



Bakalářská práce

Platforma pro modulární laboratorní přístroje

Studijní program:

B0714A270001 – Mechatronika

Studijní obor:

B0714A270001 – Mechatronika

Autor práce:

Libor Mahr

Vedoucí práce:

Ing. Leoš Petržílka

Liberec 2022



Zadání bakalářské práce

Platforma pro modulární laboratorní přístroje

<i>Jméno a příjmení:</i>	Libor Mahr
<i>Osobní číslo:</i>	M19000135
<i>Studijní program:</i>	B0714A270001 Mechatronika
<i>Zadávací katedra:</i>	Ústav informačních technologií a elektroniky
<i>Akademický rok:</i>	2021/2022

Zásady pro vypracování:

1. Nastudujte problematiku základních laboratorních přístrojů a měření.
2. Sestavte hardwarovou a softwarovou koncepci modulární stavebnice laboratorního přístroje. Navrhněte vhodné elektrické parametry takového zařízení.
3. Prakticky realizujte prototyp základní platformy stavebnice (tj, hardwarové šasi), dále napájecí zdroj a elektronickou zátěž jako základní moduly, a to včetně návrhu a realizace DPS.

Rozsah grafických prací: podle potřeby dokumentace
Rozsah pracovní zprávy: 30 – 40 stran
Forma zpracování práce: tištěná/elektronická
Jazyk práce: Čeština

Seznam odborné literatury:

- [1] BARTUŠEK, Karel. Měření v elektrotechnice. 2., přeprac. a dopl. vyd. Brno: VUTIUM, 2010. ISBN 978-80-214-4160-6.
[2] Elektrotechnická měření. Praha: BEN – technická literatura, 2002. ISBN 9788073000226.

Vedoucí práce: Ing. Leoš Petržílka
Ústav informačních technologií a elektroniky

Datum zadání práce: 12. října 2021
Předpokládaný termín odevzdání: 23. května 2023

prof. Ing. Zdeněk Plíva, Ph.D.
děkan

L.S.

prof. Ing. Ondřej Novák, CSc.
vedoucí ústavu

V Liberci dne 19. října 2021

PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že svou bakalářskou práci jsem vypracoval samostatně jako původní dílo s použitím uvedené literatury a na základě konzultací s vedoucím mé bakalářské práce a konzultantem.

Jsem si vědom toho, že na mou bakalářskou práci se plně vztahuje zákon č. 121/2000 Sb., o právu autorském, zejména § 60 – školní dílo.

Beru na vědomí, že Technická univerzita v Liberci nezasahuje do mých autorských práv užitím mé bakalářské práce pro vnitřní potřebu Technické univerzity v Liberci.

Užiji-li bakalářskou práci nebo poskytnu-li licenci k jejímu využití, jsem si vědom povinnosti informovat o této skutečnosti Technickou univerzitu v Liberci; v tomto případě má Technická univerzita v Liberci právo ode mne požadovat úhradu nákladů, které vynaložila na vytvoření díla, až do jejich skutečné výše.

Současně čestně prohlašuji, že text elektronické podoby práce vložený do IS STAG se shoduje s textem tištěné podoby práce.

Beru na vědomí, že má bakalářská práce bude zveřejněna Technickou univerzitou v Liberci v souladu s § 47b zákona č. 111/1998 Sb., o vysokých školách a o změně a doplnění dalších zákonů (zákon o vysokých školách), ve znění pozdějších předpisů.

Jsem si vědom následků, které podle zákona o vysokých školách mohou vyplývat z porušení tohoto prohlášení.

25. 5. 2023

Libor Mahr

PODĚKOVÁNÍ

Rád bych poděkoval vedoucímu své práce panu Ing. Leošovi Petržílkovi za jeho myšlenky, nápady, kritiky a jeho laskavost a trpělivost a mým kamarádům Janovi Svárovskému a Pavlovi Vaščukovi za jejich myšlenky, nápady a kritiky.

PLATFORMA PRO MODULÁRNÍ LABORATORNÍ PŘÍSTROJE

ABSTRAKT

Tato bakalářská práce se zabývá vývojem platformy pro modulární laboratorní přístroje a prototypu v podobě elektronické zátěže.

Cílem bylo vytvořit otevřenou platformu, do které může kdokoli přispívat návrhem vlastních modulů, vylepšováním existujících modulů, psaním vlastního softwaru nebo úpravou existujícího softwaru.

Práce je rozdělena na průzkum trhu s podobnými platformami či zařízeními, základní návrh platformy, návrh prototypu a jeho realizaci. Návrh komponent byl proveden ve volně dostupných bezplatných programech.

Zprovoznění prototypu nebylo v časovém rámci práce úspěšné, ale práce na platformě bude nadále pokračovat.

Klíčová slova: modulární, laboratorní, přístroj, platforma, open-source, elektronika

PLATFORM FOR MODULAR LABORATORY INSTRUMENTS

ABSTRACT

This Bachelor thesis deals with development of a platform for modular laboratory devices and a demonstration device in the form of an electronic load.

The goal was to create an open platform, which anyone can contribute to by designing their own modules, upgrading existing modules, writing their own software or modification of existing software.

The thesis is divided into market research with similar platforms or devices, basic platform design, design of the demonstration device and its realization. Component design was done in freely available free of charge programs.

Commissioning of the device wasn't successful in the time frame of this thesis, but work on the platform will still continue.

Keywords: modular, laboratory, equipment, platform, open-source, electronics

OBSAH

Seznam zkratk	12
1 Úvod	13
2 Průzkum trhu	14
3 Rešerše problematiky elektronických zátěží	17
4 Základní specifikace navrhované platformy	19
5 Specifikace prototypu	23
6 Realizace prototypu	24
6.1 Návrh komponent	24
6.1.1 Šasi	26
6.1.2 Základní deska	29
6.1.3 Modul zátěže	29
6.2 Sestavení zařízení	32
6.3 Programování zařízení	38
7 Ověření funkčnosti zařízení	40
7.1 Ověření rychlosti hran sběrnice I2C	40
8 Závěr	45
Zdroje	47
Přílohy	48

SEZNAM ZKRATEK

AD	Analogově-digitální
CAN	Controller Area Network
CIM	Communication Interface Module - modul komunikačního rozhraní
DA	Digitálně-analogový
FBSOA	Forward bias safe operating area - oblast bezpečné operace v dopředném směru
GPIO	General-purpose input/output - vstup/výstup obecného použití
HP	Horizontal pitch - horizontální rozteč
I²C	Inter-Integrated Circuit
IOM	Input Output Module - modul vstupů výstupů
MOSFET	Metal-oxide-semiconductor field-effect transistor - polem řízený tranzistor kov-oxid-polovodič
NVRAM	Non-volatile random-access memory - napětově nezávislá paměť s přímým přístupem
PCI	Peripheral Component Interconnect
PCIe	PCI-Express
PD	Power Delivery
PIO	Programmable input/output - programovatelný vstup/výstup
PXI	PCI eXtensions for Instrumentation
PXIe	PXI Express
QSPI	Quad SPI
RTC	Real-time clock - hodiny reálného času
SCC	System Controller & Coordinator - systémová řídicí jednotka a koordinátor
SMT	surface mount technology - technologie povrchové montáže
SPI	Serial Peripheral Interface
SPSU	System Power Supply Unit - systémový zdroj napájení
U	Rack unit - racková jednotka
UART	Universal asynchronous receiver-transmitter
UIC	User Interface Controller - řídicí jednotka uživatelského rozhraní
UIM	User Interface Module - modul uživatelského rozhraní
VMEbus	Versa Module Eurocard bus
XIP	Execute in place

1 ÚVOD

Cílem práce je vytvořit platformu pro modulární laboratorní přístroje, na které když bude postaveno jakékoliv zařízení, tak si ho kdokoli může koupit nebo i postavit. Ať už se jedná o kutila, profesionála, nadšence, sběratele, studenta, malou firmu, velkou firmu, samoživitele, školní instituci atd. a volně jej využívat pro vývoj, výzkum, vzdělávání, etický hacking, výrobní či testovací procesy apod.

Cílem je vytvořit zařízení, které by si koncový uživatel mohl postavit na svůj stůl nebo vložit do svého racku a přizpůsobovat svým momentálním potřebám od vytváření vlastního softwaru a firmwaru či vylepšování existujícího softwaru a firmwaru přes tvorbu vlastních modulů či vylepšování existujících modulů až po neurčené využití. Měla by být možnost, aby si kdokoli mohl dopodrobna nastudovat, jak veškerý hardware, software nebo firmware zařízení fungují. Buď ze zvědavosti, pro účely oprav, nebo pro jakékoli jiné účely. Dalším cílem je aby si uživatel mohl zařízení vylepšit výměnou pouze částí, které chce vyměnit (např. modul osciloskopu).

Z uvedených důvodů je celá platforma navržena a publikována jako tzv. open-source systém, tedy systém, z licenčního hlediska, zcela otevřený jakýmkoliv změnám, úpravám či způsobům použití. Veškeré návrhy na platformě jsou z téhož důvodu prováděné na volně dostupném softwaru.

Tato práce se tedy zabývá jak návrhem koncepce platformy s takovýmto zaměřením, tak návrhem technického řešení platformy, a ověřením funkčnosti návrhu na konkrétnější aplikaci.

2 PRŮZKUM TRHU

Kdysi se vyráběly přístroje založené na paralelní sběrnici VMEbus¹ a kartách ve velikostech Eurocard a používaly konektor DIN 41612. Později došlo k přechodu na sběrnici PXI², což je rozšíření sběrnice PCI³ o signály pro synchronizaci, časování a spouštění a vyrábí se dodnes. Pak s příchodem PCIe⁴ došlo k rozšíření trhu o PXIe⁵.

Zařízení PXI vyrábí National Instruments a Keysight. Na stránkách Keysight se ani nezobrazuje cena a musíte se u nich poptat. Na druhou stranu National Instruments vám na jejich stránkách zobrazí cenu i v korunách českých. Ale pro dokončení objednávky musíte mít u nich zaregistrovaný účet a registrace vyžaduje jméno firmy a vaši pozici. Takže jediná možnost, jak tyto systémy může koupit jednotlivec pro svůj koníček je koupě z druhé ruky.



Obrázek 2.1: National Instruments PXI.[10]

¹Versa Module Eurocard bus

²PCI eXtensions for Instrumentation

³Peripheral Component Interconnect

⁴PCI-Express

⁵PXI Express

Další platformou na trhu je platforma MDP od Miniware, které přišlo na trh s MDP-XP. Je to malý modulární laboratorní zdroj, který se skládá z modulu displeje MDP-M01 a modulu zdroje MDP-P905 nebo MDP-P906. Všechny moduly jsou v podobě stohovatelných modulů a jsou propojeny bezdrátově v pásmu 2,4 GHz proprietárním protokolem. Modul displeje lze pomocí kabelu propojit s modulem zdroje, ale pouze s jedním a pravděpodobně pouze pro nabíjení modulu displeje. Výrobce prodává i modul elektronické zátěže MDP-L1060 s možností čtyřvodičového zapojení, napětovým limitem 60 V stejnosměrných, proudovým limitem 10 A a výkonovým limitem 100 W. Výrobce má v plánu uvést na trh další moduly, mezi nichž patří modul digitálního generátoru signálů, modul nabíječky a bateriový modul. Potenciálním problémem tohoto systému je jeho bezdrátové připojení a zahlcení pásma 2,4 GHz Wi-Fi, Bluetooth a bezdrátovými sluchátky, myšemi, klávesnicemi, apod., což by mohlo vést k nespolehlivému spojení. Dalším problémem tohoto systému je to, že se jednotlivé moduly špatně ovládají kvůli malému množství ovládacích prvků, malým displejům a nemožnosti ovládání přes počítač. Modul MDP-M01 je tedy prakticky nutností, ale i ten má omezené množství ovládacích prvků. Také tato platforma nemá žádnou možnost programování, jako je např. National Instruments Labview. Výhodou platformy je, jako u ostatních produktů výrobce, její snadná přenositelnost díky velikosti jejích modulů.



Obrázek 2.2: Miniware MDP-XP. Dolní modul je MDP-P905 a modul postavený na něm je MDP-M01.[6]



Obrázek 2.3: Miniware MDP-L1060.[5]

3 REŠERŠE PROBLEMATIKY ELEKTRONICKÝCH ZÁTĚŽÍ

Elektronické zátěže lze řešit celkem několika způsoby:

- spínanými rezistancemi[7]
- MOSFETy¹[7]
- regenerativně do sítě[7], úložiště nebo vstupu testovaného zařízení
- aktivními rezistancemi - kombinací MOSFETů se spínanými rezistancemi[7]
- rezistancemi s pulzní šířkovou modulací
- rezistancemi s buck-boost² měniči

U spínaných rezistancí je potřeba udělat kompromis mezi počtem součástek a rozlišením zátěžového odporu (čím větší rozlišení, tím více rezistorů a spínačů). Jejich výhodou je však vysoká výkonová hustota a nízký poměr cena/výkon (zvláště u plechových a spirálových rezistorů).

U MOSFETů lze, oproti spínaným rezistancím, dosáhnout skutečného konstantního proudu, napětí či výkonu. Také lze, relativně ke spínaným rezistancím, dosáhnout prakticky nekonečného rozlišení. Nevýhodou je vysoký poměr cena/výkon při velkých výkonech.

Regenerativní zátěže se vyznačují výrazně menšími provozními náklady díky tomu, že jediným tepelným výkonem jsou ztráty na testovaném zařízení a měniči (případně i úložišti) zátěže. Některé tyto zátěže dokážou být i obousměrné, např. bateriový emulátor. Těchto zátěží se hodně využívá při testování velkých úložišť elektrické energie a zařízení s nimi související (střídače, nabíječky, elektromobilita). Nevýhodou je vysoká pořizovací cena.

Aktivní rezistance jsou kombinací MOSFETů a spínaných rezistancí a kombinují výhody obou řešení: skutečný konstantní proud, napětí či výkon, vysoká výkonová hustota, prakticky nekonečné rozlišení. Nevýhodou je však jejich větší složitost na řízení a vyšší pořizovací cena.

¹Metal-oxide-semiconductor field-effect transistor - polem řízený tranzistor kov-oxid-polovodič

²buck-boost - snižovací-zvyšovací

Rezistance s pulzní šířkovou modulací umožňují dosáhnout prakticky nekonečného rozlišení při použití rezistancí. Avšak minimální napětí pro dosažení maximálního proudu je limitováno vybranými rezistancemi. Nevýhodou je velmi vysoké zvlnění zátěžového proudu a použití filtrů pro snížení zvlnění dokáže tuto koncepci výrazně prodražit. Příkladem využití jsou odporové elektrodynamické brzdy.

Rezistance s buck-boost měniči dokáží, oproti rezistancím s pulzní šířkovou modulací, dosáhnout menšího minimálního napětí (až do limitu měniče). Nevýhodou je vyšší cena a složitost.

Nejdůležitějším a nejpoužívanějším režimem řízení zátěží je režim konstantního proudu. Je například typicky využíván k měření zátěžových charakteristik zdrojů napětí a využitím integrace proudu či výkonu lze měřit i kapacity úložišť elektrické energie. Je jedním z nejjednodušších režimů pro implementaci analogového řízení.

Druhým nejdůležitějším režimem je režim konstantního napětí. Je například typicky využíván k měření zátěžových charakteristik zdrojů proudu. Také ho lze využít například ke zjištění maximálního proudu zdroj napětí, při kterém jeho výstupní napětí klesá na dolní přípustnou hranici. Je to opět jeden z nejjednodušších režimů pro implementaci analogového řízení.

Pak následuje režim konstantního výkonu, který lze využít například k měření výdrže baterie v zařízení napájeném spínaným regulátorem nebo pro nastavení výkonového limitu testovaného zařízení. Tento režim je výrazně složitější pro implementaci analogového řízení kvůli přítomnosti analogového násobiče.

Posledním režimem je režim konstantního odporu, který lze využít pro emulaci libovolné odporové zátěže. Tento režim lze pro implementaci analogového řízení řešit bez použití analogového násobiče použitím nastavitelného odporového děliče napětí.

4 ZÁKLADNÍ SPECIFIKACE NAVRHOVANÉ PLATFORMY

Jedním ze základních rozhodnutí, které bylo třeba udělat bylo, do jaké úrovně bude systém modulární, resp. jestli budou moduly schopné pracovat plně samostatně, nebo jestli budou moduly čistě základními bloky (např. modul analogově-digitálního převodníku, modul filtru, modul zesilovače, modul sériové linky, modul procesoru, modul paměti, obrazový modul atd.), nebo něco mezi těmito dvěma hranicemi.

Plně samostatné moduly by prakticky bylo to samé, jako samostatná zařízení s komunikačními rozhraními, která jsou volně dostupná na trhu. Na druhou stranu skládání systému z čistě základních bloků by bylo moc složité jak pro uživatele, tak pro vývojáře. Došlo tedy k rozhodnutí, že moduly budou rozděleny na (viz obr. 4.1):

- Modul uživatelského rozhraní (UIM - User Interface Module)
- Komunikační moduly (CIM - Communication Interface Module)
- Moduly vstupů/výstupů (IOM - Input/Output Module)
- Základní desku
- Systémový zdroj napájení (SPSU - System Power Supply Unit)

Moduly vstupů/výstupů jsou, jak již vyplývá z názvu, moduly se signálovými nebo výkonovými vstupy a výstupy a může mít jednu nebo více jednoduchých i složitějších funkcí (např. modul digitálních vstupů/výstupů, modul multimetru, modul osciloskopu atd.). Musí také obsahovat základní informační prvky, jakou jsou např. stavové LED nebo malý stavový displej, z důvodu usnadnění diagnostiky zařízení či uživatelských programů.

Komunikační moduly přidávají jedno nebo více komunikačních rozhraní (např. RS-232, RS-485, CAN¹, Ethernet atd.).

Modul uživatelského rozhraní obsahuje řídicí jednotku uživatelského rozhraní (UIC - User Interface Controller), tlačítko napájení, stavové LED nebo malý stavový displej, akustické signalizační zařízení a buď připojení k počítači, připojení k externímu monitoru, myši a klávesnici, nebo obrazovku s dotykovým nebo tlačítkovým ovládním.

¹Controller Area Network

Systemový zdroj napájení poskytuje veškeré napájecí sběrnice a může mít integrovanou funkci UPS². Jeho vstupy napájení musí, z hlediska kompatibility a flexibility, být jakákoli kombinace jednoho či více následujících vstupů:

- Souosý konektor 5,5/2,1 mm pro připojení externího zdroje 12 V DC (může podporovat vyšší napětí), jehož střední pin je kladným pólem
- Zdířky pro izolované bezpečnostní banánky s průměrem 4 mm pro laboratorní zdroj 48 V DC
- 4-pinový konektor Kycon KPJX pro externí zdroj 48 V DC
- Konektor IEC 60320 C14 pro zabudovaný síťový zdroj

a napěťovými výstupy musí být:

- 48V - 48 V silová sběrnice pro moduly výkonových vstupů a výstupů
- 12V_CCUI - Control, Communications & User Interface je napájecí sběrnice vyhrazená pro řízení, komunikaci s okolím a uživatelské rozhraní
- 12V_IOC - Input, Output & Cooling je napájecí sběrnice vyhrazená pro vstupy, výstupy a chlazení
- 5VSB - 5 V Standby je pohotovostní napájení pro tlačítko napájení, NVRAM³, RTC⁴ atd.

Základní deska rozvádí veškeré komunikační a napájecí sběrnice a signály a je osazena systémovou řídicí jednotkou a koordinátorem (SCC - System Controller & Coordinator).

Dále bylo třeba rozhodnout, na jakém fyzickém konceptu bude zařízení postaveno, tedy, jestli se bude jednat o stohovatelné kostky, nebo jinak do sebe zapadající kostky, nebo jako karty zapojované do základní desky.

Pro tuto platformu byla zvolena koncepce karet zapojovaných do základní desky a z důvodu kompatibility se šasi dostupnými na trhu byl zvolen formát Eurocard[12]. Byla zvolena výška karet pro 3 U (100 mm) a délka 160 mm, protože to současné technologie vysoké integrace dovolují, je možné moduly této velikosti vyrábět i v kusové výrobě a tato velikost je podporována na trhu dostupnými šasi a šířka modulů v násobcích 3 HP, což je $3 \times 5,08 \text{ mm} = 15,24 \text{ mm}$.

Pak bylo třeba rozhodnout, jak mezi sebou budou moduly komunikovat. Nabízela se možnost použití analogových signálů, jednoduchých digitálních signálů, sběrnic, nebo bezdrátové komunikace.

²Uninterruptible Power Supply - zdroj nepřerušovaného napájení

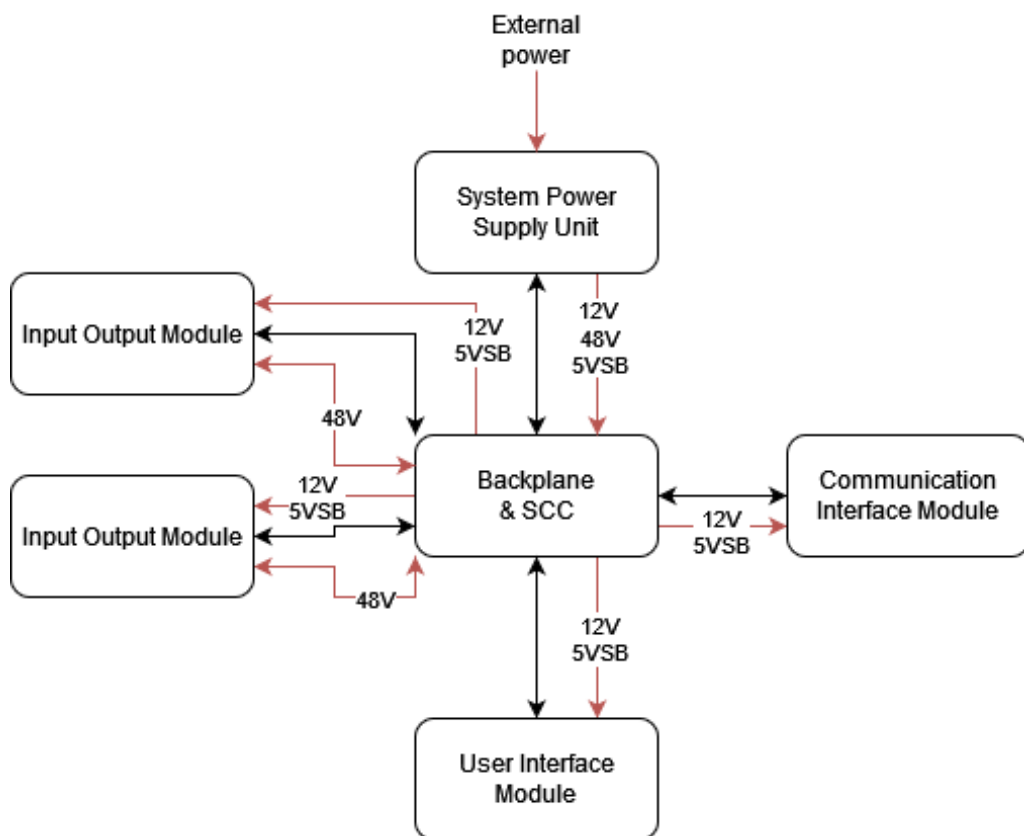
³Non-Volatile Random Access Memory - napěťově nezávislá paměť s přímým přístupem

⁴Real Time Clock - hodiny reálného času

Analogová komunikace by mohla být náchylná na rušení, samotné jednoduché digitální signály by nestačily pro přenos veškerých informací a bezdrátová komunikace by podle zvoleného pásma a protokolu mohla být náchylná na rušení (nespolehlivost spojení) a u nižších frekvencích by nemusela být dostatečná propustnost pro některé aplikace. A proto byly, podle typu komunikace, zvoleny osvědčené a široce používané sériové sběrnice spolu s vlastní paralelní sběrnici a podpůrnými jednoduchými digitálními signály. Konkrétně sběrnice SPI⁵, I²C⁶, vlastní paralelní sběrnice nazvaná SimpleBus a signály #ALERT, #RESET a 48V_EN. I²C má sloužit pro správu systému (měření interních teplot, napětí, proudů, řízení ventilátorů, identifikace modulů, stavy atd.). SPI má sloužit pro rozsáhlou kompatibilitu s mikrokontroléry a mikroprocesory, a nižší náklady na moduly, které nepotřebují vyšší datovou propustnost. SimpleBus má zajišťovat vyšší datovou propustnost pro moduly, které ji vyžadují. #ALERT je signál přerušení převzatý ze sběrnice SMBus a slouží k signalizaci požadavku na obsloužení na sběrnici I²C. #RESET je signál asynchronního resetu zařízení. A 48V_EN je signál povolení použití silové sběrnice 48 V, který musí v modulech hardwarově ovládat přístup k silové sběrnici 48 V pro případ chyby měření proudu na této napájecí sběrnici nebo pro případ jejího přetížení.

⁵Serial Peripheral Interface

⁶Inter-Integrated Circuit



Obrázek 4.1: Blokové schéma koncepce platformy

5 SPECIFIKACE PROTOTYPU

Pro prototyp byla zvolena šířka základní desky pro 28 HP¹ ($28 \times 5,08 \text{ mm} = 142,24 \text{ mm}$), jelikož ale šasi má na každé straně navíc mezeru 2,54 mm, tak byla výsledná šířka stanovena na 145 mm. Základní deska bude tedy mít 9 slotů, což je maximum, co se do dané velikosti vejde.

Kvůli komplexnosti a variabilitě navrhované platformy, nebylo v časovém rámci práce přinést komplexní řešení přístroje. Bakalářská práce je tedy omezena na návrh a realizaci mechanické konstrukce přístroje, základní desky sběrnic, vnitřní distribuce napájení, provizorního napájecího zdroje a modulu elektronické zátěže.

Pro provoz zařízení v této práci byl použit externí zdroj 12 V se souosým konektorem. Zařízení bylo ovládáno z počítače připojeného USB kabelem na základní desku. Zařízení bylo navrhováno podle Normy bezpečných napětí.

Modul zátěže by měl zvládat maximální napětí 60 V stejnosměrných a maximální zátěžový proud 10 A. Maximální výkon by měl být stanoven měřením. Veškeré vstupy jsou galvanicky izolované a modul má možnost nejen dvou- vodičového, ale i čtyřvodičového zapojení. Pro indikaci stavu modulu byly osazeny LED. Funkčnost zařízení by měla být ověřena měřením na USB C PD powerbance pro ověření, že je schopna dodávat specifikované proudy. Měření by mělo být prováděno v kombinaci s dvěma multimetry pro ověření hodnot napětí a proudu. Měla by být stanovena i přesnost měření.

¹Horizontal pitch - horizontální rozteč

6 REALIZACE PROTOTYPU

6.1 NÁVRH KOMPONENT

Návrh veškerých součástí byl proveden ve volně a zdarma dostupném softwaru. Mechanické díly byly navrženy v programu FreeCAD a plošné spoje byly navrženy v programu KiCAD. Pro simulace byly použity programy LTSpice od Linear Technology a Circuit Simulator od Paula Falstada.

Veškeré mechanické díly byly navrženy tak, aby nebylo potřeba jakýchkoliv náročnějších výrobních technologií, jako je svařování (vhodný prostor, znalosti a dovednosti) a ohýbání plechů (vybavení, znalosti a dovednosti). Místo toho bylo použito šroubových a tvarových spojů a 3D tisku (v moderní době znalostně či dovednostně nenáročný, snadný a relativně levný outsourcing).

Jelikož konektory DIN 41612 mají otvory pro šrouby M2.5 a šasi od značky Schroff[11] používají šrouby M2.5 pro připevnění předních a zadních panelů a i dalších částí, byly pro kompatibilitu s šasi a předními panely od značky Schroff (a i zřejmě ostatních výrobců) a snížení počtu druhů spojovacích dílů použity šrouby M2.5. A pro rozebíratelnost byly tištěné části navrženy s otvory pro čtvercové matičky M2.5.

Všechny mikrokontroléry použité v projektu jsou Raspberry Pi RP2040. Tento mikrokontrolér byl zvolen kvůli relativní jednoduchosti oproti např. STMicroelectronics STM32, větší obeznamenosti, předčenému vzrůstu jeho popularity (zvláště ve formě Raspberry Pi Pico a Pico W) a jeho blokům PIO¹. Bloky PIO umožňují programování různých komunikačních sběrnic, chytřejších nebo autonomnějších GPIO² nebo časovačů, a nejen to. RP2040 jich má dvě a každý blok se skládá ze čtyř programovatelných stavových automatů a instrukční paměti s kapacitou 32 instrukcí. Stavové automaty lze programovat 16bitovou sadou instrukcí s celkem devíti instrukcemi (JMP, WAIT, IN, OUT, PUSH, PULL, MOV, IRQ, SET). Každá instrukce obsahuje 5bitové pole „Delay/side-set“, které podle nastavení stavového automatu, diktuje počet cyklů zpoždění (hodnota o velikosti 0 až 5 bitů, 0 až 31 cyklů) nebo stav přednastavených pinů (0 až 5 pinů). Každý stavový automat se skládá ze dvou uživatelských registrů (X a Y), dvou posuvných registrů (vstupní a výstupní) a vlastního děliče hodinové frekvence. Stavové automaty také mají

¹programmable input/output - programovatelný vstup/výstup

²general-purpose input/output - vstup/výstup obecného použití

automatické cyklení bez zpoždění podle nastavení v registrech (počáteční a koncová adresa v instrukční paměti). Piny, které daný stavový automat čte z a zapisuje do, se určují v registrech daného automatu jako počáteční pin a počet pinů od tohoto počátečního pinu. Některé instrukce ale toto nastavení mohou obejít a používat globální číslování pinů. A pro komunikaci mezi stavovými automaty a jejich synchronizaci lze použít 8 linek přerušení a 4 z nich lze namapovat do výstupu přerušení bloku (celkem pouze dvě zároveň).[15]

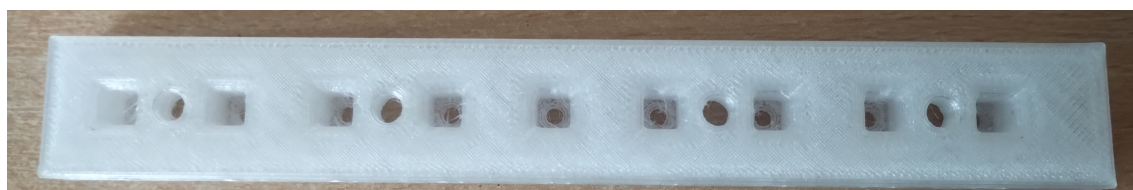
Jelikož experimenty s potlačením hran pro potlačení odrazů pomocí nastavení pinů mikrokontroléru s koaxiálním kabelem nebyl úspěšný, tak byly veškeré vysílače signálů či sběrnic osazeny odpory pro zpomalení hran signálů. Kapacita tras sběrnic a signálů byla zhruba vypočítána pomocí online kalkulačky Coplanar Waveguide Analysis/Synthesis Calculator[14] od Dana McMahilla. Délka trasy byla zvolena $84 \times 5,08 \text{ mm} = 426,72 \text{ mm}$, šířka trasy $0,16 \text{ mm}$ (kdyby byl modul vložen do zařízení velikosti 84 HP), mezera mezi trasou a rozlitou mědí kostry $0,16 \text{ mm}$ a tloušťka kovu $0,035 \text{ mm}$. Výsledná kapacita trasy na mm byla zhruba $0,066 \text{ pF/mm}$, což dávalo kapacitu trasy $0,066 \times 426,72 = 28,16 \text{ pF}$. Pak v programu Saturn PCB Toolkit v záložce „Conductor Impedance“ se doplněním šířky trasy (W) $0,16 \text{ mm}$ a výšky trasy (H) $1,6 \text{ mm}$ vypočítala efektivní dielektrická konstanta „Er Effective“ rovnající se $2,86$. Pak v záložce „Wavelength Calculator“ byla experimentálně vypočítána frekvence, při které jedna čtvrtina vlnové délky je větší než $426,72 \text{ mm}$. Poté byl pomocí kalkulačky pro filtry od DigiKey[13] vypočítán potřebný sériový odpor pro -40 dB a bylo tedy třeba, aby hodnota -3 dB byla zhruba stokrát nižší a výslednou hodnotou je $5,1 \text{ k}\Omega$. Odpor byl později zvýšen na $5,6 \text{ k}\Omega$ kvůli tomu, že nebyla na skladě odporová pole s hodnotou $5,1 \text{ k}\Omega$ o počtu čtyř odporů v poli. Sériové odpory pro sběrnici I²C a signály #ALERT, #RESET a 48V_EN byly zvoleny $10 \text{ k}\Omega$ a byl vypočten vzhledem ke specifikacím rychlosti hran I²C podle NXP[8] v jejich specifikačním listě a manuálu pro sběrnici I²C. Konkrétně pro frekvenci 1 MHz („Fast-mode Plus“) jsou maximální čas poklesu i čas náběhu specifikovány 120 ns a zvolený čas poklesu a náběhu tedy byl 60 ns . Pro výpočet frekvence ale byla použita jiná záložka v programu Saturn PCB Toolkit, a to záložka „Bandwidth & Max Conductor Length“ a v kalkulačce pro filtry od DigiKey[13] byla použita hodnota -3 dB pouze desetkrát nižší.

6.1.1 Šasi

Šasi bylo navrženo pomocí katalogu šasi EuropacPRO[4] od značky Schroff a bylo jimi i inspirováno. Konkrétně byly použity rozměry na stránce 6.37 „GUIDE RAILS“ a na předchozí stránce 6.36 „Z-RAILS, PERFORATED RAILS“ byl nalezen produkt číslo 20822-049, na jehož webové stránce[9], na prvním obrázku, byl použit rozměr 122,5 mm. Důvodem návrhu vlastního šasi byla cena a dostupnost.

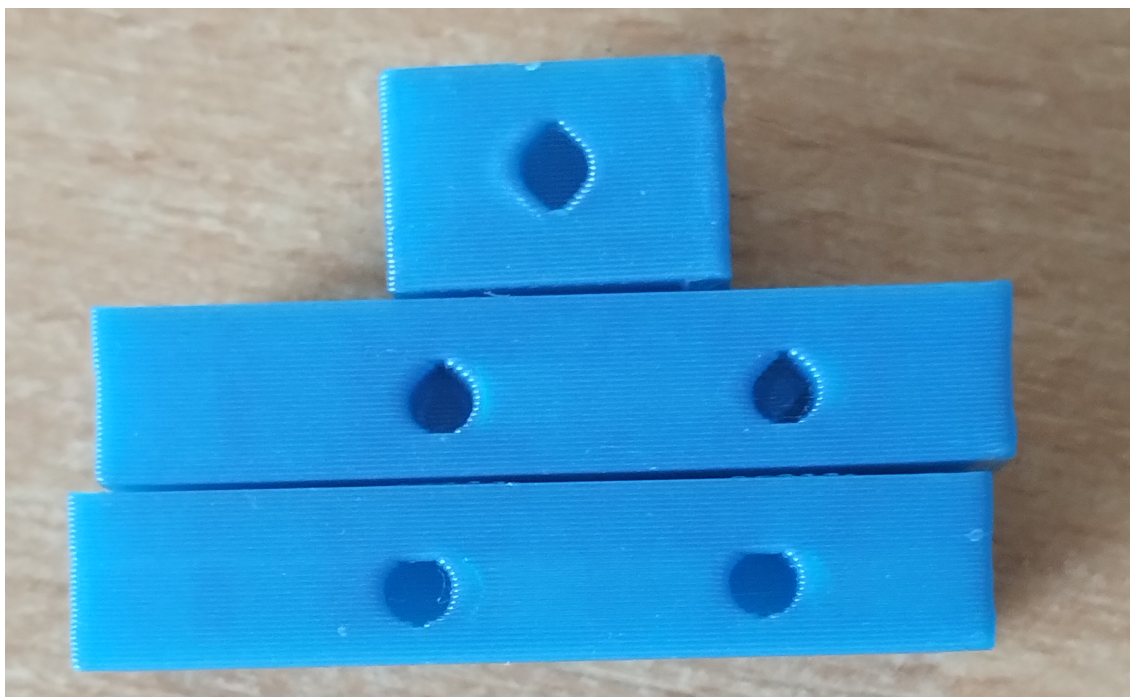
Šasi bylo sestaveno ze šesti hliníkových profilů 10 x 20 mm s T drážkou 5 mm, plechů s tloušťkou 0,5 mm a plastových částí vytištěných na 3D tiskárně. Pro chlazení modulů byl osazen radiální ventilátor Sunon PMB1212PLB2AF s napájecím napětím 12 V a velikostí 120 x 120 x 32 mm. Pro chlazení zadního prostoru byl zatím pouze specifikován (v této práci nebyl osazen) ventilátor Sunon MF50101V1-G99-A s napájecím napětím 12 V a velikostí 50 x 50 x 10 mm. Zároveň byl navržen a osazen i držák filtru vzduchu na vstupu chlazení modulů.

Jelikož se matičky M2.5, použitých pro připevnění podpěrných lišt desek, vkládaly do horizontálních lišt do otvorů konstruovaných vespod, bylo nutné kvůli dodržení tolerancí při tisku součást pro tisk otočit tak, aby otvory pro matičky byly seshora.



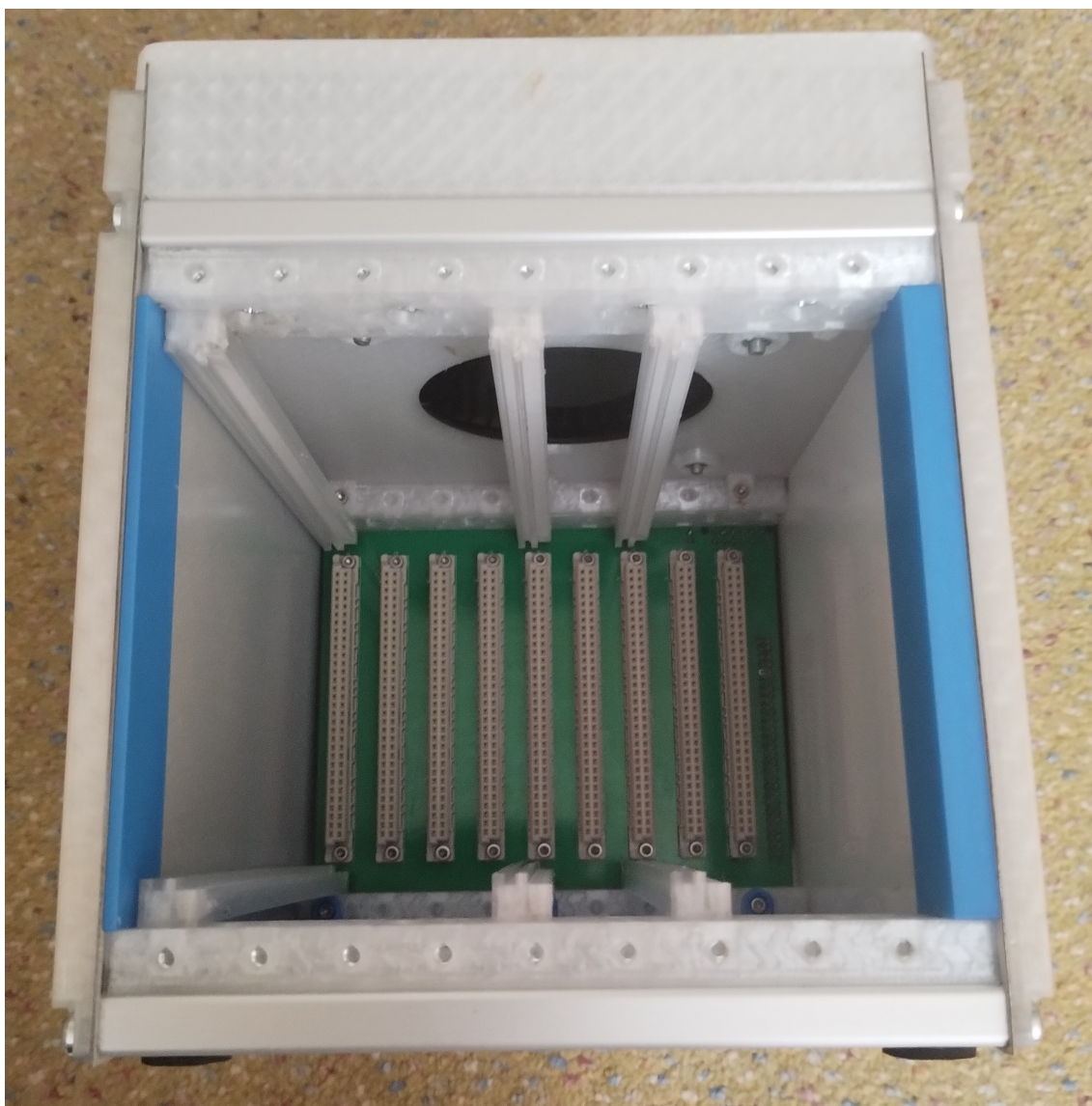
Obrázek 6.1: Horizontální lišta v orientaci ve které byla vytisknuta.

Pro otvory pro šrouby na svislých stranách byla nejdříve, při tisku vzor-
kových kusů, použita jednoduchá konstrukce kulatých otvorů, které ale byly
slicerem seshora „zmáčknuty“. Poté byla použita konstrukce otvorů ve tvaru
kapky, ale zde pak slicer mírně otvor „zmáčknul“ zespodu a nakonec tedy
byl kapkový tvar zrcadlen do tvaru kočičího oka. Nakonec se ale na předních
panelech ukázalo, že pouhé zvýšení tolerancí bylo naprosto dostačující.



Obrázek 6.2: Otvory v tištěných dílech. Zespodu nahoru: původní kulatý ot-
vor, kapkový otvor, otvor ve tvaru kočičího oka.

Schématický výkres viz Přílohy - Schématický výkres šasi



Obrázek 6.3: Fotografie vnitřku šasi.

6.1.2 Základní deska

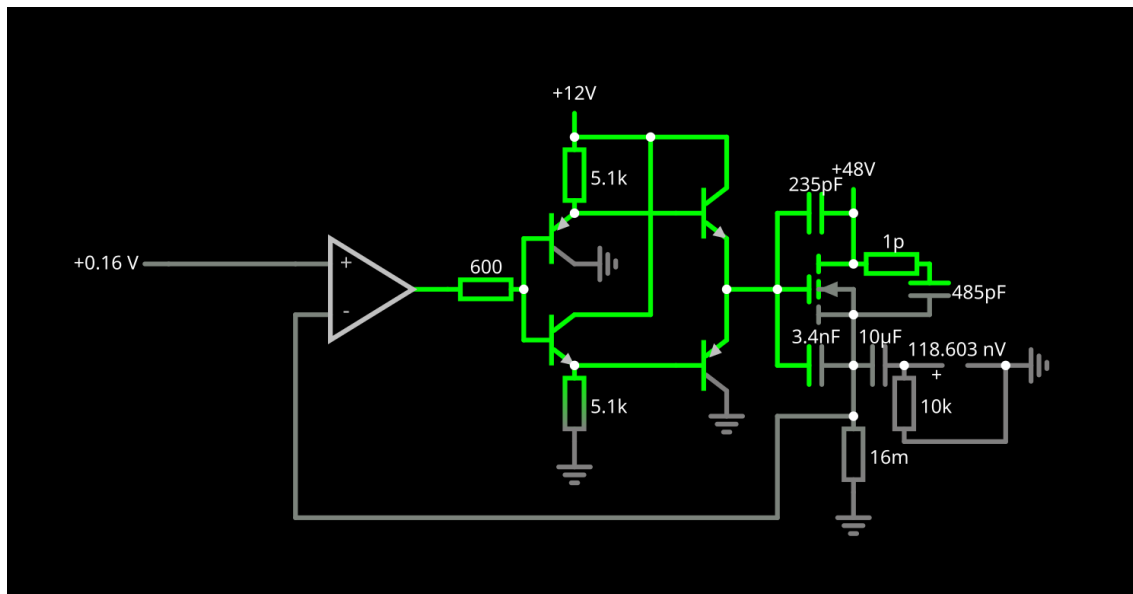
Základní deska byla kvůli úspoře místa navržena ve dvou částech: backplane a dceřinná deska s SCC (System Controller & Coordinator). Kvůli nedostatku pinů GPIO na mikrokontroléru RP2040 byla řídicí jednotka SCC navržena jako čipová sada dvou RP2040 v kombinaci s dvěma I²C GPIO rozšiřovači a multiplexorem pro signál CS sběrnice SPI. Jeden mikrokontrolér byl pověřen obsluhou paralelní sběrnice SimpleBus na backplane a měřením proudů v elektronických pojistkách. Druhý byl pověřen obsluhou sběrnic SPI a I²C a signálu #ALERT na backplane, sběrnice I²C pro komunikaci s I²C GPIO rozšiřovači a pamětí EEPROM (Electrically Erasable Programmable Read-Only Memory - elektricky vymazatelná paměť pouze pro čtení) a měřením teplot. I²C GPIO rozšiřovače byly použity pro obsluhu signálů #RESET a 48V_EN, indikačních LED a multiplexoru termistorů pro měření teplot pinů 48 V na konektorech. Oba mikrokontroléry pak byly propojeny 4bitovou sběrnicí SimpleBus.

6.1.3 Modul zátěže

Modul zátěže byl nejdříve navrhován kolem čtyř MOSFETů³ FDA38N30 a tunelového chladiče Fischer Elektronik LAM 4 K. Chladič LAM 4 K v době práce většina dodavatelů prodávala osazený drahým ventilátorem od značky ebm-papst, a našel se jen jediný prodejce, který prodával neosazený chladič, a bylo plánováno chladič osadit mnohem levnějším ventilátorem od značky Sunon. Bohužel jak neosazený, tak osazený chladič neměl prodejce na skladě a dodací lhůta byla příliš dlouhá. Proto bylo zvoleno nové řešení s MOSFETem IXYS Linear-L2 IXTH64N10L2 a chladičem Noctua NH-L9i (či jeho novější verzí NH-L9i-17xx). MOSFET IXYS Linear-L2 IXTH64N10L2 byl vybrán z důvodu, že byl výrobcem navržen pro použití v lineárních obvodech, jako jsou právě například elektronické zátěže. MOSFETY mají obvykle kladný tepelný koeficient odporu, ale pod určitou hranicí napětí U_{gs} mají tepelný koeficient odporu záporný. Toto by nebyl problém, pokud by MOSFET byl jednoduchý planární, ale ty už se dnes nevyrábí. Moderní konstrukce MOSFETů se ve skutečnosti chová jako pole infinitesimálně malých MOSFETů, jejichž vlastnosti mají nějakou toleranci. Toto může způsobit to, že jeden infinitesimálně malý MOSFET může v oblasti tepelné nestability odporu začít odebírat veškerý proud tekoucí celým MOSFETem, vytvoří se bod zvýšené teploty a MOSFET se v daném bodě může spálit. Jedná se o tzv. Spiritův efekt.[3, 2] Při použití MOSFETu, který není určen pro lineární účely, je třeba oblast tepelné stability experimentálně ověřit. V případě vybraného MOSFETu IXYS Linear-L2, u kterého je oblast tepelné stability určena výrobcem, lze jen použít charakteristiku FBSOA (Forward bias safe operating area - oblast bezpečné operace v dopředném směru).

³metal-oxide-semiconductor field-effect transistor - polem řízený tranzistor kov-oxid-polovodič

Řízení MOSFETu bylo vyřešeno operačním zesilovačem snímajícího napětí na bočníku s proudovým zesilovačem sestaveného ze dvou NPN a dvou PNP tranzistorů. A řízení tohoto celku bylo provedeno 12bitovým DA⁴ převodníkem. Použití proudového zesilovače bylo odůvodněno velkou kapacitou C_{gs} MOSFETu a použití dalšího bočníku bylo odůvodněno eliminací přechodových jevů při přepínání proudových rozsahů. Kdyby totiž operační zesilovač snímal signál ze zesilovačů měřících bočníků a přepnulo by se z nižšího rozsahu na vyšší, tak by došlo k prudkému zvýšení zátěžového proudu, než by se stačila nastavit nová hodnota v DA převodníku. Tímto byl vyřešen režim konstantního proudu a režimy konstantního napětí, výkonu a odporu byly řešeny softwarově.

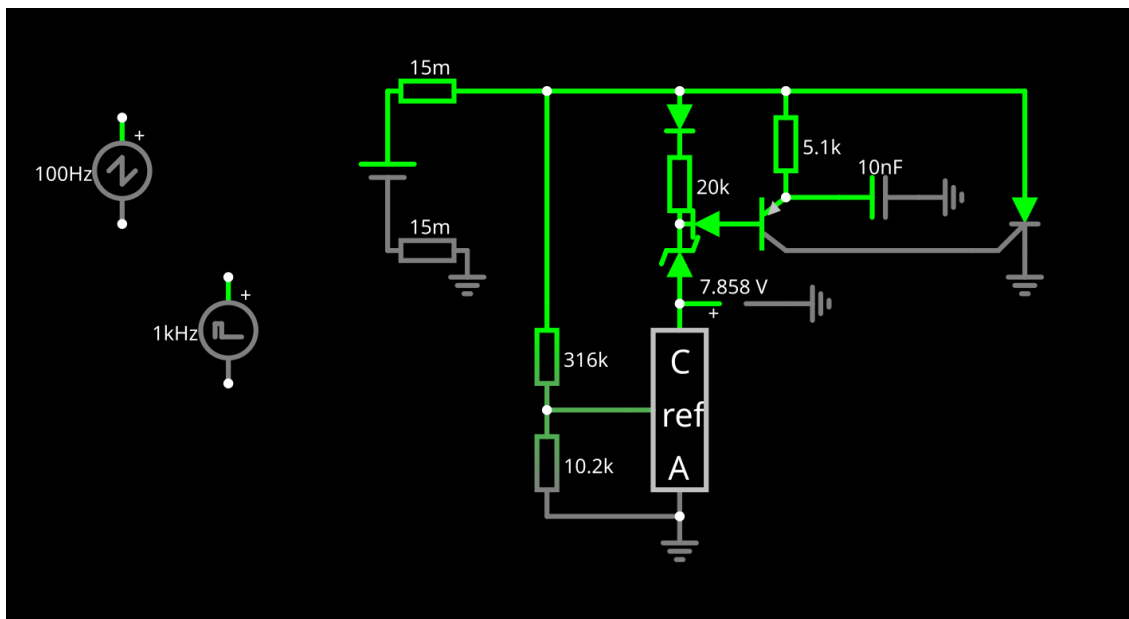


Obrázek 6.4: Model obvodu MOSFETové zátěže v Circuit Simulator

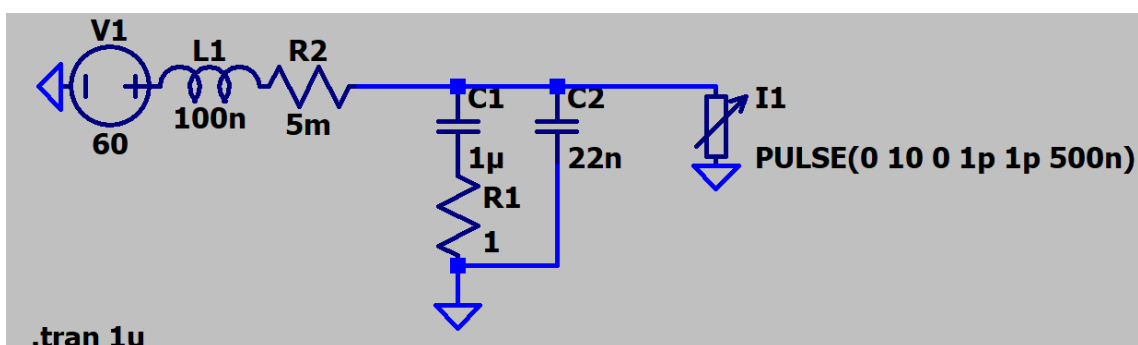
Ochrana modulu proti nadproudu byla řešena keramickou trubičkovou pojistkou v držáku, ochrana proti přepólování byla řešena anti-paralelní Schottkyho diodou a ochrana proti přepětí byla řešena pomocí „páčidlového obvodu“, což je obvod, který záměrně obvod zkratuje a aktivuje nadproudovou ochranu obvodu. Tento obvod byl nasimulován a experimentálně navrhnut v Circuit Simulator.

Pro tlumení přechodových jevů bylo použito paralelního RC obvodu, který byl nasimulován a experimentálně navrhnut v LTSpice.

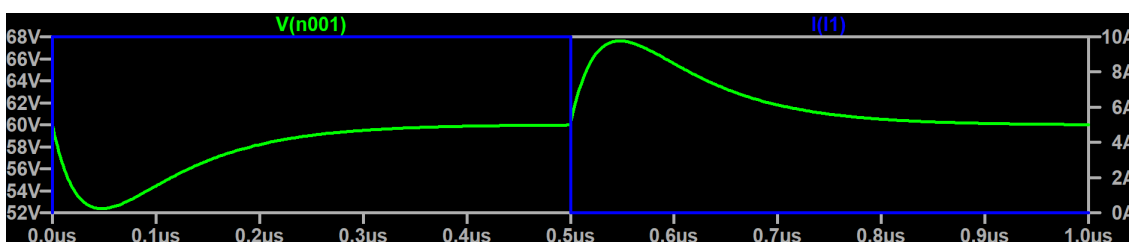
⁴digitálně-analogovým



Obrázek 6.5: Páčidlový obvodu navržený v Circuit Simulator



Obrázek 6.6: Obvod RC obvodu pro tlumení přechodových jevů navržený v LTSpice



Obrázek 6.7: Průběhy napětí a proudu v obvodu nasimulované v LTSpice

Pro měření proudu bylo zvoleno použití bočníků a dvou rozsahů (10 A a 1 A). Při výběru zesilovačů bočníků bylo zohledněno především souhlasné napětí od 1 V do 60 V (kvůli přechodným jevům a bezpečnostnímu odstupu 80 V) a zesílení ne tak malé, aby bylo nutné použití velkého výkonového bočníku, a ne tak velké, aby náš signál byl pohlcen rušením. Proto byl zvolen zesilovač Texas Instruments INA281B1 a vzhledem k jeho dvacetinásobnému zesílení napětí a napájecího napětí 3,3 V bočníky o hodnotách 160 mΩ a 16 mΩ. Bočníky byly zapojeny do série a pro vyřazení bočníku 160 mΩ při měření v rozsahu 10 A bylo použito paralelního N-kanálového MOSFETu. Ovládání MOSFETu bylo vyřešeno optočlenem Toshiba TLP155E. Napětí pro ovládání MOSFETu bylo vyřešeno použitím galvanicky izolovaného DC/DC měniče CUI PDSE1-S12-S15-S.

Pro měření napětí v dvou vodičové zapojení byl použit operační zesilovač Texas Instruments TLV9001 a pro čtyřvodičové zapojení byl použit přístrojový zesilovač Texas Instruments INA826S. Ochrana přístrojového zesilovače byla zajištěna obousměrnými transily.

Vzorkování měřených veličin bylo vyřešeno AD⁵ převodníky Texas Instruments ADS7042, a řízení jejich vstupů bylo zajištěno obvody uvedenými v jejich datovém listu (operační zesilovač a stabilizační RC filtr). Kdyby obvodu nebylo využito, mohlo by dojít k navzorkování menší než skutečné hodnoty kvůli spínané kapacitní zátěži vzorkovacích obvodů převodníků.

Pro galvanické oddělení komunikace s DA a AD převodníky a ovládacích signálů byly použity oddělovače Texas Instruments ISO6760 a ISO6762.

Napájení řídicího obvodu MOSFETu bylo vyřešeno pomocí lineárního regulátoru 12 V pro stabilizaci napětí a odstranění spínacího šumu z napětí 15 V dodávaného galvanicky izolovaným DC/DC měničem XP Power IES0212S15, ale jelikož nebyl na skladě, tak byl nahrazen měničem CUI PDS2-S12-S15. Napájení obvodů vyžadujících 3,3 V bylo rozděleno na větev pro digitální obvody a větev pro analogové obvody a každá z těchto dvou větví dostala vlastní lineární regulátor, které byly následně napojeny na výstup buck⁶ měniče, snižujícího 15 V z již zmíněného izolovaného DC/DC měniče na 5 V. Pro dodávku -3,3 V pro symetrické napájení přístrojového zesilovače bylo využito LC filtrovaného invertoru napětí.

6.2 SESTAVENÍ ZAŘÍZENÍ

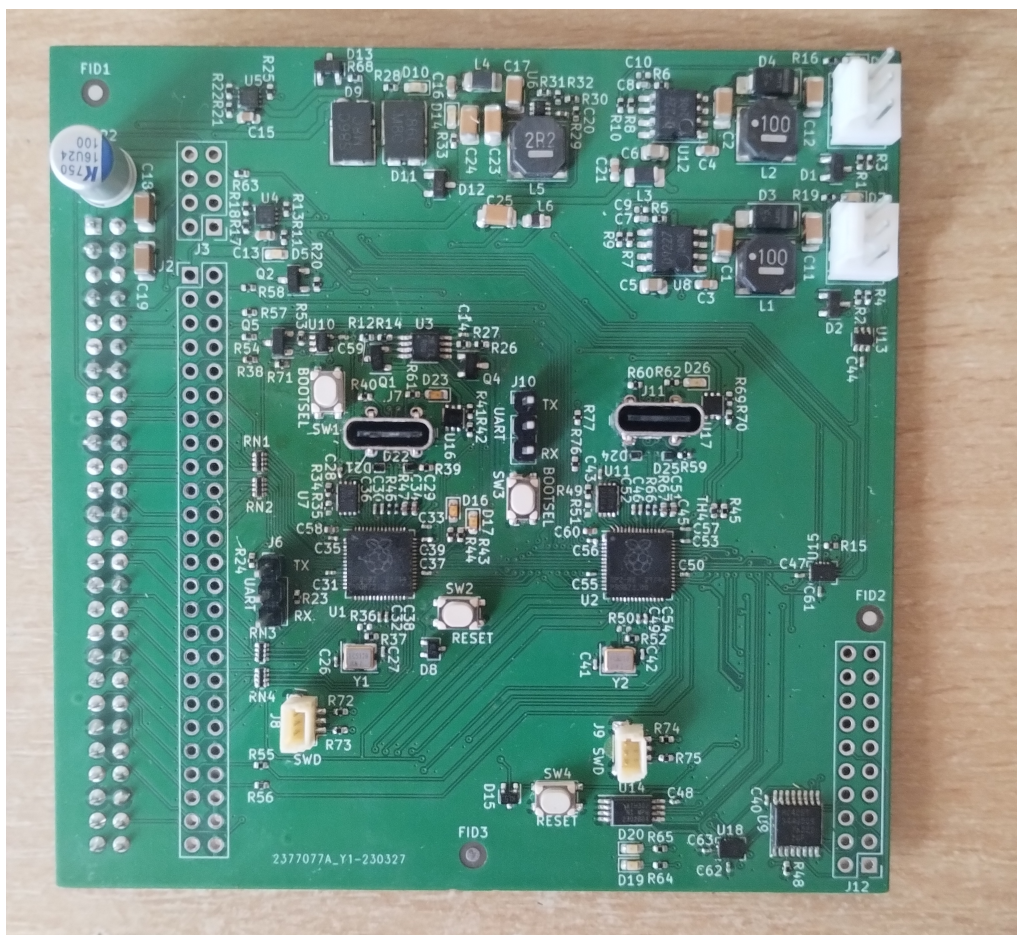
Kusovníky viz Přílohy - Kusovníky

Při sestavování se objevily chyby v propočtech a odhadech. Prostor pod chladičem byl ve skutečnosti nižší, než bylo vypočítáno z vyhledaných rozměrů procesorové patice, pro kterou byl chladič určen, a musel být vyvýšen. Pro vyplnění mezery mezi MOSFETem a chladičem byly použity dvě

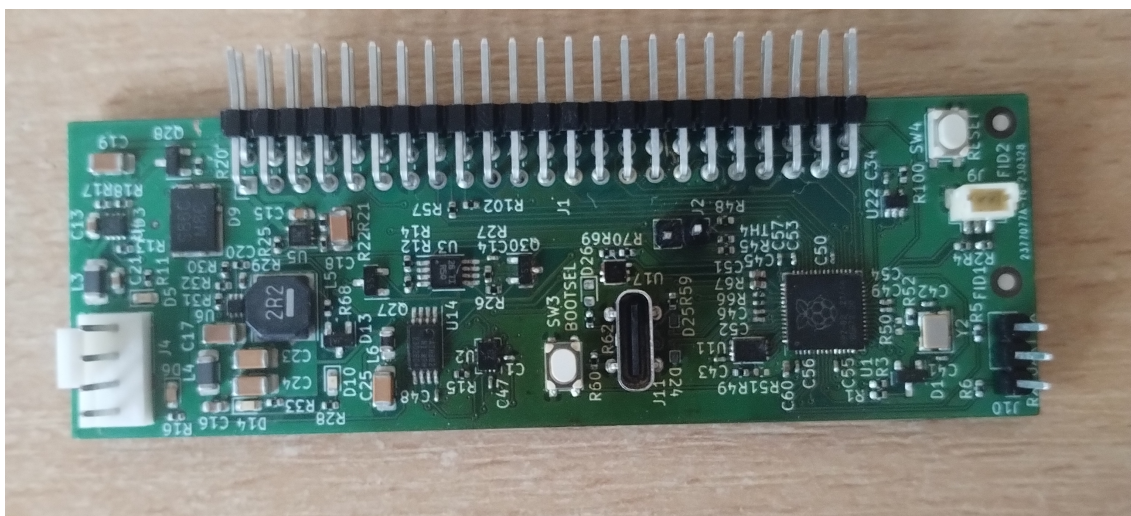
⁵analogově-digitální

⁶buck - snižovací

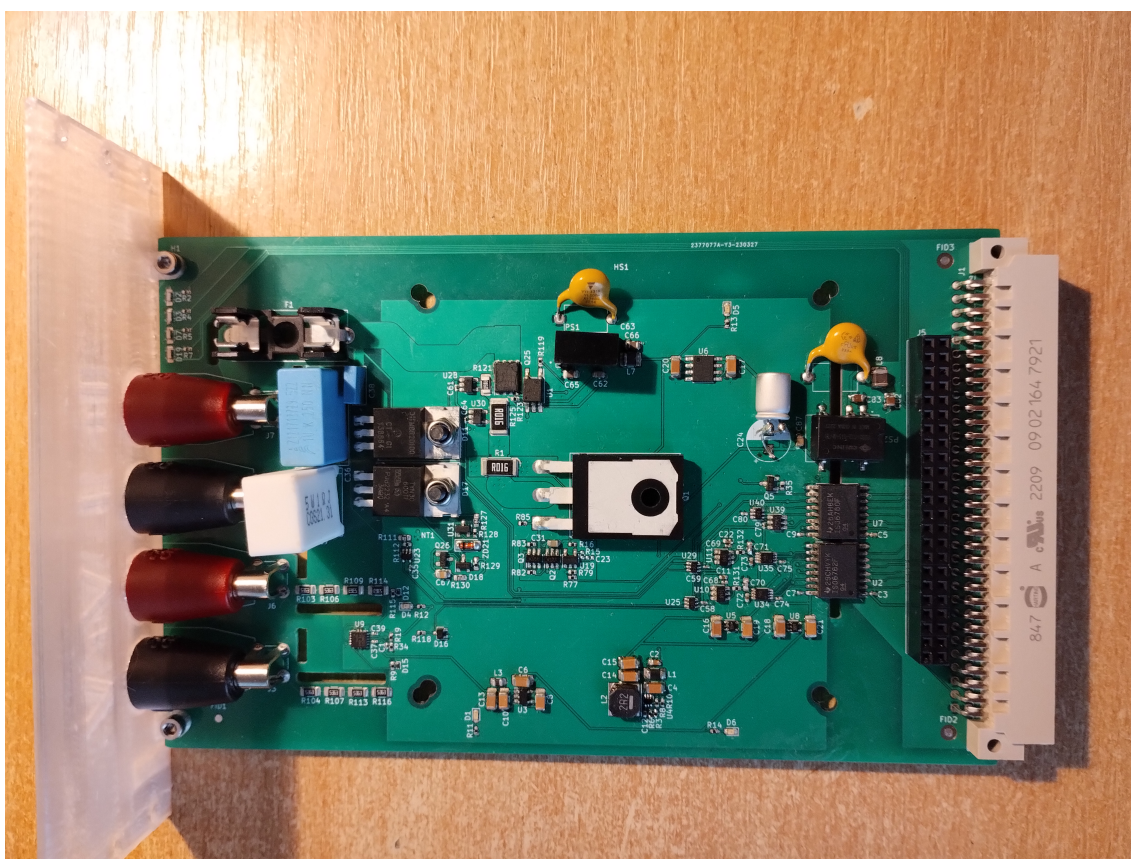
1,5 mm tlusté měděné destičky položené na sebe. Termistor pro snímání teploty MOSFETu byl pak přilepen kaptonou páskou ke spodní měděné destičce. Nebylo možné osadit dva konektory na dceřinné desce základní desky kvůli přesahu jednoho konektoru do druhého, bylo totiž při návrhu desky použito pouzdro pro neopláštěný konektor a byl objednan konektor opláštěný. Pro zapojení napájecího kabelu základní desky bylo nutné jednu horizontální lištu demontovat kvůli interferenci s konektorem na kabelu. Taktéž by nebylo možné osazení zadního modulu komunikačního rozhraní či plánovaného modulu napájecího zdroje kvůli nedostatečné hloubce šasi za backplane. Také bylo zjištěno, že jsou dva konektory (hřebínky) na dceřinné desce základní desky příliš blízko sebe, protože KiCAD neměl v knihovně pouzder opláštěné hřebínky, které mají trochu větší půdorys. Také se zjistilo, že prostor za základní deskou je příliš malý do hloubky. Není totiž možné zapojit kabel do napájecího konektoru základní desky a velmi pravděpodobně by se tam nevešel plánovaný napájecí zdroj a plánovaný zadní modul komunikačního rozhraní.



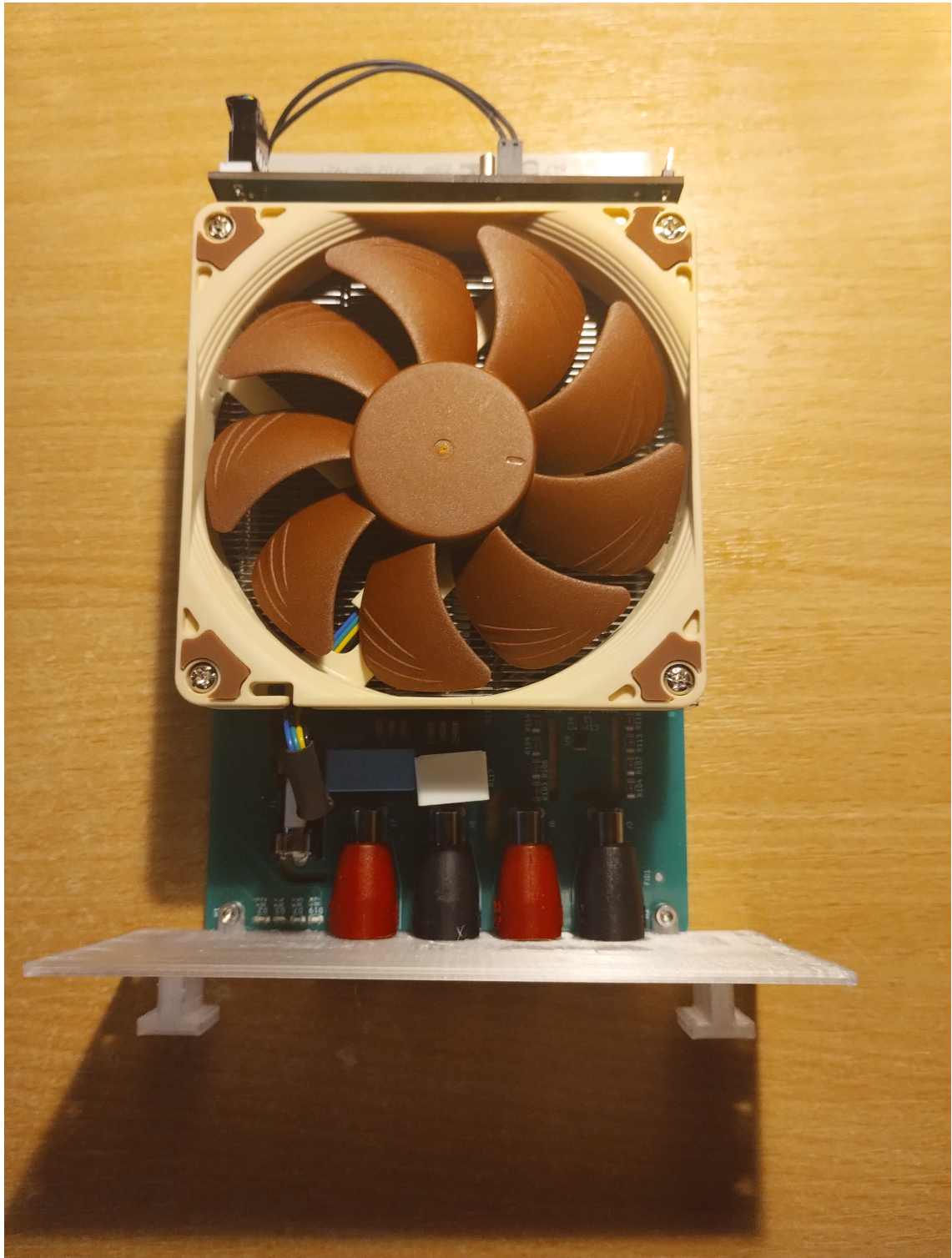
Obrázek 6.8: Řídicí dceřinná deska základní desky.



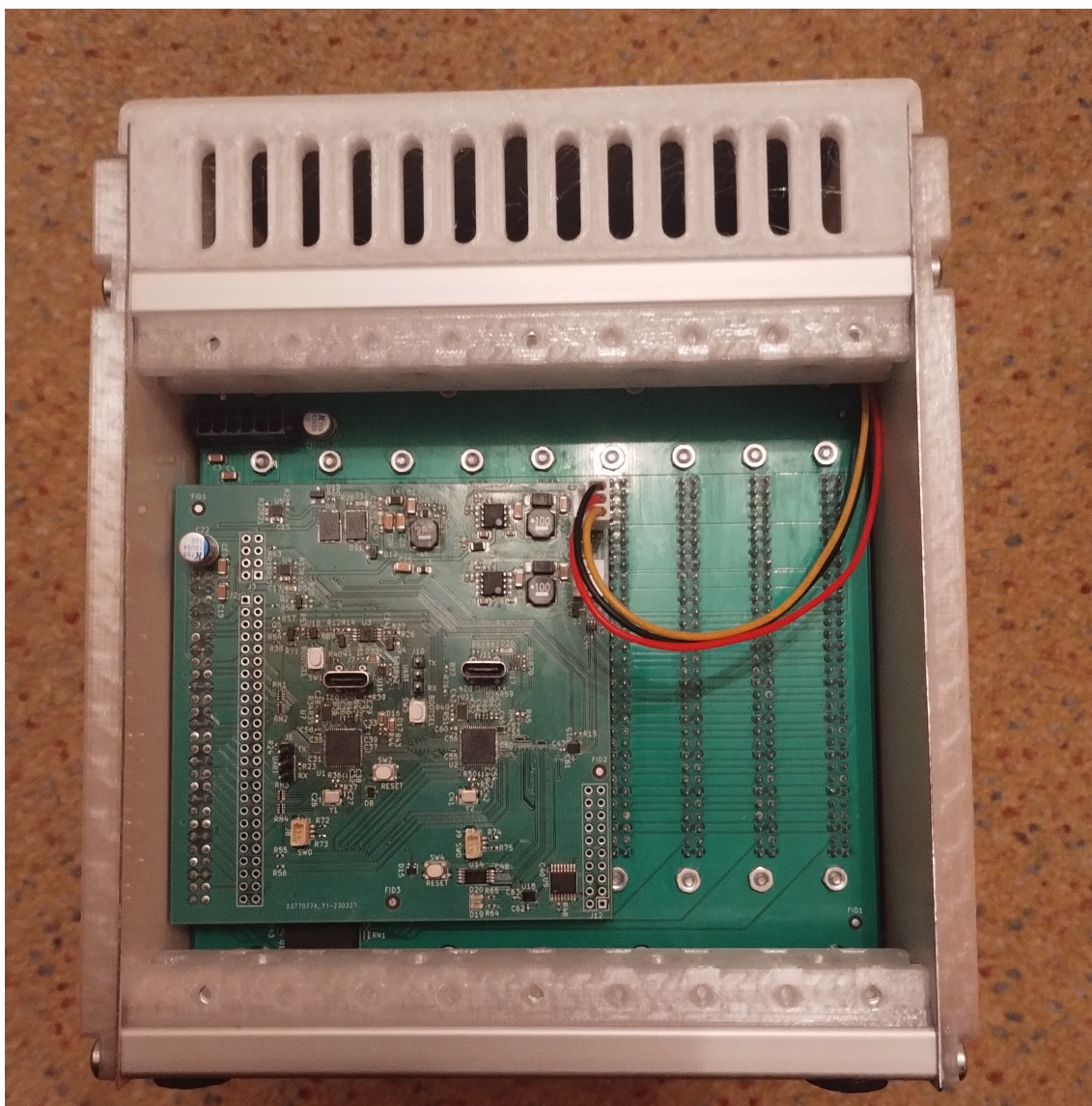
Obrázek 6.9: Řídicí deska zátěže.



Obrázek 6.10: Modul zátěže před osazením chladiče.



Obrázek 6.11: Sestavený modul zátěže.



Obrázek 6.12: Sestavené zařízení zepředu.



Obrázek 6.13: Sestavené zařízení zezadu.

6.3 PROGRAMOVÁNÍ ZAŘÍZENÍ

Zařízení bylo naprogramováno ve vývojovém prostředí Microsoft VSCode v jazyce C.

Protože mikrokontrolér RP2040 nemá interní nevolatilní paměť pro instrukce a potřebuje tedy paměť externí, je pro jeho naprogramování nutné specifikovat nastavení bloku XIP⁷ a jeho QSPI⁸ rozhraní. Konkrétně je třeba specifikovat, jak velká paměť je, nastavení frekvenčního děliče, jaké má paměť příkazy a jak se paměť přepíná do režimu QSPI. Proto byla použita stejná paměť jako na desce Raspberry Pi Pico a hlavičkový soubor desky Pico s těmito nastaveními a poupravena kvůli nepotřebě a i nesouhlasnosti některých definic s deskami zařízení.

Kvůli nedostatku SPI bloků na mikrokontroléru RP2040, bylo nutné použití jednoho bloku PIO. Jeden z SPI bloků byl použit pro komunikaci po SPI sběrnici na základní desce a druhý byl využit pro komunikaci s DA převodníkem. Tudíž pro komunikaci s AD převodníky bylo využito dvou stavových automatů bloku PIO (jeden automat na každý AD převodník). Tomu byl i přizpůsoben návrh řídicí desky modulu zátěže a nebylo by možné použití SPI bloků pro komunikaci s AD převodníky, protože rozvržení signálů na piny RP2040 nebylo provedeno souhlasně s vnitřním rozvržením pinů SPI bloků. Pro naprogramování PIO bloků bylo použito upraveného ukázkového kódu Raspberry Pi.

Zde je hlavní část programu PIO:

```
.wrap_target
    pull                side 0x0 [1]

    set pins, 0         side 0x0 [1]
bitloop:
    in pins, 1         side 0x1 [1]
    jmp x-- bitloop   side 0x0 [1]

    in pins, 1         side 0x1
    mov x, y           side 0x1

    set pins, 1         side 0x0 [1]
.wrap
```

Pro komunikaci s počítačem byla použita funkce printf pro přeposlání informací do počítače a pro čtení informací z počítače byla použita vlastní funkce serial_read, která byla úspěšně použita již v několika experimentálních programech.

```
void serial_read(char *buffer, int buffer_size)
{
```

⁷execute in place

⁸Quad SPI

```

int buffer_index = 0;
while(true)
{
    int c = getchar_timeout_us(0);
    if(c != PICO_ERROR_TIMEOUT)
    {
        printf("%c", c);
        buffer[buffer_index++] = c;
        if(buffer_index >= buffer_size)
        {
            printf("Buffer overflow!\n");
            return;
        }
    }
    if(buffer_index > 0 && buffer[buffer_index - 1]
        == '\n')
    {
        buffer[buffer_index - 1] = '\0';
        if(buffer[buffer_index - 2] == '\r')
        {
            buffer[buffer_index - 2] = '\0';
        }
        return;
    }
}
}

```

Bohužel byla funkce `serial_read` napsána jako funkce blokující chod kódu do zaznamenání znaku nového řádku. Bylo vyzkoušeno periodické posílání měřených veličin a neblokující použití funkce `getchar_timeout_us`, ale nefungovalo to, kvůli samovolnému vkládání ovládacích znaků `n` (newline - nový řádek) jak v terminálu, tak i v naprogramovaném Windows Forms C# programu programovaného ve Visual Studio Community Edition 2022.

7 OVĚŘENÍ FUNKČNOSTI ZAŘÍZENÍ

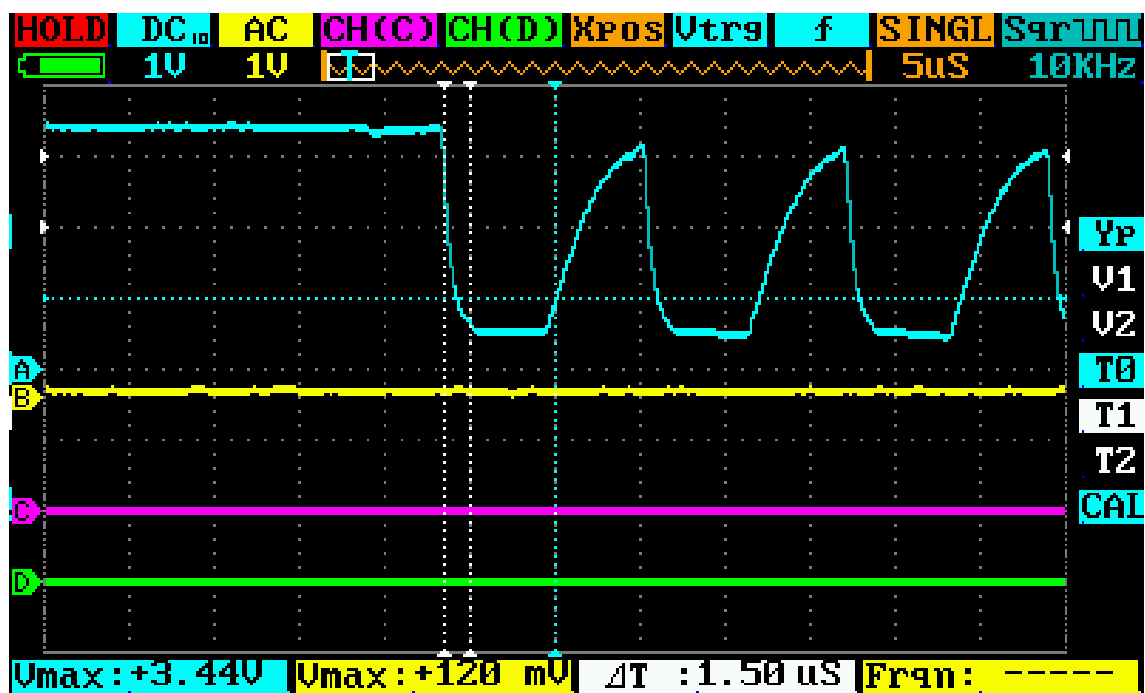
Ověření funkčnosti zařízení mělo být provedeno měřením na USB C PD powerbance. Cílem měření mělo být ověření, že powerbanka je schopna dodávat specifikované proudy a naměřené hodnoty napětí a proud měly být ověřeny dvěma multimetry. Taktéž měla být stanovena přesnost měření, a k tomu bylo plánováno využití vzorců v knize z doporučené literatury Elektrotechnická měření[1] v podkapitole 3.3 Chyby digitálních měřicích přístrojů, pro stanovení přesnosti měření obou multimetrů. Byl plánován i vypočtený odhad přesnosti měření modulu zátěže s využitím přesností součástí modulu. K tomu se nabízelo použití vzorců v té samé knize v podkapitole 3.4 Chyby nepřímých měření. Druhá doporučená publikace nebyla nalezena v univerzitní knihovně.

7.1 OVĚŘENÍ RYCHLOSTI HRAN SBĚRNICE I²C

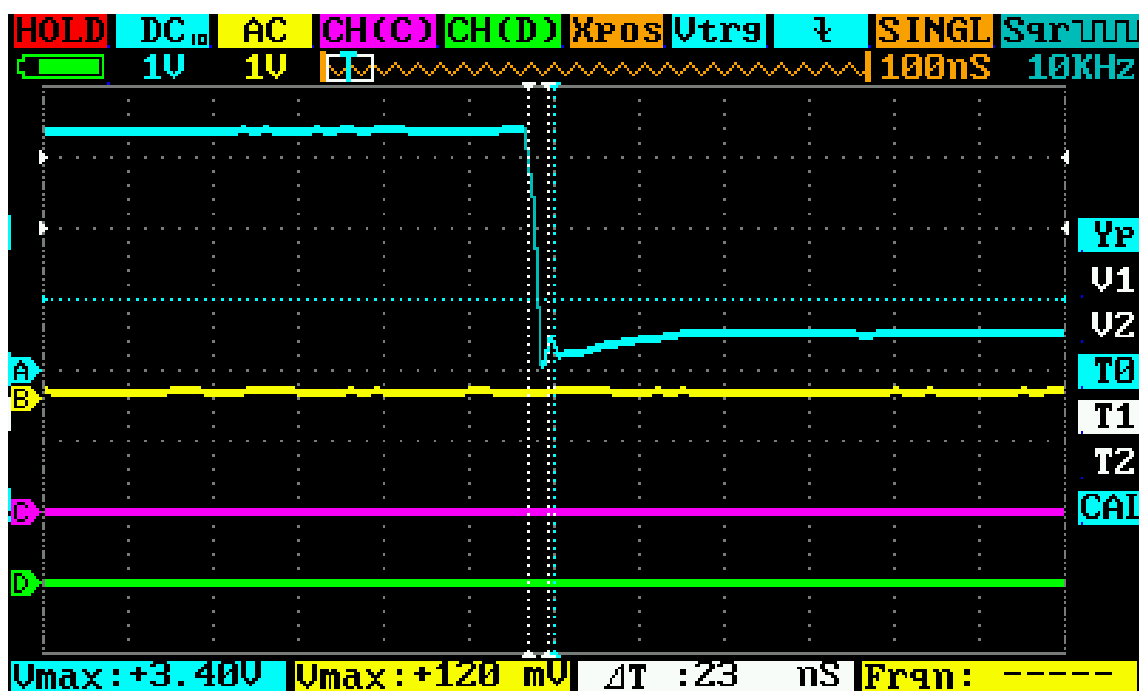
Hodinový signál SCL sběrnice I²C byl pomocí osciloskopu Miniware DS213 a prepínatelnou 1x/10x sondou přepnutou na 10x kvůli minimalizaci zatížení sběrnice osciloskopem měřen při frekvenci 100 kHz. Zjistilo se, že hodnota odporu pro potlačení hran sběrnice (viz podkapitola 6.1) byla zvolena příliš vysoká. Čas poklesu byl naměřen zhruba 1,5 μ s (viz obr. 7.1) a podle specifikací od NXP by měl být maximálně 300 ns. Změřením té samé hrany před odporem byl čas poklesu naměřen přibližně 23 ns (viz obr. 7.2. Čas náběhu byl před i po odporu změřen prakticky stejný, a to kolem 5,5 μ s (viz obr. 7.3 a 7.2) a podle specifikací od NXP by měl být maximálně 1000 ns. Tudíž by bylo vhodné snížení odporu (či i jeho odstranění) a přidat pull-up odpor nebo I²C „akcelerátor“ (aktivní pull-up) k vnitřním pull-up odporům mikrokontroléru RP2040.

I přes to vše, na použité frekvenci 100 kHz, byl schopný logický analyzátor Miniware LA104 zachytit hodinový i datový signál sběrnice (viz obr. 7.5). V tomto stavu by sběrnice nebyla schopná běžet na frekvenci 1 MHz, kde obě hrany musí být podle specifikace méně než 120 ns a periodou hodinového signálu 1 μ s. Nebyla schopná běžet ani na frekvenci 400 kHz s periodou

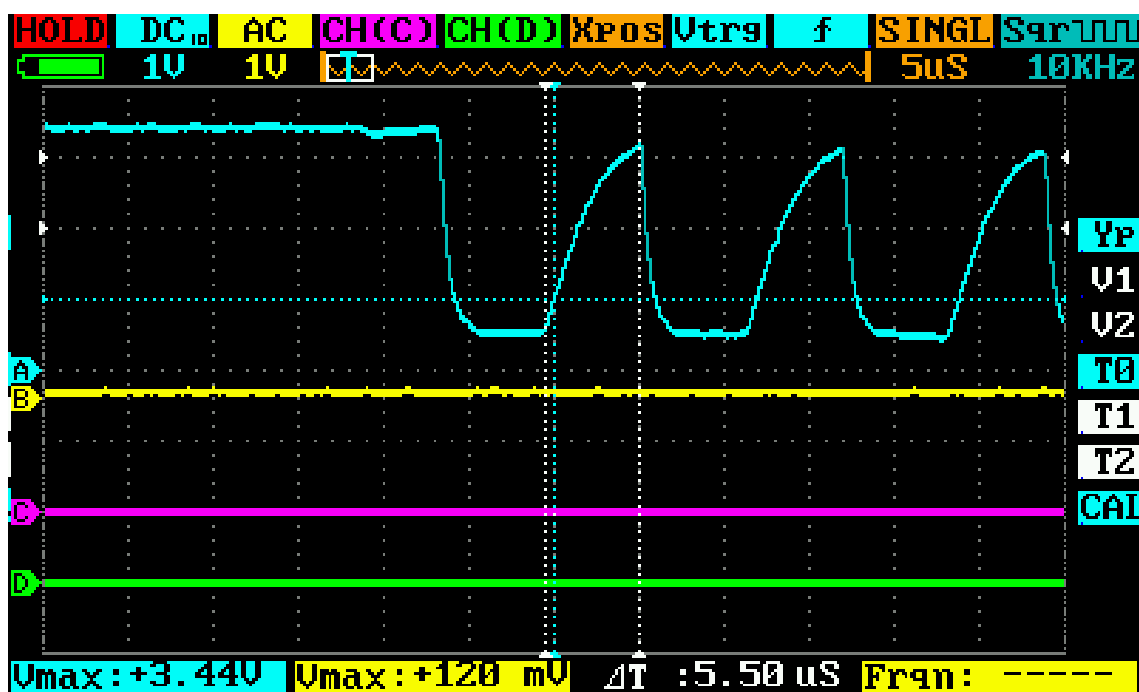
hodinového signálu 2,5 μ s.



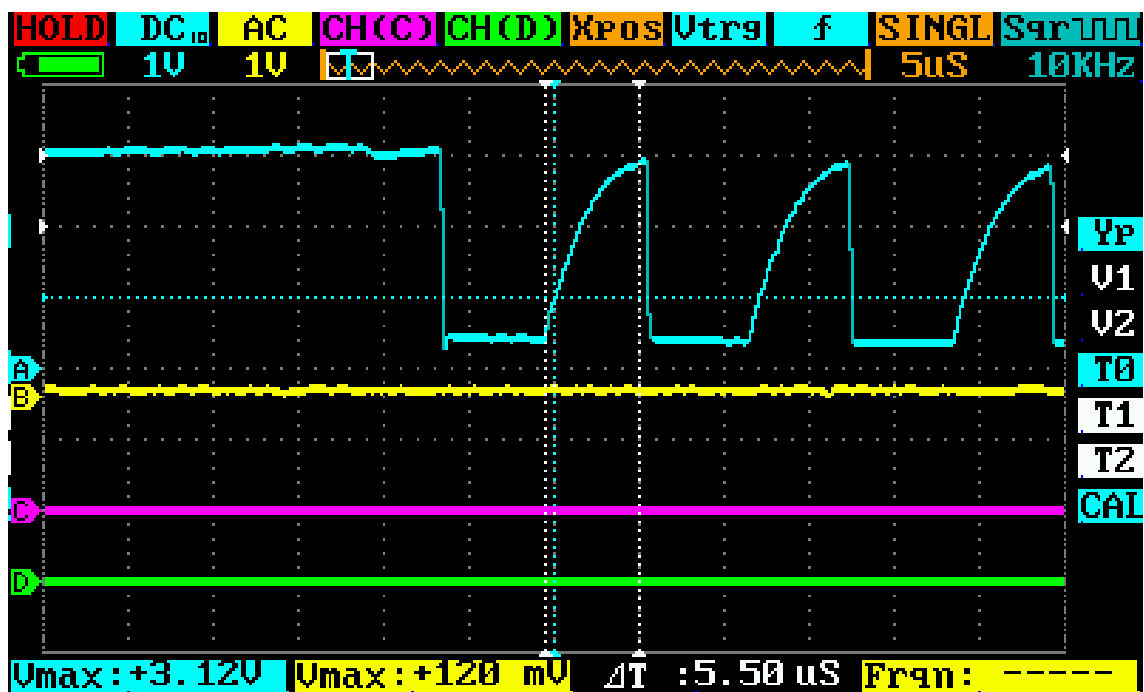
Obrázek 7.1: Rychlost sestupné hrany SCL za odporem



Obrázek 7.2: Rychlost náběžné hrany SCL za odporem



Obrázek 7.3: Rychlost náběžné hrany SCL za odporem



Obrázek 7.4: Rychlost náběžné hrany SCL před odporem



Obrázek 7.5: Zachycený hodinový a datový signál sběrnice na logickém analyzátoru

8 ZÁVĚR

Myslím si, že koncepce platformy jde správným směrem a je ověřená v profesionálních kruzích ve formě PXI a vývoj platformy bude nadále pokračovat.

Především z důvodu komplikací s dostupností součástek a problémům se softwarovým nástrojovým řetězcem RP2040 se nepodařilo zprovoznit zařízení včas a provést plánované ověření funkčnosti zařízení měřením na USB C PD powerbance.

Komunikace s AD převodníky podle osciloskopu z nějakého důvodu neprobíhá a blok PIO dává nesmyslná data a je zřejmě defektní DA převodník, který nastavuje hodnotu zatěžovacího proudu. Řešením by byla výměna DA převodníku a komplexní hledání chyby komunikace s AD převodníky v softwarovém kódu.

Je třeba provést několik změn v hardwaru. Je potřeba vyměnit transily chránící přístrojový zesilovač modulu zátěže za Schottkyho diody zapojených v závěrném směru na napájecí větve a změnit tím nesymetrické únikové proudy ochranami na únikové proudy symetrické. Je i zapotřebí přidat chybějící anti-aliasingové filtry AD převodníků. Je také velmi vhodné změnit řešení vyřazování bočníku nižšího proudového rozsahu, protože izolovaný DC/DC měnič použitý pro napájení paralelního MOSFETu tzv. plave na vstupním napětí. Při přesažení 45 V na vstupu by došlo k přesažení hranice bezpečného dotykového napětí živých částí. Avšak zařízení musí být při provozu zepředu zakrytováno a není možné se části dotknout a není prakticky možné, jak by se napětí mohlo dostat na dotykové části při normálním používání. Rovněž by bylo vhodné přehodnotit obvody měření proudu a zvolené AD a DA převodníky nebo řídicí jednotku modulu. Z hlediska zástavbového prostoru je třeba upravit pozici jednoho konektoru na dceřinné desce s řídicími jednotkami základní desky a také zvětšit do hloubky šasi. Je také potřeba upravit několik otvorů pro šrouby v částech vyrobených 3D tiskem.

Projekt také utrpěl návalem nadbytečných funkcností a bylo by vhodné je odstranit.

ZDROJE

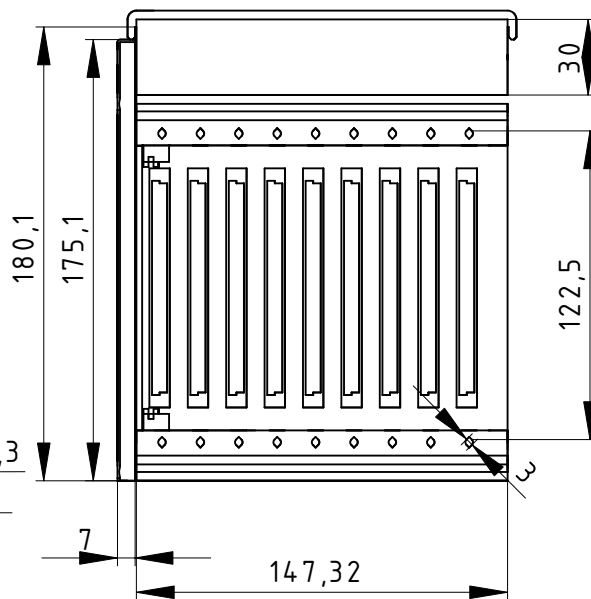
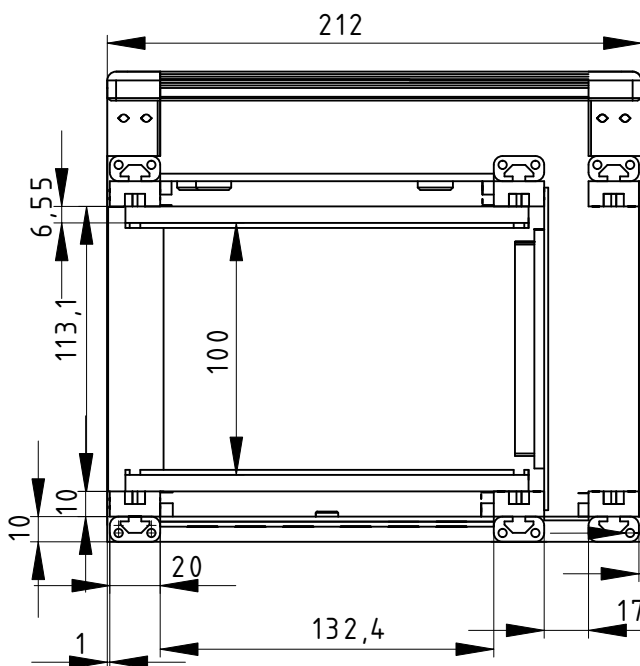
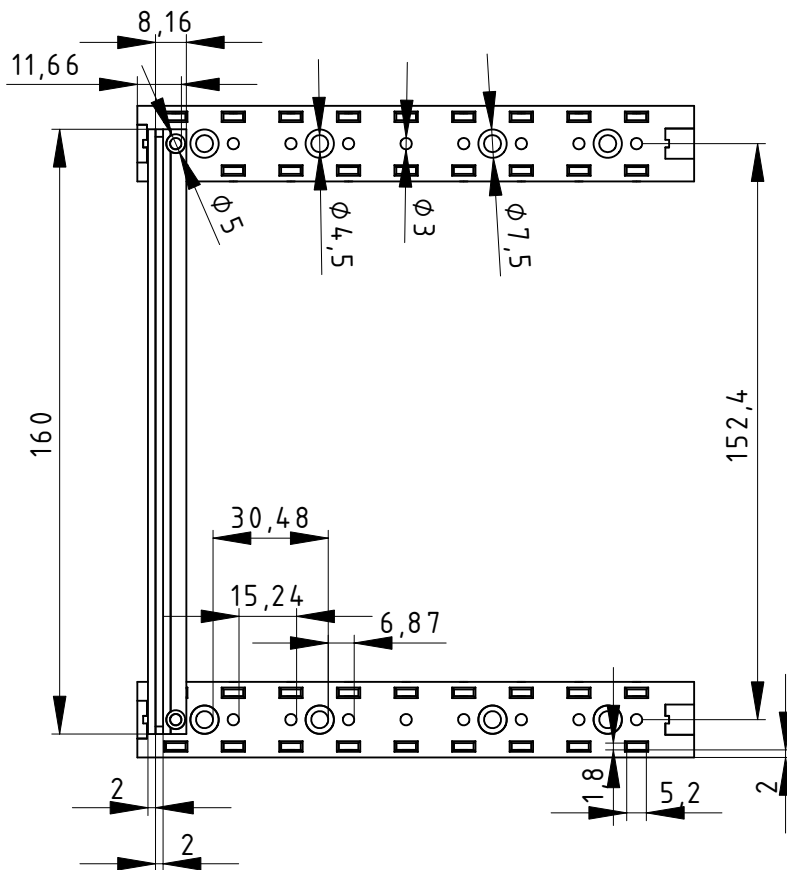
1. *Elektrotechnická měření*. 1. vyd. Praha: BEN - technická literatura, 2002. ISBN 80-7300-022-9.
2. *MOSFETs Withstand Stress of Linear-Mode Operation* [online]. Milpitas (CA): IXYS Corporation, 2007 [cit. 2023-05-20]. Dostupné z: https://www.ixys.com/documents/articles/article_linear_power_mosfets.pdf.
3. Power MOSFET Thermal Instability. *NASA Engineering and Safety Center Technical Bulletin* [online]. 2010, roč. 10, č. 10-01, s. 1 [cit. 2023-05-20]. Dostupné z: https://www.nasa.gov/sites/default/files/files/NESC-TB-10-01_Power_MOSFET_Thermal_Instability-1-28-10_NRB_TECH_BULLETIN_FINAL.pdf.
4. *EuropacPRO* [online]. Straubenhardt (BW): NVent SCHROFF GmbH, 2018 [cit. 2023-05-20]. Dostupné z: https://schroff.nvent.com/sites/g/files/hdkjer281/files/acquiadam/2020-11/6_1_europacPRO_e_.pdf.
5. *Miniware MDP-L1060* [online]. Guangzhou City: Guangzhou e-Design Intelligent Technology Co., 2018 [cit. 2023-05-20]. Dostupné z: <https://www.miniware.com.cn/product/mdp-l1060-dc-electronic-load/>.
6. *Miniware MDP-XP* [online]. Guangzhou City: Guangzhou e-Design Intelligent Technology Co., 2018 [cit. 2023-05-20]. Dostupné z: <https://www.miniware.com.cn/product/mdp-xp-digital-power-supply-set/>.
7. PITEL, Ira. *Electronic loads—a new generation* [online]. Hasbrouck Heights (New Jersey): Endeavor Business Media, 2018 [cit. 2023-05-23]. Dostupné z: <https://www.electronicdesign.com/technologies/test-measurement/article/21208249/electronic-loadsa-new-generation>.
8. *I2C-bus specification and user manual* [online]. Eindhoven: NXP Semiconductors N.V., 2021 [cit. 2023-05-20]. Dostupné z: <https://www.nxp.com/docs/en/user-guide/UM10204.pdf>.

9. *EuropacPRO Perforated Rail for Connector, According to EN 60603-2 and DIN 41612, 28 HP* [online]. Straubenhardt (BW): NVent SCHROFF GmbH, 2023 [cit. 2023-05-21]. Dostupné z: <https://schroff.nvent.com/en-cz/products/enc20822-049>.
10. *National Instruments PXI* [online]. Austin (Texas): National Instruments, 2023 [cit. 2023-05-20]. Dostupné z: <https://www.ni.com/cs-cz/shop/pxi.html>.
11. *Plug-In Unit Kit With Trapezoid Handle, Unshielded, Grey, 3 U, 3 HP* [online]. Straubenhardt (BW): NVent SCHROFF GmbH, 2023 [cit. 2023-05-20]. Dostupné z: <https://schroff.nvent.com/en-cz/products/enc20818-017>.
12. *Eurocard (printed circuit board)* [online]. San Francisco (CA): Wikimedia Foundation, 2001-2023 [cit. 2023-05-20]. Dostupné z: [https://en.wikipedia.org/wiki/Eurocard_\(printed_circuit_board\)](https://en.wikipedia.org/wiki/Eurocard_(printed_circuit_board)).
13. *Low Pass/High Pass Filter Calculator* [online]. Thief River Falls (Minnesota): Digi-Key, 1995-2023 [cit. 2023-05-20]. Dostupné z: <https://www.digikey.cz/en/resources/conversion-calculators/conversion-calculator-low-pass-and-high-pass-filter>.
14. MCMAHILL, Dan. *Coplanar Waveguide Analysis/Synthesis Calculator* [online]. San Diego (CA): Sourceforge, 2001-2009 [cit. 2023-05-20]. Dostupné z: <https://wcalc.sourceforge.net/cgi-bin/coplanar.cgi>.
15. *RP2040 Datasheet* [online]. Milton (Cambridge): Raspberry Pi Ltd, 2020-2023 [cit. 2023-05-20]. Dostupné z: <https://datasheets.raspberrypi.com/rp2040/rp2040-datasheet.pdf>.

PŘÍLOHY

SCHÉMATICKÝ VÝKRES ŠASI

Půdorys lišt - 1/2
 Nárýs a bokorys - 1/3



Created by:
 Libor Mahr

Title:
 Šasi

Supplementary information:

FreeCAD DRAWING

Size: A4	Sheet: 1/1	Scale: SCALE
-------------	---------------	-----------------

Part number:

PN

Drawing number:

DN

Date:

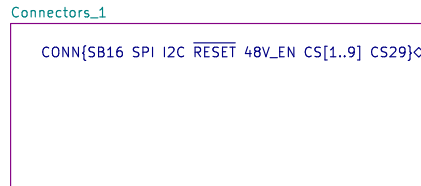
DD/MM/YYYY

Revision:

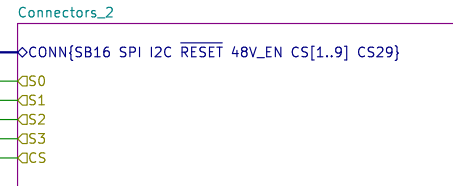
REV A



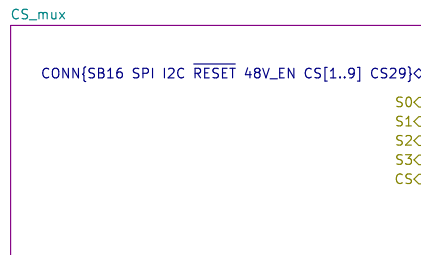
SCHÉMATA



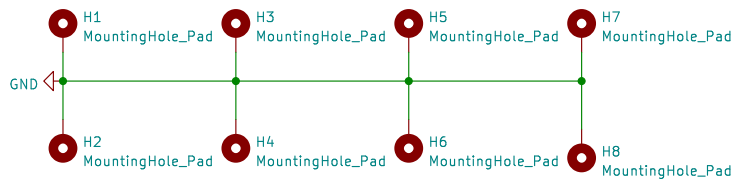
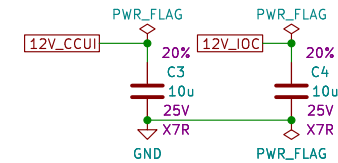
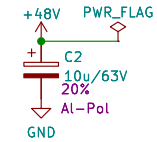
File: Connectors1.kicad_sch



File: Connectors2.kicad_sch



File: CS_mux.kicad_sch



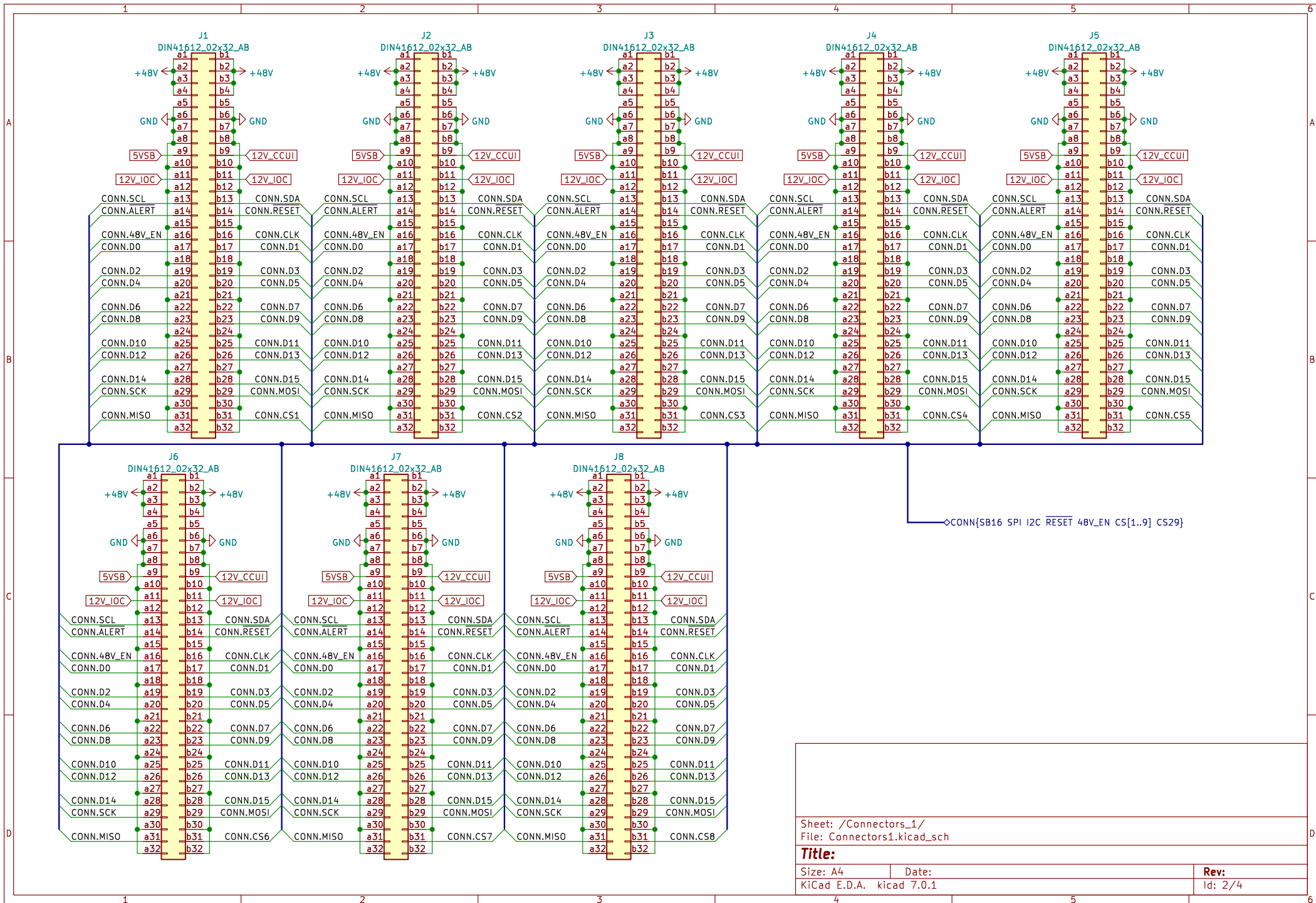
Sheet: /
File: Backplane.kicad_sch

Title:

Size: A4
KiCad E.D.A. kicad 7.0.1

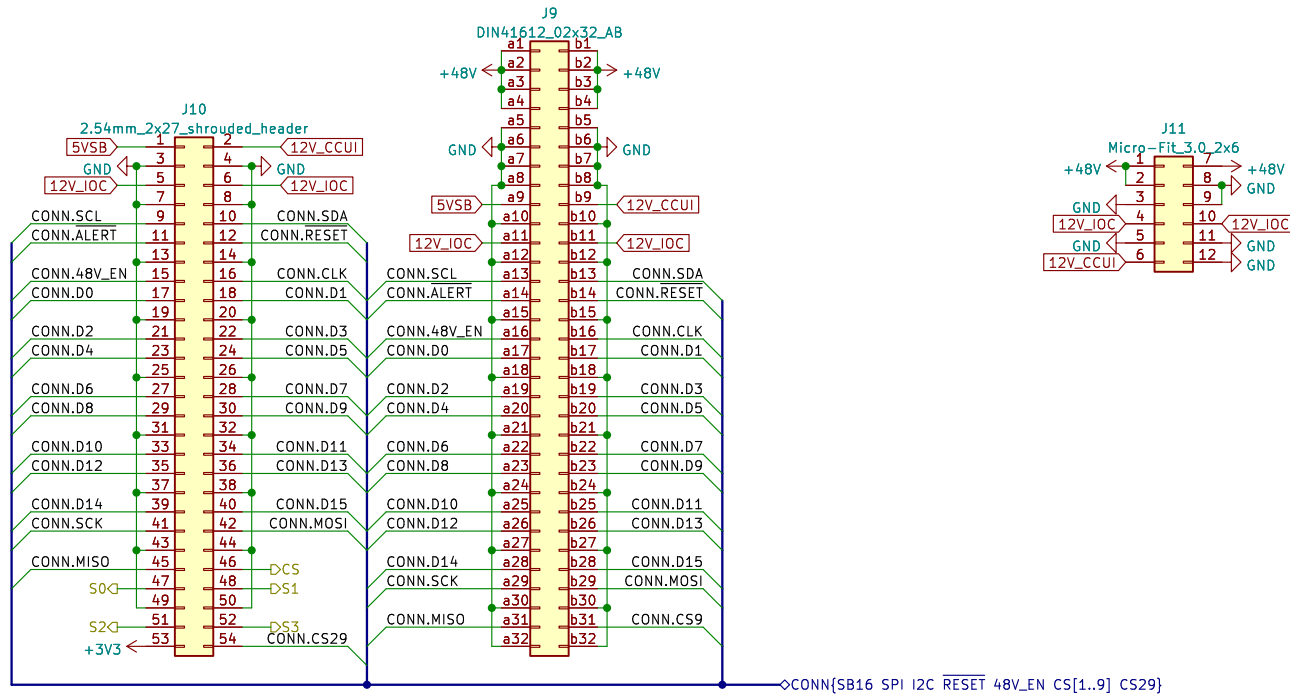
Date:

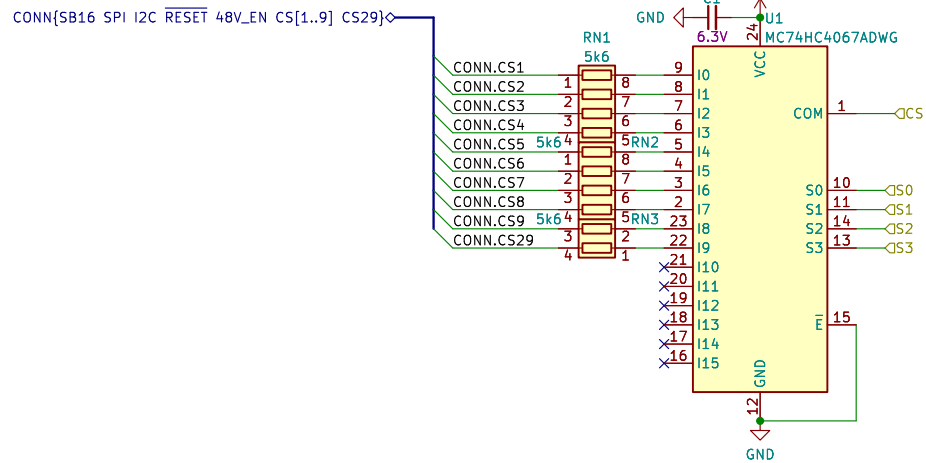
Rev:
Id: 1/4



Sheet: /Connectors_1/
 File: Connectors1.kicad_sch

Title:		Rev:	
Size: A4	Date:	Id: 2/4	
KiCad E.D.A. kicad 7.0.1			





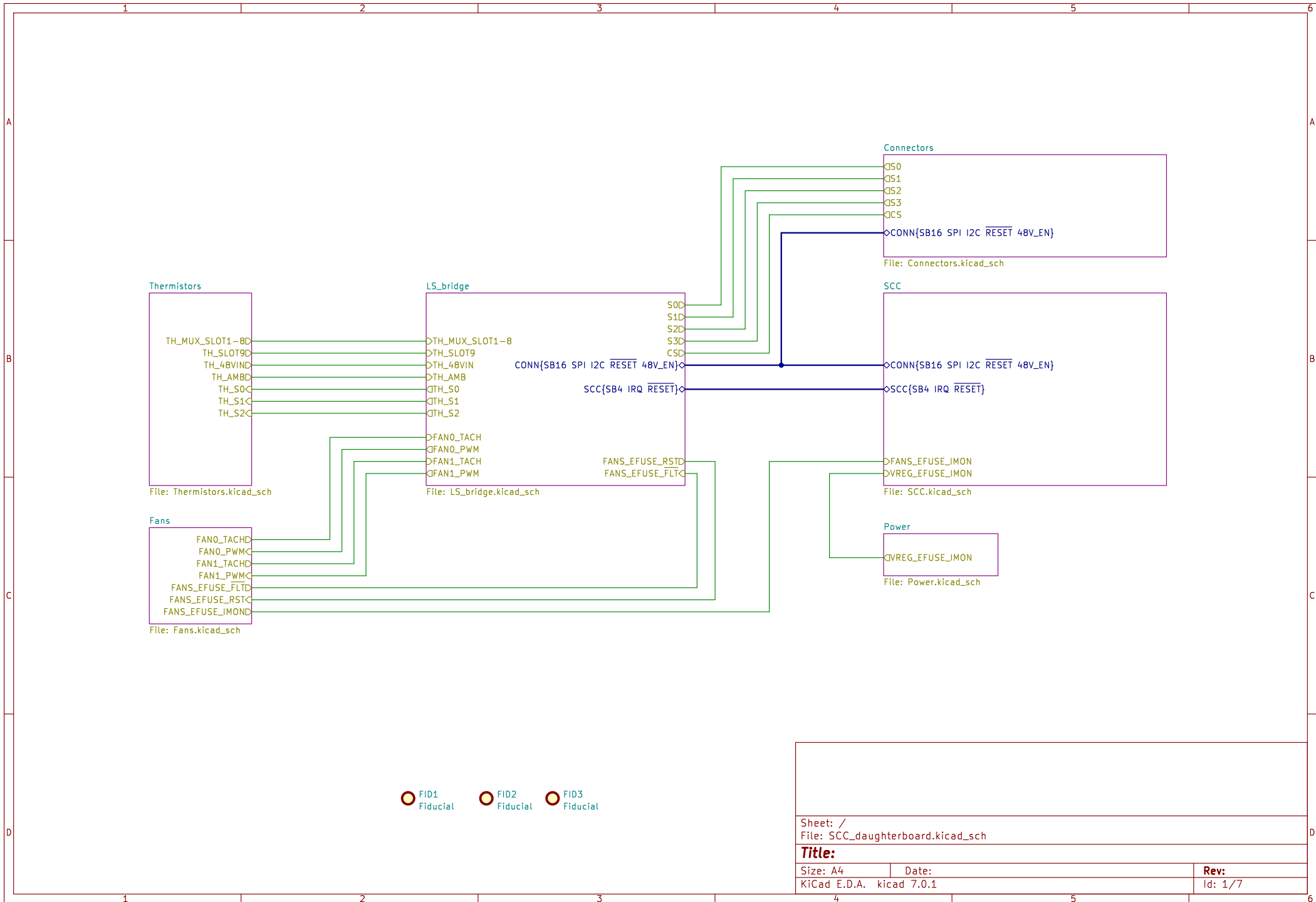
Sheet: /CS_mux/
File: CS_mux.kicad_sch

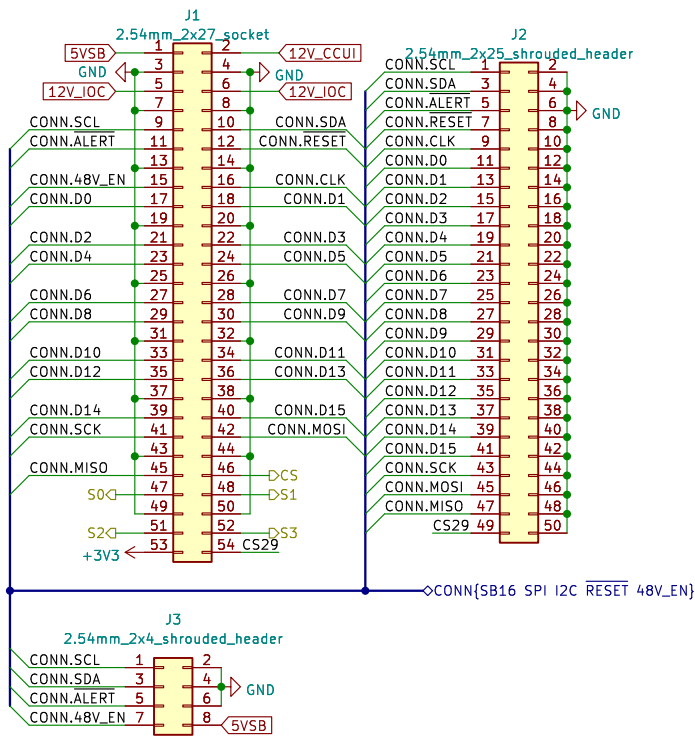
Title:

Size: A4
KiCad E.D.A. kicad 7.0.1

Date:

Rev:
Id: 5/4





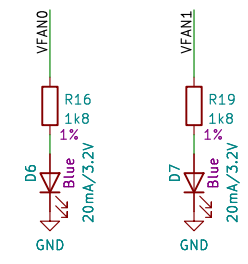
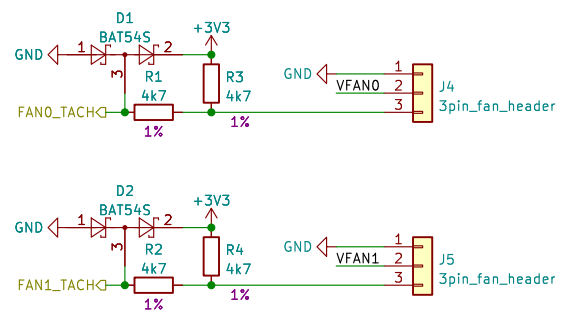
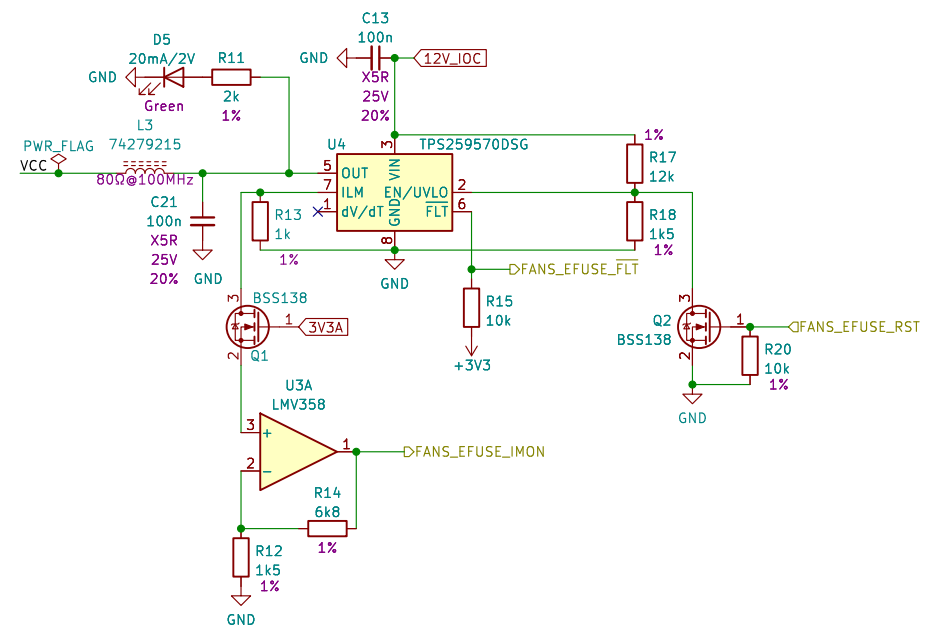
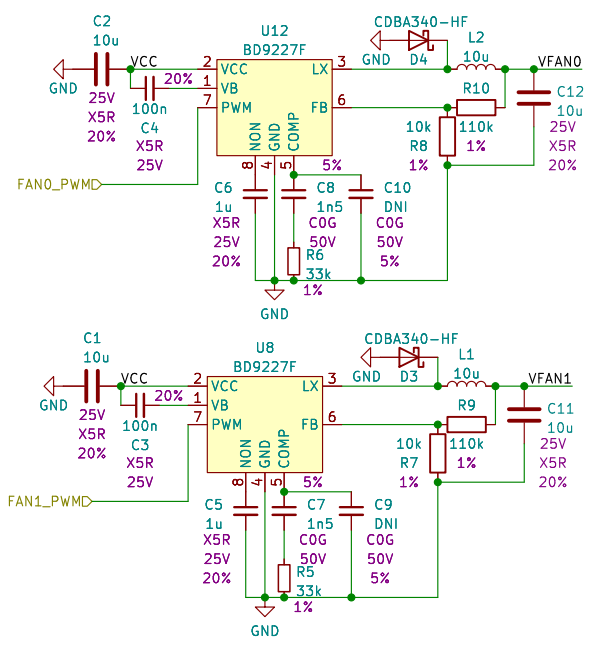
Sheet: /Connectors/
File: Connectors.kicad_sch

Title:

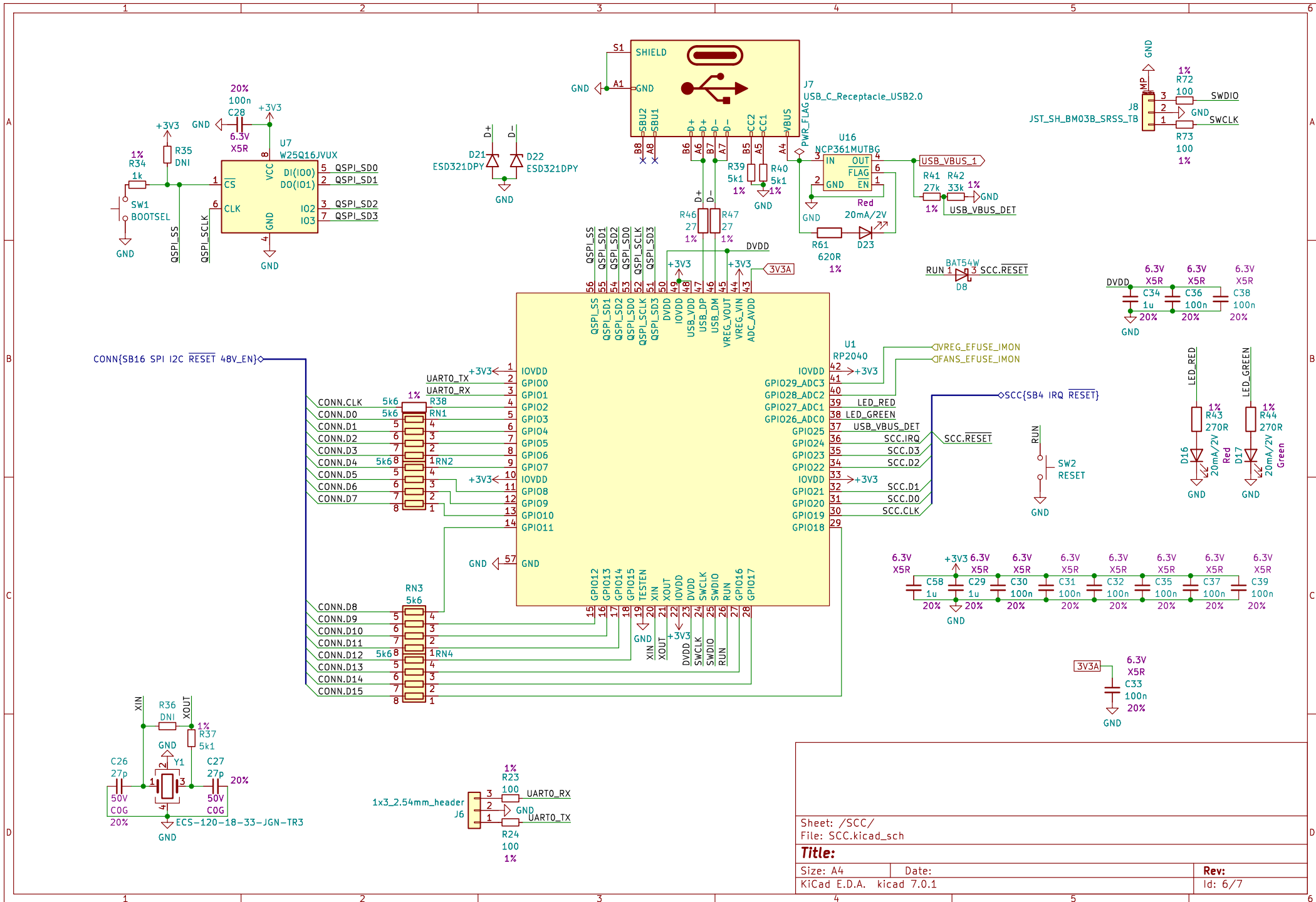
Size: A4
KiCad E.D.A. kicad 7.0.1

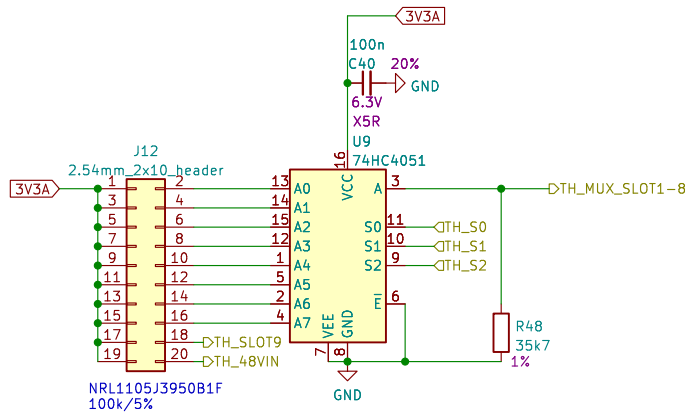
Date:

Rev:
Id: 3/7

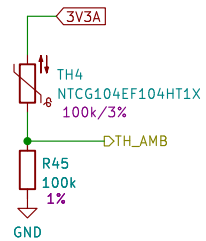


Sheet: /Fans/		
File: Fans.kicad_sch		
Title:		
Size: A4	Date:	Rev:
KiCad E.D.A. kicad 7.0.1		Id: 4/7





NRL1105J3950B1F
100k/5%



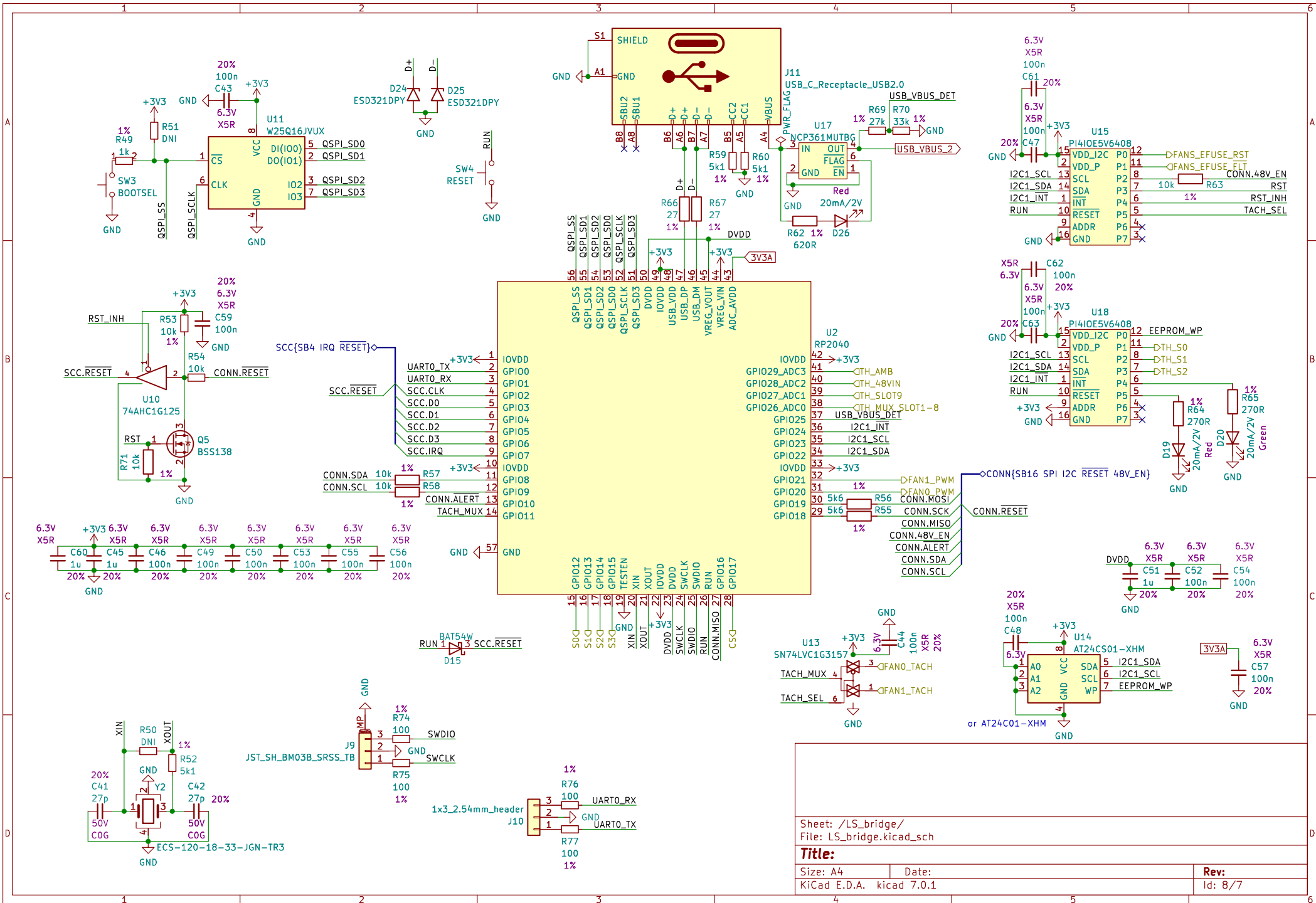
Sheet: /Thermistors/
File: Thermistors.kicad_sch

Title:

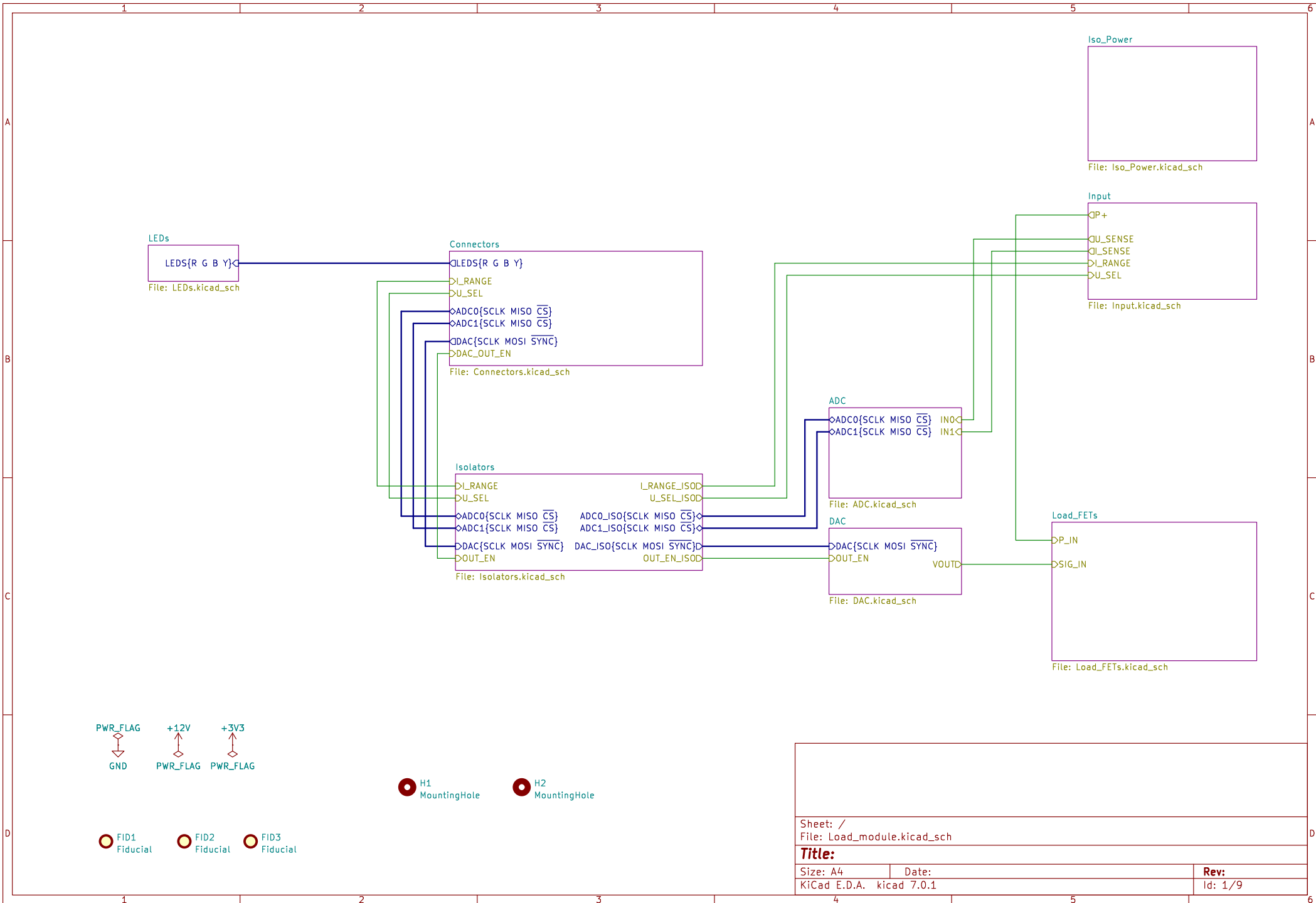
Size: A4
KiCad E.D.A. kicad 7.0.1

Date:

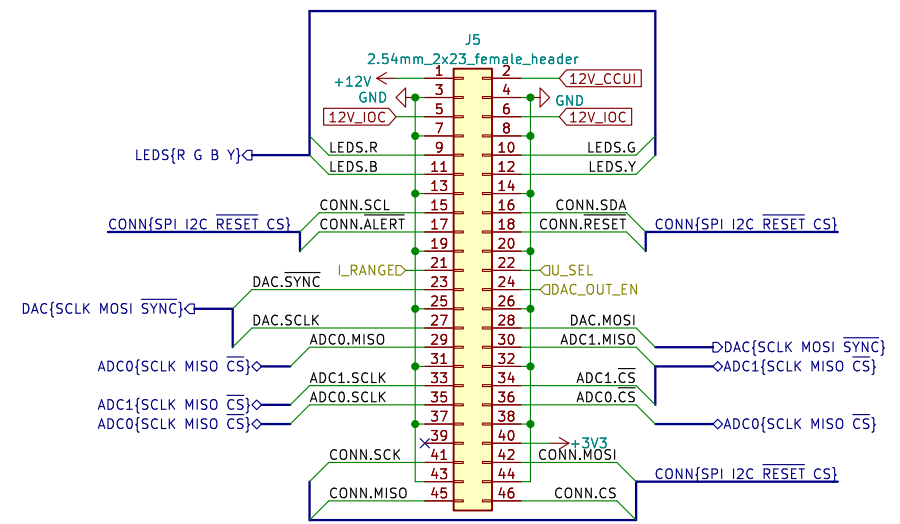
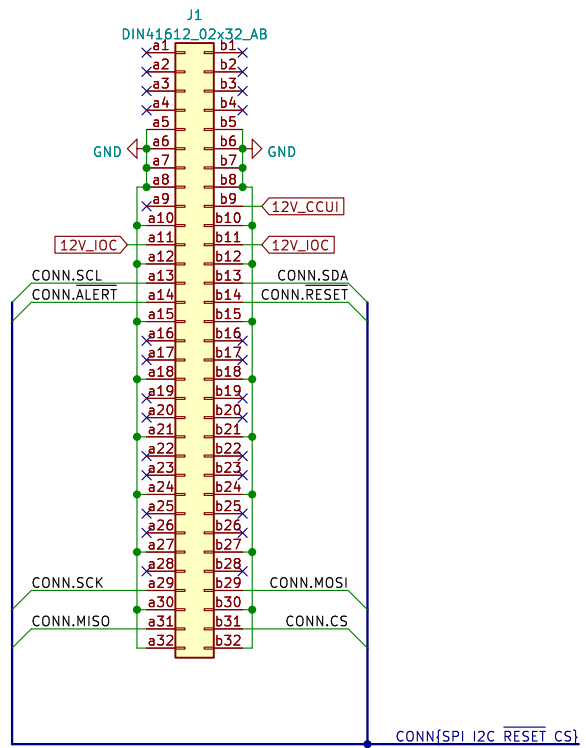
Rev:
Id: 7/7



Sheet: /LS_bridge/		Date:	
File: LS_bridge.kicad_sch		Rev:	
Size: A4	Id: 8/7	KiCad E.D.A. kicad 7.0.1	

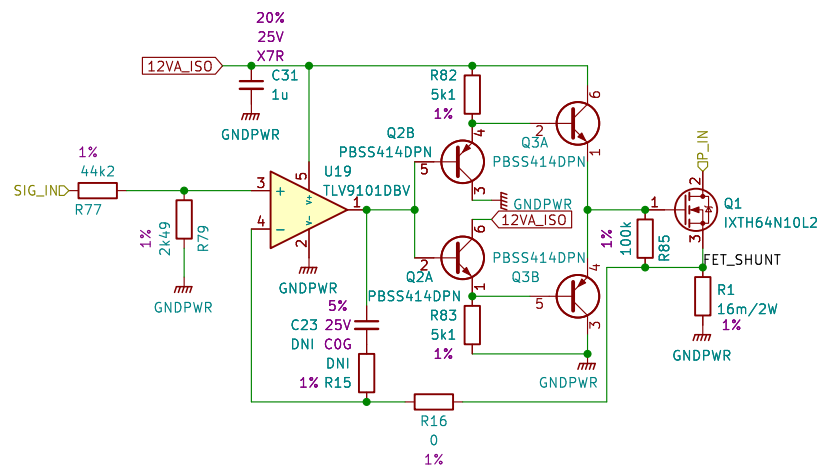


Sheet: /		File: Load_module.kicad_sch	
Title:		Rev:	
Size: A4	Date:		
KiCad E.D.A. kicad 7.0.1	Id: 1/9		



Sheet: /Connectors/
 File: Connectors.kicad_sch

Title:	
Size: A4	Date:
KiCad E.D.A. kicad 7.0.1	Rev: Id: 3/9



HS1
Noctua_NH-L9i(-17xx)

Sheet: /Load_FETs/
File: Load_FETs.kicad_sch

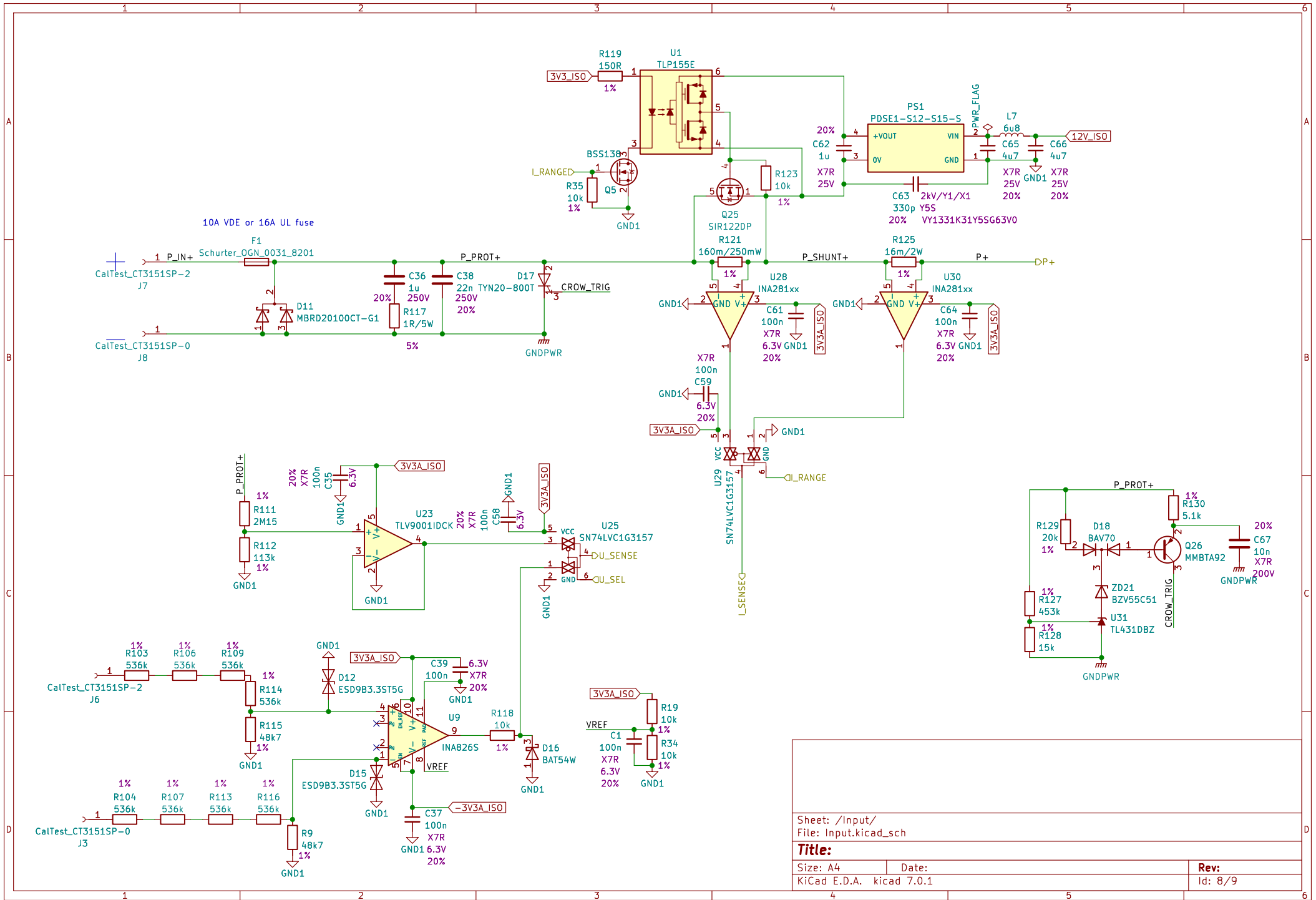
Title:

Size: A4
KiCad E.D.A. kicad 7.0.1

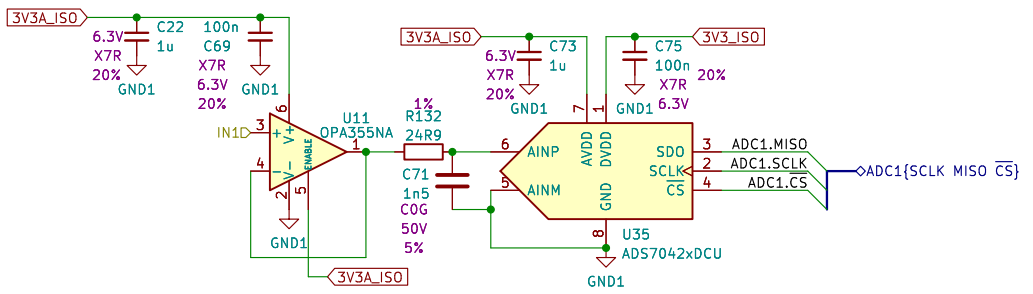
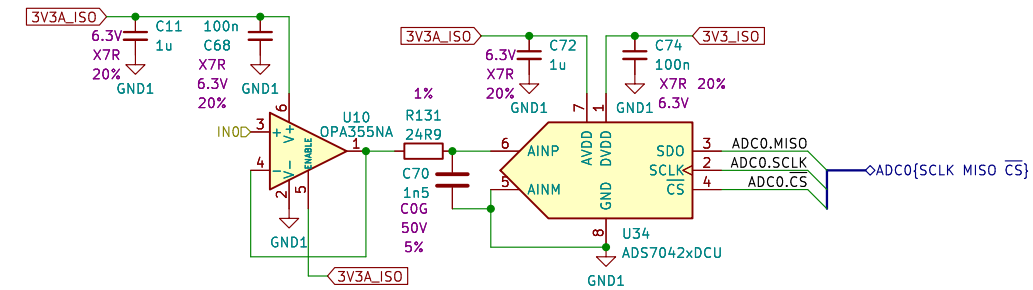
Date:

Rev:

Id: 7/9



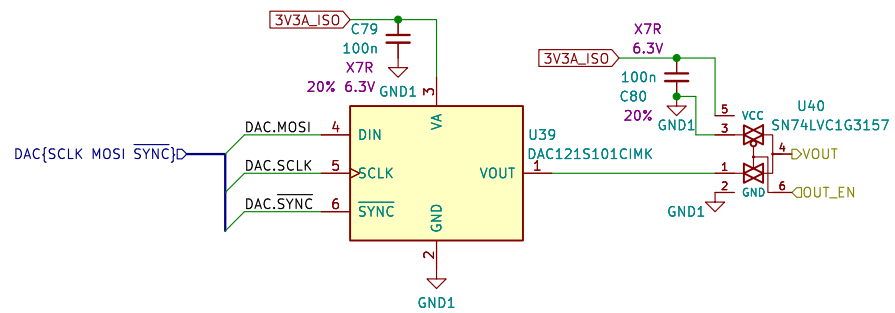
Sheet: /Input/		File: Input.kicad_sch	
Title:			
Size: A4	Date:		Rev:
KiCad E.D.A. kicad 7.0.1			Id: 8/9



Sheet: /ADC/
 File: ADC.kicad_sch

Title:

Size: A4	Date:	Rev:
KiCad E.D.A. kicad 7.0.1		Id: 10/9



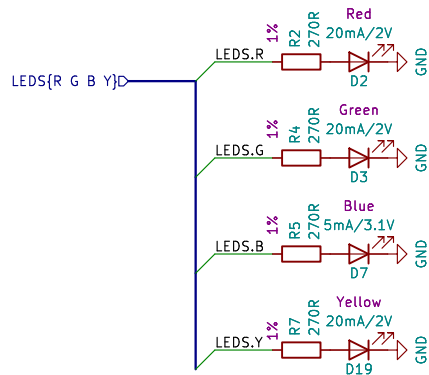
Sheet: /DAC/
 File: DAC.kicad_sch

Title:

Size: A4
 KiCad E.D.A. kicad 7.0.1

Date:

Rev:
 Id: 11/9



Sheet: /LEDs/
 File: LEDs.kicad_sch

Title:

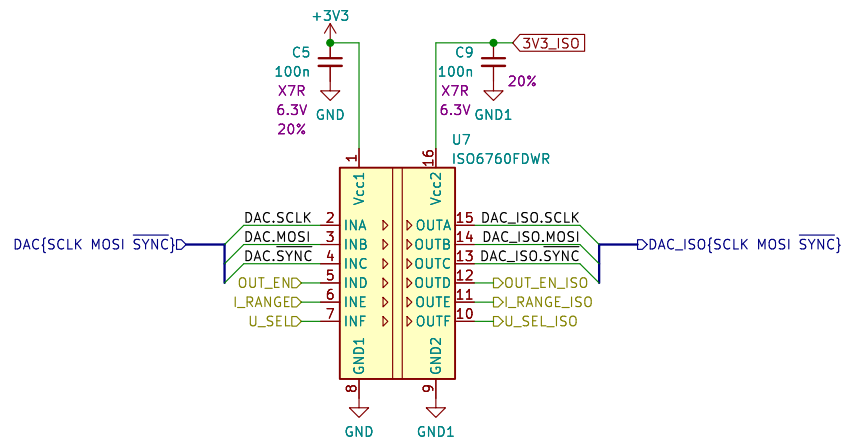
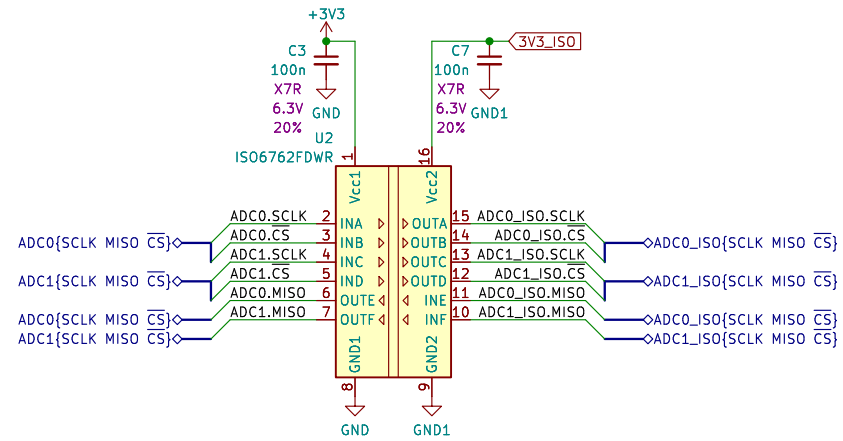
Size: A4

Date:

KiCad E.D.A. kicad 7.0.1

Rev:

Id: 12/9



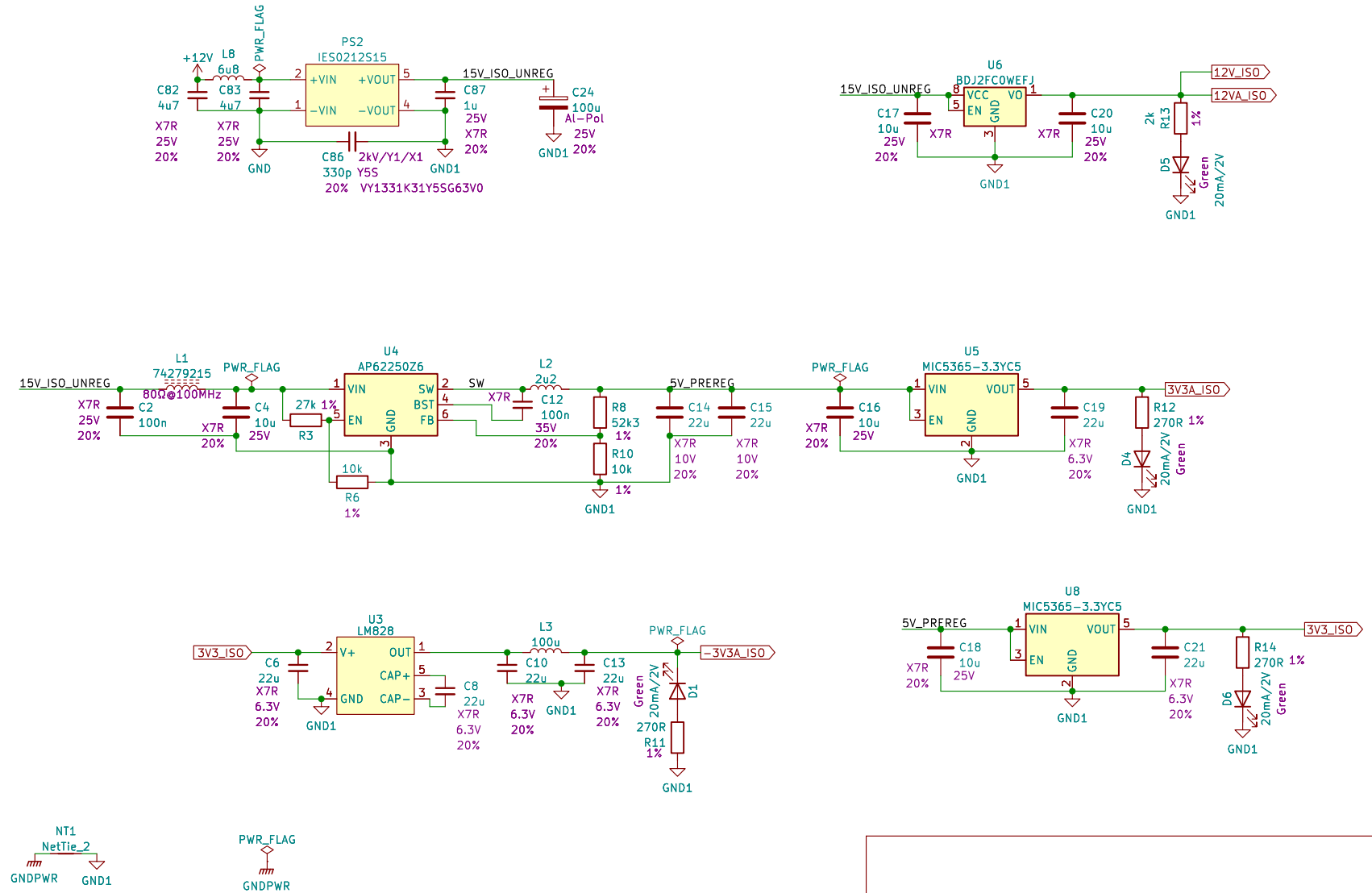
Sheet: /Isolators/
 File: Isolators.kicad_sch

Title:

Size: A4
 KiCad E.D.A. kicad 7.0.1

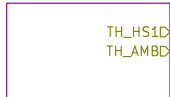
Date:

Rev:
 Id: 12/9



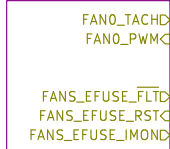
Sheet: /Iso_Power/	
File: Iso_Power.kicad_sch	
Title:	
Size: A4	Date:
KiCad E.D.A. kicad 7.0.1	Rev: Id: 12/9

Thermistors



File: Thermistors.kicad_sch

Fans



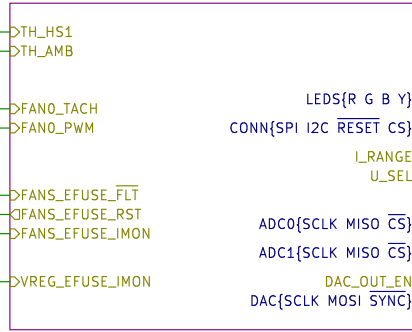
File: Fans.kicad_sch

Power



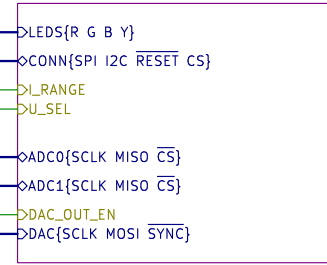
File: Power.kicad_sch

RP2040



File: RP2040.kicad_sch

Connector



File: Connector.kicad_sch

FID1 Fiducial FID2 Fiducial FID3 Fiducial

Sheet: /
File: Controller_daughtercard.kicad_sch

Title:

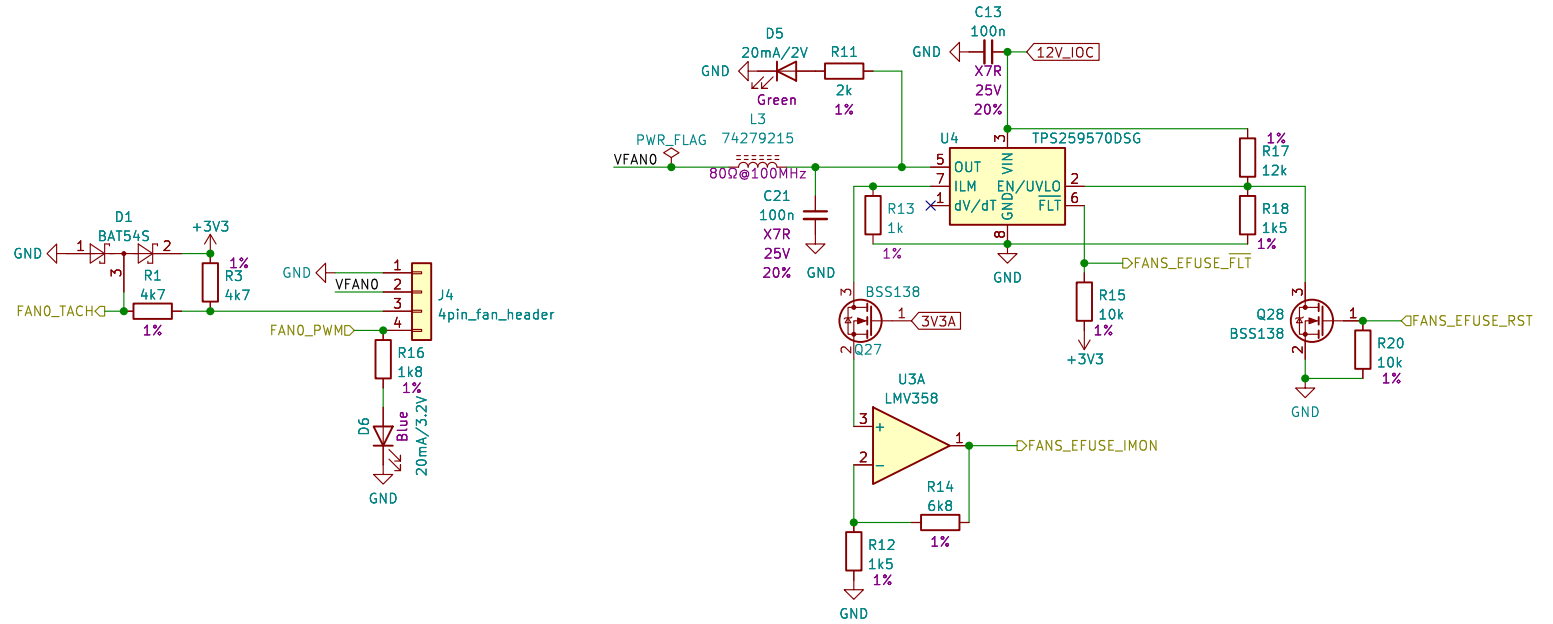
Size: A4

Date:

KiCad E.D.A. kicad 7.0.1

Rev:

Id: 1/6



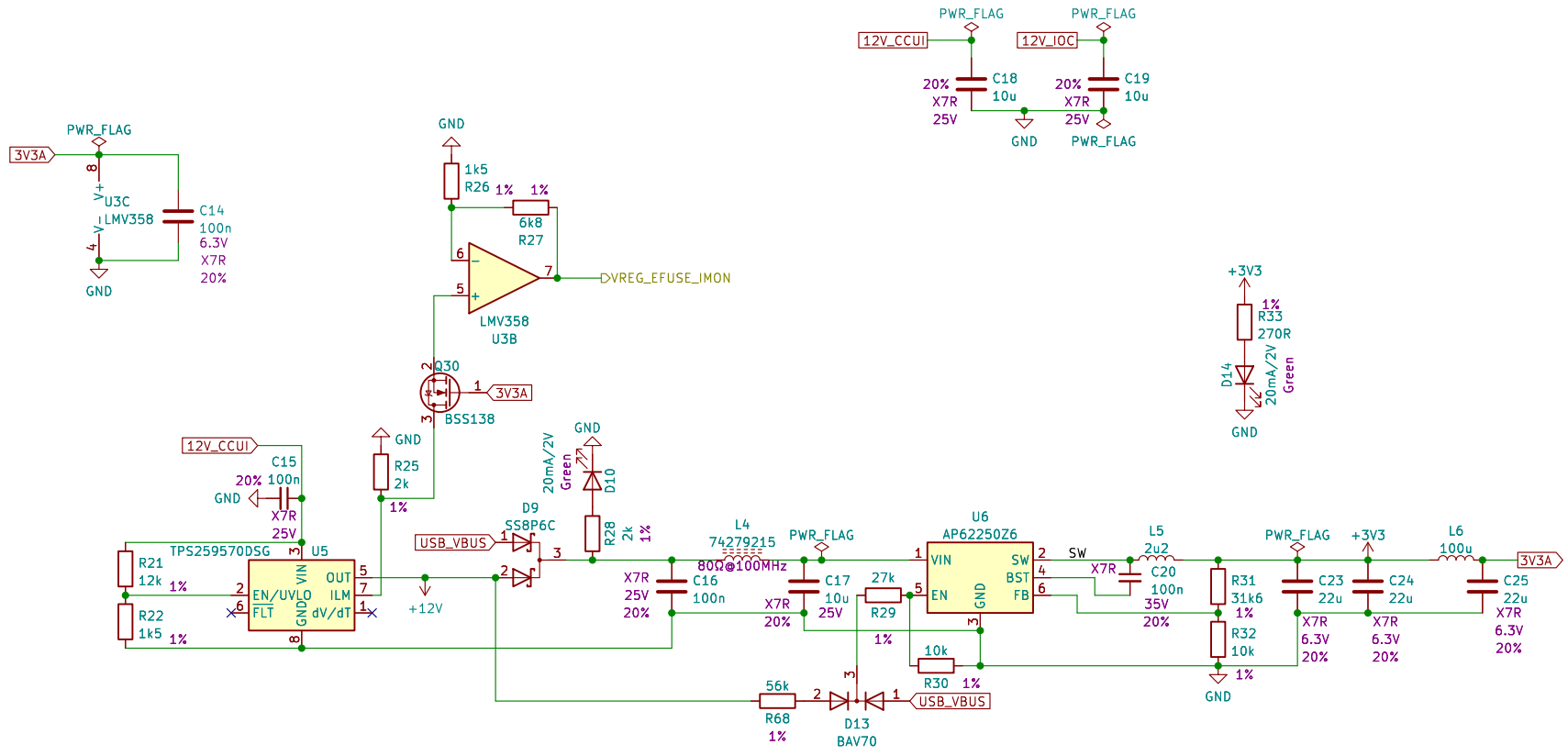
Sheet: /Fans/
File: Fans.kicad_sch

Title:

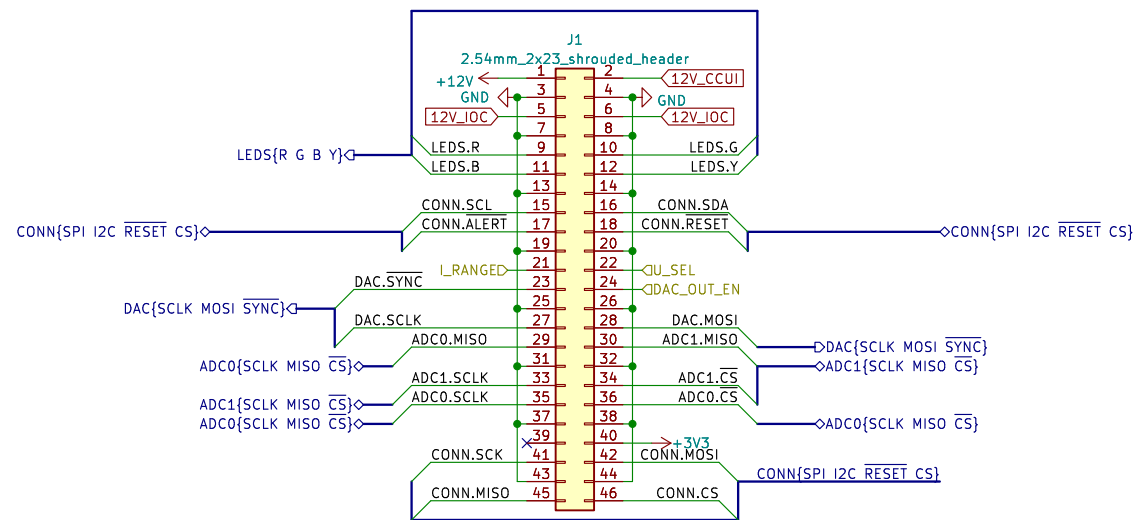
Size: A4
KiCad E.D.A. kicad 7.0.1

Date:

Rev:
Id: 4/6



Sheet: /Power/	
File: Power.kicad_sch	
Title:	
Size: A4	Date:
KiCad E.D.A. kicad 7.0.1	Rev: Id: 5/6



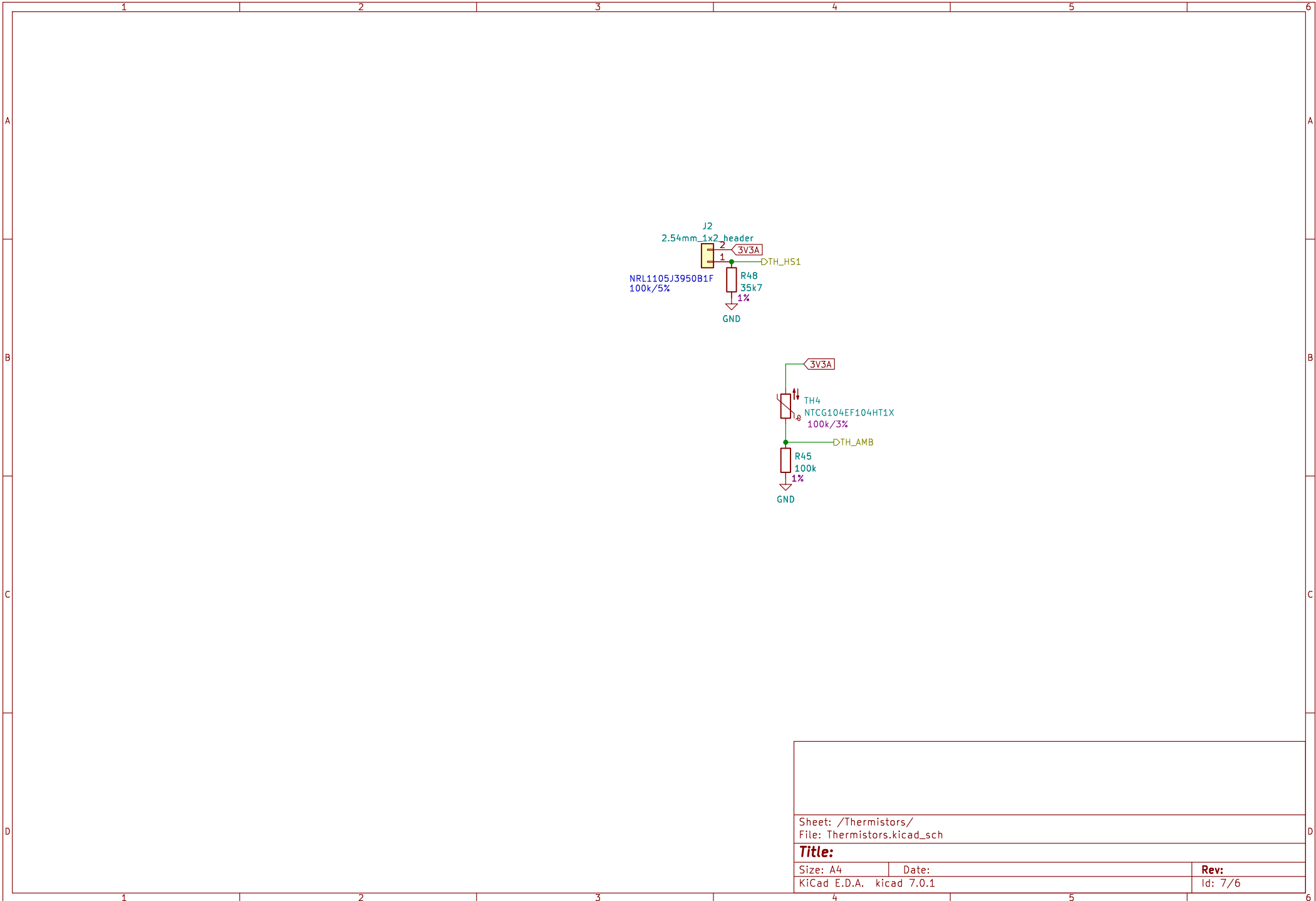
Sheet: /Connector/
 File: Connector.kicad_sch

Title:

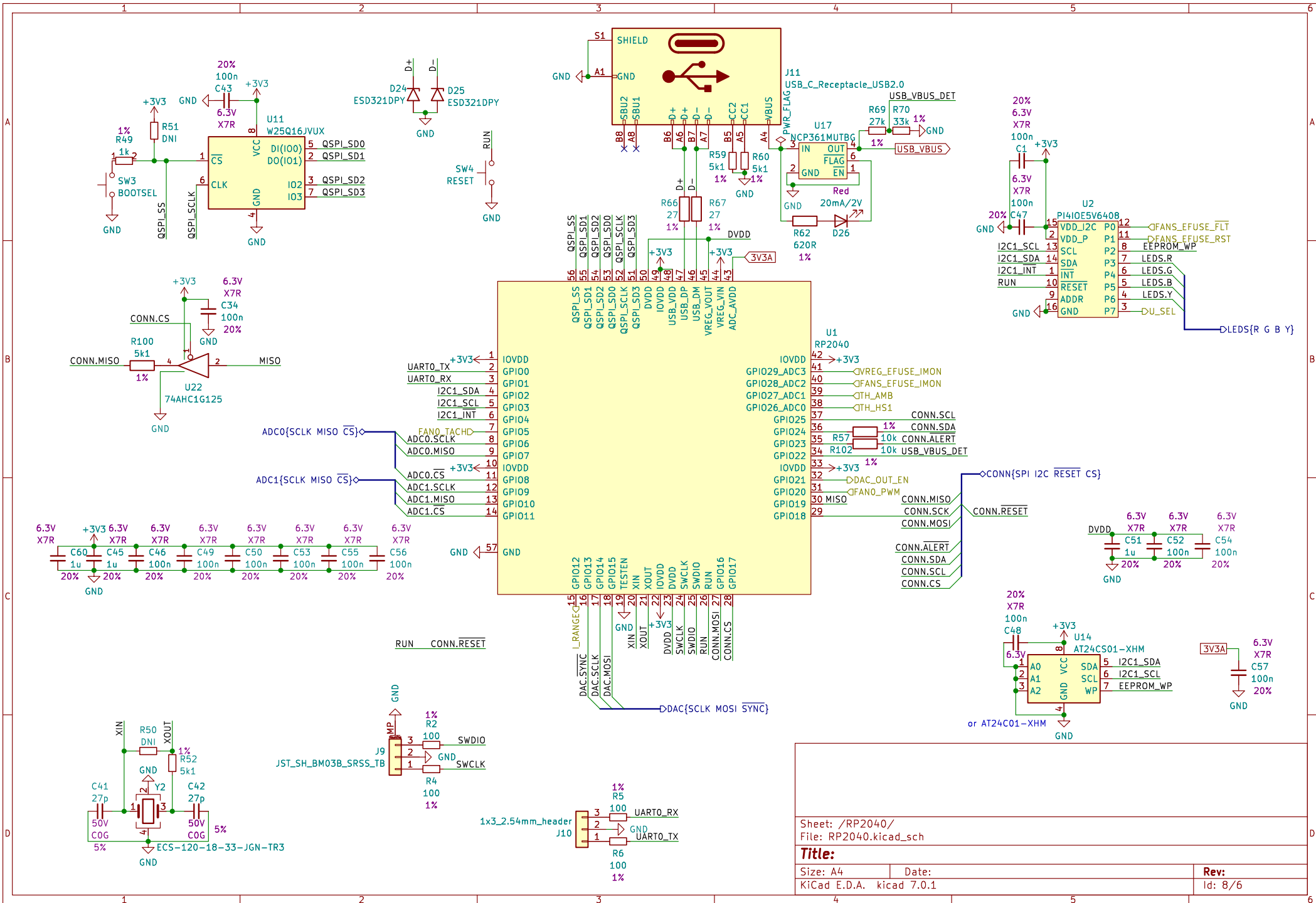
Size: A4
 KiCad E.D.A. kicad 7.0.1

Date:

Rev:
 Id: 6/6

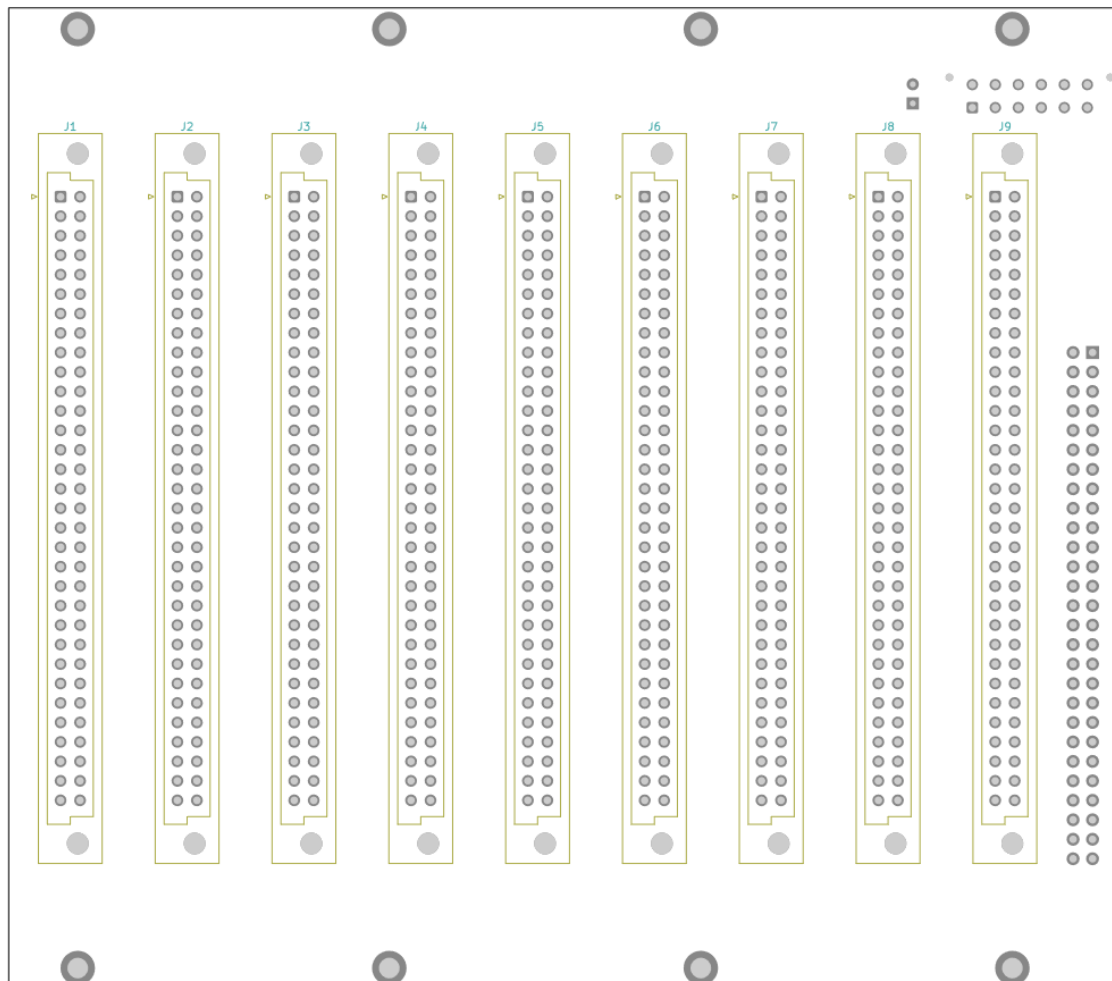


Sheet: /Thermistors/ File: Thermistors.kicad_sch		
Title:		
Size: A4	Date:	Rev:
KiCad E.D.A. kicad 7.0.1		Id: 7/6

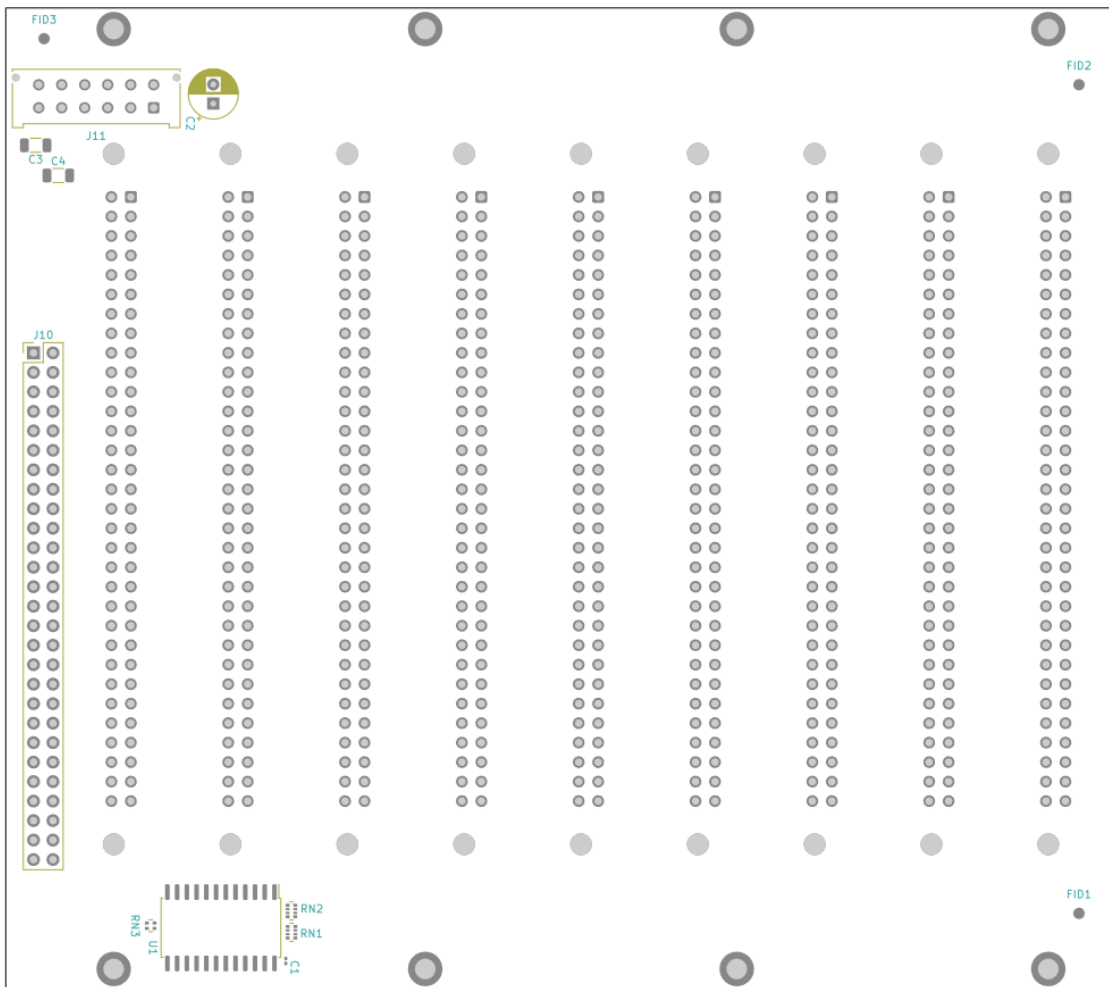


Sheet: /RP2040/		Date:	
File: RP2040.kicad_sch		Rev:	
Size: A4	Id: 8/6	KiCad E.D.A. kicad 7.0.1	

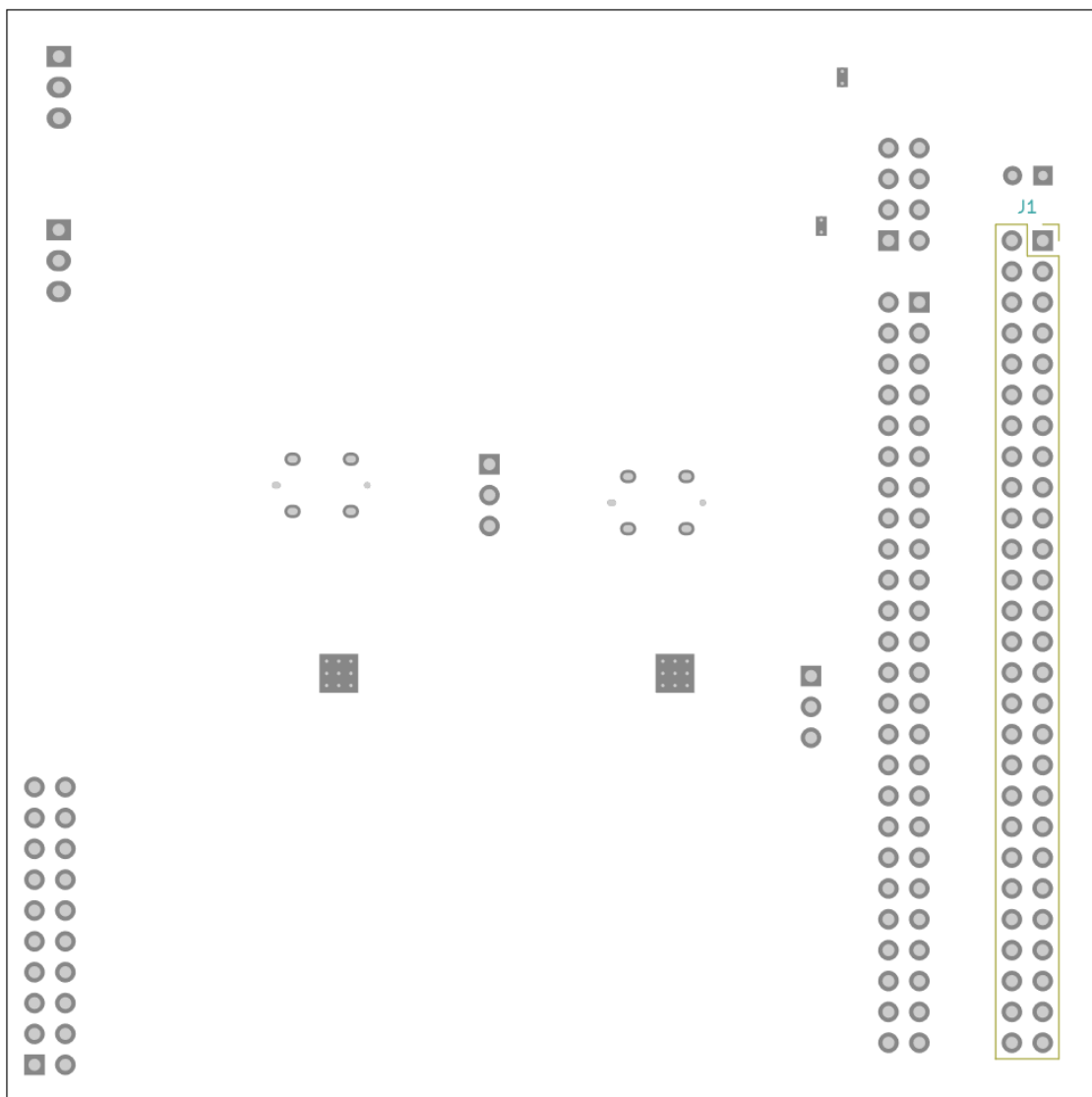
OSAZOVACÍ NÁHLEDY



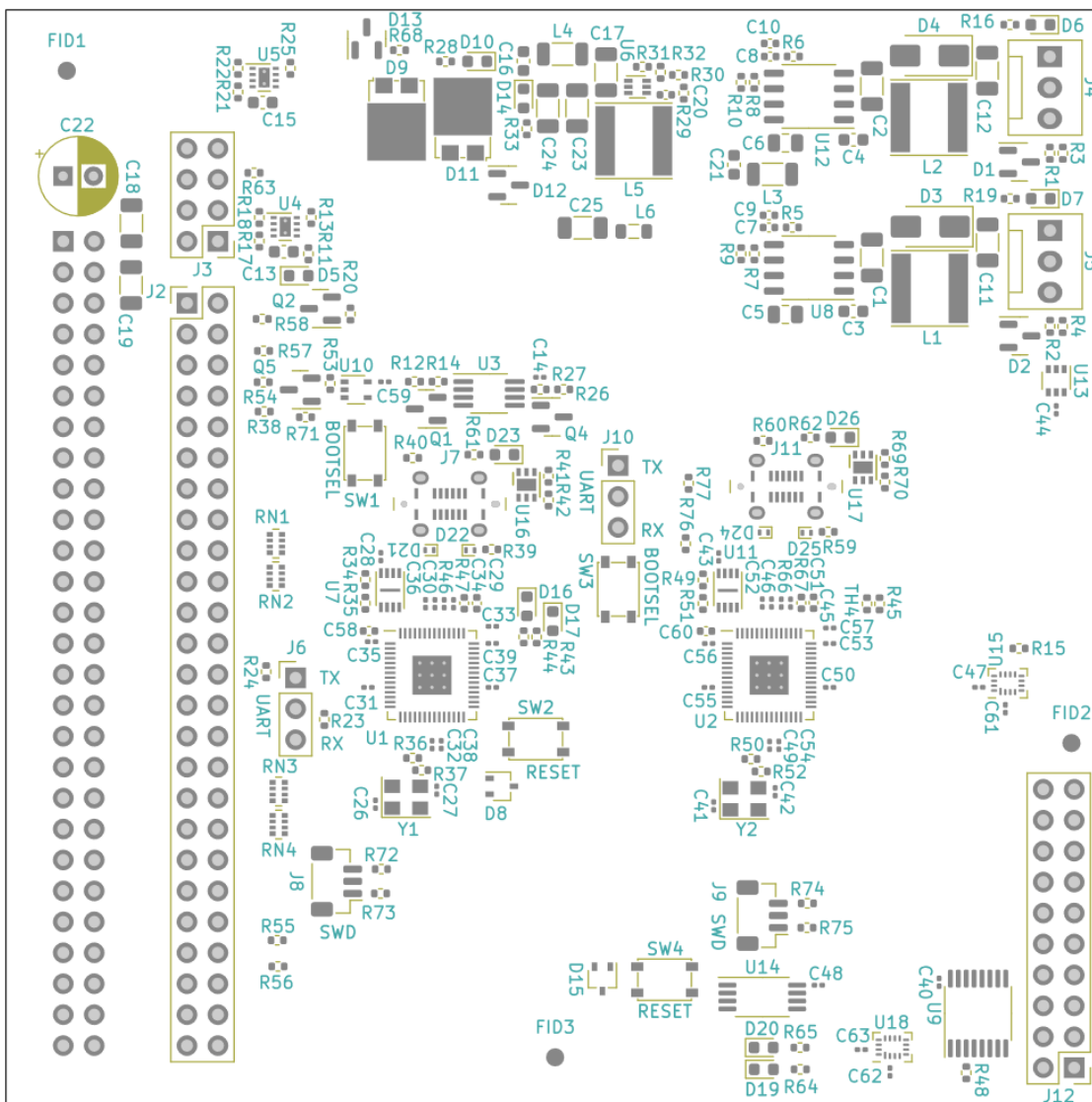
Obrázek 8.1: Osazovací náhled backplane - přední strana.



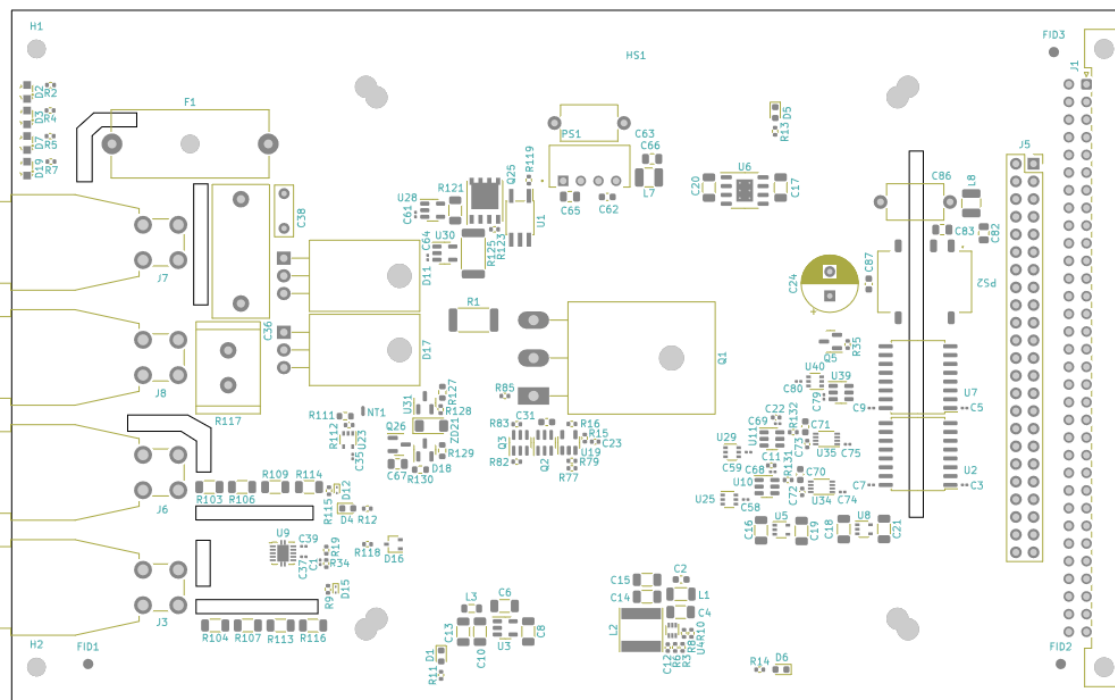
Obrázek 8.2: Osazovací náhled backplane - zadní strana.



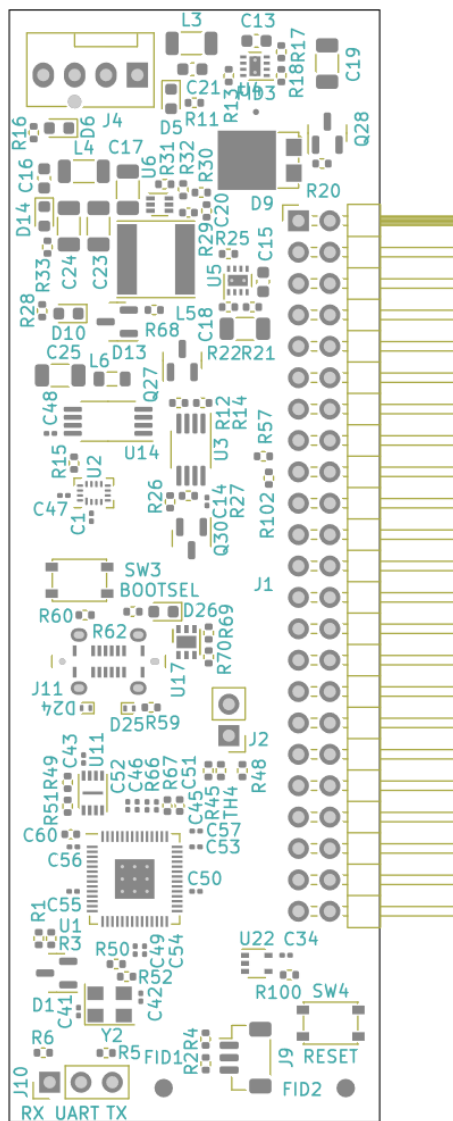
Obrázek 8.3: Osazovací náhled řídicí dceřinné desky základní desky - přední strana.



Obrázek 8.4: Osazovací náhled řídicí dceřinné desky základní desky - zadní strana.



Obrázek 8.5: Osazovací náhled hlavní desky modulu zátěže.



Obrázek 8.6: Osazovací náhled řídicí desky modulu zátěže.

KUSOVNÍKY

Tabulka 8.1: Kusovník mechanických a elektromechanických dílů

Díl	Počet kusů
Kupované díly	
Hliníkový profil 10 × 20 mm s T drážkou 5 mm délky 147,32 mm	6
Ventilátor Sunon PMB1212pLB2-A(2)	1
Ventilátor Sunon MF50101V1	1
Chladič Noctua NH-L9i	1
Plech	
Postranní plech	2
Horní plech	1
Zadní plech	1
3D tisk	
Levý záslepny díl	1
Pravý záslepny díl	1
Výztuha plechu	6
Zadní kryt ventilátoru	1
Přední kryt ventilátoru	1
Držák ventilátoru	1
Horizontální lišta	6
Horní rohový díl	2
Podpěrná lišta desky	6
Držák filtru	1
Přídržná mřížka filtru	1
Přepážka 6 HP	1
Přepážka 9 HP	1
Přední panel přepážky 6 HP	1
Přední panel přepážky 9 HP	1
Přední panel modulu zátěže 15 HP	1
Spojovací materiál	
Matička M2.5s	89
Matička M4	7
Matička M2.5	24
Matička M4 do T-drážky	24
Matička M3	2
Šroub M2.5×6	93
Šroub M4×40	3
Šroub M4×16	4
Šroub M4×10	48
Šroub M3×6	6

Tabulka 8.1: Kusovník mechanických a elektromechanických dílů

Díl	Počet kusů
Polyamidová podložka M2.5	18
Polyamidová podložka M3	2
Distanční sloupek 3,1 mm ID × 3 mm	4
Konektory	
DIN 41612 typ B 2×32 rovný samice	9
DIN 41612 typ B 2×32 pravoúhlý samec	1
Rastrový konektor 2,54 mm 2×27 rovný samec	1
Rastrový konektor 2,54 mm 2×27 rovný samice	1
Molex Micro-Fit 3.0 2×6 rovný samec	1
Tělo rastrového konektor 2,54 mm 1×2 na kabel samice	1
Pin rastrového konektoru 2,54 mm na kabel	2
Konektor Molex 0022232031 3-pin	2
Rastrový konektor 2,54 mm 1×3 rovný samec	1
GCT USB4120-03-C	3
JST SH BM03B SRSS TB	3
Rastrový konektor 2,54 mm 2×25 rovný samec	1
Rastrový konektor 2,54 mm 2×4 rovný samec	1
Rastrový konektor 2,54 mm 2×10 rovný samec	1
CalTest CT3151SP-0	2
CalTest CT3151SP-2	2
Rastrový konektor 2,54 mm 2×23 rovný samice	1
Rastrový konektor 2,54 mm 2×23 pravoúhlý samec	1
Konektor Molex 0470531000 4-pin	1
Rastrový konektor 2,54 mm 1×2 rovný samec	1
Ostatní	
Měděná destička 40 × 40 mm 1,5 mm tloušťka	2
Teplovodivá podložka 40 × 40 mm 0,5 mm tloušťka	1

Tabulka 8.2: Kusovník elektronických součástek

Hodnota	Pouzdro	Doplňující hodnoty	ks
Kondenzátory			
10 μ F	1206	X5R 25 V	17
100 nF	0201	X5R 6,3 V	63
10 μ F	Radiální D 6,3 mm P 2,5 mm	Al-poly 63 V	1
100 nF	0603	X5R 25 V	11
1 μ F	0402	X5R 6,3 V	13
27 pF	0201	C0G 50 V	6
22 μ F	1206	X5R 6,3 V	12
1 μ F	0805	X5R 25 V	2
1,5 nF	0402	C0G 50 V 5 %	2
100 nF	0402	X5R 35 V	3
100 μ F	Radiální D 6,3 mm P 2,5 mm	Al-poly 16 V	1
4,7 μ F	0805	X5R 25 V	4
1 μ F	0603	X5R 25 V	3
22 μ F	1206	X5R 10 V	2
330 pF	Disk D 8 mm W 5 mm P 10 mm	Y5S 2 kV Y1	2
1,5 nF	0603	C0G 50 V 5 %	2
100 μ F	Radiální D 8 mm P 3,5 mm	Al-poly 25 V	1
1 μ F	Kvádrový L 19 mm W 8 mm P 15 mm	Fóliový 250 V	1
22 nF	Kvádrový L 7,2 mm W 2,5 mm P 5 mm	Fóliový 250 V	1
10 nF	0805	X5R 200 V	1
Odpory			
5,6 k Ω	4 \times 0402 konvexní	Pole 4	6
5,6 k Ω	2 \times 0402 konvexní	Pole 2	1
10 k Ω	0402	1 %	25
100 Ω	0402	1 %	13

Tabulka 8.2: Kusovník elektronických součástek

Hodnota	Pouzdro	Doplňující hodnoty	ks
5,1 k Ω	0402	1 %	12
270 Ω	0402	1 %	13
4,7 k Ω	0402	1 %	6
33 k Ω	0402	1 %	5
1,5 k Ω	0402	1 %	8
27 Ω	0201	1 %	6
2 k Ω	0402	1 %	7
1 k Ω	0402	1 %	5
27 k Ω	0402	1 %	6
5,6 k Ω	0402	1 %	3
110 k Ω	0402	1 %	2
6,8 k Ω	0402	1 %	4
1,8 k Ω	0402	1 %	3
12 k Ω	0402	1 %	4
620 Ω	0402	1 %	3
31,6 k Ω	0402	1 %	2
100 k Ω	0402	1 %	2
35,7 k Ω	0402	1 %	2
56 k Ω	0402	1 %	2
536 k Ω	1206	1 %	8
16 m Ω	2512	2 W 1 %	2
48,7 k Ω	0402	1 %	2
24,9 Ω	0402	1 %	2
52,3 k Ω	0402	1 %	1
0 Ω	0402	1 %	1
2,15 M Ω	0603	1 %	1

Tabulka 8.2: Kusovník elektronických součástek

Hodnota	Pouzdro	Doplňující hodnoty	ks
113 k Ω	0402	1 %	1
1 Ω	Radiální L 13 mm W 9 mm P 5 mm	5 %	1
150 Ω	0402	1 %	1
160 m Ω	1206	1 %	1
453 k Ω	0603	1 %	1
15 k Ω	0402	1 %	1
20 k Ω	0603	1 %	1
5,1 k Ω	0603	1 %	1
Cívky			
10 μ H	Taiyo Yuden NR-60xx		2
Würth Elektronik 74279215	1206		5
2,2 μ H	Taiyo Yuden NR-60xx		3
100 μ H	0805		3
6,8 μ H	1210		2
LED			
Zelená	0603	20 mA 2 V	12
Červená	0603	20 mA 2 V	5
Modrá	0603	20 mA 3,2 V	3
Červená	LTST-S326	20 mA 2 V	1
Zelená	LTST-S326	20 mA 2 V	1
Modrá	LTST-S326	5 mA 3,1 V	1
Žlutá	LTST-S326	20 mA 2 V	1
Diody			
ESD321DPY	X1SON		6
BAT54S	SOT-23		3
CDBA340-HF	SMA		2

Tabulka 8.2: Kusovník elektronických součástek

Hodnota	Pouzdro	Doplňující hodnoty	ks
BAT54W	SOT-323		3
SS8P6C	TO-277A		3
BAV70	SOT-23		1
MBRD20100CT-G1	TO-220		1
TYN20-800T	TO-220		1
ESD9B3.3ST5G	SOD-923		2
BZV55C51	MiniMELF		1
Tranzistory			
BSS138	SOT-23		8
IXTH64N10L2	TO-247		1
PBSS414DPN	SC-74-6 1,5 × 2,9 mm P 0,95 mm		1
SIR122DP	PowerPak SO-8		1
MMBTA92	SOT-23		1
Integrované obvody			
MC74HC4067ADWG	SOIC-24W 7,5 × 15,4 mm P 1,27 mm		1
RP2040	QFN-56-EP 7 × 7 mm P 0,4 mm		3
TPS259570DSG	WSON-8-EP 2 × 2 mm P 0,5 mm EP 0,9 × 1,6 mm		4
W25Q16JVUX	USON-8 2 × 3 mm P 0,5 mm		3
PI4IOE5V6408	UQFN-16 1,8 × 2,6 mm P 0,4 mm		1
NCP361MUTBG	DFN-6-1EP 2 × 2 mm P 0,65 mm EP 1 × 1,6 mm		3
LMV358	MSOP-8 3 × 3 mm P 0,65 mm		2
AP62250Z6	SOT-563		3
74HC4051	TSSOP-16 4,4 × 5 mm P 0,65 mm		1
74AHC1G125	SOT-353		2
SN74LVC1G3157	SOT-363		4
AT24CS01-XHM	TSSOP-8 4,4 × 3 mm P 0,65 mm		2

Tabulka 8.2: Kusovník elektronických součástek

Hodnota	Pouzdro	Doplňující hodnoty	ks
MIC5365-3.3YC5	SOT-353		2
OPA355NA	SOT-23-6		2
INA281B1	SOT-23-5		2
ADS7042xDCU	VSSOP-8 2,3 × 2 mm P 0,5 mm		2
TLP155E	SO-5 4,4 × 3,6 mm P 1,27 mm		1
ISO6762FDWR	SOIC-16W 7,5 × 10,3 mm P 1,27 mm		1
LM828	SOT-23-5		1
BDJ2FC0WEFJ	HTSOP-8-1EP 3.9 × 4,9 mm P 1,27 mm EP 2,4 × 3,2 mm		1
ISO6760FDWR	SOIC-16W 7,5 × 10,3 mm P 1,27 mm		1
INA826S	VSON-10-1EP 3 × 3 mm P 0,5 mm EP 1,65 mm × 2,4 mm		1
TLV9101DBV	SOT-23-5		1
TLV9001IDCK	SOT-353-5		1
TL431DBZ	SOT-23		1
DAC121S101CIMK	SOT-23-6		1
PDSE1-S12-S15-S			1
IES0212S15			1
Ostatní			
ECS-120-18-33-JGN-TR3	3225 4 pin 3,2 × 2,5 mm		3
SMD SPST-NO tlačítko	PTS815		2
NTCG104EF104HT1X	0402	100 kΩ 3 %	2
Schurter OGN 0031 8201			1
Keramická pojistka 5 × 20 mm 10 A			1