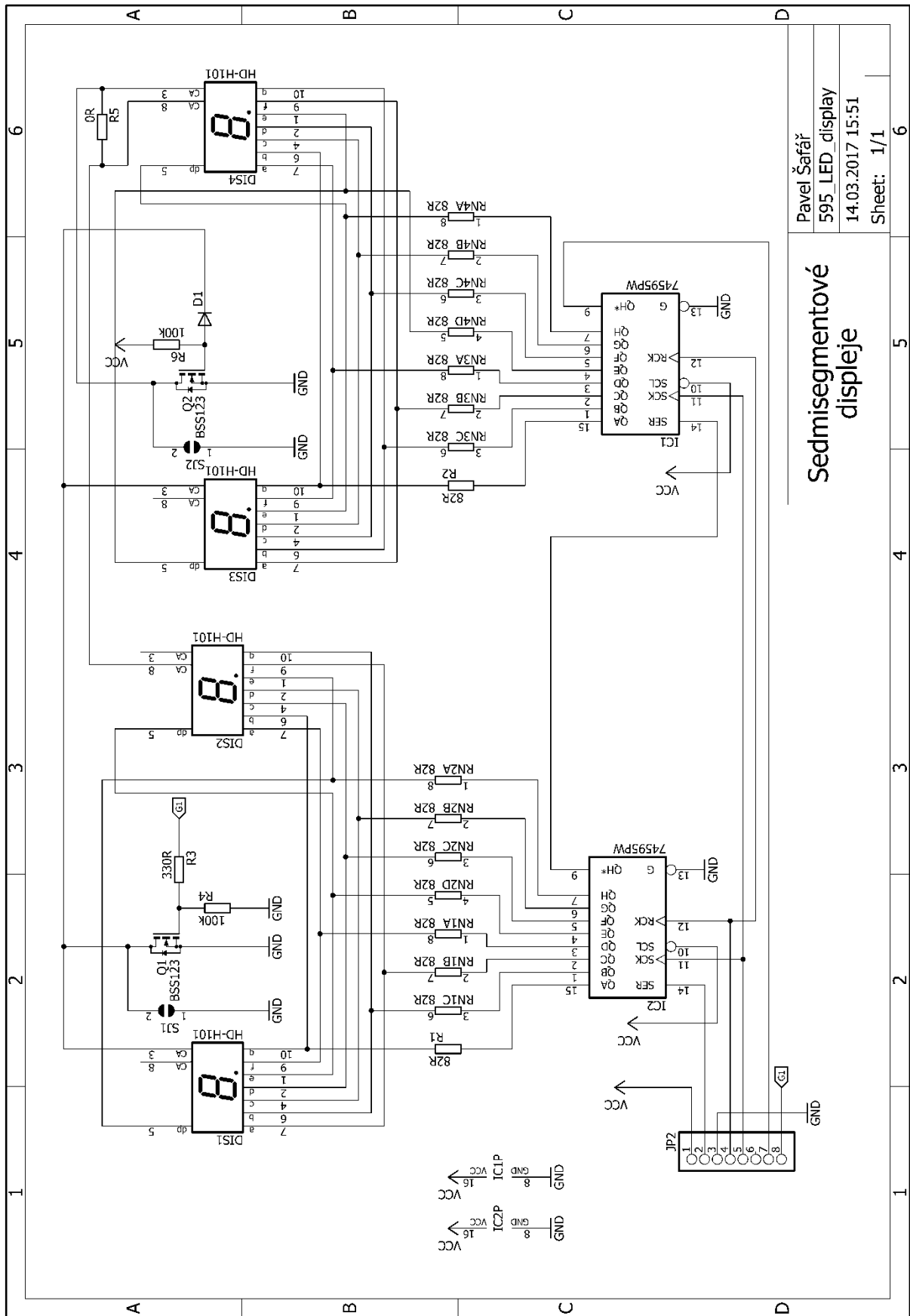
Příloha 4: Schéma a návrh pomocného zdroje



Pomocný zdroj

Pavel Šařfář
 DMP_Analogova_cast_zdroj
 14.03.2017 19:47
 Sheet: 1/1

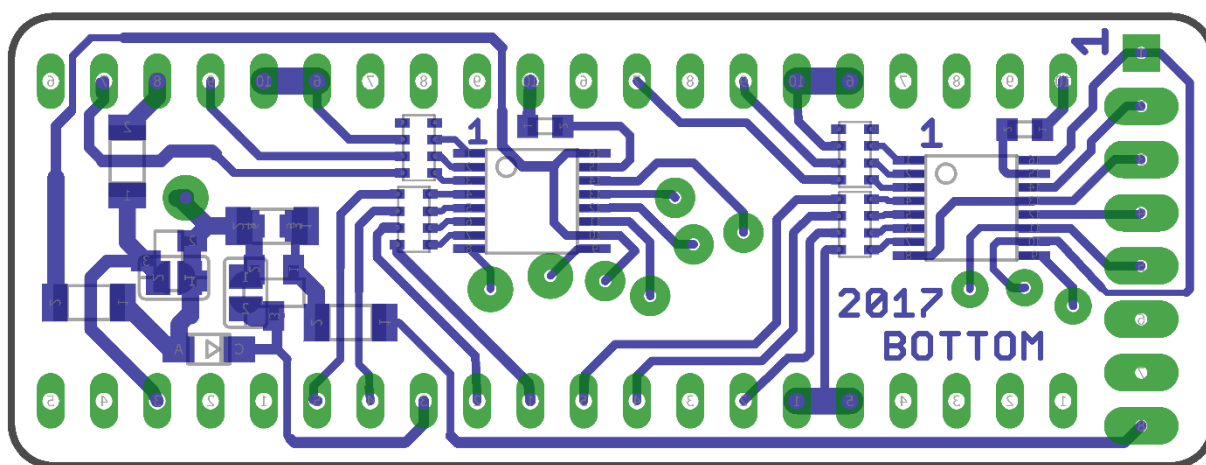
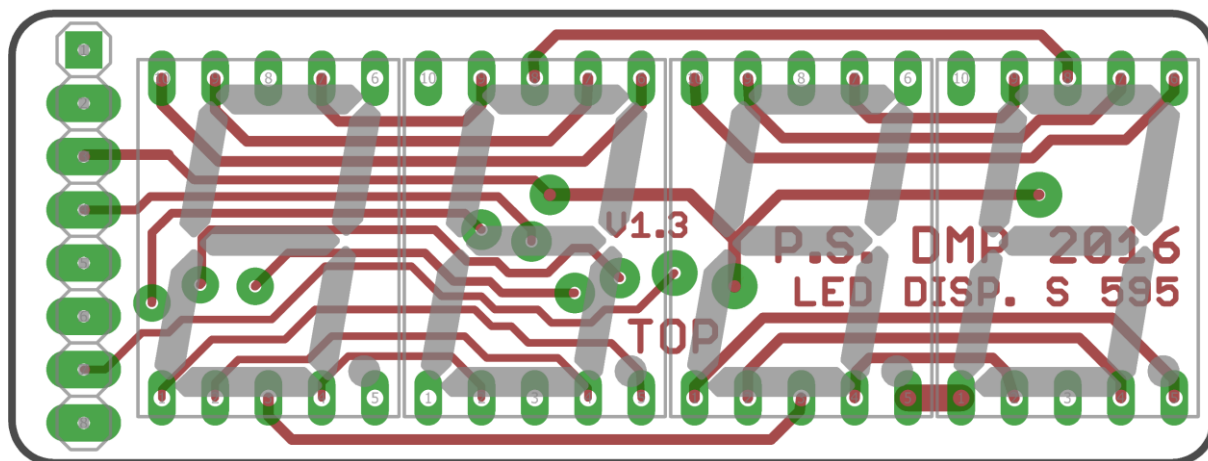
Příloha 5: Schéma a návrh modulu se sedmisegmentovými LED displeji



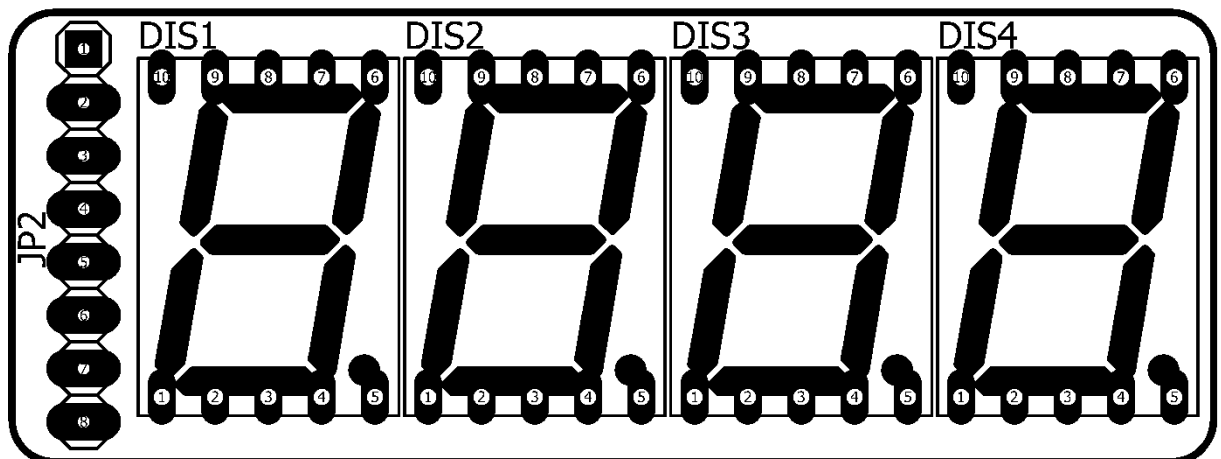
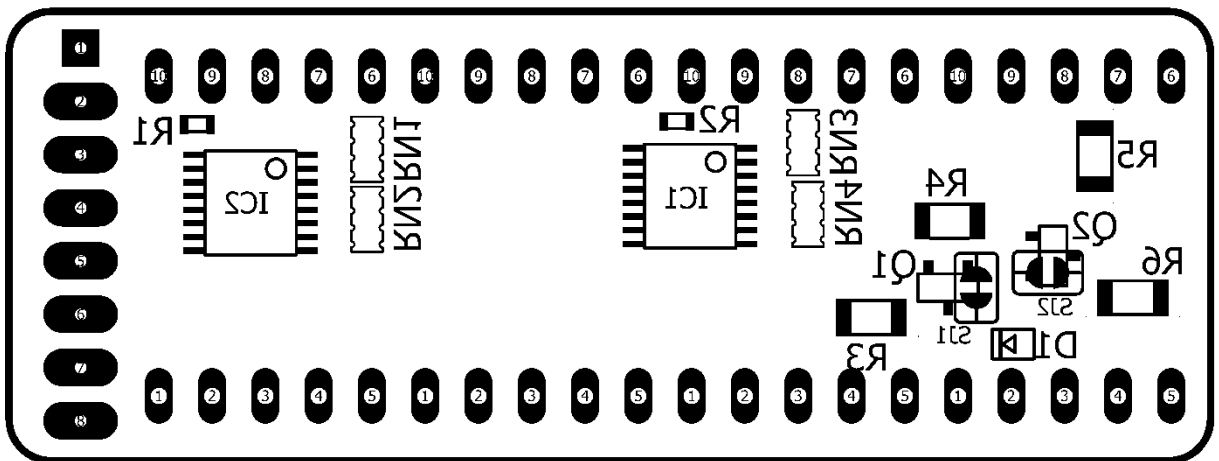
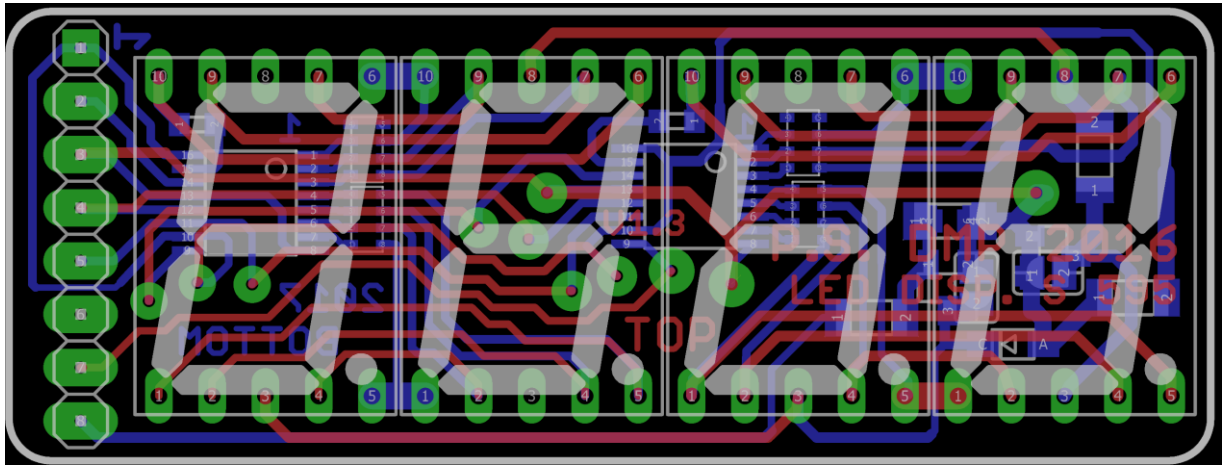
Pavel Šafář
595_LED_display
14.03.2017 15:51
Sheet: 1/1

Sedmisegmentové displeje

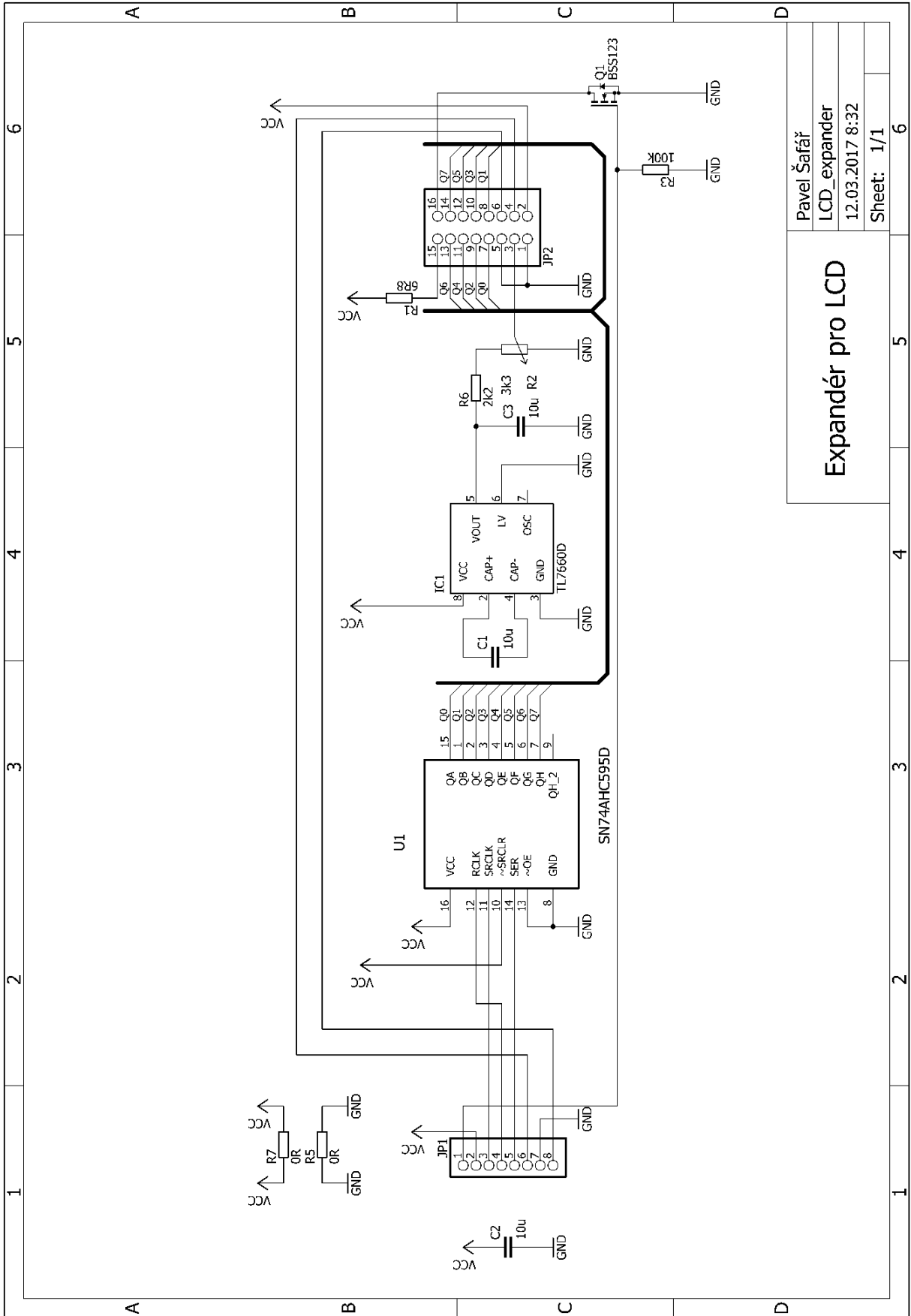
Příloha 5: Schéma a návrh modulu se sedmissegmentovými LED displeji



Příloha 5: Schéma a návrh modulu se sedmissegmentovými LED displeji



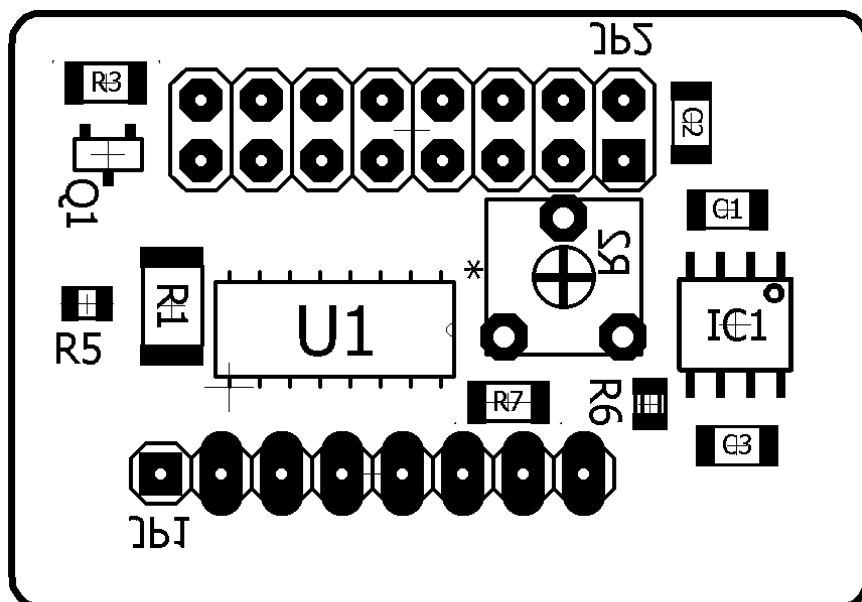
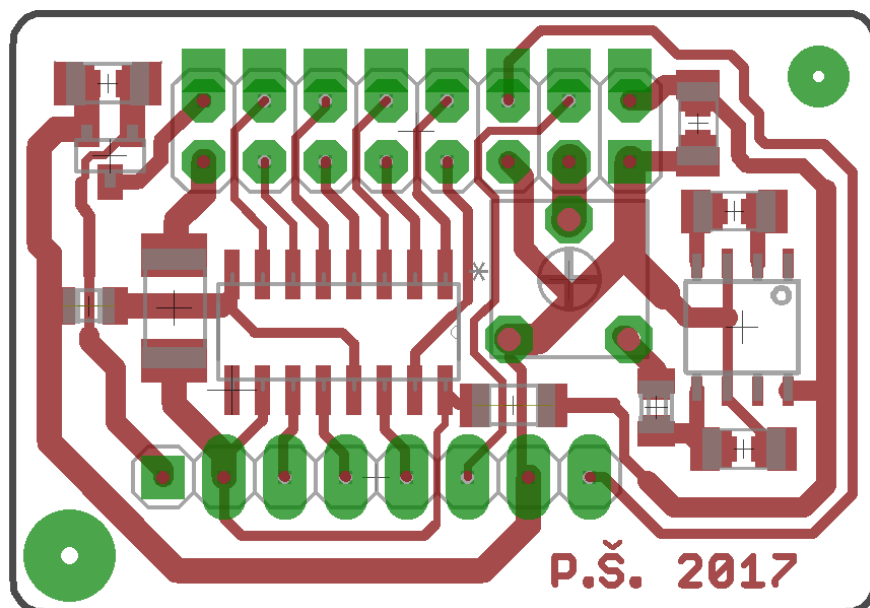
Příloha 6: Schéma a návrh expandéru pro LCD



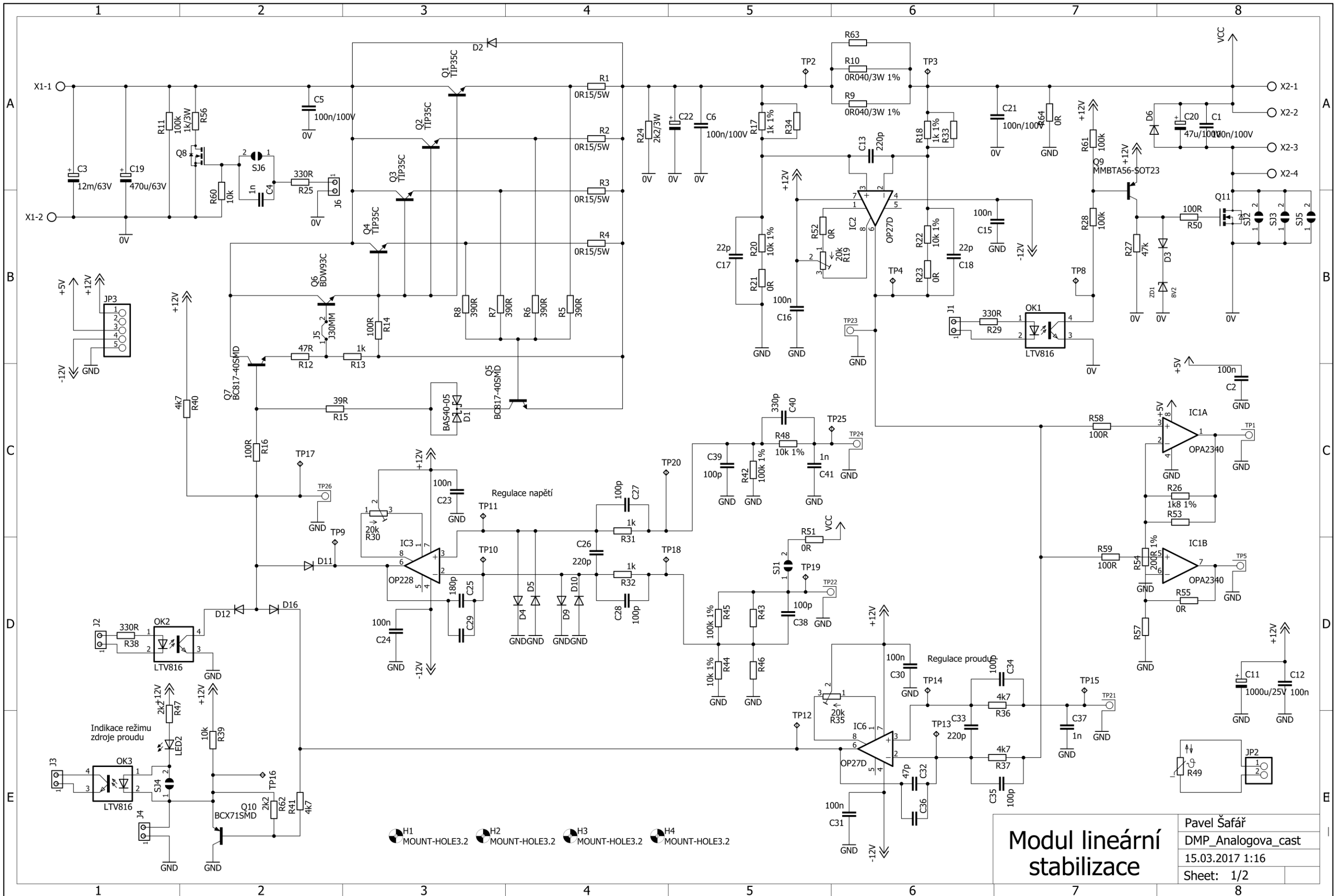
Pavel Šafář
 LCD_expander
 12.03.2017 8:32
 Sheet: 1/1

Expandér pro LCD

Příloha 6: Schéma a návrh expandéru pro LCD



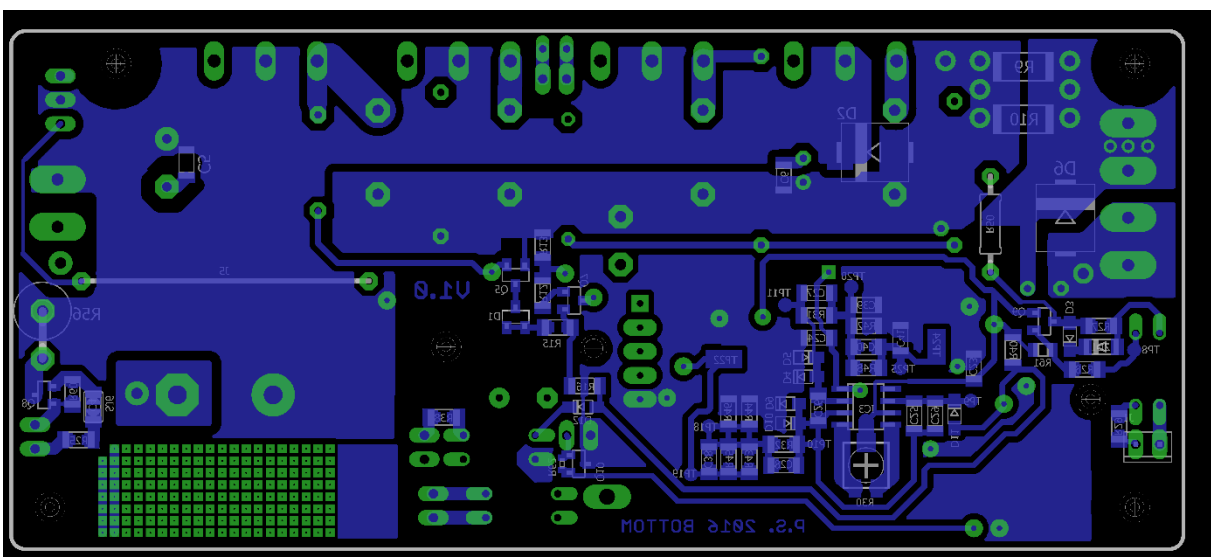
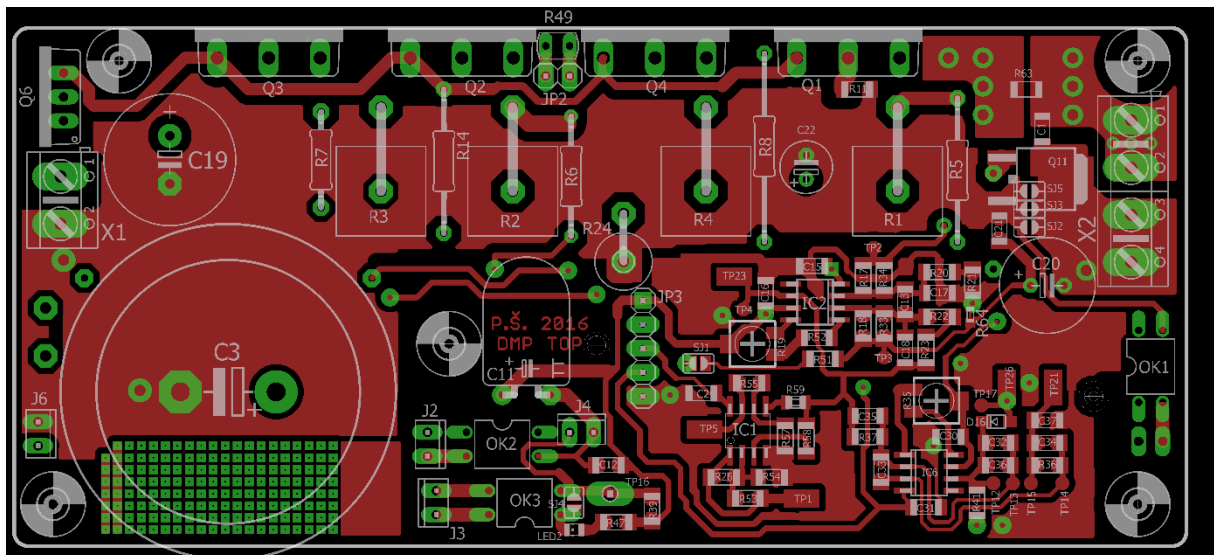
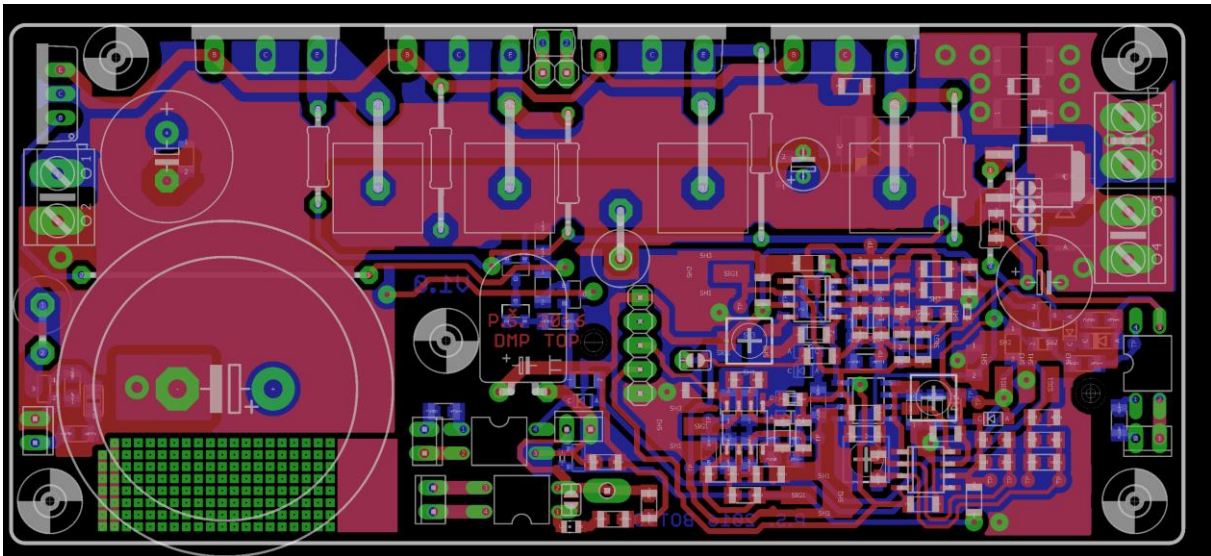
Příloha 7: Schéma a návrh modulu lineární stabilizace



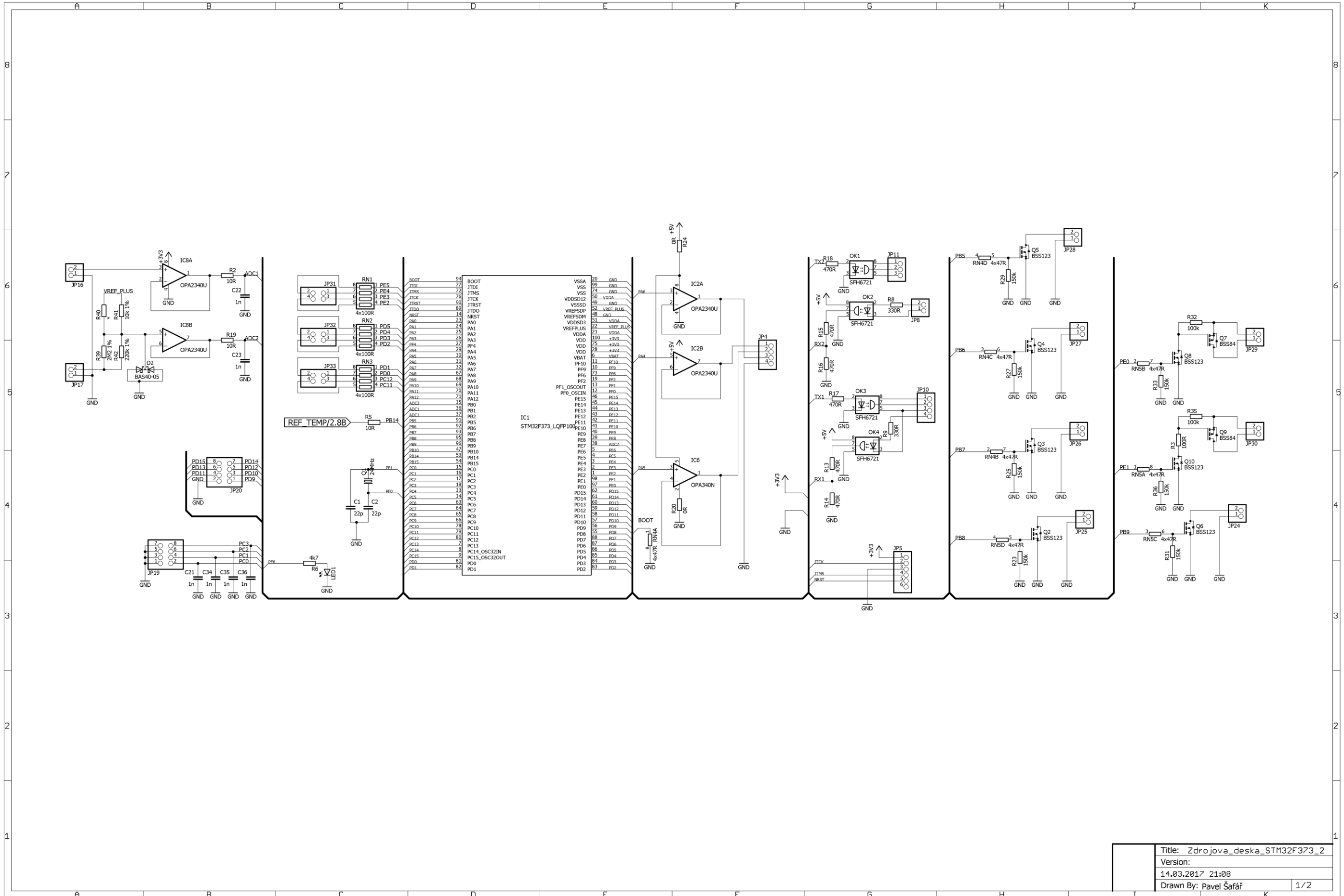
Modul lineární stabilizace

Pavel Šafář
 DMP_Analogova_cast
 15.03.2017 1:16
 Sheet: 1/2

Příloha 7: Schéma a návrh modulu lineární stabilizace

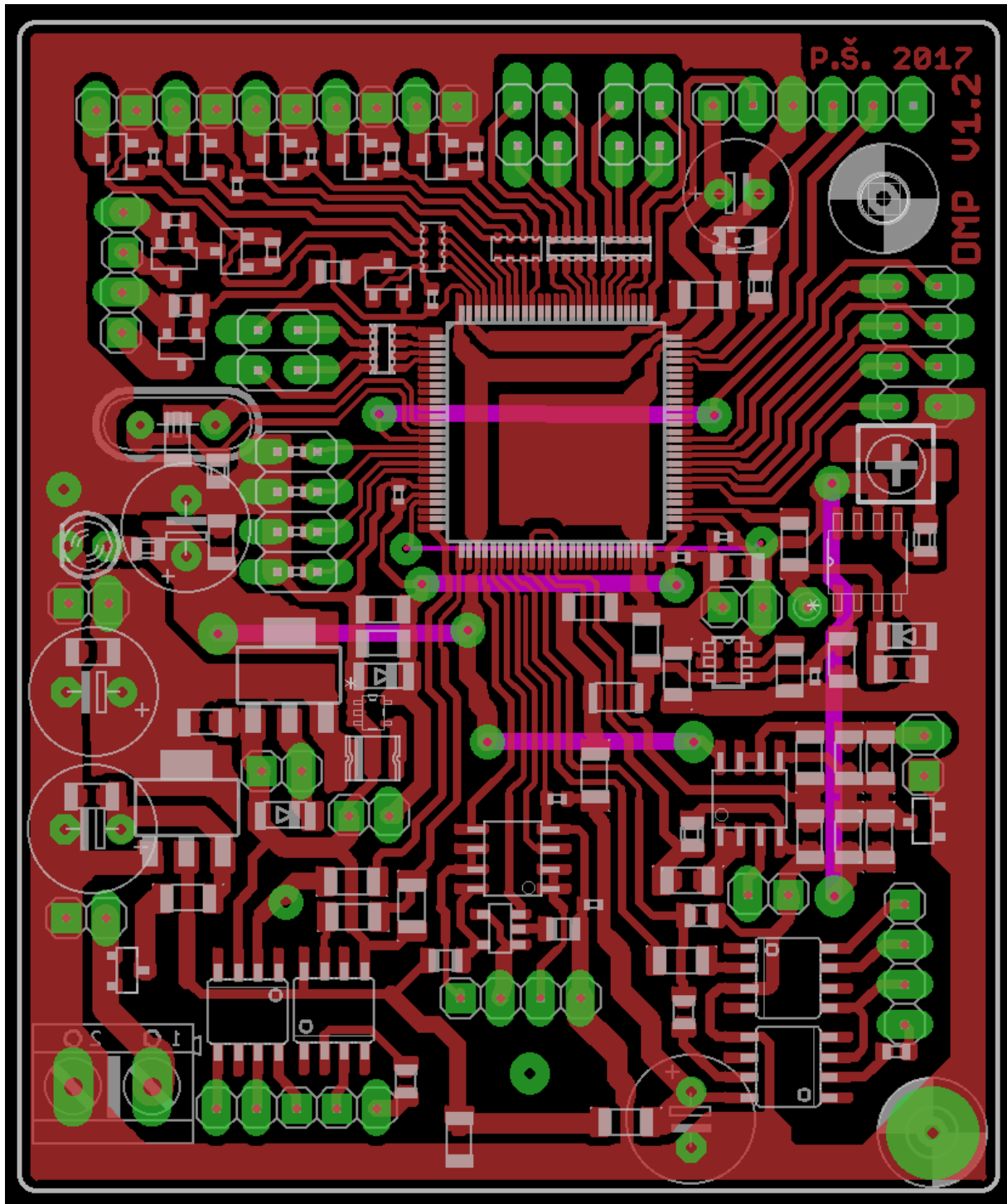


Příloha 8: Schéma a návrh procesorové desky

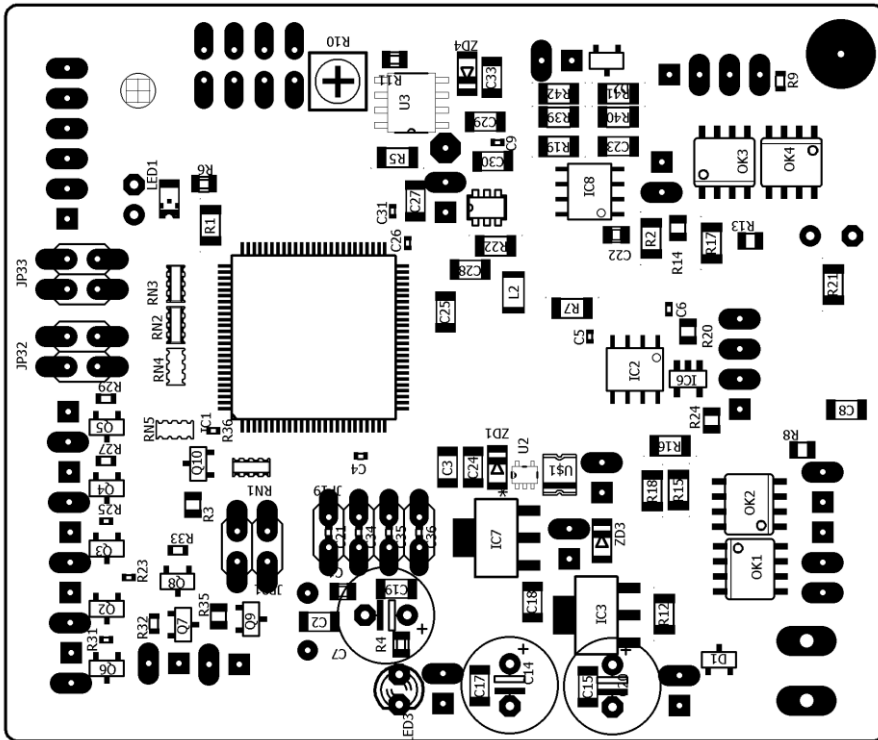
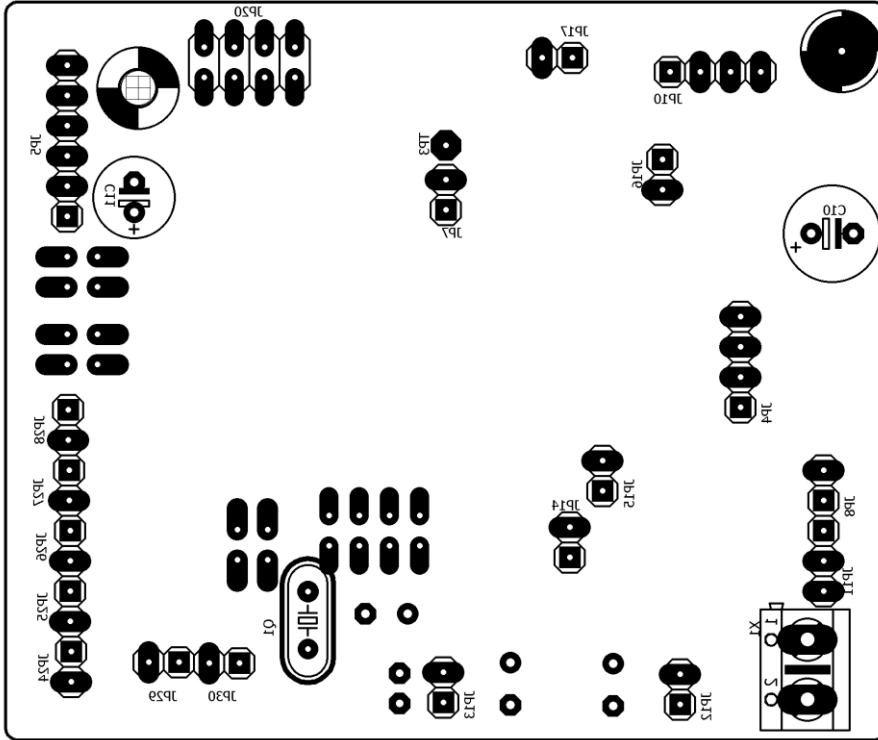


Title: Zdrojova_deska_STM32F373_2
Version: 14.03.2017 21:08
Drawn By: Pavel Šafář
1/2

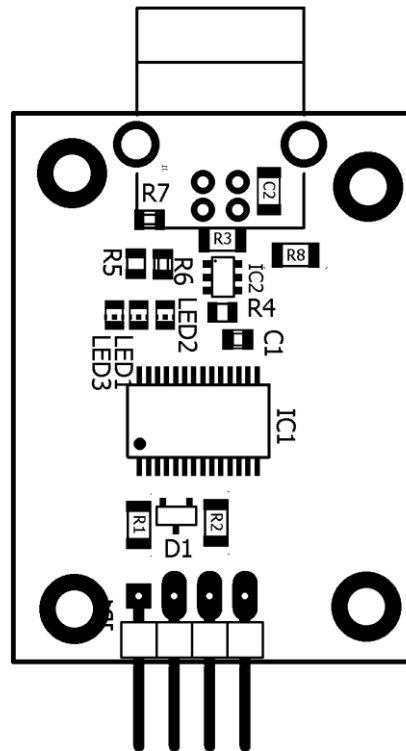
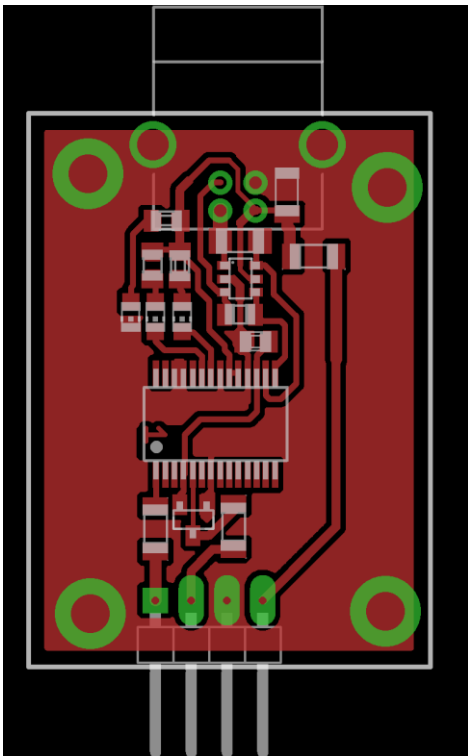
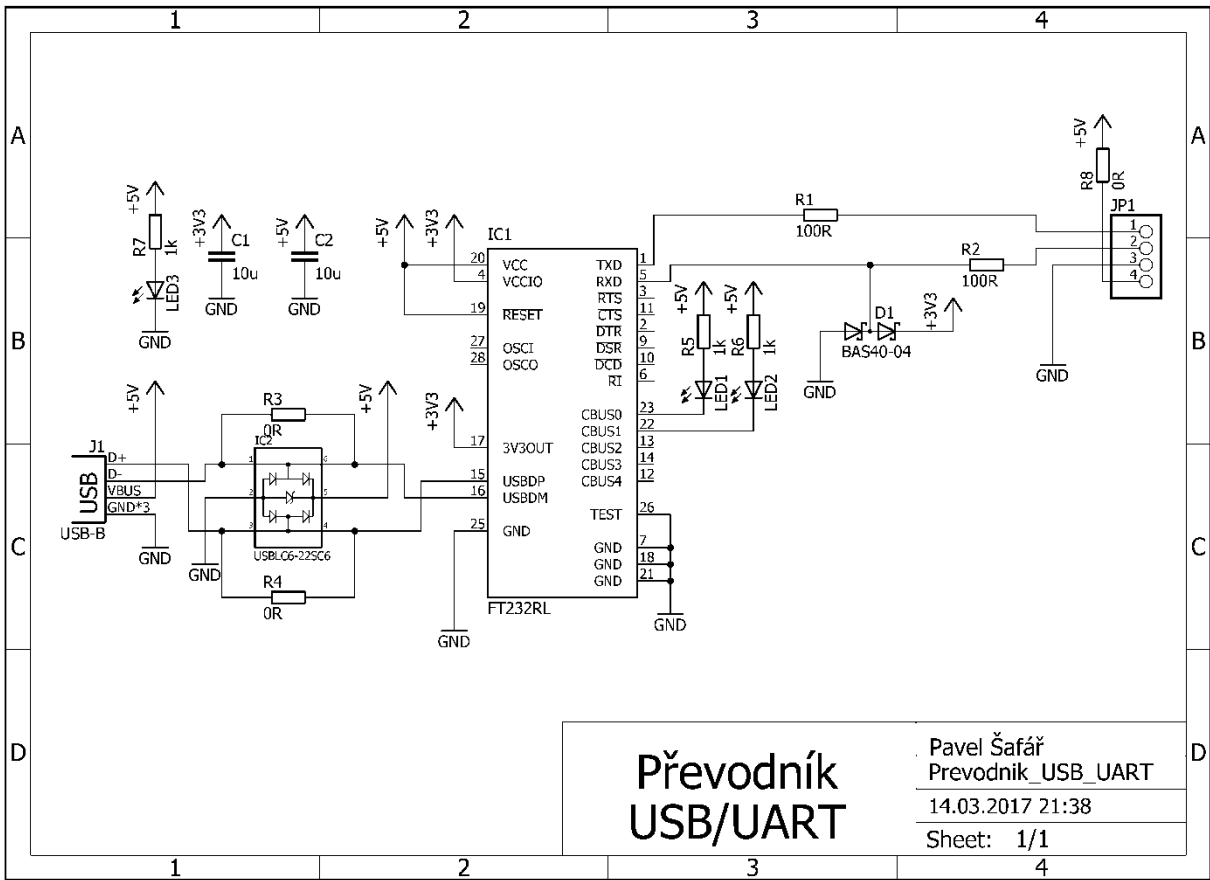
Příloha 8: Schéma a návrh procesorové desky



Příloha 8: Schéma a návrh procesorové desky



Příloha 9: Schéma a návrh modulu s převodníkem USB/UART



Příloha 11: Blokové schéma zdroje

