

**ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI
FAKULTA ELEKTROTECHNICKÁ**

KATEDRA APLIKOVANÉ ELEKTRONIKY A TELEKOMUNIKACÍ

DIPLOMOVÁ PRÁCE

Výkonová aktivní zátěž

ABSTRAKT

Tato diplomová práce se zabývá návrhem a realizací výkonové aktivní zátěži, se schopností funkce jako napětím řízený odpor. Navržená aktivní zátěž je určena pro napětí do 500 V stejnosměrných a střídavých a proudy do 50 A s maximálně dovoleným výkonem 1 kW. Dalším parametrem aktivní zátěže je komunikace a ovládání počítačem pomocí rozhraní USB a také pomocí ovládacích prvků zátěže. Navržená aktivní zátěž se skládá ze třech desek plošných spojů a to umožňuje modulárnost zařízení. Jako základní řídicí jednotky jsou použité mikroprocesory STMicroelectronics s architekturou ARM řady STM32F105. Součástí práce je popis aktivní zátěží, aktuálních druhů na trhu a možnostech jejího použití. Praktická část se zabývá zdůvodněním vybraných způsobů návrhu a popisuje postup návrhu a realizaci. Finální kapitola se zabývá měřením základních parametrů zařízení a jejich analýzou.

KLIČOVÁ SLOVA

Výkonová aktivní zátěž, elektronická zátěž, testování zdrojů napájení, automatizované a programovatelné testy, IGBT.

ABSTRACT

This diploma thesis deals with the design and implementation of a power electronic load with the ability to operate as a voltage controlled resistor. The designed electronic load is intended for AC and DC voltages up to 500 V and currents up to 50 A with maximum allowed power losses of 1 kW. The electronic load can be controlled from a PC via USB or by using the control elements of the device. The designed electronic load consists of three printed circuit boards, which enables modularity of the device. STMicroelectronics' STM32F105 line microcontrollers with ARM architecture are used as basic controlling units. Descriptions of electronic loads, modern loads on the market and the possibilities of its use are part of the thesis. The practical part of the thesis deals with the explanation of the chosen methods of construction and describes the process of design and implementation of the device. The final chapter of the thesis is focused on testing the device and analysis of the received result.

KEY WORDS

Power active load, electronic load, testing of power supply, programmable and automated testing, IGBT.

Prohlášení

Prohlašuji, že jsem tuto diplomovou práci vypracovala samostatně, s použitím odborné literatury a pramenů uvedených v seznamu, který je součástí této diplomové práce.

Dále prohlašuji, že veškerý software, použitý při řešení této diplomové práce, je legální.

.....

podpis

V Plzni dne 11.5.2014

Aleksandra Ilčeva

Poděkování

Tímto bych ráda poděkovala vedoucímu diplomové práce Ing. Petrovi Štětkovi za cenné profesionální rady, pomoc s řešením problémů, připomínky a metodické vedení práce. Dále bych chtěla poděkovat za pomoc, podporu a možnost využití materiální základny společnosti DI-ELCOM s.r.o.

Obsah

I. ÚVOD.....	9
II. PRINCIP FUNKCIONALITY AKTIVNÍ ZÁTĚŽE.....	10
II.1. OPERAČNÍ REŽIMY AKTIVNÍ ZÁTĚŽE	12
II.2. SPECIFIKA NÁVRHU ELEKTRONICKÉ ZÁTĚŽE.....	13
a) <i>Dimenzování aktivní zátěže.....</i>	<i>13</i>
b) <i>Použití pro stejnosměrné a střídavé signály.....</i>	<i>13</i>
III. NÁVRH ELEKTRONICKÉ ZÁTĚŽE.....	14
III.1. DEFINICE POŽADAVKŮ A VZTAHUJÍCÍ SE ZÁKLADNÍ VLASTNOSTI	14
III.2. BLOKOVÉ SCHÉMA.....	14
III.3. VÝKONOVÁ ČÁST.....	16
a) <i>Výběr tranzistorů.....</i>	<i>16</i>
b) <i>Spárování paralelně zapojených IGBT tranzistorů</i>	<i>17</i>
c) <i>Dimenzování maximálního výkonu.....</i>	<i>18</i>
III.4. ZESILOVACÍ STUPEŇ	19
a) <i>Měření proudu elektronickou zátěží.....</i>	<i>19</i>
b) <i>Ovládání mírou otevření tranzistorů</i>	<i>21</i>
c) <i>Měření napětí na elektronické zátěže.....</i>	<i>22</i>
III.5. REGULAČNÍ SCHÉMA	24
a) <i>Mikrokontrolér</i>	<i>24</i>
b) <i>Ovládání ventilátorů</i>	<i>26</i>
c) <i>Teplotní senzory.....</i>	<i>26</i>
III.6. KOMUNIKACE PO ROZHRÁNÍ USB	27
III.7. OVLÁDACÍ BLOK.....	28
a) <i>Galvanická bariera.....</i>	<i>28</i>
b) <i>Displej.....</i>	<i>28</i>
c) <i>Ovládací prvky.....</i>	<i>29</i>
III.8. NAPÁJECÍ BLOK	30
a) <i>Návrh push-pull měniče.....</i>	<i>31</i>
b) <i>Výpočet transformátoru.....</i>	<i>32</i>
c) <i>Návrh sekundární strany.....</i>	<i>34</i>
III.9. NÁVRH DESEK PLOŠNÝCH SPOJŮ	36
a) <i>Napájecí DPS.....</i>	<i>36</i>
b) <i>Řídicí DPS</i>	<i>37</i>
c) <i>Ovládací DPS.....</i>	<i>37</i>

III.10. PROGRAMOVÉ VYBAVENÍ.....	38
III.11. MECHANICKÁ KONSTRUKCE.....	39
IV. ZÁVĚR	40
POUŽITÁ LITERATURA.....	41
SEZNAM OBRÁZKŮ	42
SEZNAM PŘÍLOH.....	43
PŘÍLOHA A - KOMPLETNÍ SCHÉMA	44
PŘÍLOHA B - DESKY PLOŠNÝCH SPOJŮ	49
PŘÍLOHA C - VÝKRESY MECHANICKÉ SKŘÍNĚ.....	52

SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK

AD	Analog-to-Digital (Converter)	Analogově digitální převodník
ARM		Architektura procesorů vyvinutá firmou ARM Limited
CAN	Controller Area Network	Sériová datová sběrnice vyvinutá firmou BOSCH
CMRR	Common Mode Rejection Ratio	Činitel potlačení souhlasného rušení
DA	Digital-to-Analog (Converter)	Digitálně analogový převodník
DPS	Deska Plošných Spojů	
Flash		Semipermanentní elektricky programovatelná paměť s libovolným přístupem
I ² C	Inter-Integrated Circuit	Dvou vodičová synchronní sériová sběrnice
I2S	Integrated Interchip Sound	Sériová sběrnice pro propojení digitálních audio zařízení
IGBT	Insulated Gate Bipolar Transistor	Bipolární tranzistor s izolovaným hradlem
LCD	Liquid-Crystal Display	Displej z tekutých krystalů
LED	Light-Emitting Diode	Dioda emitující světlo
PC	Personal Computer	Osobní počítač
PWM	Pulse Width Modulation	Pulzně šířková modulace
RAM	Random-Access Memory	Paměť s přímým přístupem, která neuschovává informaci po vypnutí napájení
RISC	Reduced Instruction Set Computing	Architektura mikroprocesorů s redukovanou instrukční sadou
SPI	Serial Peripheral Interface	Duplexní synchronní sériová sběrnice
UART	Universal asynchronous receiver/transmitter	Univerzální asynchronní sériové rozhraní
UPS	Uninterruptible Power Supply	Nepřerušitelný zdroj energie
USART	Universal synchronous/asynchronous receiver/transmitter	Univerzální synchronní/asynchronní sériové rozhraní
USB	Universal Serial Bus	Univerzální sériová sběrnice
USB OTG FS	Universal Serial Bus On-The-Go Full-Speed	Specifikace USB rozhraní, dovolující přenosným zařízením vystupovat v roli masteru

I. Úvod

Aktivní zátěž je zařízení umožňující dynamické a parametrizované zatížení s účelem zjištění parametrů napájecích zdrojů. Vývoj elektronických zařízení a napájecích zdrojů odhalil potřebu přesnějších a komplexnějších testů, než je možné dosáhnout pomocí pasivních součástek. Navíc při rozšiřující se roli elektronických přístrojů v každodenním životě je jejich výroba rozšířená více, je rychlejší a více automatizovaná, a to znamená, že i testovací prostředky se modernizují. Dnešní aktivní zátěže nabízí automatizované testy a flexibilitu použití.

Cílem této práce je navrhnout, realizovat a zprovoznit aktivní zátěž založenou na IGBT modulech. Konečné elektrické parametry jsou omezené vlastnostmi použitých výkonových prvků, avšak požadavky uvádí jenom dolní hranice hodnot: minimální ztrátový výkon 500 W a vstupní napětí 230 V. Navržená aktivní zátěž musí umožňovat ovládání pomocí UART rozhraní a být schopná práce v režimu napětím řízeného odporu.

Postup navržení a realizaci aktivní zátěží začíná návrhem blokového schématu. Každý blok vnáší požadavky na obvody, kterými je realizován, proto výběr vhodného zapojení a součástek je nejvýznamnější fází diplomové práce. K tomuto procesu patří i návrh desek plošných spojů. Pro uvedení zařízení do provozu je nutné napsat programové vybavení a doladěním potřebných parametrů dosáhnout vyhovující funkčnosti zařízení. Pro konečné charakterizování zařízení je vhodné provést změření základních vlastností zátěže. Rozvíjený popis postupu návrhu aktivní zátěže s požadovanými parametry je prezentován v následujících kapitolách.

II. Princip funkcionality aktivní zátěže

Aktivní zátěži jsou zařízení pro testování a ladění jak primárních tak i sekundárních zdrojů napájení: od konvertorů, invertorů a UPS do elektrochemických zdrojů jako baterie a palivové články. Aktivní zátěže umožňují testování nejenom v klasickém statickém režimu, ale i v dynamickém, ve kterém se kompletně simuluje chování reálných zátěží. Pro napájecí zdroje aktivní zátěže umožňují simulaci různých provozních stavů spotřeby zařízení, jako režim spánku, režimy úspory energie a plné spotřeby. S vzrůstajícími požadavky k napájecím zdrojům a zvětšením množství normovaných parametrů, elektronické zátěže nahrazují klasické pasivní metody, které nejsou schopné v plné míře zajistit testování a ověření zdrojů. Elektronické zatížení umožňuje široký rozsah provozních režimů, které mohou být konfigurovány tak, aby se zařízení mohlo charakterizovat a ověřila se konstrukce a specifikace napájecího zdroje.

Na druhou stranu se také zvyšuje užití ve společnosti přenosných (mobilních) zařízení, napájených stejnosměrným napětím. Akumulátorové články se objevují u všech typů výrobků: z analytických elektronických zařízení až na elektrické nářadí a hračky. V některých případech tyto různé aplikace představují různé požadavky na zdroje stejnosměrného napětí. Naštěstí, dostupnost mnoha druhů chemii baterií přináší charakteristiky vyhovující požadavkům daných aplikací. Obecně testování baterií zahrnuje vybíjení po určité době pro určení základních specifikací. Většina mobilních zařízení při snížení napájecího napětí zvyšuje spotřebu proudu a vykazuje chování s konstantním výkonem. Proto je výhodný režim konstantního proudu, nabízený elektronickými zátěží, který značně zkracuje dobu provedení testu, ve srovnání s odporovými dekádami. Navíc pro testování baterií a palivových článků je možné vygenerovat charakteristiky vybíjení k určení skutečné kapacity, referenční kapacity, a vnitřní impedance.

Princip elektronické zátěže je založen na použití tranzistoru v lineárním režimu jako náhradu pasivních součástek. Namísto zatížení pomocí rezistorů, potenciometrů či odporových dekád se využívá vlastnost tranzistoru, pracujícího v lineárním režimu: se změnou přiloženého napětí se mění vnitřní odpor tranzistoru, což vede ke změně protékajícího proudu celým systémem. Evoluce elektronických zátěží přidala k základnímu principu sofistikovanější a komplexnější ovládaní až se elektronické zátěže staly komplikovanými systémy, které jsou dnes navrhovány a vyráběny špičkovými společnostmi.

S evolucí napájecích zdrojů, testovací metody pro ověření návrhu a funkčnosti zařízení vyžadují komplexnější elektronické zatížení. Různé architektury napájecích zdrojů a výstupní kombinace také diktují potřebu univerzálních testů, které se mohou přizpůsobit široké škále specifikaci. Zároveň je nutný vyšší stupeň řízení zátěže kvůli propracovanosti testu, jako potřeba programovatelnosti. Testování ve výrobním prostředí se zaměřuje hlavně na celkovou funkčnost zařízení, založenou na specifikacích vyvíjeného produktu. Automatizace je často nutností jako záležitost výroby kvůli velkému objemu testování, což vyžaduje vysokou propustnost a opakovatelnost testu. Na druhou stranu testy, prováděné při vývoji výrobků jsou určeny hlavně pro ověření návrhu zdroje napájení. Takové testy vyžadují vysoce účinné testovací zařízení a vysoký stupeň ručního nastavení. Jak pro výrobní prostředí, tak i pro vývojové procesy synchronizace měření je nezbytná pro správné provedení některých zkoušek a získání korektních dat. Všechny tyto záležitosti zvyšují požadavky na elektronické zátěže.

Standardní aktivní zátěže, nabízené dnes na trhu jsou s vysokou úrovní spolehlivosti a umožňují opakovatelné, vysoce účinné měření díky nízkému šumu. Moderní systémy jsou modulární, umožňují konfigurační flexibilitu založenou na výkonových požadavcích a jsou jednodušší pro modernizaci. Kromě toho servis, výměna nebo kalibrace samostatných modulů systému může být prováděna s minimálním zdržením provozu systému. Jsou typicky programovatelné, a tato schopnost umožňuje přesnější kontrolu nad měřením hodnot během testování a může poskytnout uživateli cennou informaci o stavu systému. Tyto systémy jsou často projektované s použitím FET tranzistorů, což poskytuje zvýšenou spolehlivost proti jednodušším systémům, skládajícím se z relé a rezistorů. Obvyklé elektronické zátěže nabízí provozní režimy konstantního proudu, konstantního napětí, konstantního výkonu a také konstantního odporu. Sofistikovanější systémy nabízí všechny režimy v jednom produktu. Také poskytují univerzální řešení pro testování zdrojů jak stejnosměrného napětí i proudu, tak i střídavých signálů. Poslední výhodou jsou elektronické zátěže s komunikační sběrnici; toto eliminuje potřebu digitálních multimetrů pro napětí a proud u některých testů.

II.1. Operační režimy aktivní zátěže

Většina aktivních elektronických zátěže se používá nejčastěji v některém z provozních režimů: konstantní proud, konstantní napětí nebo konstantní odpor. V posledním režimu je zátěž použita jako náhrada obyčejného rezistoru.

CC Režim konstantního proudu (ang. Constant Current) umožňuje simulovat pomocí zátěže komplexní elektronický systém, které mají různé stavy spotřeby energie a spotřebovávají stálý proud, v závislosti na pracovním stavu (stav spánku, částečná nebo plná funkcionality atd.).

CV Režim konstantního napětí (ang. Constant Voltage) se používá pro testování zdrojů proudu, palivových článků a nabíjecích zařízení pro baterie. Při testování nabíječek aktivní zátěž v režimu konstantního napětí může zaměnit několika hodinové testování skutečných baterií. V průběhu testování aktivní zátěži jsou přiřazeny hodnoty, odpovídající různým stavům nabití baterií.

CP Novější způsob provozování elektronické zátěže je v režimu konstantního výkonu (ang. Constant Power). Tento režim se nejčastěji používá pro zjištění kapacity baterií a palivových článků. U přenosných zařízení s vybíjením baterií se zvyšuje odebíraný proud, následkem je konstantní spotřebovaný výkon. Fakticky pomocí zatížení s konstantním odebíraným výkonem se zjišťuje schopnost baterií napájet konkrétní zařízení – takovým způsobem se určuje čas provozu zařízení od daného typu baterie. Nadále se tento režim také dá použít pro testování zdrojů pro motory, nabíječky superkondenzátorů a spínané zdroje.

Velkými společnostmi, nabízející široký sortiment elektronických zátěží jsou společnosti Agilent, B&K Precision, Chroma Systems Solutions, Ametek Programmable Power a jiné. Nejrozšířenější na trhu jsou stejnosměrné aktivní zátěže. Většina nabízených zařízení je programovatelná a modulární, což zvyšuje flexibilitu použití.

II.2. Specifika návrhu elektronické zátěže

a) Dimenzování aktivní zátěže

Elektronické zátěže jsou dimenzované podle poměru napětí/proudu a výkonu. Na rozdíl od zdrojů napájení, u kterých je typicky nutné znát jenom maximální proud a napětí, všechny elektronické zátěže mají také výkonový limit. To znamená, že je nutné vědět napětí a proud ve stejný okamžik aby se nepřetížila zátěž. Zátěž se také dá použít jako rychlý modulátor proudu pro zdroje napájení. Toto je zvláštní případ použití aktivních zátěží pro zlepšení účinnosti napájecího zdroje.

Na druhou stranu se staví omezení minimálního napětí na zátěži, jelikož každá elektronická zátěž potřebuje určité minimální napětí pro plné otevření. Kvůli této vlastnosti při maximálním proudu napětí na zátěži nemůže být nulové. Když je nutné měřit nižší napětí, než to umožňuje zátěž, jsou možnosti jak toho dosáhnout. Jedná z možností je zapojení napájecího zdroje v sérii se zátěží pro zvětšení napětí na ní. Toto řešení je vhodné pro pracovní režim konstantního odporu. Toto řešení ale je problematické pro přechodové jevy a je relativně drahé. Napájecí zdroj musí být dimenzován na maximální proud, ale použité napětí bude jenom několik voltů. Také napájecí zdroj má typicky pomalejší reakci než je požadováno od zátěže.

b) Použití pro stejnosměrné a střídavé signály

I přes to, že většina vyráběných zátěží jsou pro stejnosměrný proud, v mnoha případech je nutno použít zátěž s rychlým přeběhem nebo střídavý signál, v kombinaci se stejnosměrným. Specifické například pro vývojové fáze kontrolérů pro nabíjecí baterie, palivových článků a magnetů, jsou široká širka pásma a schopnost generování libovolného tvaru průběhu zátěže. U kontroléru baterií, je aktivní zátěž zapojena paralelně se zdrojem napájení, čímž se simulují nabíjecí a vybíjecí cykly. Při testování palivových článků je možné zatížit články vysokofrekvenčním signálem s nízkou amplitudou pro provedení elektrochemické impedanční spektroskopie pro určení impedance článku.

III. Návrh elektronické zátěže

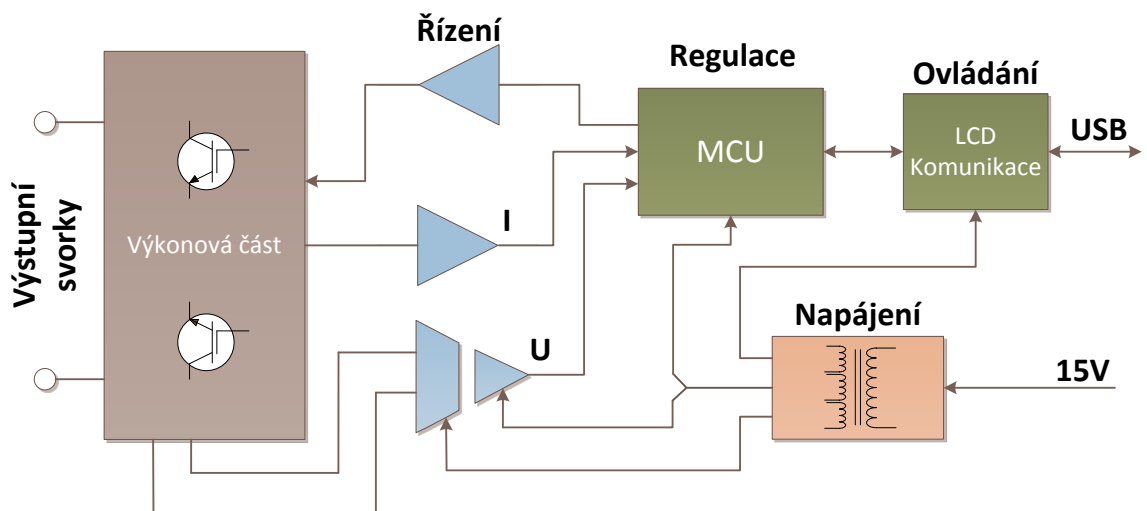
III.1. Definice požadavků a vztahující se základní vlastnosti

Požadované vlastnosti dle zadání diplomové práce jsou:

- minimální ztrátový výkon – 500 W
- vstupní napětí – stejnosměrné, volitelně střídavé – 230 V
- galvanicky oddělené řízení po komunikační sběrnici – I²C nebo UART
- schopnost funkce jako napětím řízený odpor

Pro nejlepší splnění požadavku na ztrátový výkon jsem byla nasměrovaná vedoucím na použití IGBT tranzistorů jako hlavní výkonový prvek, protože tyto tranzistory jsou určeny pro výkonově náročné aplikace. Pro splnění možnosti střídavého vstupního napětí je zvoleno použití dvou tranzistorů v anti-sériovém zapojení. Požadavek řízení po sběrnici diktuje použití mikrokontroléru jako hlavního řídicího prvku ve schématu a tím je možné rovněž splnit i poslední požadavek na funkčnost jako napětím řízený odpor.

III.2. Blokové schéma



Obr. III-1 Blokové schéma

Celé zařízení je rozděleno na 4 velké části, ze kterých každá splňuje logickou funkci, část zařízení a zároveň je také oddělenou jednotkou celku. Na *Obr. III-1* je zobrazeno blokové schéma pro lepší ilustraci funkce zařízení.

Zesilovací stupeň je tvořen modrými zesilovače s označeními „U“, „I“ a „Řízení“. Zesilovače s označením I a U jsou určeny k měření napětí a proudu, protékajícího výkonovými prvky a tímto poskytují zpětnou vazbu o parametrech výstupu. Zesilovači pro měření napětí je předřazen napěťový dělič, který je součástí výkonového bloku. Důležitou vlastností zesilovače napětí je jeho vnitřní galvanické oddělení. Zesilovač pro měření proudu by měl být velmi přesný a s velkým rozsahem zesílení. Zesilovač s označením „Řízení“ slouží pro nastavení výstupních parametrů dle požadavků zadání.

Napájecí blok je obvod, který zajišťuje napájení pro všechny ostatní bloky zařízení. Každý blok musí mít svoje vlastní napájení, které musí zajistit kromě potřebných napájecích úrovní pro správnou funkcionalitu, také galvanické oddělení a izolaci od všech ostatních bloků.

Nezanedbatelnou částí zařízení jako celků je ovládání jeho parametrů a komunikace s uživatelem. Tyto funkce jsou realizované pomocí LCD displeje, čtyřech tlačítek a jednoho rotačního spínače. Blok ovládání také je blokem, který zpracovává komunikaci s počítačem pomocí rozhraní USB.

Z ovládacího bloku nebo po rozhraní USB se nastavují výstupní parametry zátěže – proud nebo napětí mezi svorkami pro zapojení testovacího zařízení. Tyto nastavení se předávají přes asynchronní rozhraní k hlavní řídicí jednotce označené jako blok MCU. Po té potřebné úrovně napětí se předávají k bloku označenému jako „Řízení“ který je zesiluje do požadovaných hodnot, které rovnou ovlivňují stupeň otevření tranzistorových modulů. Zpětnovazební stupeň zesiluje napěťové signály do příslušných hodnot pro zpracování mikrokontrolérem.

Je nutné také poznamenat, že zařízení se skládá celkově z třech desek plošných spojů a mimo toho blok, označený jako „Výkonová část“ je složen z externích součástek. Hlavní řídicí schéma reprezentují bloky „Řízení“ a „Regulace“ a to je jedna z desek plošných spojů. Bloky „Napájení“ a „Ovládání“ jsou reprezentovány každý samostatnou deskou plošných spojů. V následujících kapitolách budou popsány principy funkce a specifické vlastnosti každého bloku.

III.3. Výkonová část

a) Výběr tranzistorů

Jako základní výkonové prvky byli vybrány IGB tranzistory, které jsou specifické velkým rozsahem spínaných výkonů a jednoduchým ovládním napětím. IGBT jsou bipolární tranzistory s izolovaným hradlem a zahrnují v sobě charakteristiky obou technologií: vysoké vstupní napětí a nízká úroveň řídicího výkonu od MOSFET tranzistorů a nízký úbytek napětí v otevřeném stavu od bipolárních tranzistorů. Schopnost IGB tranzistorů regulovat velké výkony s proudovou zatížitelností do stovek Ampérů a blokujícími napětí do tisíců Voltů určila jejich použití nejvíc ve výkonové elektronice. IGBT jsou vhodné pro pulzně šířkovou modulaci, invertory, konvertory, zdroje napájení jako UPS, spínané zdroje a další výkonové aplikace, což je určuje jako vhodné zároveň jak pro aplikace, kde jsou nutné nízké ztráty při vedení, tak i pro aplikace, vyžadující nízké spínací ztráty. Je nutné podotknout, že vysoce výkonné IGBT moduly nejsou dostupné na trhu pro neprofesionální použití vzhledem k jejich ceně, která se pohybuje v tisících korun. Moduly, použité v diplomové práci mi byly zapůjčeny společností DI-ELCOM.



Obr. III-2 Příklady IGBT modulů, vhodných pro použití v aktivní zátěži

Při výběru tranzistorů pro použití jako hlavní výkonové prvky v úvaze bylo použito nejdříve dvou tranzistorů od výrobce Infineon s napětím kolektor-emitor 1700 V ve větším pouzdře z Obr. III-2. Při výpočtu výkonových ztrát ale bylo zjištěno, že dva takové tranzistory nebudou dostačující. Proto bylo rozhodnuto použít pět menších paralelně zapojených tranzistorů od výrobce Semitran s napětím kolektor-emitor 1200 V jako náhradu jednoho. Tímto způsobem je použito celkem 10 tranzistorů, čím se dosáhlo násobně větších výsledných výkonových ztrát a významně se zlepšili tepelné parametry celého systému. Toto řešení ale vyžaduje větší pozornost kvůli komplikovanějšímu zapojení. Je nutno zajistit dobré

tepelní vedení pro 10 tranzistorů namísto pouze dvou. Další komplikací je nutnost spárování jednotlivých tranzistorů kvůli nejednotnostem výrobní technologie.

b) Spárování paralelně zapojených IGBT tranzistorů

V praxi se ukázalo, že je možné dosáhnout vyhovujících výsledků úspěšným spárováním IGBT při dodržování určitých pravidel. Hlavní nevýhodou při paralelním zapojení IGBT je nejednotné rozdělení ztrát, které je výsledkem nevyrovnaného rozdělení proudu. Nepoměry jsou způsobeny ne jenom vnitřními příčinami ale také nesymetrickým návrhem schématu.

- Dynamické neshody vznikají zapínacími a vypínacími ztrátami a také zotavovacími ztrátami. Zapínací a vypínací ztráty je možné do jisté míry řídit hradlovým obvodem. Synchronizace řídicích signálů je důležitý parametr pro minimalizaci rozdílu ve spínacích časech. Nejlepším prostředkem pro sjednocení signálů je dosáhnout největší symetričnosti obvodů aby odpovídali parazitním indukčnostem. Cílem je odstranit rozdíly v indukčnostech hradel a emitorů a indukčnostech a odporech hradel.

- Použití samostatných odporů na hradle každého tranzistoru zlepšují shodnost impedanci každého tranzistoru. Použití samostatných rezistorů pomáhá zabránit oscilacím mezi paralelními zařízení, ale také způsobuje rozdíly v časech náběhu a doběhu.

- Termální koeficient je velmi důležitý parametr, který se musí brát v úvahu při paralelním zapojení IGBT. Termální koeficient musí být kladný, aby se mohl rozdělovat proud mezi tranzistory. Při záporném termálním koeficientu je možné, že některé tranzistory budou teplejší než ostatní, což povede k jejich větší vodivosti a to přivede k jejich většímu ohřátí atd. V nejlepším případě mezi tranzistory bude velká teplotní nerovnováha, v nejhorším se jeden kus tepelně poškodí, což přivede k většímu proudovému namáhání ostatních s v důsledku k destrukci celého zapojení.

Další praktické postupy, které jsou totéž důležité:

- vhodné rozmístění tranzistorů pro symetrické protékání proudu;
- umístění tranzistorů na jednom chladiči pro termální spárování;
- $V_{CE(SAT)}$ tranzistorů musí být sladěné v rozmezí $\pm 0,05$ V;
- prahové napětí musí být sladěné v rozmezí $\pm 0,1$ V;

- pokud není možné použít zařízení z jednoho křemíkového substrátu je vhodné zapojit paralelně emitoru odpory pro přesnější rozdělení proudu;
- anti-paralelní diody, obsažené v pouzdře IGBT musí mít úbytek napětí v otevřeném stavu do $\pm 0,1$ V.

c) Dimenzování maximálního výkonu

Pro každý z vybraných tranzistorů výkonové ztráty se vypočítají dle vzorce:

$$Q = \frac{T_{STG} - T_A}{R_{thcs} + R_{thcr} + R_{thra}} \quad (\text{III.3.1})$$

kde R_{thcs} je tepelní odpor přechodu čip-pouzdro IGBT. R_{thrc} je tepelní odpor mezi pouzdem tranzistoru a chladičem, a vzhledem k použití teplo vodivé pasty, je vzata hodnota její odporu - 0,1 K/W. R_{thra} je tepelní odpor přechodu chladič-vzduch a je závislý na typu použitého chladiče a se udává v technických listech. Pro konkrétní realizace je zajištěno použití ventilátoru kromě chladiče, takže celková hodnota se vypočítává násobením odporu chladiče koeficientem ventilátoru. Pro použitý chladič je hodnota $R_{thra}=0,4$ K/W a koeficient ventilátoru 0,5, takže výsledná celková hodnota $R_{thra}=0,2$ K/W. T_{STG} je maximální teplota provozu tranzistoru, a T_A je teplota okolí. Dle vzorce výpočet výkonové ztráty pro jeden tranzistor:

$$Q = \frac{T_{STG} - T_A}{R_{thcs} + R_{thcr} + R_{thra}} = \frac{125 - 25}{0,23 + 0,2 + 0,1} = 188,7 \text{ W} \quad (\text{III.3.2})$$

Specifikou zapojení je, že při jakékoliv polaritě napětí, proud, protékající aktivními prvky, vždy protéká tranzistory jedné skupiny a diodami druhé skupiny. Proto k výkonovým ztrátám pěti paralelně zapojených tranzistorů se přičítají také výkonové ztráty pěti paralelně zapojených diod druhé skupiny aktivních prvků. Výkonové ztráty pro každou diodu se omezují maximálním možným úbytkem na nich. Při maximálním dovoleném proudu 50 A, a napětí na diodě 2 V maximální výkonové ztráty pro jednu diodu jsou 100 W. Tedy výsledné výkonové ztráty pro jeden tranzistor a jednu diodu jsou 288,7 W.

Pro pět paralelních tranzistorů a diod, celkové výkonové ztráty jsou $Q = 288,7 \cdot 5 = 1443$ W.

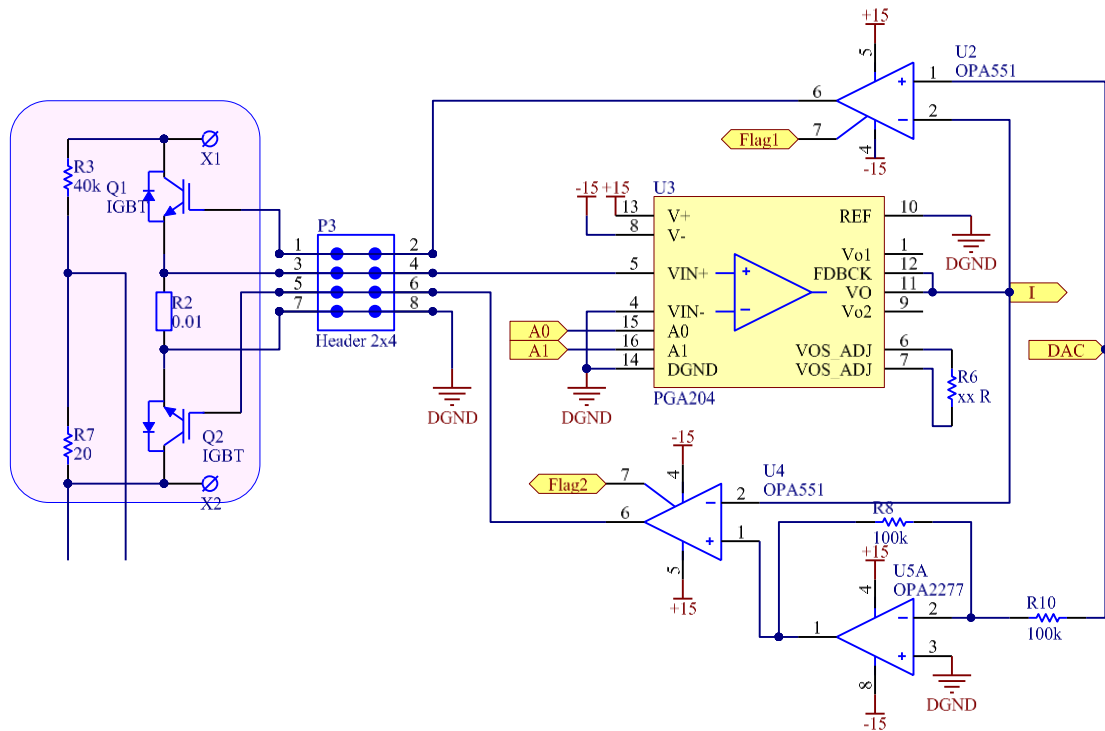
III.4. Zesilovací stupeň

Účelem zesilovacího stupně je poskytování potřebných úrovní napětí signálů pro přesné fungování obvodu. Jednou částí tohoto úkolu je zesílení napět'ových signálů do příslušných úrovní pro zpracování mikrokontrolérem. Druhým důležitým úkolem je zesílení řídicího signálu poskytnutého mikrokontrolérem na úrovni, postačující pro otevření výkonových tranzistoru na požadovanou hodnotu.

Protože tranzistory jsou externí součástky a nejsou součástí řídicí desky plošného spoje, na schématu je možné vidět konektory pro zapojení výkonových externích součástek. Na *Obr. III-3* a *Obr. III-4* jako P3 je označen konektor pro připojení řídicích signálů hradel a také spojovací body pro měření proudu přes zátěž. Na *Obr. III-4* je konektor od výrobce Wago Kontakttechnik, označený jako P7. Tento konektor slouží pro propojení výstupů napět'ového děliče se vstupem zesilovače pro další zpracování. Na schématech z obrázků *Obr. III-3* a *Obr. III-4* externími součástkami (na tmavším pozadí) jsou dvě skupiny IGBT, označené jako Q1 a Q2 a odpory R2, R3 a R7. R2 slouží pro měření proudu přes elektronickou zátěž, proto jeho hodnota musí být tak malá, aby neovlivňovala vážně parametry zátěže. Je samozřejmé, že přes tento odpor budou protékat zatěžovací proudy v plné hodnotě, proto jeho parametry to musí umožňovat. Vybrán je odpor RH-50 od výrobce Vishay Dale, který je dimenzován pro ztrátu 50 W. Při umístění odporu na chladiče vedle tranzistorových modulu jeho parametry jsou dostačující pro splnění funkce. R3 a R7 formují napět'ový dělič pro snímání napětí na zátěži, a jsou umístěné na samostatné desce plošných spojů.

a) Měření proudu elektronickou zátěží

Sledování zatěžovacího proudu, protékajícího přes elektronickou zátěž je realizováno pomocí sledování úbytku napětí na rezistoru s nízkou hodnotou $0,01 \Omega$, umístěným mezi skupinami tranzistorů. Proud, protékající aktivní zátěží mohou být ve velmi velkém rozsahu – od stovek mA do desítek A. Jestli by celý proudový pracovní rozsah elektronické zátěže byl předáván na vstup analogovo-číslicového převodníku, nejmenší hodnoty v rozsahu stovek mA by byli srovnatelné s kvantizační chybou převodníku. Proto aby se data mohly zpracovávat při řízení, chyby při digitalizaci signálu by neměli být srovnatelné s velikostí signálu. Při nízkých hodnotách proudu by byla výsledkem nepoužitelnost zařízení. Proto je signál zesílen operačním zesilovačem PGA204 s programovatelným ziskem, označeném na schématu jako U3 (*Obr. III-3*).



Obr. III-3 Zesílení řídicích napěťových signálů a proudu, protékajícího aktivní zátěží.

Zesilovač PGA204 je od výrobce Texas Instruments a je specifický svojí programovatelností a velkou přesností: CMRR 115 dB při zesílení 1000, napěťová nesymetrie 50 μV a napěťový drift 0,25 μV . Napájecí napětí pro zesilovač může být voleno od $\pm 4,5\text{ V}$ do $\pm 15\text{ V}$ a vstupní ochrana je schopná vydržet do $\pm 40\text{ V}$ na analogových vstupech. Zvolení hodnoty zesílení se provádí pomocí nastavení kombinací logických hodnot na vstupech A0 a A1 a je možné vybírat z hodnot 1, 10, 100 a 1000. Největší zesílení je použité pro hodnoty proudu v řadě desítek mA, nejnižší zesílení je vhodné pro hodnoty řady desítek A. Tak při maximálním dovoleném proudu 50 A na výstupu zesilovače je napětí 0,5 V a při nejnižším možném proudu – 10 mA, na výstupu zesilovače je 0,1 V. Odpor R6 slouží pro korekci výstupu a nemusí být osazován.

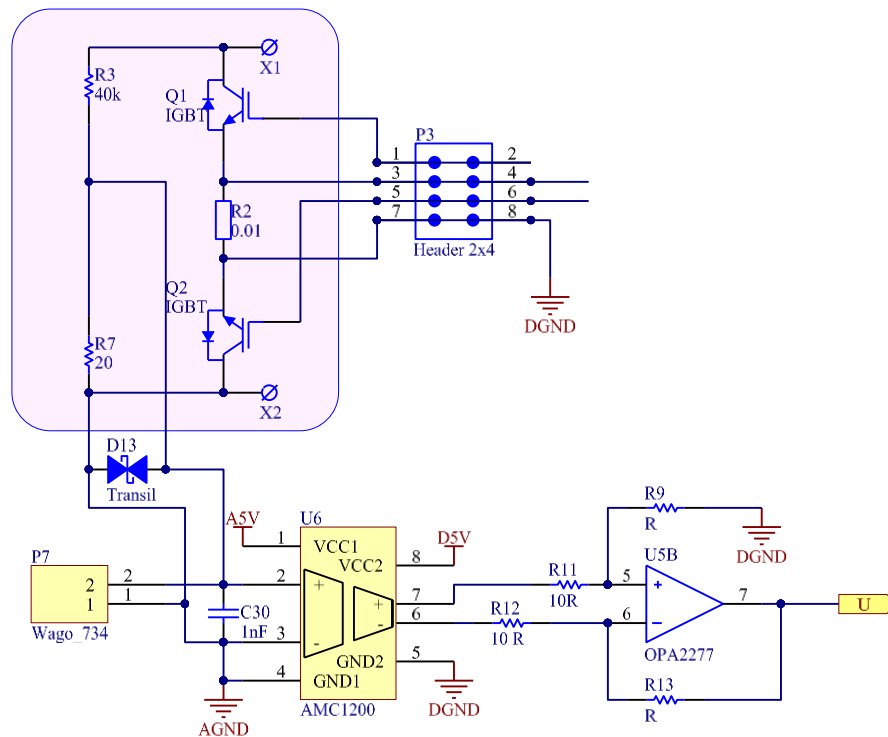
Namísto použití programovatelného zesilovače by mohlo být zvoleno například zesílení pomocí několika sad odporů ve zpětné vazbě zesilovače, mezi kterými by se přepínalo pomocí analogového multiplexoru. Tento způsob ale není zvolen kvůli větší komplikovanosti obvodu a většímu počtu součástek, potřebných pro realizaci. Tyto faktory by překáželi dosažení přesnosti na úrovni integrované součástky, která je odladěna výrobním procesem pro nejlepší parametry.

Jinou možností měření proudu přes aktivní zátěž je použití senzoru proudu jako například ACS750, který je založen na Hallovém senzoru. Tento typ senzoru ale má zavedený offset pro použití s analogovo-číslicovým převodníkem: při maximálním proudu jeho výstup má napětí rovnající se napájecímu napětí a při maximálním proudu opačné polarity výstupní napětí je nulové. Bohužel použití proudové sondy jako senzor ACS750 neumožňují měření proudu v tak velkém rozsahu jako navržený obvod.

b) Ovládání mírou otevření tranzistorů

Stupeň otevření tranzistorů a tím i odpor nebo napětí na výstupu aktivní zátěže se řídí pomocí nastavení příslušné hodnoty na výstupu mikrokontroléru, který je označen na *Obr. III-3* popiskem DAC. Operační zesilovače U2, U4 a U5A tvoří proudový regulátor, ovládající míru otevření výstupních tranzistorů. Signál od mikrokontroléru je jedním vstupem proudových regulátorů U4 a U2 a pro tranzistorovou skupinu, označenou jako Q2 se také invertuje pomocí zesilovače U5A. Bez zavádění ovládajícího signálu do tranzistorové skupiny s invertovaným zapojením, proud by protékal jenom inverzními diodami a tranzistory by byli vždy zavřené. Nadále invertování ovládajícího signálu je nutné kvůli zapojení hradla tranzistoru vůči referenčnímu bodu ovládajícího signálu (DGND) – hradlo tranzistorů má záporný potenciál. Napájení operačních zesilovačů poskytuje dostatečné výstupní napětí pro plné otevření výkonových tranzistorů. Důležitou vlastností je také zajištění dostatečné rychlosti otevření tranzistorů a proto je potřebné dodat do hradel tranzistorů proud patřičné hodnoty. Druhým vstupem proudového regulátoru je napětí odpovídající proudu přes zátěž, formující zpětnou vazbu poskytnutou od zesilovače U3. Pro operační zesilovače U2 a U4 jsou vybrány OPA551 od Texas Instruments. Jejich důležitou vlastností je vysoký výstupní proud – 200mA, nadále mají také termální ochranu, která se také indikuje na speciálním výstupu. Další výhodou tohoto operačního zesilovače je velká šířka pracovního pásma – 3 MHz, což umožňuje použití elektronické zátěži pro střídavé napětí a proudy ve vyšších kmitočtech. Pro doplňující zesilovač U5A je vybrán OPA2277 vyhovující hlavně díky širokému frekvenčnímu rozsahu a dobrému potlačení šumu.

c) Měření napětí na elektronické zátěži



Obr. III-4 Měření napětí na výstupních tranzistorech

Měření napětí na svorkách elektronické zátěže je nezbytné pro kompletní ovladatelnost zařízení a pro regulaci v režimech konstantního napětí, výkonu a odporu – umožňuje se sledování průběhu zatížení a správnost jeho funkčnosti – správný přenos požadavků a reakce zátěže při provozu. Pro měření napětí na zátěži je použit napět'ový dělič, který předává jenom zlomek celého napětí pro další zpracování. Dimenze napět'ového děliče je v souladu s požadavky pro vstupní napětí operačního zesilovače, kterým se zpracovává signál. Pro tento účel je použit operační zesilovač s vnitřním galvanickým oddělením mezi vstupem a výstupem model AMC1200 od firmy Texas Instruments. Požadavek pro vstupní signál do operačního zesilovače je, aby její hodnota byla v rozmezí ± 250 mV.

Pro snímací odpor R2 zem řídicího obvodu je zapojena na jednom z jeho vývodu, a za kolektorem tranzistorů Q2 je zapojena zem pro napět'ový dělič. Při regulaci napětí na tranzistorové skupině Q1, na tranzistorové skupině Q2 bude úbytek napětí minimálně 3,3 V – napětí nutné pro otevření tranzistoru. Při regulaci tranzistorů Q2 mezi dvěma zemními body by byl napět'ový rozdíl úbytku na tranzistoru a úbytku na snímacím odporu. Při galvanickém spojení těchto dvou bodů mezi nimi by byl potenciál do stovek při regulaci napětí na tranzistoru Q2. Při použití operačního zesilovače s galvanickým oddělením vstupu a výstupu, potenciál kolektoru tranzistoru Q2 a referenčního bodu pro napět'ový dělič získává plovoucí

charakter vůči zemi ostatní části řídicího obvodu. Pomocí galvanicky odlišných referenčních potenciálů, použitých pro snímací odpor a napěťový dělič jsou odstraněny neshody v potenciálech těchto bodů. Galvanické oddělení mezi vstupem a výstupem je nutné také kvůli bezpečnostním důvodům. Přímé propojení mezi zatěžovaným zařízením a ovládacími prvky elektronické zátěže by mohlo způsobit poškození řídicích obvodů a v nejhorším případě dokonce fyzicky uraz uživateli, pracujícího s elektronickou zátěží.

Druhým stupněm zesílení je skutečné zesílení signálu, které je provedeno pomocí operačního zesilovače pro obecné použití OPA2277. Tento zesilovač už byl zmíněn při popisu měření proudu elektronickou zátěží a kromě jeho výborných parametrů, vyhovujících plně pro dané funkce jeho doplňující výhodou je provedení dvou zesilovače v jednom pouzdře.

III.5. Regulační schéma

Regulační schéma je část celého zařízení, která se stará o zpracování dat z měřících modulů, regulování výstupu na odpovídající hodnoty dle požadavků ze vstupu, poskytování zpětné vazby pro uživatele ve formě zobrazení dat na LCD displeji a také o komunikaci zařízení – jak interní tak i s vnějšími přístroji, jako PC. Tímto způsobem regulační obvod zahrnuje v sobě řízení nejdůležitějších funkcí celé aktivní zátěži. Dále budou popsány všechny funkce, splněné regulačním modulem zařízení.

a) Mikrokontrolér

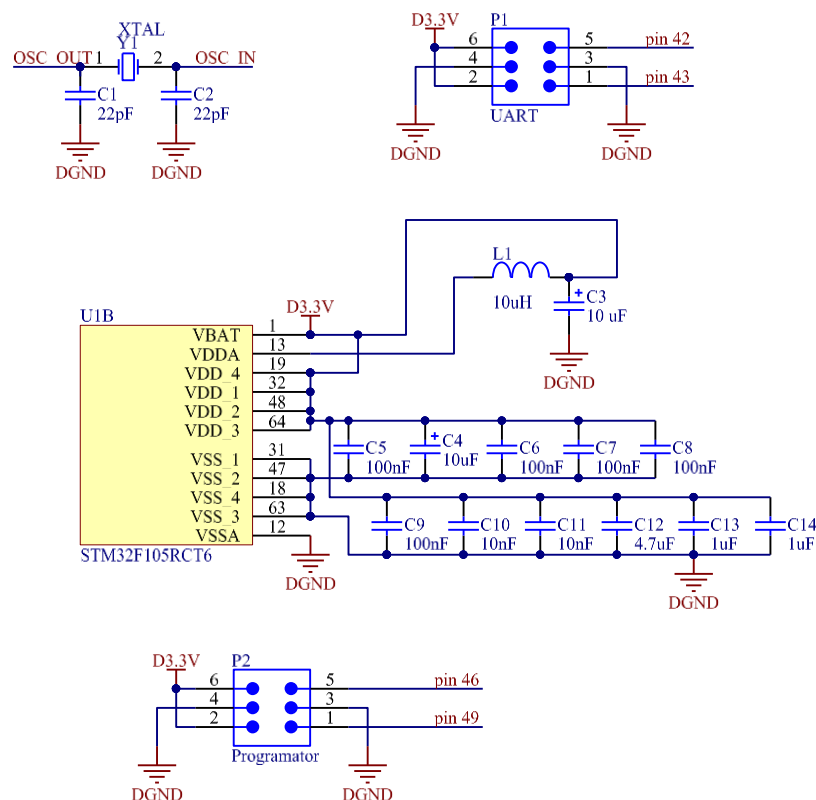
Řízení základních funkcí navrženého zařízení je ovládáno mikrokontrolérem společnosti STMicroelectronics řady STM32F105. Mikrokontroléry této řady jsou zaměřené na použití v aplikacích s náročnější komunikací. Je to 32bitový mikrokontrolér založený na ARM architektuře, řady Cortex-M3 s jádrem RISC. V nabízené funkcionalitě mikrokontroléru je I²C, SPI, I2S, USART, USB OTG FS a CAN. Vybraný model má 256 KB Flash paměti a 64 KB RAM paměti. Výhodou je také, že součástí čipu jsou zároveň AD a DA převodníky, jelikož je to důležité pro konkrétní použití.

Tento mikroprocesor byl vybrán hlavně kvůli zkušenosti s řadou STM32 v průběhu navazujícího studia a pokročilým použitím v modernějších aplikacích. Pro splnění požadavků v navrženém zařízení by mohl být využit i méně výkonný mikrokontrolér jiného výrobce, avšak při programování by se museli využívat prostředky, se kterými jsem neměla zkušenost. Navíc po návštěvě v sídlišti společnosti STMicroelectronics v Praze každému studentovi nabídli vývojový přípravek, který velmi usnadnil vývojový proces programu a může být použit také jako programátor.

Mikrokontrolér přijímá signály označené na *Obr. III-3* a *Obr. III-4* jako I a U – to jsou analogové signály, které nesou informace o proudu a napětí na zátěži. Na *Obr. III-3* je signál DAC, který zavádí požadovanou hodnotu proudu do regulační smyčky a je výstupem z mikrokontroléru. Nadále jsou na těchto obrázcích signály pro zadání zisku operačního zesilovače U3 (A0 a A1), a signály indikující o teplotním vypnutí operačních zesilovačů U2 a U4, označené jako Flag1 a Flag2.

Standardními přídatnými součástkami pro normální funkce mikrokontroléru jsou konektor na programování, oscilační krystal a odrušovací kondenzátory. Pro dosažení přesnějšího časování je nutné použití oscilačního krystalu, který pro konkrétní aplikaci je vybrán s pracovním kmitočtem 8 MHz. Konektor na programování se zapojuje dle doporučení v technické dokumentaci mikrokontroléru, stejně jako oscilační krystal.

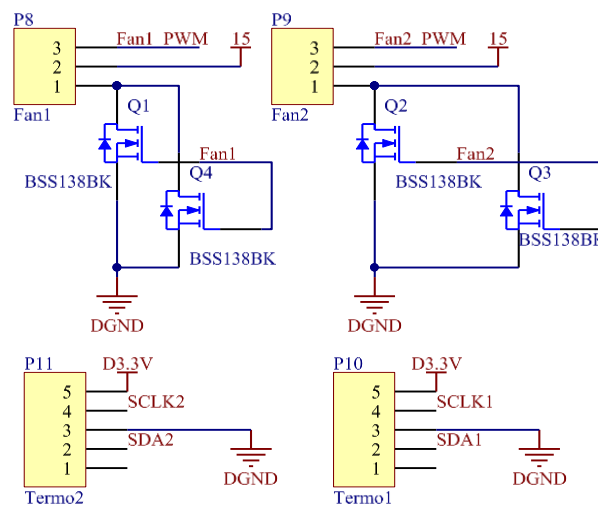
Je nutné podotknout, že mikrokontrolér má speciální vstup pro analogové napájení, který se používá hlavně pro analogovo-číslicový převodník. V_{DDA} a V_{SSA} jsou použity jako základ pro zpracování s použitím referenčního napětí na vstupech V_{REF+} a V_{REF-} . Pro navrženou aktivní zátěž není nutné použití referenčního napětí, proto vstupy V_{DDA} a V_{SSA} mohou být spojené s ostatními napájecími vstupy. Pro ochranu proti rušivým vlivům jsou použity odrušovací kondenzátory a LC filtr. Na *Obr. III-5* jsou demonstrovány zapojení filtrů pro napájecí napětí, oscilačního krystalu a konektorů na programování a komunikaci s blokem „Ovládání“.



Obr. III-5 Doplnující obvody pro mikrokontrolér.

b) Ovládání ventilátorů

Pro dostatečné tepelné ztráty a lepší výkon zařízení, je vhodné použití ventilátorů pro snížení teploty chladičů. Použité jsou ventilátory od výrobce NMB s průtokem vzduchu $3,07 \text{ m}^3/\text{min}$ a rychlosti 2950 min^{-1} . Elektrické požadavky jsou 12 V stejnosměrné napájecí napětí a spotřebovaný proud je $0,72 \text{ A}$. Ventilátory se standardně ovládají pulzně-modulovaným signálem, který přímo kontroluje otáčky. Proto pro propojení ventilátoru s ovládajícími signály jsou ve schématu použité konektory P8 a P9 (*Obr. III-6*). Na pinu 3 těchto konektorů jsou podávány pulzně modulované signály přímo od PWM bloku mikrokontroléru a pin 1 slouží pro ovládání zapnutí ventilátorů.



Obr. III-6 Konektory pro ovládání ventilátorů a teplotních čidel

c) Teplotní senzory

Pro kontrolu teploty chladičů, nutnosti zapnutí ventilátorů nebo pro zamezení přehřátí tranzistorů a externích rezistorů je nezbytné sledovat teplotu těchto součástek. K tomu účelu jsou použité teplotní čidla TC74 s rozsahem $0 \div 125 \text{ }^\circ\text{C}$ a sériovým přístupem od Microchip. Komunikace s tímto senzorem je realizovaná pomocí pouze 2 spojů: pro časování a přenos dat. Napájecí napětí může být v rozsahu $2,7 \div 5,5 \text{ V}$ a spotřeba je typický $200 \mu\text{A}$ a v stavu spánku $5 \mu\text{A}$. Umístění teplotních senzorů musí být v bezprostřední blízkosti nejvíce výkonově a tepelně namáhaných součástek. Proto je vhodnější umístit senzory na nejvíce vzdálený od ventilátorů konec chladiče. Na *Obr. III-6* konektory P10 a P11 jsou určeny k zapojení teplotních čidel.

III.6. Komunikace po rozhraní USB

Jedním z bodů v zadání je galvanicky oddělené řízení po sběrnici UART nebo I²C. Pro splnění komunikačních požadavků je použito rozhraní USB, které je také asynchronní, ale má komplikovanější strukturu a je mnohem více rozšířené v dnešní době. Komunikace s počítačem je realizovaná pomocí dvou stupňů zpracování dat v aktivní zátěži. První stupeň je příjem dat od počítače a jejich zpracování, což je splněno pomocí bloku „Ovládání“ v blokovém schématu, který je také označen jako „LCD Komunikace“. Druhý doplňující název zahrnuje v sobě prakticky nejdůležitější funkce tohoto bloku. Celý tento blok je samostatná deska plošných spojů a bude popsán v následující kapitole. Pro popisu komunikaci je důležité, že tento blok realizuje konkrétně komunikaci po rozhraní USB a dál předává data mikrokontroléru řídicího bloku po rozhraní UART. Proto na desce plošných spojů, realizující funkce bloku „Řízení“ je pouze konektor pro UART a ani galvanické oddělení komunikace není zajištěno na této desce. Důvodem pro takový způsob návrhu je mechanická konstrukce celého zařízení. Pro pohodlné pracovní se zařízením je vhodné umístit LCD, ovládací prvky (tlačítka a rotační enkodér) a konektor USB na čelní straně mechanické konstrukci zařízení (*Obr. III-7*), když řídicí desku plošných spojů je vhodnější umístit co nejbliž k tranzistorům pro nejmenší rušení a ztrátu signálů. Společně se také zjednodušuje realizace galvanického oddělení výkonového sekce od částí, které přichází do kontaktu s uživatelem. Konektor, pomocí kterého se propojují obě desky, je na *Obr. III-5* a je označen jako P1.



Obr. III-7 Vzhled na čelní stranu přístroje

III.7. Ovládací blok

Ovládací blok je určen pro zpracování ovládacích příkazů přicházejících po sběrnici od počítače nebo od pultu ručního zadání parametrů. Tento blok splňuje funkce:

- zobrazení na displeji současných stavů parametrů aktivní zátěže,
- zpracování a předání požadovaných výstupních parametrů do řídicího bloku
- zajištění galvanického oddělení výkonových spojů od komunikačních prvků

Splnění těchto funkcí je založeno na mikrokontroléru stejného modelu jako v už popsaném řídicím bloku – STM32F105. Jak už bylo popsáno, výhodou tohoto mikrokontroléru jsou jeho komunikační možnosti včetně rozhraní USB. Další výhodou použití druhého mikrokontroléru pro řízení ovládacích prvků je snížení komplikovanosti desky plošných spojů snížením počtu použitých vývodů mikrokontroléru. Pro zapojení vybraného displeje je potřeba 20 volných vývodů na mikrokontroléru a kromě velkých obtíží, které by to způsobilo, komplikovanější by bylo současně i řešení galvanické izolace displeje. Kromě zmíněných součástí na čelním krytu zařízení je také umístěn konektor pro USB spojení a RGB LED, která slouží pro indikaci různých stavů elektronické zátěže.

a) Galvanická bariera

Další součástka, použitá v tomto bloku je ISO7221B – dvoukanálový číslicový izolátor, který zajišťuje galvanickou bariéru mezi řídicí deskou plošných spojů a ovládacími prvky. Výhodou je, že izolátor zpracovává číslicové signály a to znamená, že není potřebné převádět signály na určité úrovně. Na každé straně bariéry je jeden vstup a jeden výstup a to jí určuje pro použití přesně v podobných aplikacích – pro zajištění galvanického oddělení na sběrnicích.

b) Displej

Pro zobrazení parametrů výstupu a také jejich nastavení součástí aktivní zátěži je grafický LCD s maticí 128 x 64 bodů. Napájecí napětí pro displej by mělo být v rozmezí 4,5 ÷ 5,5 V. Grafický displej je s vestaveným podsvícením, proto není potřebné rozhodovat o přídavném podsvícení. Důvodem pro výběr grafického displeje je pohodlí jeho použití pro konkrétní případ: při zadání výstupních parametrů je možné vykreslit pro každé tlačítko vedle jeho pozice specifický znak nebo jiné označení, které pomůže s orientací a umožní pohodlné

ovládání. Jiný návrh, který lze umožnit pomocí grafického displeje je grafické menu, které by mohlo být také ovládáno tlačítky vedle zobrazovací jednotky.

c) Ovládací prvky

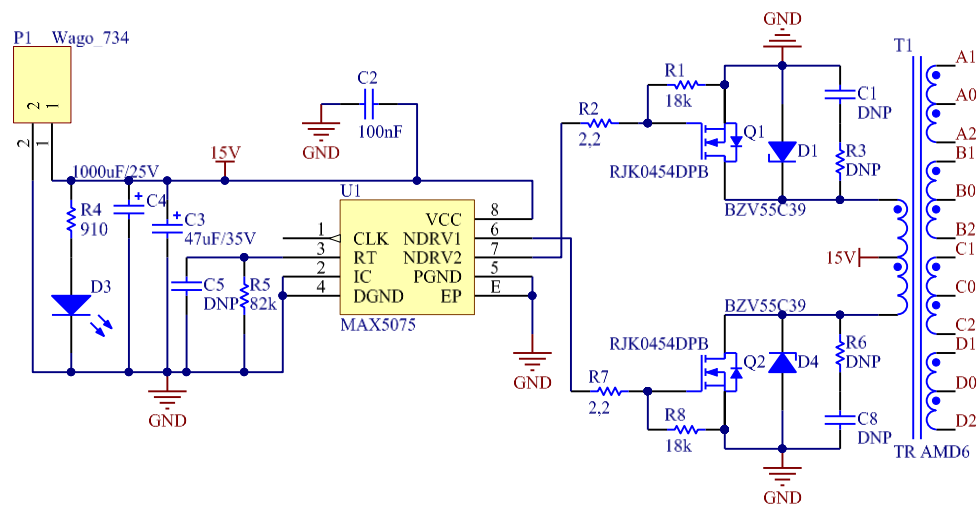
Jak ukazuje název celého bloku jednou z jeho nejvýznamnějších funkcí je ovládání a zadání výstupních parametrů aktivní zátěži uživatelem buď pomocí ovládacích prvků na samotném zařízení, anebo pomocí počítače. Ovládací prvky, použité při návrhu aktivní zátěže, jsou 4 spínače, 1 přepínač a rotační kodér. Spínače jsou určeny pro ovládání a přepínání mezi položkami menu programu ovládání. Rotační kodér je určen pro zadávání požadovaných hodnot výstupních veličin. Přepínač je vhodný pro přepínání mezi ručním ovládáním a zadáváním parametrů pomocí počítače.

III.8. Napájecí blok

Napájení každé části a dodání potřebné energie pro zajištění funkčnosti každé součástky je nezbytnou částí každého elektronického zařízení. Kromě poskytování potřebné energie pro součástky na napájení se kladou také další důležité požadavky jako zajištění všech potřebných napájecích úrovní pro součástky s různými požadavky, omezení nestability napájecího napětí, ochrana celého zařízení od nežádoucích vlivů ze sítě, zajištění filtrace od samotného napájecího zdroje atd. Díky realizaci jako samostatné desky plošných spojů napájecí blok v navržené aktivní zátěži může zcela splňovat kladené na něj požadavky.

Je možné říct, že napájení aktivní zátěže je navrženo ve dvou stupních: první jeho část je standardní napájecí blok (Mean Well RS-15-12), zakoupený v obchodě s elektronickými součástkami, který ze vstupního napětí 230 V střídavých poskytuje 15 V stejnosměrného napětí na výstupu. Použití takového napájecího bloku zjednodušuje celkové navržené schéma, tento blok také nabízí na svém výstupu výborné parametry vzhledem k nízké ceně a malým rozměrům. Nadále ale je nutné poskytnout napájení pro dvě různé desky plošných spojů, tři úrovně napětí a dva logicky odlišné obvody: analogový a číslicový. Tři odlišné úrovně napájecího napětí jsou vyžadovány kvůli různým součástkám, použitých v rozsahu celého zařízení: obecné operační zesilovače potřebují napájení ± 15 V, operační zesilovač s galvanickým oddělením vstupu a výstupu je napájen od „analogových“ 5 V na vstupu řídicí části tj. analogové předzpracování signálu a „číslicových“ 5 V na výstupním obvodu. LCD a USB rozhraní potřebují také 5 V a mikrokontroléry, použité na obou deskách jsou napájené od 3,3 V. Rozdělení na „analogové“ a „číslicové“ napájení je nutné, protože je důležité, aby každá strana zesilovače s galvanickou bariérou měla samostatné, galvanicky nespojené napájení. Získání takového množství samostatných napájecích napětí od jednoho zdroje energie je nejnáze dosaženo pomocí transformátoru s několika výstupy. Použitím transformátorů pro oddělení samostatných napájecích obvodu zároveň se řeší požadavek na galvanické oddělení mezi nimi. Pro to, aby se mohl použít transformátor ale je nutné z výstupního stejnosměrného napětí od zakoupeného zdroje udělat střídavé. K tomuto účelu slouží obvod z *Obr. III-8*.

a) Návrh push-pull měniče



Obr. III-8 Oscilační obvod napájecího schématu.

Integrovaný push-pull driver MAX5075 je určen pro řízení dvou MOSFET tranzistorů na výstupu dle nastaveného kmitočtu. Schéma již obsahuje interní oscilátor s nastavitelnou frekvencí mezi 50 kHz a 1,5 MHz. Výběr frekvence oscilování je možné nastavit pomocí externího hodinového signálu nebo pomocí jednoho vnějšího rezistoru (R5), který určuje výběr mezi interními hodnotami oscilátoru. Zapojení celé primární strany transformátoru je navrženo v souladu s doporučením v dokumentaci k MAX5075. Hodnota rezistoru R5 pro požadovanou frekvenci je vypočtená dle vzorce:

$$R = \frac{10^{12}}{32 \cdot f} = \frac{10^{12}}{32 \cdot 250 \cdot 10^3} = 125 \text{ k}\Omega \quad (\text{III.8.1})$$

Tranzistory Q1 a Q2 musí vydržet dvojnásobek vstupního napětí s rezervou – minimálně 40 V a špičkovým proudem od 20 A. Na základě těchto požadavků je vybrán tranzistor RJK0454 od výrobce Renesas, který je snadno dostupný, má nejrychlejší spínací reakci (ve srovnání s konkurencí ve stejné cenové hladině) – $t_r=5,2 \text{ ns}$, $t_f=6,5 \text{ ns}$ a nejnižší odpor kanálu $R_{DS(on)}=3,9 \text{ m}\Omega$.

b) Výpočet transformátoru

Zvláštností ale zároveň i předností transformátoru je jeho konstrukce – použit je planární transformátor. Planární transformátor je objemově mnohem menší, lehčí, nabízí větší přesnost nejenom rozměrů ale i dosažených hodnot každého vinutí, efektivnější chlazení, menší ztráty v každém vinutí díky nižšímu profilu ale hlavní jeho výhodou je přesná opakovatelnost. Transformátor pro danou aplikaci má 4 výstupy každý, ze kterých je s vyvedeným středním bodem. Taková architektura je vhodnější díky úspoře výstupních usměrňovacích diod a tím zmenšení celkové zástavby zdroje.

Požadované vlastnosti transformátoru:

- Vstupní napětí 15 V;
- Spínací frekvence 250 kHz;
- Celkový výstupní proud 2 A;
- Výstupní vinutí 4x ±15 V;

Výpočet transformátoru je založen na jádře PE 32/20/6 typu E od výrobce Kesckhe z materiálu K 2008. Tohle jádro je navrženo pro použití jak v tradičních transformátorech, tak i pro planární transformátory. Na základě parametrů jádra a jeho materiálu z technických listů a také parametrů mědi, použité obecně pro plošné spoje, jsou dále popsány kroky návrhu transformátoru.

Pro výpočet závitu na primární straně transformátoru je nutné nejdřív spočítat primární indukčnost a pro to je použita rovnice II.8.2:

$$L = \frac{U_{I_{max}} \cdot \delta}{\Delta I \cdot f} = \frac{16 \cdot 0,45}{1 \cdot 250 \cdot 10^3} = 0,03 \text{ mH} \quad (\text{III.8.2})$$

kde δ je činitel využití nebo doba sepnutí transformátoru a je vyjádřen jako poměrná hodnota.

Počet závitů na primární straně je závislý na maximálně dovolené magnetické indukci ΔB , indukčnosti L , dovoleném zvlnění proudu ΔI a efektivním magnetickým průřezem A_e (uveden v technické dokumentaci jádra):

$$N_1 = \frac{L \cdot \Delta I}{\Delta B \cdot A_e} = \frac{15 \cdot 2 \cdot 10^{-6}}{200 \cdot 10^{-3} \cdot 129 \cdot 10^{-6}} = 1,05 \quad (\text{III.8.3})$$

Proti přesycení jádra je nutné provést korekci spočítaných počtů závitů dle teplotní závislosti permeability jádra μ_r :

$$N'_1 = \sqrt{\frac{L \cdot l}{\mu_{rmin} \cdot 4\pi \cdot A_e}} = \frac{0,03 \cdot 10^{-3} \cdot 41,8 \cdot 10^{-3}}{1500 \cdot 129 \cdot 10^{-6} \cdot 4 \cdot \pi} = 2,15 \quad (\text{III.8.4})$$

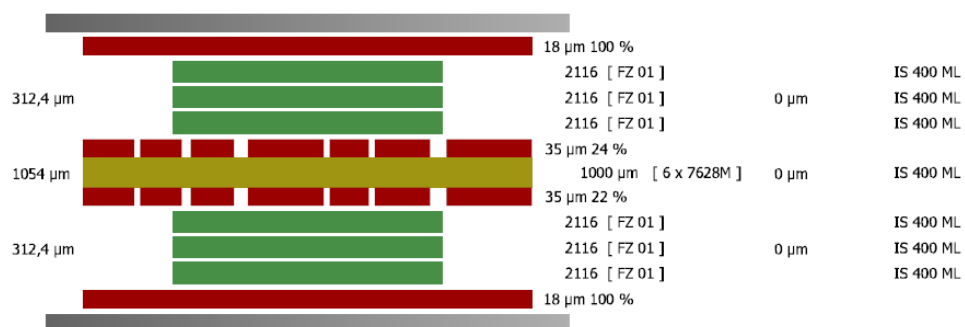
Počet závitů se zaokrouhluje na celé číslo nahoru, takže výsledný počet závitů pro realizaci je 3. Počet výstupních závitů se rovná počtu závitů na primární straně, protože požadovaný převod je 1, tj. $N_2 = 3$.

Dále je nutné spočítat maximální proud, který může protékat primárním vinutím.

$$I_{max} = I_o \frac{N_2}{N_1} + \Delta I_{tmin} = 2 \frac{3}{3} + 0,55 = 3,22 \text{ A} \quad (\text{III.8.5})$$

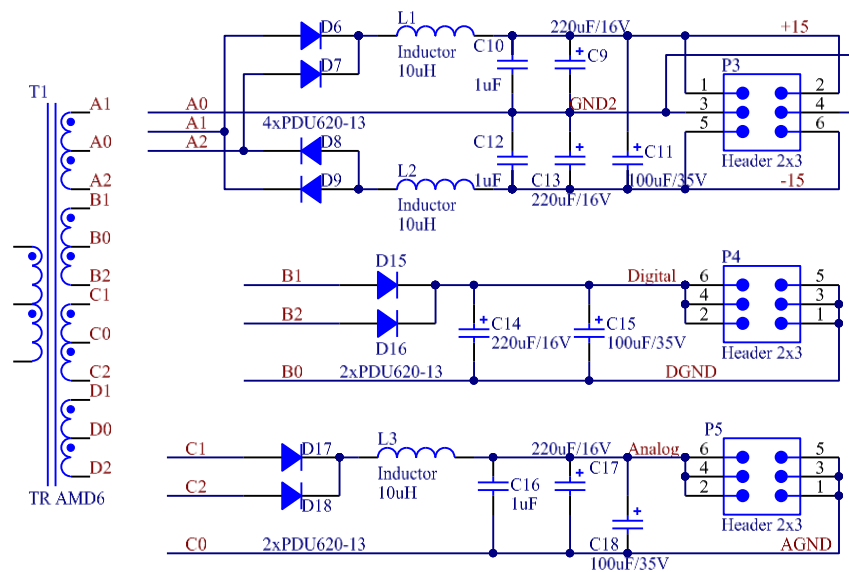
Rozložení vrstev a tloušťky použité mědi pro 2 vinutí jsou patrné z *Obr. III-9*. Použité jsou 4 vrstvy, celková nominální tloušťka každé DPS je 1,8 mm. Pro zjištění vlivu skin efektu se vypočítává hloubka vniku, ukazující vzdálenost, na které intenzita proudu je o $1/e$ ($\approx 37\%$) nižší. Hloubka vniku pro měděný vodič se počítá dle vzorce III.8.5:

$$\delta = \frac{75}{\sqrt{f}} = \frac{75}{\sqrt{250 \cdot 10^3}} = 0,15 \text{ m} \quad (\text{III.8.5})$$



Obr. III-9 Rozložení mědi a tloušťka vrstev pro každé vinutí.

c) Návrh sekundární strany

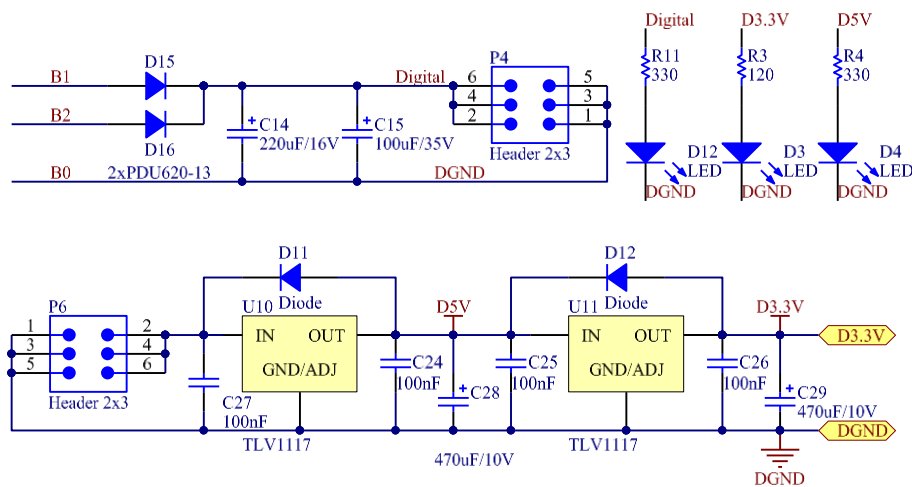


Obr. III-10 Usměrňovací obvody.

Za transformátorem se signál zpracovává jako pro vše zdroje stejnosměrného napájení – nejdřív je usměrněn, po té je signál odfiltrován a doregulován na požadovanou úroveň. Na desce, určenou pro napájení je signál zpracován jenom do bodu prvního filtrování, protože takovým způsobem je vhodnější přenášet napájení ke každé desce. Na *Obr. III-10* jsou obvody napájení na straně napájecí desky plošných spojů jmenovitě: ± 15 V se vstupy od transformátoru A0÷A2, číslicových +5 V se vstupy B0÷B2 a analogových +5 V se vstupy C0÷C2. Obvod se vstupem od transformátoru D0÷D2 není ukázán na obrázku, protože je úplně analogický druhému obvodu se vstupy B0÷B2 a je určen pro poskytování 5 V pro ovládací desku. Jak už bylo zmíněno ± 15 V jsou určené pro napájení operačních zesilovačů a ventilátorů z bloku „Řízení“. Napájení, operačního zesilovače s galvanickým oddělením AMC1200 a LCD je zajištěno od 5 V s následujícím regulováním do 3,3 V pro napájení mikrokontrolérů, teplotních čidel, komunikačních linek a ovládacích spínačů.

Kompletní napájecí obvod pro mikrokontrolér je na *Obr. III-11*. Obvod, skládající se z diod D15 a D16, kondenzátorů C14 a C15 a konektoru P4 je realizován na desce „Napájení“. Vstupní napětí na vodičích B0 až B2 se dodává od transformátoru. Dále obvod pokračuje na straně desky „Řízení“ druhým obvodem z obrázku. Na této straně se napájecí napětí nejdřív reguluje na úroveň 5V pomocí regulátoru TLV117-5V a doplňujících ho kondenzátorů C24, C27 a C28. Diody D11 a D12 slouží k ochraně stabilizátorů proti zpětnému napětí např. z programátoru mikrokontroléru. Za kondenzátorem C28 dostáváme

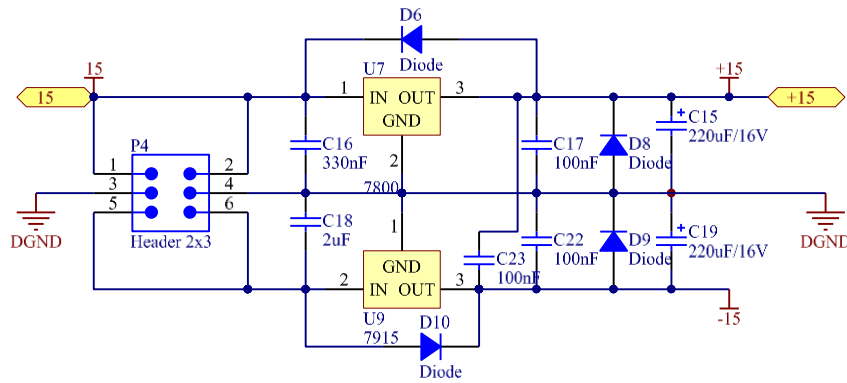
první výstupní napájecí napětí – 5 V, které slouží pro napájení části součástek ze schématu. Poté následuje ještě jeden stupeň regulace – na 3,3 V pro napájení mikrokontroléru, teplotních čidel atd. Tento regulační obvod se skládá ze součástek C25, C26, C29, D12 a TLV117-3V3. Pro obě úrovně napájecího napětí je použit regulátor TLV117 od Texas Instruments, který má konfigurace pro různé výstupní napětí a mezi ně patří i 5 V a 3,3 V. Tento regulátor je typu LDO a další jeho výhodou je zvětšený výkon ve srovnání s řadou regulátorů 78Lxx, který je způsoben dokonalejší vnitřní konstrukcí. Proud vlastní spotřeby, který v klasických regulátorech teče do země, tento regulátor dodává do zátěže a tím zvyšuje účinnost až o 10%.



Obr. III-11 Napájecí obvod pro mikrokontrolér a další součástky na desce „Řízení“.

Pro každé napájecí napětí na každé desce plošných spojů jsou umístěné indikační LED pro vizuální kontrolu přítomnosti napájení obvodu. Na Obr. III-11 jsou LED pro obvod napájení mikrokontroléru: D12 a R11 jsou na desce „Napájení“ s obvodem D15, D16, C14, C15, P4 a D3, D4, R3 a R4 jsou na desce s obvodem regulátorů. Analogickým způsobem jsou zapojené LED ke každému napájecímu obvodu.

Napájení pro LCD a mikrokontrolér na desce „Ovládání“ je navrženo analogickým způsobem: protože LCD potřebuje napájecí napětí 5 V a mikrokontrolér – 3,3 V, obvod je navrženo také ve dvou stupních – jako z Obr. III-11. Dalším podobným napájecím obvodem je napájení pro analogovou část, které se liší od tohoto napájecího obvodu jednodušším schématem – je nutný pouze jeden regulátor na napětí 5 V.



Obr. III-12 Napájecí obvod pro +15 V a -15 V.

Na *Obr. III-12* je obvod zajišťující napájecí napětí s úrovněmi +15 V a -15 V na straně řídicí desky. Použité regulátory jsou MC7815 a MC7915 od ON Semiconductor s pevným výstupem, výstupním proudem do 1 A a integrovanou ochranou proti přehřátí. Zapojení je v souladu s typickými požadavky v dokumentaci použitých regulátorů.

III.9. Návrh desek plošných spojů

Vhodný návrh desek plošných spojů (DPS) je kritický pro bezchybný a korektní provoz každého zařízení. Pro zlepšení odolnosti proti šumu kromě vyhovujícího návrhu schématu je vhodné použít také určité techniky – volba umístění součástek, protažení plošných spojů, použití stínících pomůcek atd. Důležité jsou také konstrukční úpravy, ale o nich bude zmíněno v odstavci, zabývajícím se konstrukcí zařízení. Koncepcí navrženého zařízení rozděluje celkové schéma na tři logické bloky každý, ze kterých je reprezentován samostatnou DPS. V tomto odstavci budou vysvětlené hlavní principy, které ovlivnily návrh desek plošných spojů. Ilustrace navržených DPS jsou umístěné v příloze.

a) Napájecí DPS

Napájecí DPS, jak už bylo zmíněno, musí zajistit 4 odlišné výstupní napětí, které se na dalších deskách regulují na příslušné napájecí úrovně. Zřejmou podmínkou je galvanické oddělení mezi obvody. Největší součástkou je planární transformátor, umístěný v centru desky. Doleva od něj je primární obvod a doprava – sekundární. Pro sekundární obvod je patrné rozdělení na 4 výstupy s galvanickou bariérou mezi obvody, která je dodržena minimálně 2mm. Na primární straně je zajímavější pouze symetrické umístění tranzistorů a souvisejících součástek a použití propojovacích otvorů v rozlité zemi. Také pro zkrácení délky

vodičů součástky, které patří střídavé části obvodu, jsou umístěné nejbliž k vývodům transformátoru.

b) Řídicí DPS

Při návrhu řídicí DPS bylo nutné splnit konstrukční a elektrické požadavky pro umístění součástek, provedení spojů, vyhovět požadavkům na odolnost šumu atd. Konektor P3 slouží pro zapojení výstupních skupin tranzistorů a externích rezistorů a je logickým vstupem desky. Výstupní signál od konektoru je zpracováván následně operačními zesilovače U3 a U6 (nacházející se ve vrchní vrstvě), proto jsou umístěné co nejbliž ke konektoru. Ve spodní vrstvě nejbližší součástky ke konektoru P3 jsou operační zesilovače U2 a U4, které poskytují výstupní signál do tranzistorových skupin pomocí tohoto konektoru. Nadále napájecí obvody pro operační zesilovače jsou umístěné co nejbliž k nim: pro operační zesilovače U2, U3 a U4 obvod pro napájení ± 15 V je tvořen se vstupem od konektoru P4 a nejdůležitějšími součástkami jsou regulátory U7 a U9. Pro U6 napájecí obvody jsou umístěné nejbliž k operačnímu zesilovači: analogové napájení 5 V se vstupem od konektoru P5 a číslicové napájení výstupní části se vstupem od konektoru P6. Vstupní signály od tranzistorových skupin jsou zpracovány a přeneseny do mikrokontroléru. Na druhém konci DPS v bezprostřední blízkosti mikrokontroléru jsou umístěné konektory na zapojení teplotních čidel, ventilátorů, pro programování a komunikaci s ovládací DPS. Co nejbliž k mikrokontroléru jsou umístěné také odrušovací kondenzátory, oscilační krystal a LC filtr. Kolem konektoru P5 je vytvořená zóna, která je galvanický oddělená od ostatních spojů. Pro zkrácení cest rušivých proudů v návrhu této desky je také použité propojení zemních vrstev.

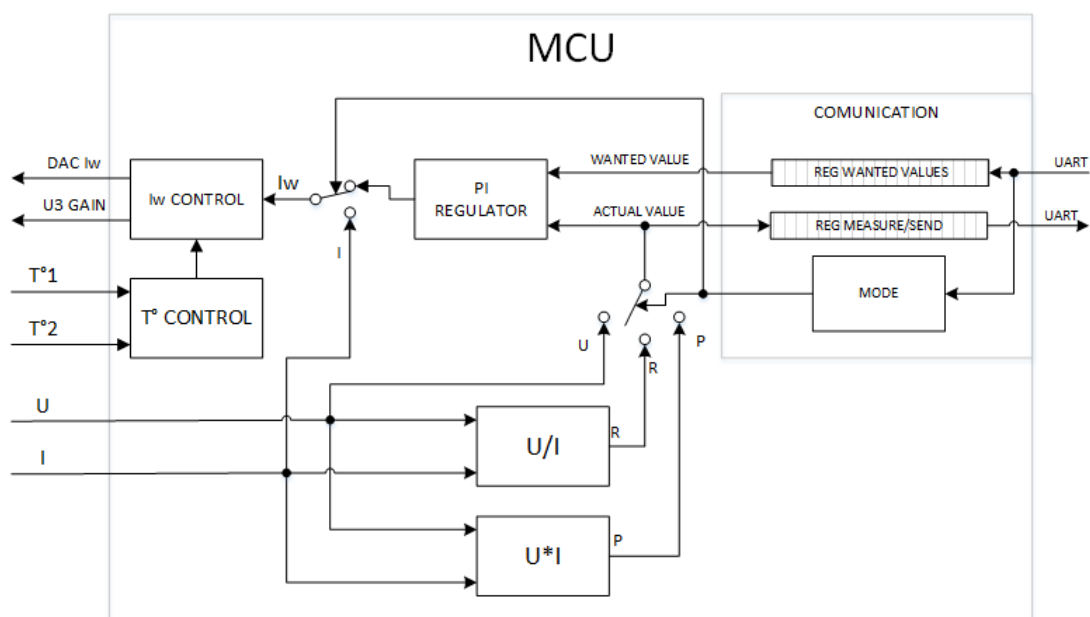
c) Ovládací DPS

Ovládací deska plošných spojů kromě elektronické funkce musí splnit také konstrukční funkci pro umístění spínačů, USB konektorů a displeje. Proto její rozměry jsou v souladu s těmito účely. Na této desce je pozoruhodné zapojení konektoru pro komunikaci s řídicí deskou, který musí být galvanický oddělený kvůli odlišným potenciálům mezi deskami.

III.10. Programové vybavení

Programové vybavení je prostředkem mezi uživatelem, pracujícím s aktivní zátěží a výslednou reakcí a nastavením výstupu. Úkolem programu je převést vstupní požadavky na výstupní parametry. Program musí zajistit správnou inicializaci periférií mikrokontroléru, nastavení správných hodnot na jeho požadovaných výstupech, převést analogové hodnoty na číslkové a zpětně, poslat určité data pomocí komunikačních protokolů, zabezpečit zobrazení příslušných dat na displeje atd.

Po zapnutí zařízení program nejdříve inicializuje potřebné výstupy a vnitřní strukturu mikrokontroléru. Po té je zařízení ovladatelné - pomocí ovládacích prvků na čelním panelu nebo přes připojení k počítači pomocí sběrnici USB. Po zadání požadovaných výstupních hodnot a pracovního režimu jsou tyto hodnoty převedené na hodnoty, které se přenášejí ke každé z výstupních tranzistorových skupin. Pro každý pracovní režim v programu je větev s regulací, kde pro každý režim se sledují a regulují související parametry. Pro režim konstantního napětí se sleduje napětí na výstupu a v souvislosti s jeho změnami se doreguluje otevření tranzistorů nastavením hodnoty napětí na hradle. Při konstantním výstupním proudu v regulační smyčce se zúčastňuje hodnota výstupního proudu a kromě nastavení otevření tranzistorů je nutné nastavit také zesílení operačního zesilovače (U3), poskytujícího zpětně informace o proudu zátěží. Režimy konstantního výkonu a odporu vyžadují, aby se sledovaly obě tyto hodnoty – i proudu i napětí. Na *Obr. III-13* je zjednodušený diagram programu, kde jsou ilustrované nejdůležitější závislosti a procesy.

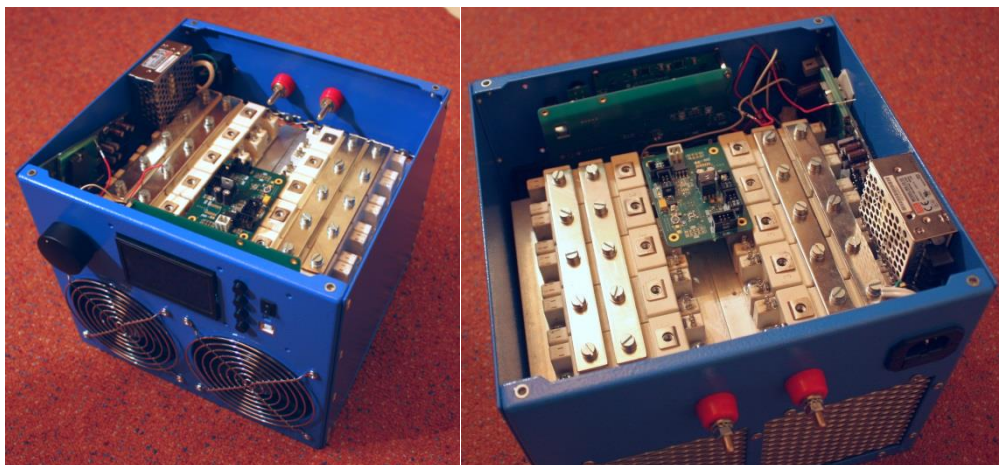


Obr. III-13 Principiální schéma programu

Nezbytnou součástí činnosti zařízení v jakémkoliv pracovním režimu je sledování teplotních parametru na výstupu. Proto zpracování dat z teplotních čidel má nejvyšší prioritu a může dokonce ovlivnit uzavření výstupních tranzistorů, aby se zabránilo tepelnému poškození součástek. Než dojde k teplotní softwarově ochraně, jsou zapínané ventilátory a program se stará o regulaci jejich výkonu v souvislosti s daty, přijímaných z teplotních senzorů.

III.11. Mechanická konstrukce

Mechanická konstrukce má zajistit uspořádání a upevnění samostatných částí do jednoho celku, ochranu vnitřních částí a také poskytnout možnost pohodlného přenesení a práci se zařízením. Logika uspořádání části zařízení začíná umístěním chladičů a ventilátorů na dno konstrukci. Na chladiče se upevňují externí odpory, teplotní čidla a IGBT moduly, které se propojují paralelně měděnými lištami. Na IGBT moduly se zapojuje řídicí DPS, mechanické otvory na které jsou v rozteči, odpovídající otvorům na IGBT modulech. Ovládací DPS s LCD a ovládacími prvky se upevňuje na čelní straně mechanické skříně. Použit je chladič modelu SK 109 Fischer Elektronik délky 19cm. Výkresy konstrukční skříně jsou v příloze C.



Obr. III-14 Fotografie finální realizace

IV. Závěr

Účelem této diplomové práce bylo navrzení a realizace aktivní zátěže, schopné komunikovat po rozhraní UART, fungovat v režimu napětím řízeného odporu a možnosti regulaci stejnosměrného nebo střídavého napětí se ztrátovým výkonem od 500 W. Realizované zařízení je schopné dosáhnout větší ztrátový výkon, a komunikace je realizovaná pomocí modernějšího a více využívaného rozhraní USB. Nadále kromě vyžadované funkce jako napětím řízený odpor, navržená aktivní zátěž je schopna nabídnout také režimy konstantního napětí, proudu a výkonu.

Při návrhu aktivní zátěže se zformovaly napájecí obvody pro moduly systému, zajistilo se galvanické oddělení modulů, použitých při práci se zátěží, a výkonových částí. Musel být řešen výběr výkonových prvků, odpovídající jim chlazení a jejich řízení. Významnou částí vývoje je návrh ovládacích desek plošných spojů, se kterým je spojen výběr vhodných součástek a jejich racionální umístění. Pro komunikaci s počítačem se navrhl způsob její realizací a usnadnění jejího použití pomocí vhodného umístění konektoru. Rozhodlo se o fyzickém umístění jak výkonových prvků, tak i desek plošných spojů. Bohužel kvůli časovým důvodům nebyli změřené parametry charakterizující zařízení. Zařízení je také závislé na programovém vybavení, které je pro funkčnost dostatečné, avšak je jednodušší. V této části by v budoucnu mohly být provedené změny pro zvýšení možností zařízení. Například by se mohly naprogramovat pracovní režimy s kompletními testy, u kterých by se nemusely ručně nastavovat jednotlivé parametry. Jinou možností pro zlepšení je realizování automatických programovatelných testů ve skriptovacím jazyce pro mikrokontroléry s ARM jádrem. Kromě toho momentálně chybí plnohodnotný program pro PC.

Realizované zařízení je modulární, což umožňuje následnou modernizaci, jednodušší připojení dalších ovládacích prvků a také usnadňuje údržbu zařízení. Přidání nové funkcionality včetně nově navržených modulů, jako například měřicího modulu, může být provedeno velmi zjednodušeným vývojem. Jediná komplikace by byla při návrhu dalšího samostatného modulu, kdy by se kromě tohoto modulu musel navrhnout také nový zdroj napájecích napětí, jinou možností je návrh přídavného napájecího modulu.

POUŽITÁ LITERATURA

- [1] Power Supply Testing (AN 372-1). In: *Agilent Technologies* [online]. 22. 2. 2002 [cit. 6. 5. 2014]. Dostupné z: <http://cp.literature.agilent.com/litweb/pdf/5952-4190.pdf>
- [2] DC Electronic Load Selection. In: *AMETEK Programmable Power* [online]. 26. 2. 2009 [cit. 6. 5. 2014]. Dostupné z: http://www.programmablepower.com/Application_Notes/app_downloads/Article-DC_Electronic_Load_Selection.pdf Path: Homepage; Support; Article-DC_Electronic_Load_Selection.pdf
- [3] Agilent AN 372-2 Battery Testing. In: *Agilent Technologies* [online]. 22. 2. 2002 [cit. 6. 5. 2014]. Dostupné z: <http://cp.literature.agilent.com/litweb/pdf/5952-4191.pdf>
- [4] Semiconductor Group. Connecting IGBTs in Parallel (Fundamentals) In: *Infineon.com* [online]. 12. 5. 1997 [cit. 6. 5. 2014]. Dostupné z: http://www.infineon.com/dgdl/Infineon-Connecting_IGBTs_in_Parallel-AN-v1.0-en.pdf?folderId=db3a30433a047ba0013a69f8f64c0705&fileId=db3a30433f565836013f5cbaba342d37
- [5] Nelson, J.J. Investigation of parallel operation of IGBTs. In: Industry Applications Conference, 2002. 37th IAS Annual Meeting. Conference Record of the (Volume:4) Pittsburgh, USA, 2002, s. 2585 – 2591 vol. 4. [cit. 6. 5. 2014]. ISBN: 0-7803-7420-7. Dostupné z: doi: <http://dx.doi.org/10.1109/IAS.2002.1042811>.
- [6] Fuji Electric Co. Fuji IGBT Modules Application Manual. In: *Fuji Electric* [online]. 24. 8. 2011 [cit. 6. 5. 2014]. Dostupné z: http://www.fujielectric.com/products/semiconductor/technical/application/box/doc/REH984b/REH984b_a.pdf
- [7] Ferroxcube. Design of Planar Power Transformers. In: *Adamsmagnetic.com* [online]. 21. 2. 2001 [cit. 6. 5. 2014]. Dostupné z: <http://www.adamsmagnetic.com/pdf/Ferroxcube-planar-transformer-design.pdf>
- [8] STMicroelectronics. RM0008 Reference manual: ...STM32F105xx and STM32F107xx advanced ARM-based 32-bit MCUs. In: *st.com* [online]. 24. 10. 2011 [cit. 6. 5. 2014]. Dostupné z: http://www.st.com/web/en/resource/technical/document/reference_manual/CD00171190.pdf

SEZNAM OBRÁZKŮ

Obr. III-1 Blokové schéma.....	14
Obr. III-2 Příklady IGBT modulů, vhodných pro použití v aktivní zátěži.....	16
Obr. III-3 Zesílení řídicích napěťových signálů a proudu, protékajícího aktivní zátěží.....	20
Obr. III-4 Měření napětí na výstupních tranzistorech.....	22
Obr. III-5 Doplnující obvody pro mikrokontrolér.	25
Obr. III-6 Konektory pro ovládání ventilátorů a teplotních čidel.....	26
Obr. III-7 Vzhled na frontální stranu přístroje.....	27
Obr. III-8 Oscilační obvod napájecího schématu.	31
Obr. III-9 Rozložení mědi a tloušťka vrstev pro každé vinutí.....	33
Obr. III-10 Usměrnovací obvody.	34
Obr. III-11 Napájecí obvod pro mikrokontrolér a další součástky na desce „Řízení“.....	35
Obr. III-12 Napájecí obvod pro +15V a -15V.....	36
Obr. III-13 Principiální schéma programu.....	38

SEZNAM PŘÍLOH

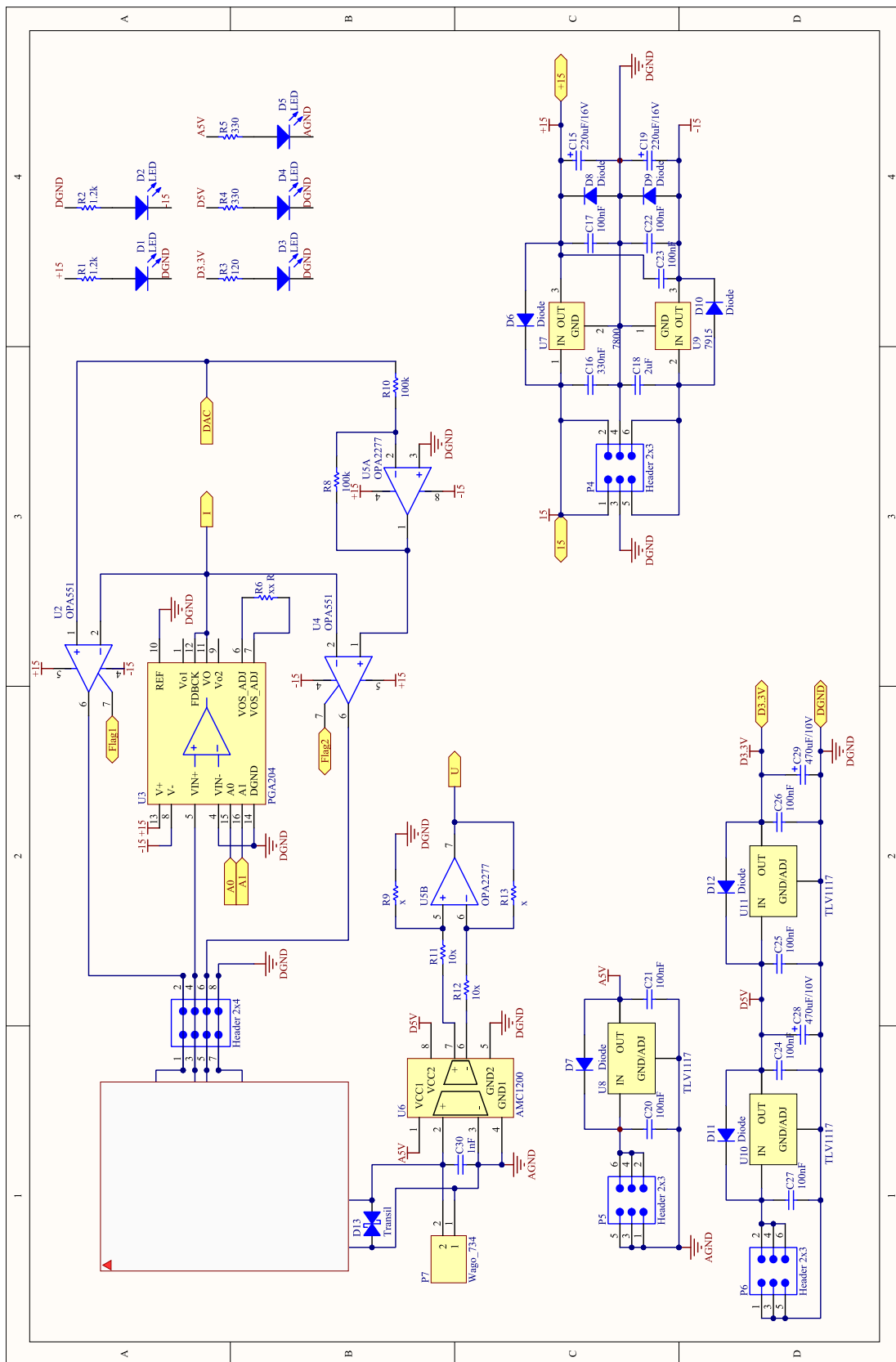
PŘÍLOHA A - Kompletní schéma

PŘÍLOHA B - Desky plošných spojů

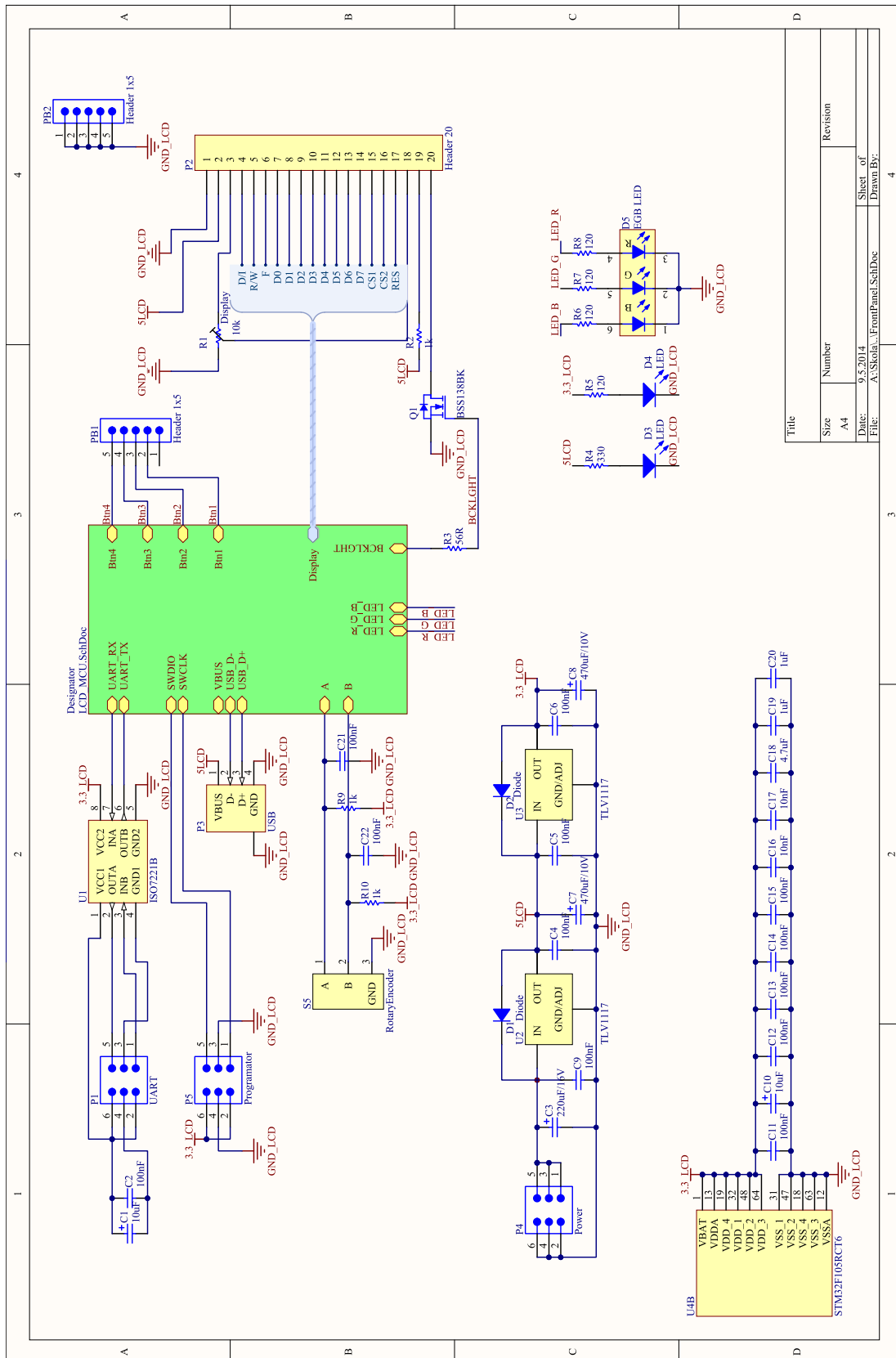
PŘÍLOHA C - Výkresy mechanické skříně

PŘÍLOHA D - CD s textem diplomové práce, seznamem použitých součástek a technickými listy k nim.

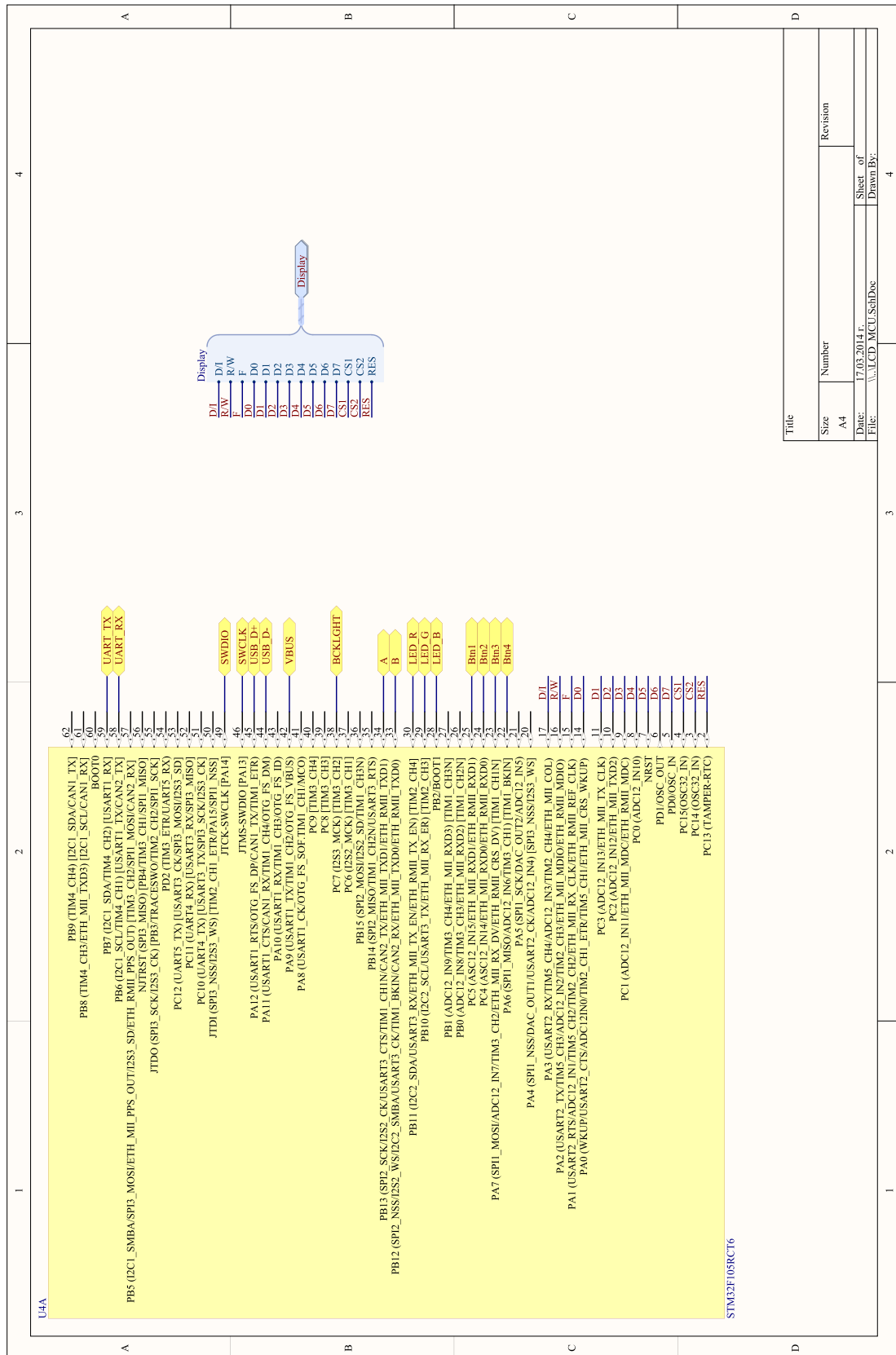
PŘÍLOHA A - Kompletní schéma



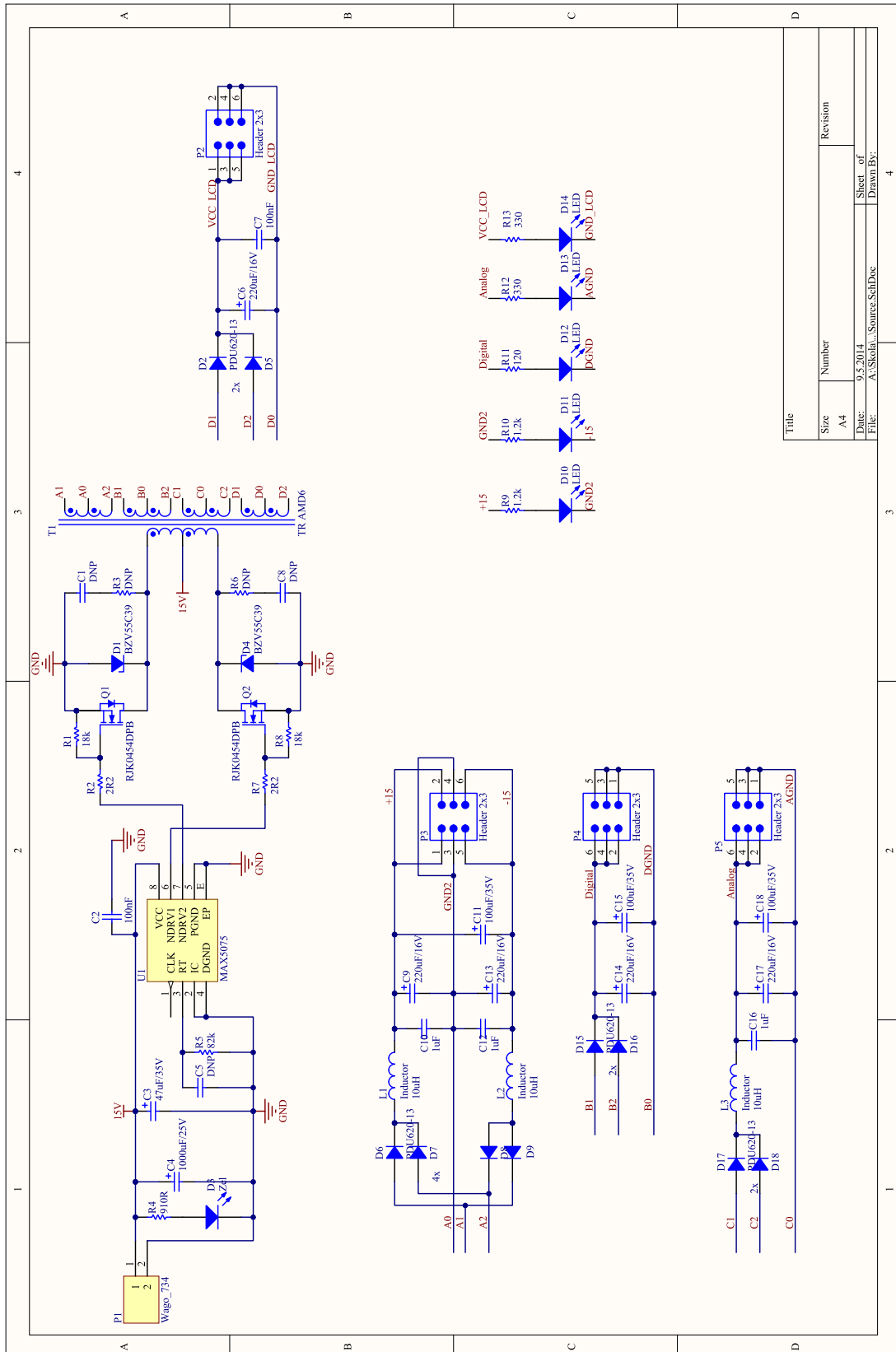
A 1 Schéma zapojení analogové a napájecí části řídicí DPS.



A 3 Schéma zapojení analogové a napájecí části ovládací DPS.

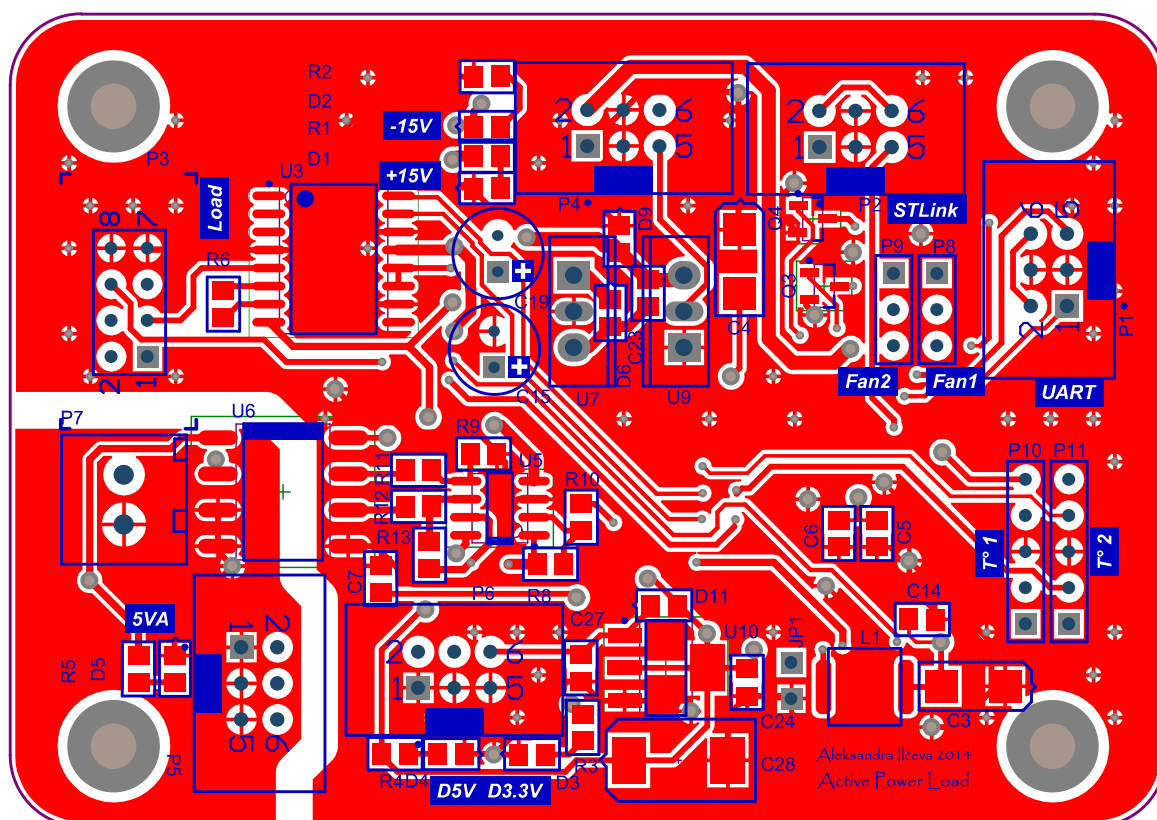


A 4 Schéma zapojení mikrokontroléru ovládací DPS.

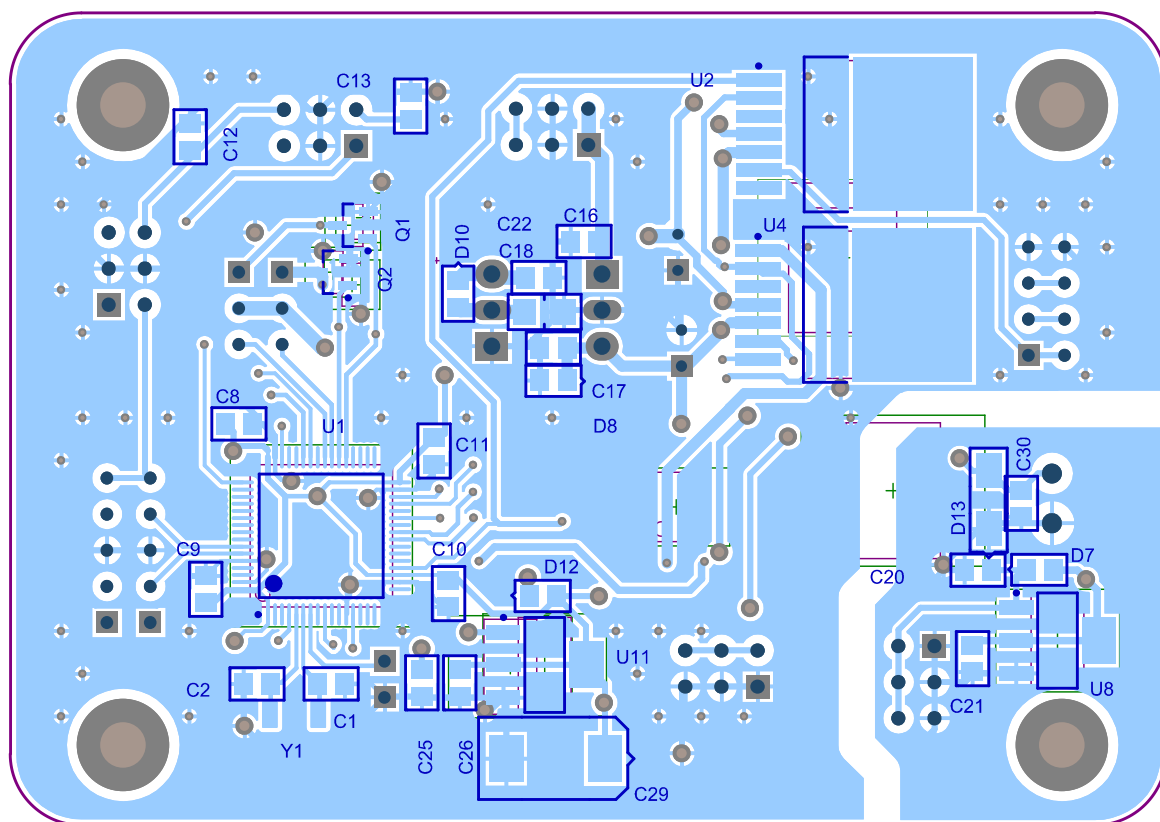


A 5 Schéma zapojení napájecího obvodu.

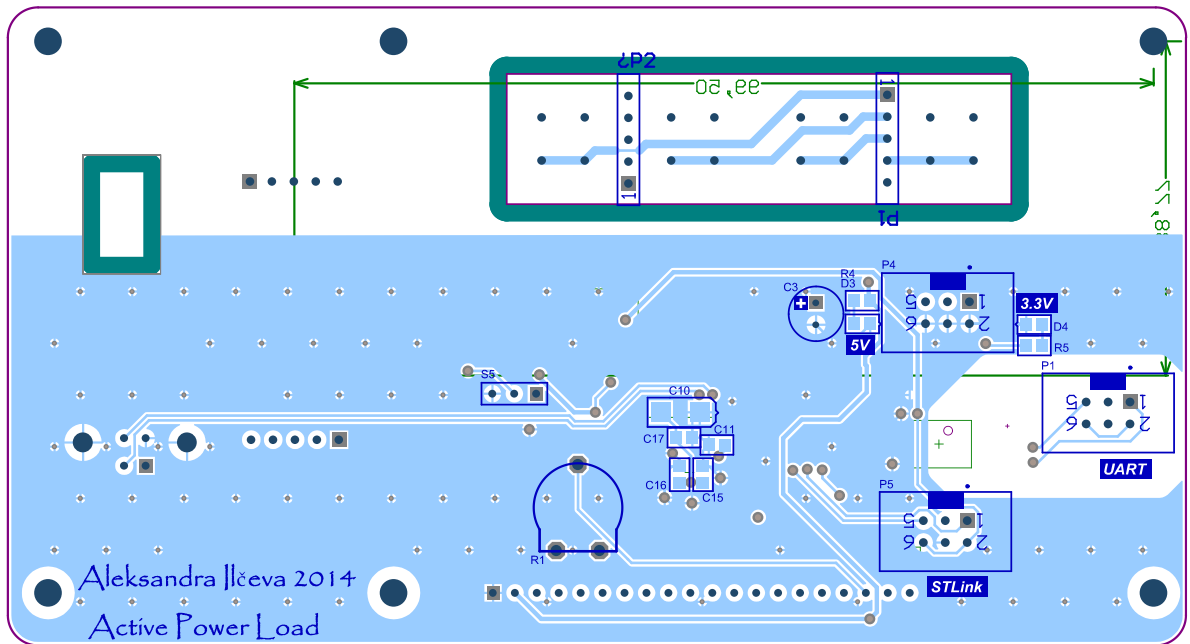
PŘÍLOHA B - Desky plošných spojů



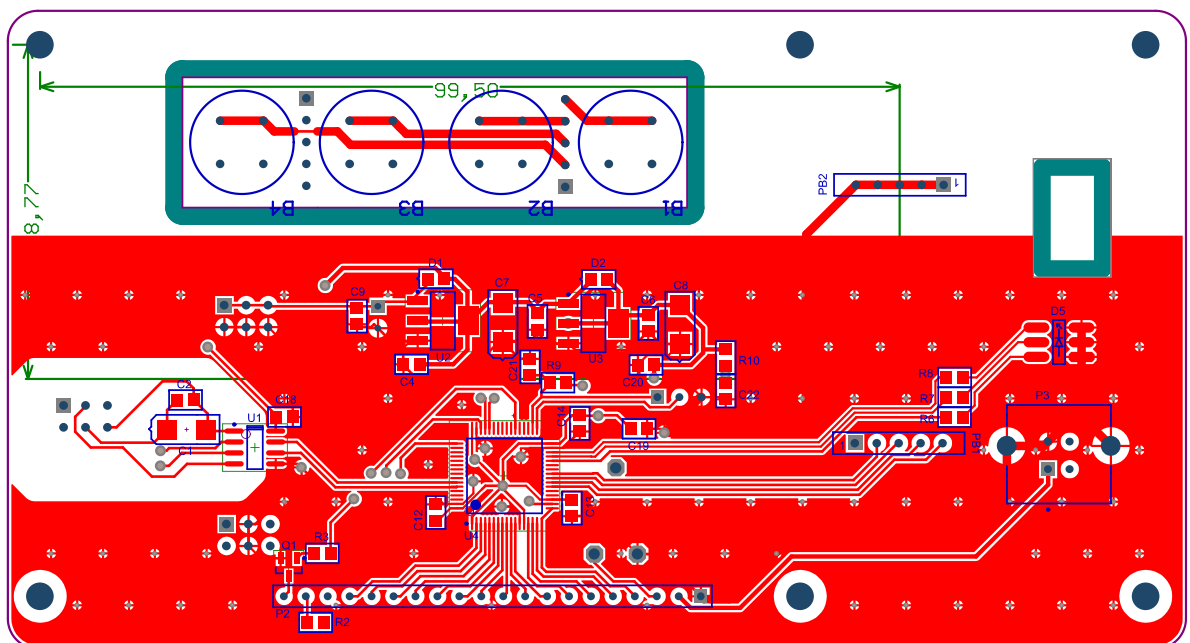
B 1 Vrchní vrstvá řídicí DPS.



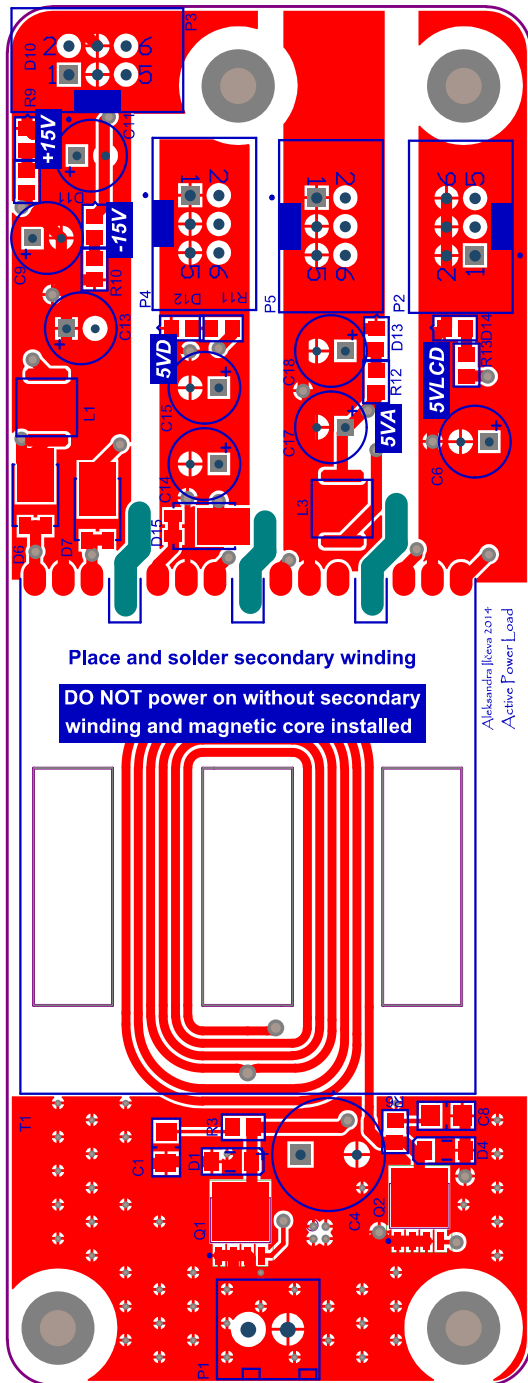
B 2 Spodní vrstvá řídicí DPS.



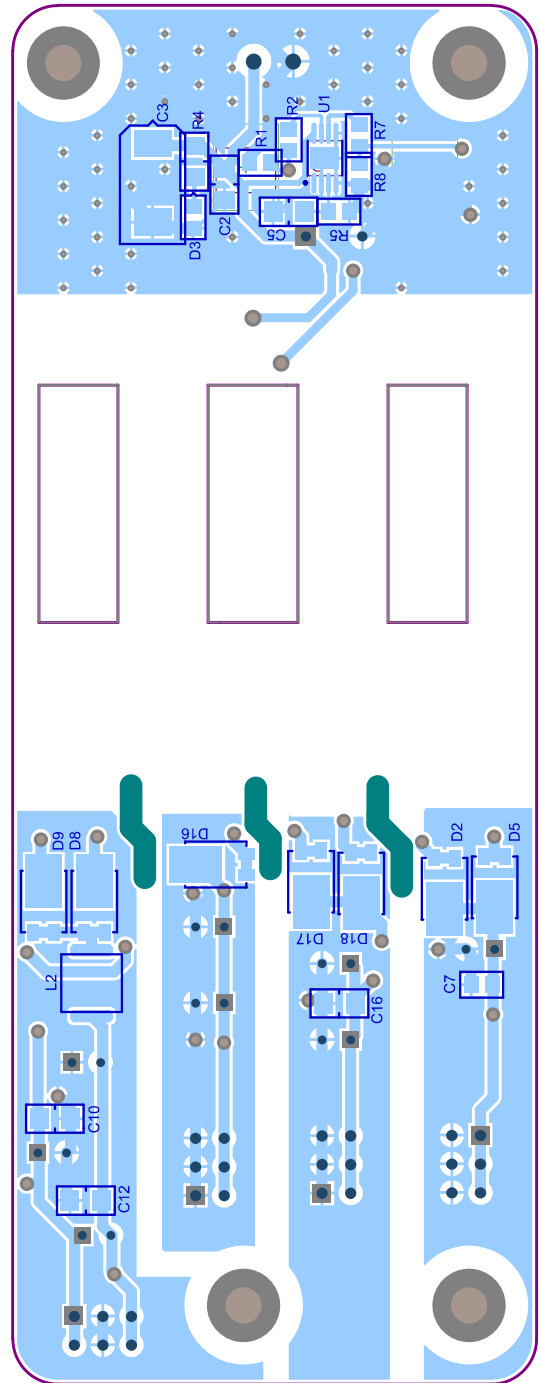
B 3 Vrchní vrstvá ovládací DPS.



B 4 Spodní vrstvá ovládací DPS.

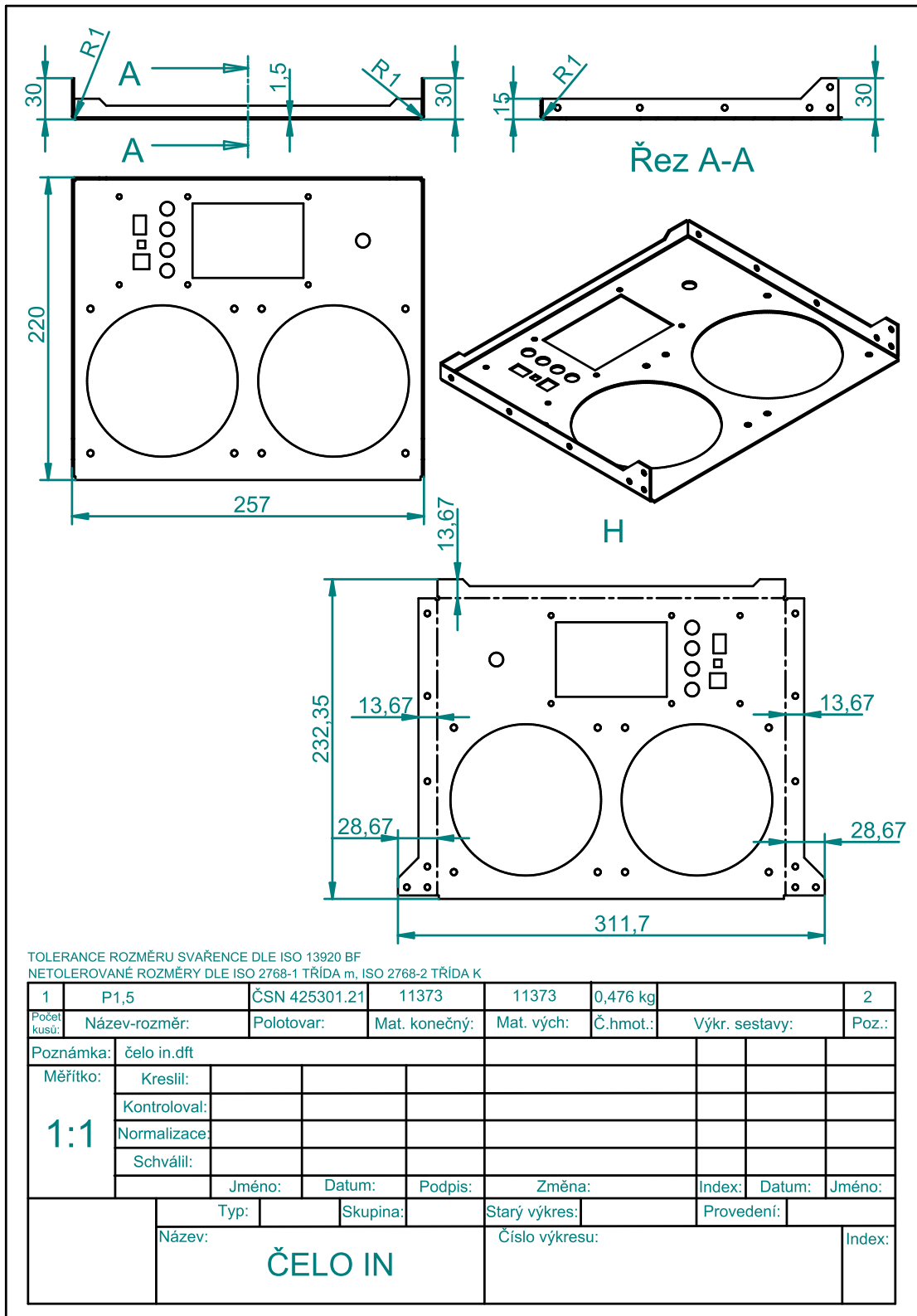


B 5 Vrchní vrstvá napájecí DPS.

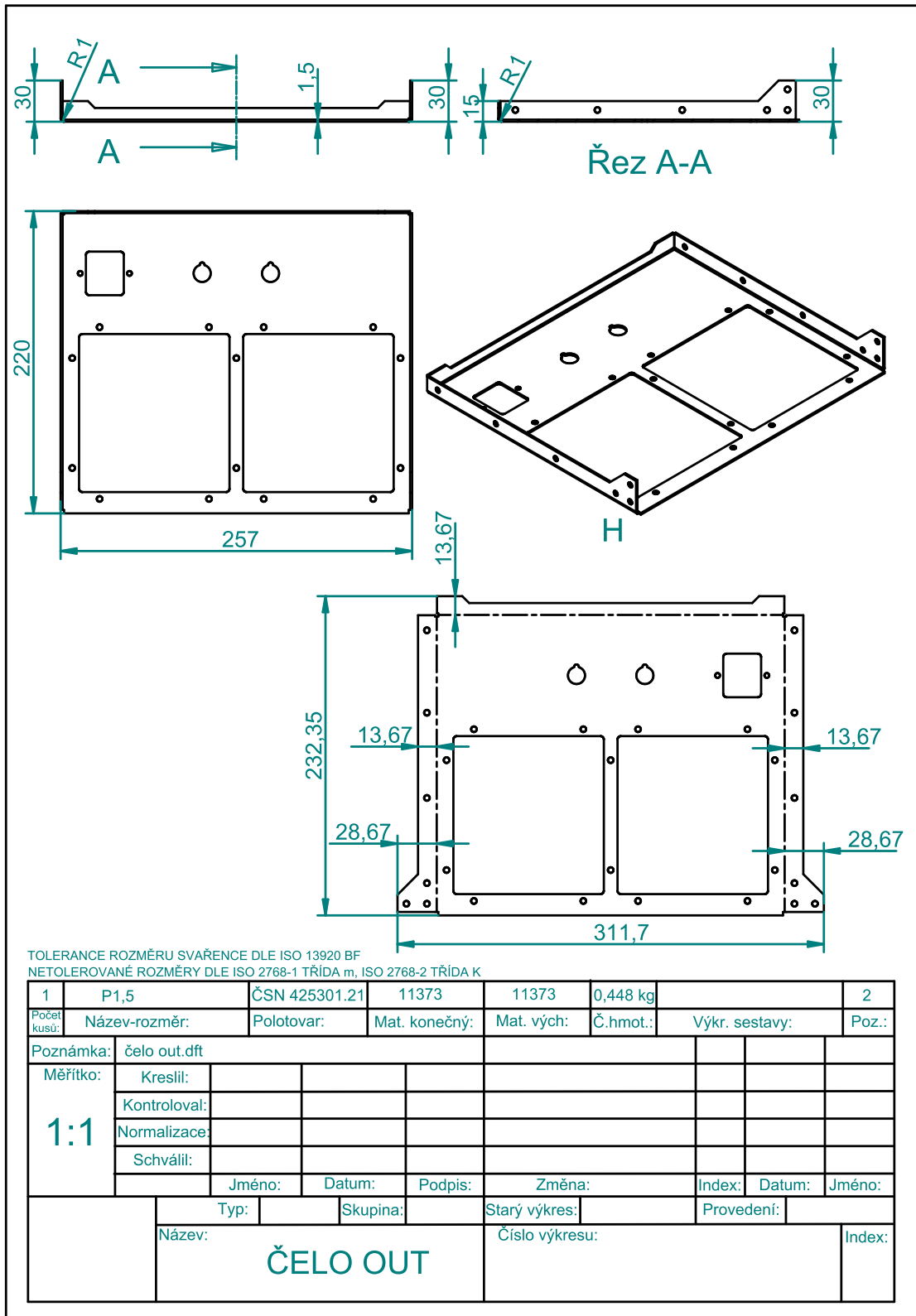


B 6 Spodní vrstvá napájecí DPS.

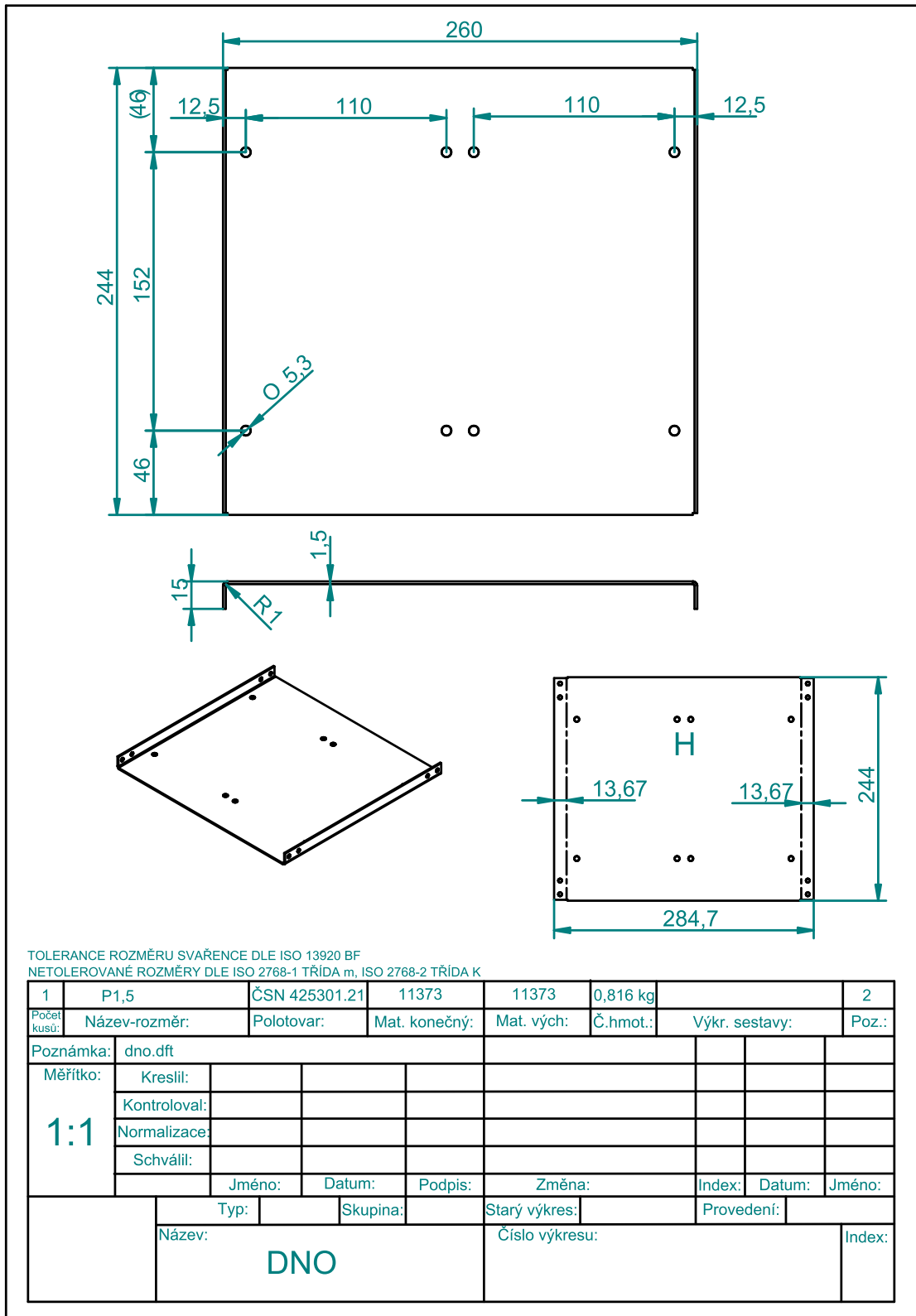
PŘÍLOHA C - Výkresy mechanické skříně



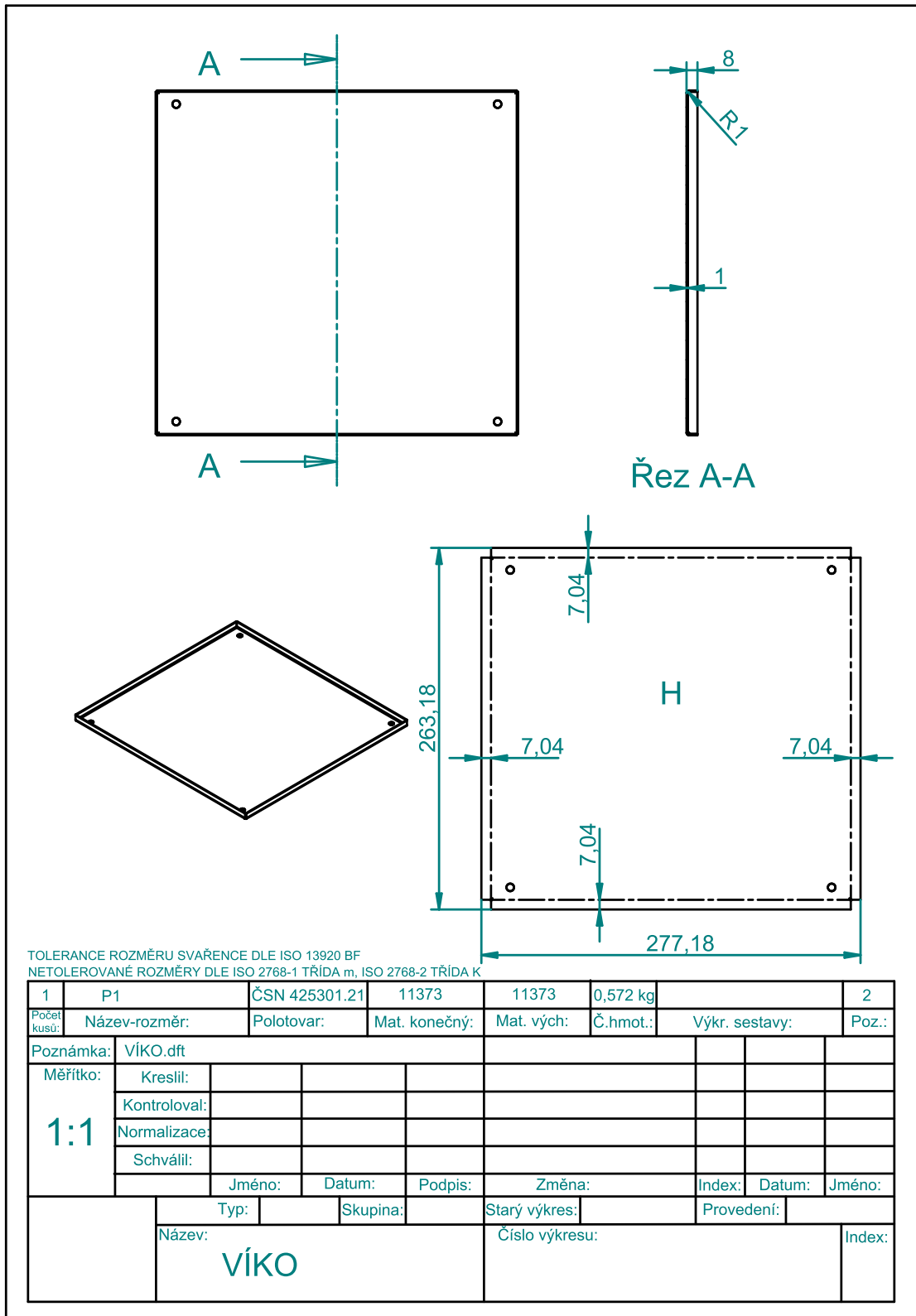
C 1 Čelní strana.



C 2 Zadní strana.



C 3 Spodní strana.



C 4 Víko.