

**ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI
FAKULTA ELEKTROTECHNICKÁ**

Katedra elektromechaniky a výkonové elektroniky

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

**Návrh monitorovacího zařízení pro sběr dat do
vzdáleného uložení**

ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI

Fakulta elektrotechnická
Akademický rok: 2019/2020

ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE (projektu, uměleckého díla, uměleckého výkonu)

Jméno a příjmení: **Lukáš CALTA**
Osobní číslo: **E17B0138P**
Studijní program: **B2644 Aplikovaná elektrotechnika**
Studijní obor: **Aplikovaná elektrotechnika**
Téma práce: **Návrh monitorovacího zařízení pro sběr dat do vzdáleného úložiště**
Zadávací katedra: **Katedra elektromechaniky a výkonové elektroniky**

Zásady pro vypracování

Cílem práce je navržení vhodného konceptu zařízení, které bude sloužit k testování elektronických obvodů. Zařízení bude schopné monitorování signálů a generování jednoduchých stimulů. Změřená data budou odesílána do vzdáleného úložiště pro budoucí zpracování.

1. Zvolte vhodnou hardwarovou platformu zařízení s ohledem na rozměry, napájení, komunikační rozhraní.
2. Definujte druh a počet podporovaných signálových vstupů (ADC kanály, digitální vstupy, teplotní čidla).
3. Definujte druh a počet podporovaných signálových výstupů (DAC kanály, digitální výstupy).
4. Navrhněte a zdokumentujte koncept zařízení. Dále realizujte funkční prototyp.
5. Zhodnoťte vlastnosti a možnosti nasazení navrženého zařízení.

Hlavním cílem bakalářské práce je zejména návrh hardwaru zařízení a ověření funkčnosti jednotlivých funkčních částí.



Rozsah bakalářské práce: **30 – 40 stran**
Rozsah grafických prací: **podle doporučení vedoucího**
Forma zpracování bakalářské práce: **tištěná/elektronická**

Seznam doporučené literatury:

1. Interní dokumentace firmy Logic Elements s.r.o.

Vedoucí bakalářské práce: **Ing. Michael Holík, Ph.D.**
Katedra aplikované elektroniky a telekomunikací

Datum zadání bakalářské práce: **4. října 2019**
Termín odevzdání bakalářské práce: **11. června 2020**


Prof. Ing. Zdeněk Peroutka, Ph.D.
děkan




Prof. Ing. Václav Kůs, CSc.
vedoucí katedry

Anotace

Předkládaná bakalářská práce je zaměřena na návrh a realizaci univerzálního elektronického zařízení pro automatické testování a měření nově vyvinutých a vyrobených prototypů různých elektronických zařízení s možností odesílání změřených dat na databázový server. V práci je zdokumentován postup návrhu schémat zapojení a desky plošných spojů za použití profesionálních vývojových nástrojů (Altium Designer, TinaTI). Dále je popsán postup při oživování prototypu navrženého zařízení, a to jak po samotné hardwarové stránce, tak i za použití jednoduchého testovacího softwaru nezbytného k ověření správné funkce dílčích bloků. Ke konci práce je uvedeno shrnutí obsahující zejména výsledky získané měřeními na prototypu zařízení.

Klíčová slova

Testování, měření, Raspberry Pi, návrh, schéma zapojení, deska plošného spoje, zprovoznění.

Annotation

The presented bachelor thesis is focused on the design and realization of a universal electronic device for automatic testing and measurement of newly developed and manufactured prototypes of various electronic devices with possibility of sending measured data to a web server. The work documents the design process of wiring diagrams and printed circuit board using professional development tools (Altium Designer, TinaTI). Furthermore, the procedure for reviving the prototype of the designed device is described, both in terms of the hardware itself and using simple test software necessary to verify the correct function of the sub-blocks. At the end of the work, there is a summary containing mainly the results obtained by measuring on the prototype device.

Key words

Testing, measurement, Raspberry Pi, design, circuit diagram, printed circuit board, commissioning.

Prohlášení

Prohlašuji, že jsem tuto bakalářskou práci vypracoval samostatně, s použitím odborné literatury a pramenů uvedených v seznamu, který je součástí této bakalářské práce.

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

.....

podpis

V Plzni dne 14.6.2020

Lukáš Caltá

Poděkování

Tímto bych rád poděkoval vedoucímu bakalářské práce Ing. Michaelu Holíkovi, Ph.D. a Ing. Václavu Krausovi, PhD. za cenné profesionální rady, připomínky a metodické vedení práce.

Dále bych rád poděkoval Ing. Lukáši Krahulcovi a Ing. Ondřeji Pajerovi za předané zkušenosti, rady a připomínky během realizace tohoto projektu a také Ing. Jiřímu Novotnému za výraznou pomoc při programovém zprovoznění méj bakalářské práce.

Obsah

| | |
|---|-----------|
| OBSAH | 8 |
| SEZNAM SYMBOLŮ A ZKRATEK | 10 |
| ÚVOD | 11 |
| 1 KONCEPT ZAŘÍZENÍ | 12 |
| 2 NÁVRH HARDWARE | 14 |
| 2.1 PROCESOROVÁ JEDNOTKA | 15 |
| 2.2 DIGITÁLNÍ VSTUPY | 17 |
| 2.3 DIGITÁLNÍ VÝSTUPY | 19 |
| 2.4 PWM SIGNÁLOVÉ VÝSTUPY | 20 |
| 2.5 ANALOGOVÉ NAPĚŤOVÉ VSTUPY | 21 |
| 2.6 ANALOGOVÉ PROUDOVÉ VSTUPY | 27 |
| 2.7 SIMULACE TEPLOTNÍCH SENZORŮ | 29 |
| 2.8 IO EXPANDÉR | 31 |
| 2.9 RELÉ S PŘEPÍNACÍMI KONTAKTY | 32 |
| 2.10 DETEKCE SÍŤOVÉHO NAPĚTÍ | 33 |
| 2.11 ROZHRAŇÍ RS-485 | 34 |
| 2.12 PŘEVODNÍK USB NA UART | 35 |
| 2.13 NAPÁJECÍ ZDROJ | 36 |
| 2.13.1 Síťový filtr | 38 |
| 2.13.2 Měnič AC/DC | 39 |
| 2.13.3 Měnič DC/DC | 40 |
| 2.13.4 LDO regulátor | 41 |
| 2.13.5 Referenční napětí | 42 |
| 3 PRAKTICKÁ REALIZACE | 43 |
| 3.1 NÁVRH SCHÉMAT ZAPOJENÍ | 44 |
| 3.2 NÁVRH DPS | 44 |
| 3.2.1 Pravidla návrhu DPS | 45 |
| 3.3 KONSTRUKČNÍ PROVEDENÍ | 48 |
| 3.4 VÝROBA | 51 |
| 4 ZPROVOZNĚNÍ A OVĚŘENÍ VLASTNOSTÍ | 52 |
| 4.1 ELEKTRICKÉ OŽIVENÍ | 52 |
| 4.2 ZÁKLADNÍ OVLÁDACÍ PROGRAM | 53 |

| | | |
|----------|---|-----------|
| 4.3 | ZPROVOZNĚNÍ SPI | 55 |
| 4.4 | WEBOVÝ SERVER | 55 |
| 4.5 | DOSAŽENÉ VLASTNOSTI A PARAMETRY TESTING BOARDU | 57 |
| 5 | ZÁVĚR..... | 59 |
| | SEZNAM LITERATURY A INFORMAČNÍCH ZDROJŮ..... | 61 |
| | SEZNAM OBRÁZKŮ | 64 |
| | SEZNAM TABULEK..... | 65 |
| | PŘÍLOHY..... | 1 |
| | PŘÍLOHA A – JEDNOTLIVÉ VRSTVY MĚDI DPS | 1 |
| | PŘÍLOHA B – MODEL DPS | 5 |
| | PŘÍLOHA C – 3D MODEL KRYTU PRO TESTING BOARD | 7 |
| | PŘÍLOHA D – FOTO REÁLNÉHO VÝROBKU | 8 |
| | PŘÍLOHA E – VÝTAH Z TESTOVACÍHO SKRIPTU VŠECH FUNKCÍ KROMĚ ADC A RS-485 | 10 |
| | PŘÍLOHA F – CD | 12 |

Seznam symbolů a zkratk

| | |
|--------------------|--|
| AC | alternating current |
| ADC | analog to digital converter |
| A_U | napěťové zesílení |
| DC | direct current |
| DPS | deska plošných spojů |
| DUT | device under test |
| EMC | electro-magnetic compatibility |
| ESD | electrostatic discharge |
| f_{vz} | vzorkovací frekvence |
| GND | ground – elektrický potenciál tvořící referenční nulové napětí |
| GPIO | general-purpose input / output |
| IO | integrováný obvod |
| kSPS | kilosamples per second |
| L | označení fázového vodiče |
| LDO | low dropout voltage regulator |
| LED | light-emitting diode |
| MOSFET | metal oxide semiconductor field effect transistor |
| N | označení nulového vodiče |
| OZ | operační zesilovač |
| PE | označení ochranného vodiče |
| ppm_{p-p} | parts per million peak-peak |
| PWM | pulse-width modulation |
| P_{zmax} | maximální ztrátový výkon |
| RPi | Raspberry Pi |
| TTL | transistor-transistor logic |

Úvod

V této práci se ve spolupráci s firmou Logic Elements, s. r. o. zabývám návrhem elektronického zařízení, které bude univerzálně použitelné pro měření a testování nově vyvinutých a vyrobených prototypů elektronických zařízení. Účelem laboratorního měřicího přípravku je schopnost nejen pasivně monitorovat a měřit dané zařízení, ale i generovat stimuly a sledovat odezvu na ně. Ze své charakteristické funkce vzešel název pro vyvíjený nástroj, a to Testing board, který budu dále v celé práci používat.

Po základním rozboru a stanovení potřebných funkcí vyberu vhodný hardware. Bude nutné určit hlavní procesorovou jednotku, která se postará o řízení celé desky a bude komunikovat se vzdáleným uložštěm. Poté popíši obvodové řešení dílčích funkčních bloků, které umožní realizovat požadované funkce.

Následovat bude návrh desky plošných spojů, včetně vygenerování dat potřebných pro výrobu DPS a její osazení. Dále popíši oživení a způsob otestování funkčnosti navrženého zařízení.

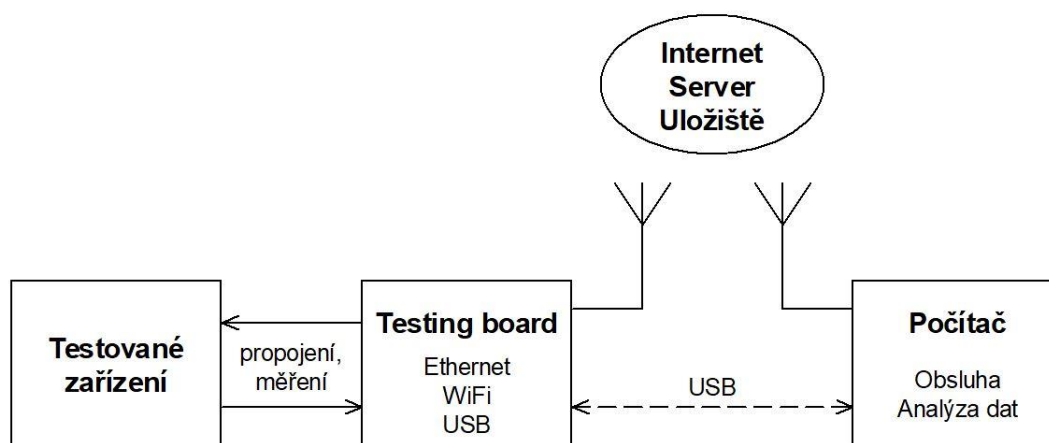
V závěru práce zhodnotím realizovaný výrobek a navrhnou případná vylepšení pro druhou revizi Testing boardu.

1 Koncept zařízení

Aby bylo možné uvést na trh výrobek, který funguje dle požadavků zákazníka, který je odladěný a vlastnosti jsou u všech vyrobených kusů stejné v rámci tolerancí, je nezbytné ho při vývoji testovat a měřit, dokud není dosaženo stanovených hodnot. Měření má probíhat ideálně automatizovaně.

Většina elektronických zařízení generuje různé signály pro ovládání jiných zařízení nebo spínání aktuátorů. Rovněž tato zařízení signály přijímají a reagují na změny logických napěťových úrovní, jako např. stisknutí tlačítka, nebo musí být resetována. Nesmí být opomenuto otestování funkčnosti napájecích zdrojů, parametrů zesilovačů či jiných analogových obvodů, měření odebíraného elektrického proudu, regulace příkonu topných odporových těles, přepínání mezi rozdílnými napájecími zdroji atd.

Za tímto účelem vznikne zařízení, které bude schopno generovat stimuly a monitorovat veličiny uvedené v *Tabulce 1* na str. 13. Testing board bude řízený jednodeskovým počítačem, ve kterém se spustí program automatického měření, určený přímo pro konkrétní testované zařízení. Změřená data se zpracují a odešlou na firemní server, kde budou ukládána do databázi a případně zpracována do grafické podoby. Celkový koncept testovacího zařízení je znázorněn na *Obrázku 1*.



Obrázek 1: Princip celého konceptu monitorovacího zařízení

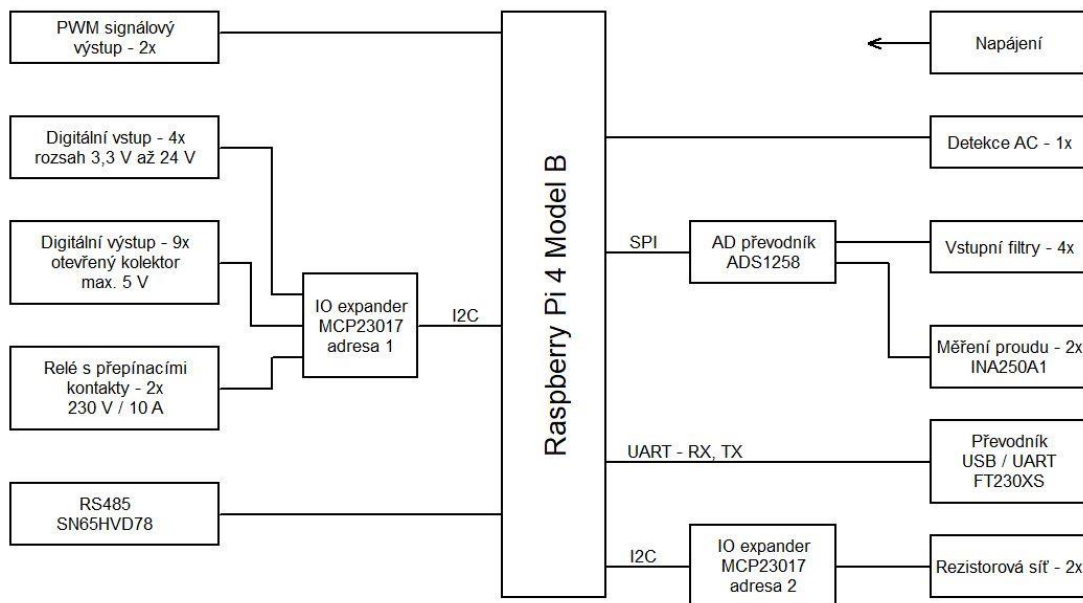
Po konzultaci s vývojáři, kteří budou Testing board využívat, se stanovily potřebné funkce. Jejich počet a rozsah měřených veličin je shrnut v následující *Tabulce 1*.

Tabulka 1: Požadované funkce Testing boardu včetně jejich rozsahu a počtu

| Funkce | Parametr | Počet |
|-----------------------------|---------------------------|--------------|
| Digitální vstup | 0 V ÷ 24 V | 4 |
| Digitální výstup | otevřený kolektor | 9 |
| PWM výstup | 3,3 V / otevřený kolektor | 2 |
| Analogový vstup | ± 24 V | 4 |
| Měření proudu | ± 10 A | 2 |
| Simulace teplotních senzorů | NTC10K, PT100, PT1000 | 2 |
| Relé s přepínacími kontakty | 230 V / 10 A | 2 |
| Detekce síťového napětí | 230 V | 1 |
| Rozhraní RS-485 | - | 1 |

2 Návrh hardware

Následující blokové schéma (viz *Obrázek 2*) zobrazuje zjednodušené propojení jednotlivých funkčních bloků Testing boardu. Kromě univerzálně použitelných GPIO jsou využity piny s podporou komunikačních sběrnic I²C, SPI a UART.



Obrázek 2: Zjednodušené blokové schéma zapojení Testing boardu

2.1 Procesorová jednotka

Řídící počítač je nejdůležitější část celého zařízení. Musí být schopen komunikovat se všemi dílčími obvody na Testing boardu, řídit jejich činnost, číst stavy vstupních obvodů, ovládat výstupy a také komunikovat se serverem. Na trhu existuje mnoho programovatelných zařízení, která disponují různými rozhraními, funkcemi, parametry, obsahují I/O piny a funkce jako ADC, DAC atd. Nejvhodnějším řešením je využít jednodeskový počítač. Při porovnání nabídky dostupných jednodeskových počítačů jsem narazil např. na tyto:

- Banana Pi
- Raspberry Pi
- Asus Tinker Board

Výše uvedená zařízení jsou si principiálně velmi podobná. Každé je od jiného výrobce a mají některé drobně odlišné parametry (počet a standard USB portů, počet GPIO, napětí TTL atp.). Kritérium mého výběru je rozumná cena, co nejlepší dostupnost, dobrá podpora a široká komunita.

Nejvhodnějším z výběru je Raspberry Pi. Je to relativně levný, dostupný a univerzálně použitelný počítač, který obsahuje dostatečnou výbavu pro řízení celého Testing boardu. Jeho největší výhodou oproti konkurenčním počítačům je široká komunita a množství informačních zdrojů a dostupných knihoven. Existuje více generací a provedení tohoto jednodeskového počítače. Například pro průmyslové využití a maximální přizpůsobení konkrétní aplikaci návrháře se nabízí varianta Raspberry Pi Compute Modul 3+, která je navržena pro připojení do desky plošného spoje pomocí konektoru DDR2 SODIMM. Toto provedení RPi však obsahuje pouze nezbytné prvky pro základní funkci procesoru a nehodí se pro řízení Testing boardu. Nejvhodnější variantou je typ Raspberry Pi 4 Model B. Ilustrace zvoleného řídicího počítače se nachází na *Obrázku 3* na str. 16.



Obrázek 3: Ilustrační obrázek použitého Raspberry Pi 4 Model B. Zdroj [4]

Charakteristické parametry Raspberry Pi 4 Model B jsou uvedeny v *Tabulce 2*.

Tabulka 2: Základní parametry vybraného řídicího počítače Raspberry Pi 4 Model B

| Specifikace Raspberry Pi 4 Model B |
|--|
| Procesor Broadcom BCM2711, 4 jádrový Cortex-A72, frekvence 1,5 GHz |
| RAM LPDDR4-3200 SDRAM, až 4 GB |
| WiFi 2,4 GHz a 5 GHz IEEE 802.11ac |
| Bluetooth 5.0 |
| Gigabit Ethernet |
| 2x USB 3.0 port, 2x USB 2.0 port |
| Standardní 40-pinový GPIO header zpětně kompatibilní s předchozími deskami |
| 2x micro-HDMI port |
| Sériová rozhraní: UART, SPI, I ² C |
| Napájení: 5 VDC, min. 2,5 A (možnost napájet přes GPIO header) |
| Rozměry desky: 85 mm x 56 mm |

Díky těmto vlastnostem je velice usnadněný návrh celé desky. V případě použití výše zmíněné průmyslové verze Raspberry Pi Compute Modul 3+ by v návrhu přibyly obvody pro USB, Ethernet, WiFi a SD kartu a tím i zabraný prostor na desce plošného spoje.

2.2 Digitální vstupy

Digitální vstupy mají být schopné detekovat úroveň „high“ v rozsahu 3,3 V až 24 V. V zapojení je využito tzv. galvanické oddělení, které spočívá v elektrickém oddělení vstupních obvodů od vyhodnocovací části s využitím optočlenu. Řešení na Testing boardu nemá za úkol oddělovat nebezpečné střídavé napětí od bezpečného malého napětí, ale pouze zajistit galvanické oddělení zemí a aby např. při nevhodném zapojení vstupu nedošlo k nežádoucímu ovlivnění či rušení mezi DUT a vyhodnocovacími obvody. Proto při návrhu DPS nebudou aplikována pravidla pro izolační mezery mezi síťovým napětím a bezpečným malým napětím. Nevhodným připojením by mohla být obrácená polarita napětí nebo napětí vyšší než 24 V. Zvolené řešení s optočlenem zároveň zajistí funkčnost v uvedeném relativně širokém rozsahu napětí díky širokému rozsahu vstupního proudu, který je 0 až 50 mA. Toho by nebylo možné dosáhnout v případě využití např. jednoduchého napěťového děliče či stabilizátoru se Zenerovou diodou. Jako vstupní obvod by se dal využít i tranzistor ve spínacím režimu, ale v tom případě by nebylo možné obvody galvanicky oddělit, což je nežádoucí. Nevýhodou řešení s optočlenem však může být poměrně nízká vstupní impedance, která je zhruba 1,6 k Ω . V případě detekce některých signálových výstupů existuje riziko jejich přetěžování.

Na vstupu zapojení, viz *Obrázek 4* na str. 18, můžeme vidět TVS (Transient Voltage Suppressor) diody, ozn. IC4. Jedná se o součástky poskytující ochranu při přepětíových špičkách, konstruované pro velké impulsní proudy. Jejich důležitým parametrem je jmenovité napětí, do kterého zaručeně nepropouští proud, dále tzv. breakdown voltage – začíná protékat proud a tzv. clamping voltage – napětí, při kterém zkratují obvod a pohltí dodanou energii ze vstupu.

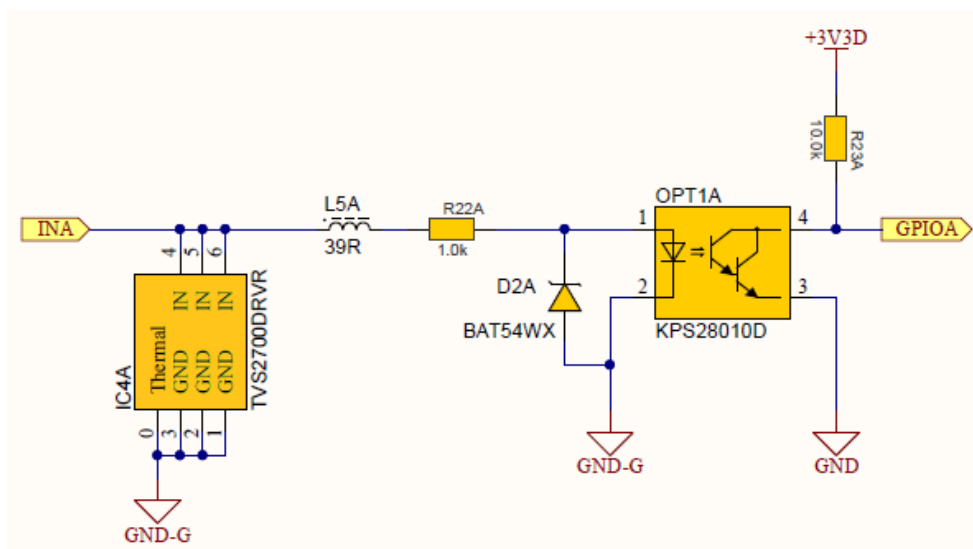
Další důležitou součástí v obvodu je dioda D2. Tato dioda slouží jako ochrana proti přepólování optočlenu, který má dle datasheetu maximální závěrné napětí 6 V. V případě připojení napětí obrácené polaritě větší než 6 V by došlo k zničení optočlenu. Použitá dioda v daném místě při přepólování zajistí úbytek pouze 0,7 V a zbylé napětí vytvoří úbytek na předřadném rezistoru.

Z charakteristiky v datasheetu [15] lze vyčíst, že pro bezpečné sepnutí optočlenu je potřebný proud 2 mA, při kterém je úbytek napětí na diodě přibližně 1,35 V. V případě minimální detekované hodnoty napětí na vstupu, což je 3,3 V, je potřeba použít předřadný

rezistor o hodnotě $R_{22} = \frac{U_{in} - U_f}{I_f} = \frac{3,3 - 1,35}{0,002} = 975 \Omega$. Z normalizované řady byla zvolena hodnota 1 k Ω .

Pokud bude na vstupu napětí 24 V, poteče proud $I = \frac{U - U_f}{R} = \frac{24 - 1,35}{1000} = 22,7 \text{ mA}$. Při návrhu nesmí být opomenuta výkonová ztráta na předřadném rezistoru, která bude $P_{Zmax} = R \times I^2 = 1000 \times 0,0227^2 = 0,52 \text{ W}$. Byl zvolen rezistor s max. ztrátovým výkonem 1 W.

Na výstupu optočlenu můžeme vidět pull-up rezistor R23 pro definování logické úrovně 3,3 V. Dále je signál veden na vstupní GPIO IO expandéru, kde je vyhodnocen.

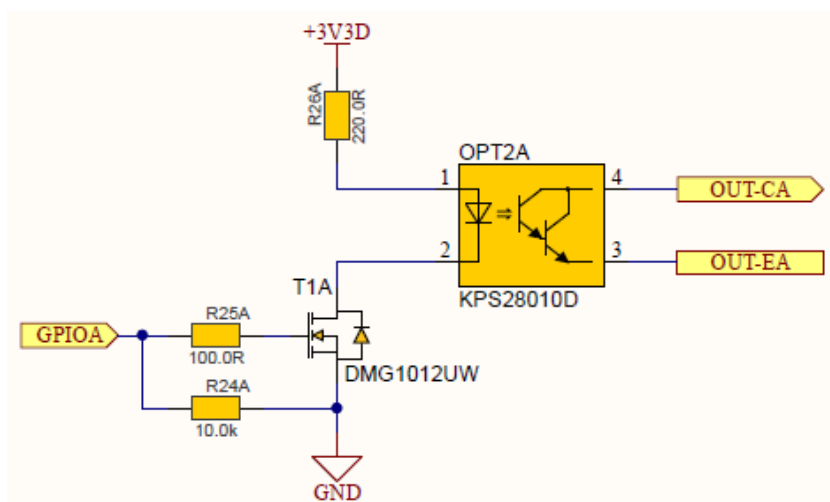


Obrázek 4: Schéma zapojení obvodu digitálního vstupu

2.3 Digitální výstupy

Výstupní logická úroveň použitého IO expandéru je 3,3 V. Tato úroveň je vyhovující, ale není vhodné přímo vyvést využitě GPIO na svorkovnici, bez jakékoliv ochrany proti přetížení či chybnému zapojení. Proto bude využit, stejně jako u digitálních vstupů, i zde optočlen, díky kterému je navíc možné galvanické oddělení výstupů. Dále je do zapojení, viz *Obrázek 5*, implementován MOSFET tranzistor pro spínání optočlenu, aby GPIO IO expandéru nebyly proudově příliš zatěžovány. V zapojení tedy můžeme vidět pull-down rezistor pro jasné definování stavu výstupu při bootování RPi. Následuje rezistor na gate MOSFET tranzistoru zajišťující omezení proudových špiček způsobených vstupní kapacitou. Tranzistor spíná optočlen. Hodnota předřadného rezistoru byla určena tak, aby optočlenem protékal proud zhruba 10 mA kvůli dostatečnému a rychlému sepnutí.

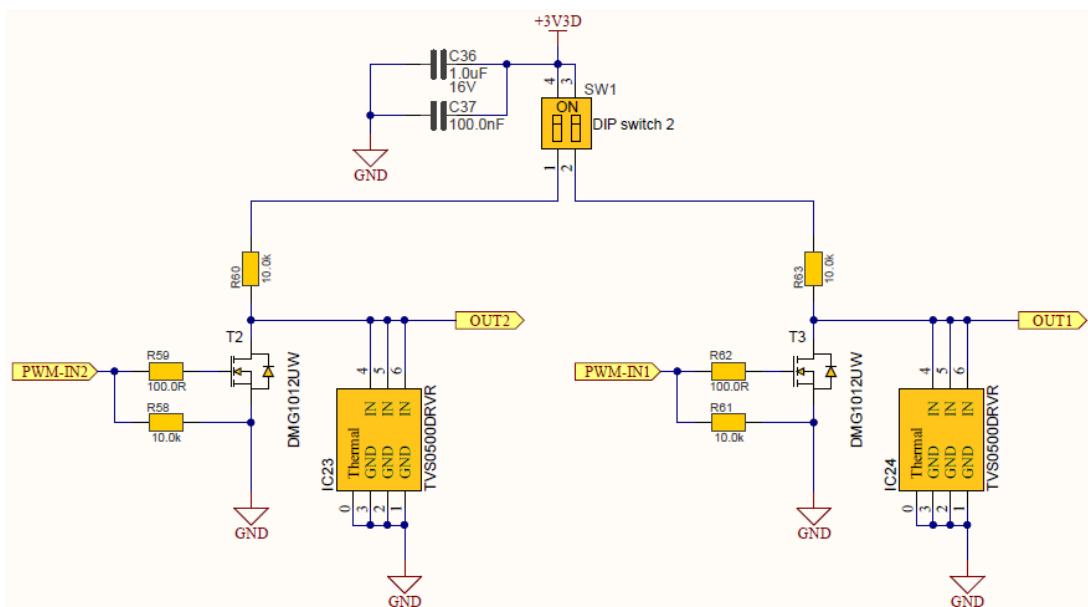
$$R = \frac{U - U_f}{I_f} = \frac{3,3 - 1,35}{0,01} = 195 \Omega. \text{ Nejbližší vyšší normalizovaná hodnota je } 220 \Omega.$$



Obrázek 5: Schéma zapojení obvodu digitálního výstupu

2.4 PWM signálové výstupy

PWM výstup může sloužit například k regulaci příkonu odporového topného tělesa, nebo být použit jako standardní digitální výstup. Na tento signálový výstup nebyl kladen požadavek pro galvanické oddělení. V datasheetu RPi [20] je uvedeno, které GPIO podporují funkci PWM. Jedná se o GPIO 12 a 13 (PWM0 a PWM1). Z těchto výstupů je veden signál na gate MOSFET tranzistoru, ošetřený pull-down rezistorem. Pro univerzálnost použití je možné připojit přepínačem na výstup přes pull-up rezistor napětí 3,3 V z desky, nebo nechat čistě vyvedený otevřený kolektor. Tranzistor je chráněn přepětíovou ochranou, aby nedošlo k jeho proražení, protože maximální povolené blokovací napětí mezi drain – source je 20 V. Celé schéma zapojení PWM výstupů lze vidět na *Obrázku 6*.



Obrázek 6: Schéma zapojení signálového výstupu PWM

2.5 Analogové napěťové vstupy

Pro měření analogového průběhu napětí a následné digitální zpracování se využívají analogově-digitální převodníky.

Výběr AD převodníku

Existuje několik základních druhů, které se liší způsobem, rychlostí i počtem bitů převodu signálu z analogového na digitální [25].

Testing board je určen pro měření stejnosměrného i střídavého napětí. Základními požadavky na měření jsou:

- měření setin voltu s přesností $\pm 5\%$
- měření signálu o frekvenci $0 \div 20$ kHz

Kromě chyby zesílení, chyby nuly a chyby linearity AD převodník vnáší do měření také kvantizační chybu způsobenou zaokrouhlováním při AD převodu. Její hodnota může být rovna maximálně $\pm \frac{q}{2}$, kde q je kvantizační krok vypočtený jako $\frac{U_{ref}}{2^{n-1}}$, kde U_{ref} je hodnota referenčního napětí a n je počet bitů AD převodníku.

Relativní chyba měření se vypočítá: $\delta_r = \frac{\Delta_X}{X_S} \times 100$, kde

Δ_X – absolutní chyba měření (odchylka od skutečné hodnoty)

X_S – skutečná hodnota

δ_r – relativní chyba měření, stanovená hodnota $\delta_r = 5\%$

Aby bylo možné při rozsahu ± 24 V měřit napětí 0,01 V s přesností 5 %, musí maximální chyba mít velikost spočtenou dle vztahu (1).

$$\frac{\Delta_X}{X_S} \times 100 = 5\% \rightarrow \Delta_X = \frac{5}{100} \times X_S = \frac{5}{100} \times 0,01 = 0,5 \text{ mV} \quad (1)$$

Celkový napěťový rozsah měření je 48 V. Má-li být chyba max. $\pm 0,5$ mV, potom kvantizační krok $q = 1$ mV a minimální počet bitů ADC je $n = \log_2 \frac{48}{0,001} = 15,55$.

Nejbližší vyšší hodnota počtu bitů vyráběných ADC je 16. Protože chybu měření nezpůsobuje jen kvantizační chyba, ale i další výše zmíněné chyby ADC, bude vybrán AD převodník s vyšším počtem bitů než 16.

Dle vzorkovacího teorému, který říká, že vzorkovací frekvence musí být minimálně 2x vyšší než maximální měřená frekvence, je nutno zvolit AD převodník se vzorkovací frekvencí alespoň 40 kSPS.

Ze zjištěných požadavků vyplývá jako nejvhodnější řešení použít převodník typu Δ - Σ ([23], [24]). Vzorkovací frekvence tohoto typu AD převodníku jsou 10^1 až 10^5 Hz a vyrábí se s rozlišením až 24 bitů. Tento převodník sestává z dvou hlavních bloků – modulátoru a digitálního filtru. Modulátor převádí analogový signál na digitální pomocí jednobitového AD převodníku a převzorkování. Vzorkovací frekvence f_{vz} uvedená v datasheetu říká, kolikrát za sekundu je AD převodník schopen odeslat zprávu o aktuální hodnotě napětí na vstupu. Uvnitř převodníku ale ve skutečnosti probíhá vzorkování mnohem vyšší frekvencí, označené např. f_m . Poměr frekvence $\frac{f_m}{f_{vz}}$ se nazývá decimační poměr (může být 4 až 32768). Čím je tento poměr vyšší, tím větší je převzorkování a přesnější měření.

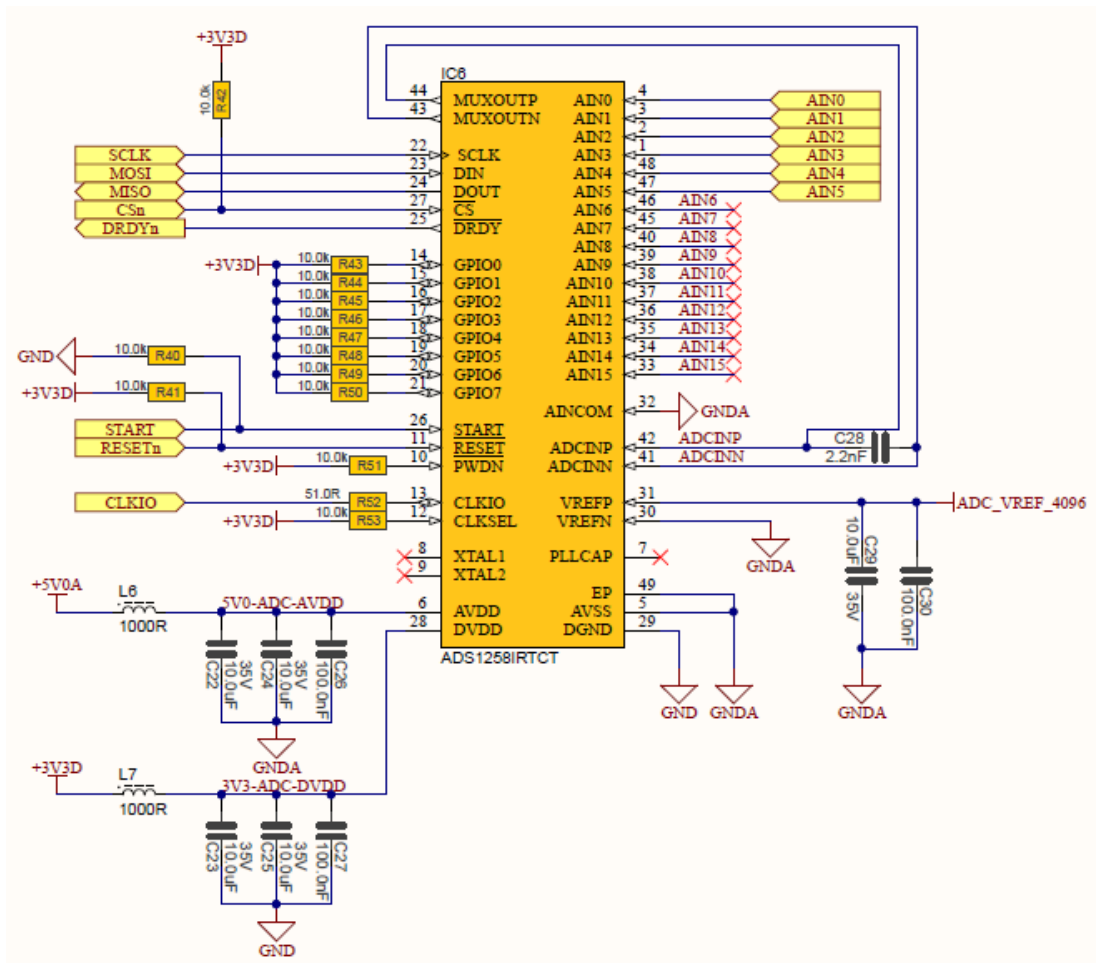
Po prozkoumání velmi široké nabídky různých převodníků, s mnoha dalšími funkcemi, byl vybrán AD převodník od firmy Texas Instruments, jehož charakteristické vlastnosti jsou shrnuty v následující *Tabulce 3*.

Tabulka 3: Základní parametry vybraného AD převodníku

| | |
|---------------------------|---|
| Označení výrobce | ADS1258IRTCT |
| Typ převodníku | Δ - Σ |
| Rozlišení | 24 bitů |
| Max. vzorkovací frekvence | 125 kSPS |
| Počet AD kanálů | 16, nebo 8 diferenciálních |
| Referenční napětí | $\pm 2,5$ V nebo +5 V |
| Šum | 2,8 μV_{rms} při 1,8 kSPS |
| Nelinearita | 0,0003 % |
| Napěťový drift | 0,02 $\mu\text{V}/^\circ\text{C}$ |
| Drift zisku | 0,4 ppm/ $^\circ\text{C}$ |
| Počet GPIO | 8 |

Hodinový signál pro digitální část obvodů může být zajištěn buď krystalem, nebo externím zdrojem. Pro komunikaci s řídicím procesorem převodník využívá sběrnici SPI.

Schéma zapojení je vytvořeno dle doporučení v katalogovém listu [9]. Bylo dodrženo použití všech blokovacích a vyhlazovacích kondenzátorů, pull-up či pull-down rezistorů, viz *Obrázek 7* na str. 24.



Obrázek 7: Schéma zapojení AD převodníku ADS1258IRTC

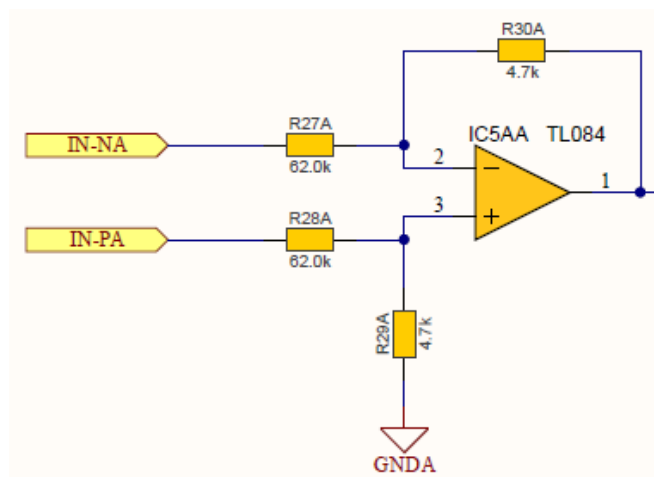
Návrh vstupních obvodů

Jelikož bude mít měřený signál rozsah ± 24 V, musí být upraven tak, aby do ADC vedl signál v rozsahu 0 - 4,096 V. Vstupní signál nejprve vede do rozdílového zesilovače tvořeného jedním ze čtyř kanálů operačního zesilovače TL084 (viz Obrázek 8 na str. 25). Zesílení tohoto stupně je nastaveno tak, aby z původních 24 V vytvořil napětí o velikosti maximálně poloviny referenčního napětí ADC.

$$\text{Vztah pro výpočet zesílení invertujícího OZ je: } A_U = \frac{U_{\text{výstupní}}}{U_{\text{vstupní}}} = -\frac{R_{30}}{R_{27}}$$

Pro úpravu měřeného signálu je tedy potřebné zesílení $|A_U| = \frac{2}{24} = 0,083$.

Pro takové zesílení velmi přesně odpovídá kombinace rezistorů $R27 = 62 \text{ k}\Omega$ a $R30 = 5,6 \text{ k}\Omega$. Z důvodu menší rezervy byla zvolena hodnota $R30 = 4,7 \text{ k}\Omega$. Pro plný rozsah ADC bude úroveň vstupního signálu přibližně 29 V. Rezistory jsou zvoleny s tolerancí 0,1 %.

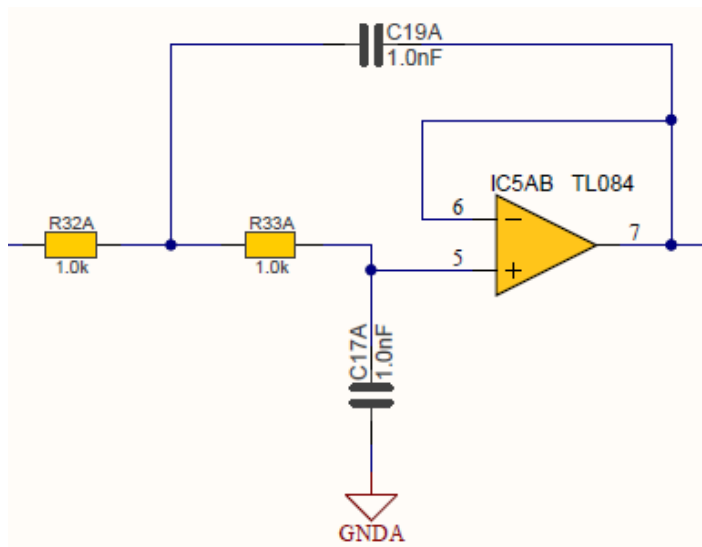


Obrázek 8: Rozdílový zesilovač ve vstupním analogovém obvodu

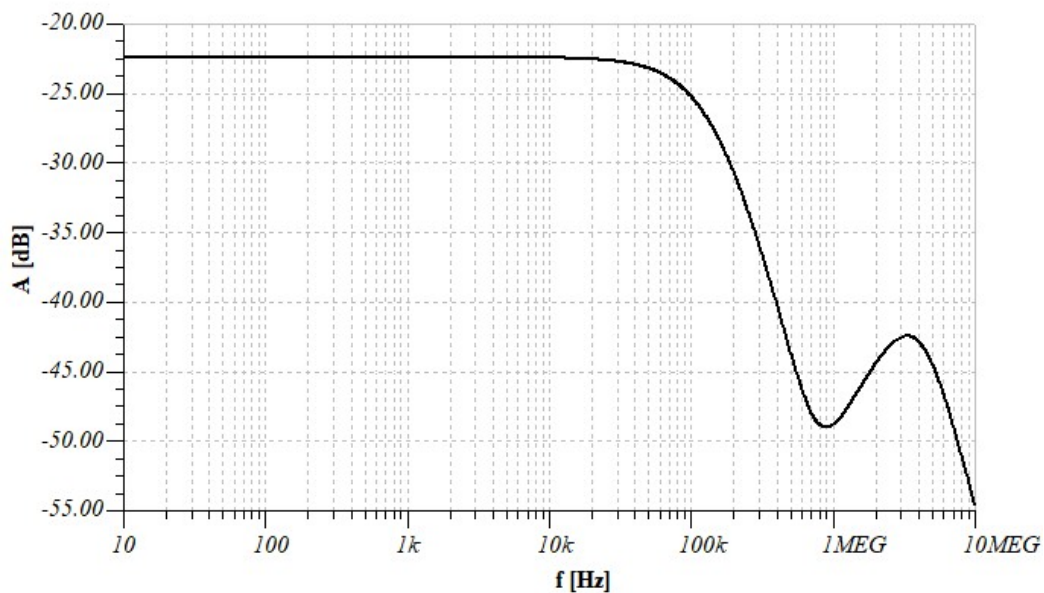
Další stupeň tvoří filtr typu dolní propust (viz *Obrázek 9* na str. 26) navržený pro odstranění případného rušení, nikoliv jako antialiasingový filtr, který dle datasheetu [9] u zvoleného ADC není nutný. Pro dostatečnou strmost byl zvolen filtr druhého řádu typu Sallen-Key, jehož podrobný popis lze najít např. na webové adrese, viz [21]. Jeho amplitudová frekvenční charakteristika má od mezní frekvence útlum 40 dB/dekádu. Mezní frekvence bude vypočtena taková, aby bylo netlumené kmitočtové pásmo do 20 kHz. Vztah pro výpočet mezní frekvence filtru Sallen-Key je $f_m = \frac{1}{2 \times \pi \times \sqrt{R_1 \times C_1 \times R_2 \times C_2}}$.

Tento filtr byl navržen s využitím simulačního programu TinaTI. Aby signál do kmitočtu 20 kHz byl netlumený, jsou dle simulace vhodné hodnoty rezistorů 1 k Ω a kondenzátory o hodnotě 1 nF. V případě potřeby upravit pásmo filtru je v praxi běžné odpájet zvolené součástky a připájet součástky o jiných hodnotách. Na *Obrázku 10*, str. 26, si lze všimnout jisté odlišnosti od teoretického předpokladu, kdy od kmitočtu asi 1 MHz dojde k nárůstu přenosu z -49 dB na -42,5 dB. Tento jev nastává při kmitočtech výrazně nad mezní hodnotou a je způsoben velice nízkou hodnotou impedance kondenzátorů ve srovnání s rezistory (představují téměř zkrat). To způsobí uzemnění vstupu zesilovače a odezvou je na výstupu generované napětí omezené vlastní výstupní impedancí OZ, viz [21]. Následující

pokles přenosové charakteristiky od kmitočtu 3 MHz je již způsoben šířkou pásma samotného operačního zesilovače, protože jeho jednotkový zisk (tzv. unity-gain bandwidth) je právě na 3 MHz.



Obrázek 9: Navržený kmitočtový filtr typu Sallen-Key



Obrázek 10: Amplitudová frekvenční charakteristika analogových napěťových vstupů simulovaná v programu TinaTI

2.6 Analogové proudové vstupy

Elektrický proud lze měřit mnoha metodami, které se liší přesností, oblastí použití i složitostí. Např. pomocí snímačů LEM nebo pomocí úbytku napětí na snímacím rezistoru.

Pro měření proudu Testing boardem byl vybrán integrovaný obvod INA250 od firmy Texas Instruments, který je určen pro měření stejnosměrných i střídavých proudů s rozsahem až 15 A. Jeho princip spočívá v měření proudu bočnickem, a to s hodnotou odporu pouze 2 m Ω . Vyznačuje se vysokou přesností. Kromě přesného bočnicku je v integrovaném obvodu také přesný rozdílový zesilovač s chybou zisku typicky $\pm 0,05$ % a nelinearitou 0,03 %. Řešení s tímto integrovaným obvodem je oproti vlastnímu návrhu bočnicku a diferenčního zesilovače vhodnější z důvodu přesnosti, tolerancí a chyby měření.

V *Tabulce 4* jsou uvedeny dostupné varianty obvodu INA250, které se liší různou citlivostí.

Tabulka 4: Varianty integrovaného obvodu INA250

| Varianta | Citlivost |
|-----------------|------------------|
| INA250A1 | 200 mV/A |
| INA250A2 | 500 mV/A |
| INA250A3 | 800 mV/A |
| INA250A4 | 2 V/A |

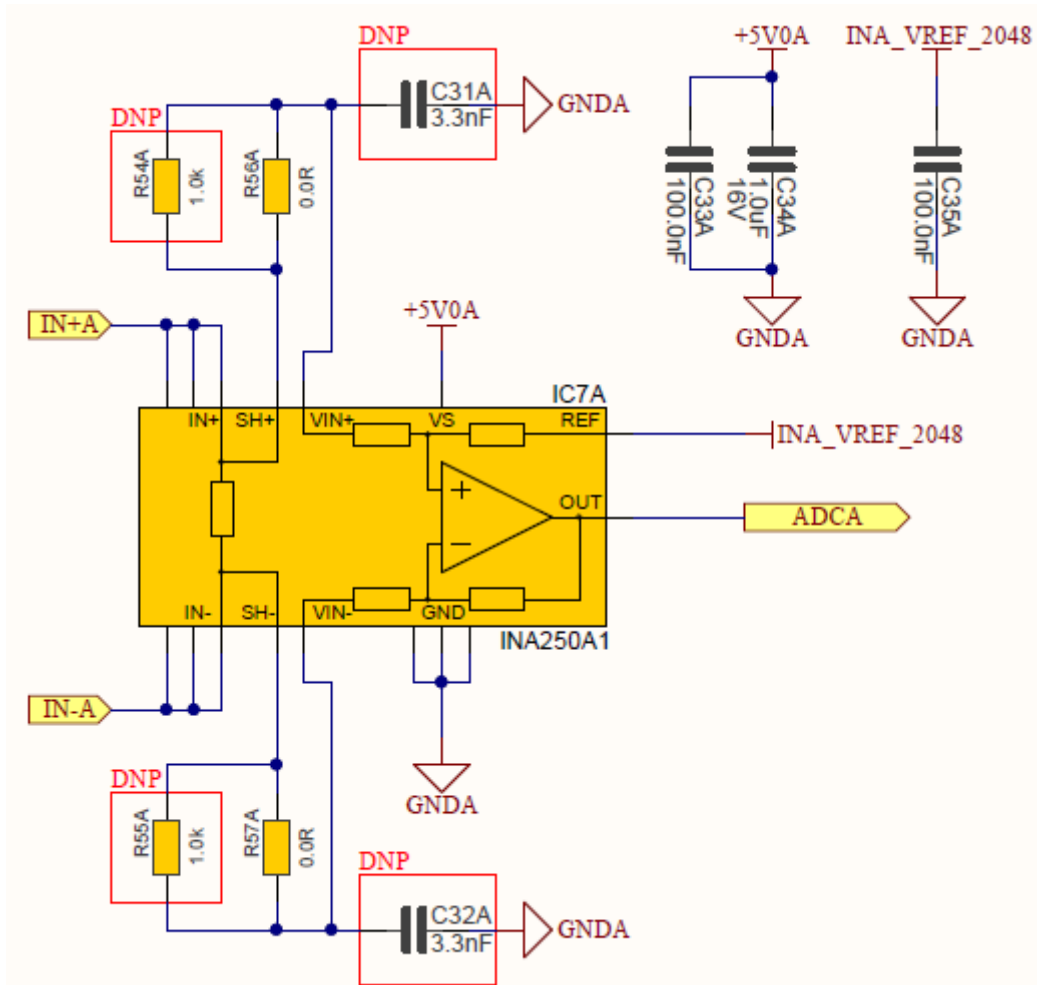
Pro požadovaný rozsah měření ± 10 A odpovídá citlivost převodníku 200 mV/A, proto byla zvolena varianta INA250A1. Z *Obrázku 11* na str. 28 je patrné, že napájení obvodu INA250 je nesymetrické 5 V. Protože bude měřen proud kladné i záporné polarity, měřené napětí na bočnicku by rovněž mělo kladnou i zápornou polaritu, ale operační zesilovač by zesiloval pouze kladnou část. Z tohoto důvodu je využita možnost vybraného integrovaného obvodu připojit referenční napětí, které posune hodnotu výstupního napětí v klidovém stavu (když je měřen proud o nulové hodnotě) o hodnotu referenčního napětí výše. Aby bylo možné měřit proud -10 A, je použito referenční napětí 2,048 V. Rozkmit výstupního napětí pro střídavý proud je tedy $\pm 2,048$ V, což odpovídá rozsahu ± 10 A.

Frekvenční rozsah použitého obvodu je 50 kHz. Proto je také v zapojení navržen filtr typu dolní propust, který odfiltruje signál o vyšších frekvencích. Byla zvolena hodnota

rezistoru $R = 1 \text{ k}\Omega$ a poté dopočtena a zvolena hodnota kondenzátoru $C = 3,3 \text{ nF}$ dle vztahu pro mezní frekvenci (2).

$$f_m = \frac{1}{2 \times \pi \times R \times C} \rightarrow C = \frac{1}{2 \times \pi \times f_m \times R} = \frac{1}{2 \times \pi \times 50000 \times 1000} = 3,18 \text{ nF} \quad (2)$$

Výstupní napětí úměrné měřenému proudu je přivedeno do AD převodníku.



Obrázek 11: Schéma zapojení analogového proudového vstupu s integrovaným obvodem INA250A1

2.7 Simulace teplotních senzorů

Teplotní senzory existují v mnoha provedeních, principech a variantách. Ve firmě, kde bude tato deska sloužit při testování, jsou používány tři druhy teplotních senzorů: NTC10K, PT100 a PT1000. Proto v tomto návrhu bude počítáno s těmito třemi odporovými čidly.

Simulovat elektronicky elektrický odpor, aby se choval stejně jako čidlo, není zcela běžné. Při návrhu se rozhodovalo mezi dvěma řešeními:

- 1) použít součástku digipot
- 2) navrhnout přepínatelnou síť rezistorů

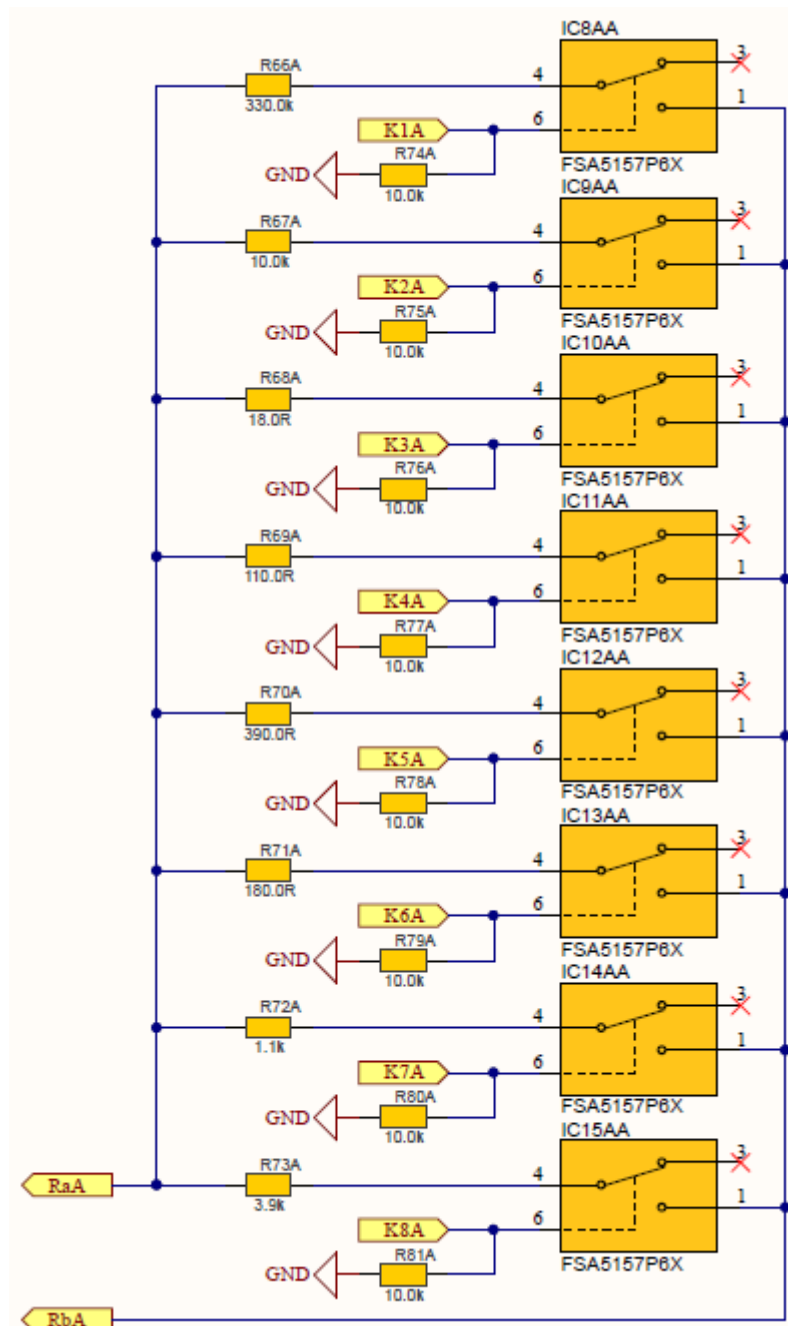
V této aplikaci není cílem napodobit chování senzorů v celém jejich rozsahu (nastavovat co nejvíce hodnot), ale pouze mít možnost simulovat stav běžné pokojové teploty (25 °C), stav nízké teploty (mrazu) a stav vysoké teploty. Z důvodu zachování vlastností skutečného rezistoru byla upřednostněna varianta přepínatelné sítě rezistorů. Ta bude realizována skupinou 8 analogových přepínačů typu SPDT, z nichž každý bude spínat vhodný rezistor reprezentující určitý stav senzoru.

Z dokumentace jednotlivých senzorů byly odečteny hodnoty jejich odporu při zmíněných teplotách a vybrány hodnoty odpovídajících rezistorů z řady E24. Všechny hodnoty jsou shrnuty v *Tabulce 5*:

Tabulka 5: Významné hodnoty odporu používaných teplotních senzorů

| Typ senzoru | | spodní limit | jmenovitá teplota | horní limit |
|-------------|-------------------------------|--------------|-------------------|-------------|
| PT100 | teplota [°C] | -200 | 25 | 850 |
| | rezistivita [Ω] | 18,52 | 109,735 | 390,481 |
| | zvolený rezistor [Ω] | 18 | 110 | 390 |
| PT1000 | teplota [°C] | -200 | 25 | 850 |
| | rezistivita [Ω] | 185,2 | 1097,35 | 3904,81 |
| | zvolený rezistor [Ω] | 180 | 1,1 k | 3,9 k |
| NTC10K | teplota [°C] | -40 | 25 | 150 |
| | rezistivita [Ω] | 332 094 | 10 000 | 182,6 |
| | zvolený rezistor [Ω] | 330 k | 10 k | 180 |

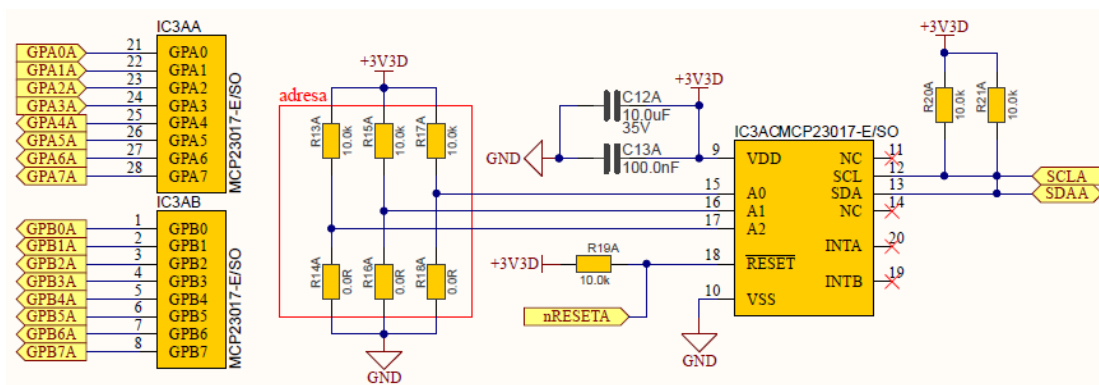
V zapojení (viz *Obrázek 12*) je řazeno 8 rezistorů paralelně, z nichž každý může být sepnut zvlášť vlastním analogovým spínačem. Z důvodu téměř shodné hodnoty odporu senzoru PT1000 při teplotě $-200\text{ }^{\circ}\text{C}$ a NTC10K při $150\text{ }^{\circ}\text{C}$, byly tyto hodnoty sloučeny a pro obě použit rezistor $180\ \Omega$. To navíc velice zjednodušilo návrh, protože celá rezistorová síť pro jeden výstup nyní může být řízena jedním portem IO expandéru, který je 8bitový.



Obrázek 12: Schéma zapojení přepínatelné rezistorové sítě pro simulaci teplotních senzorů

2.8 IO expandér

Z důvodu nedostatečného počtu GPIO pinů Raspberry Pi byly využity dva IO expandéry, konkrétně typ MCP23017-E/SO. Tento expandér je řízený z Raspberry Pi přes I²C komunikační sběrnici a má dva 8bitové porty (GPA a GPB). Protože jsou na desce celkem dva tyto expandéry, musela být pro správnou funkci nastavena každému jedinečná adresa. K tomu jsou na integrovaném obvodu expandéru připraveny tři piny, které se připojí pull-up nebo pull-down rezistorem. Různou kombinací připojení vznikne jiná adresa dle tabulky v datasheetu [14]. Jeden expandér slouží k řízení dvou přepínatelných rezistorových sítí pro simulaci teplotních senzorů a druhý pro obsluhu digitálních vstupů, digitálních výstupů a relé. Schéma zapojení je uvedeno na *Obrázku 13*.

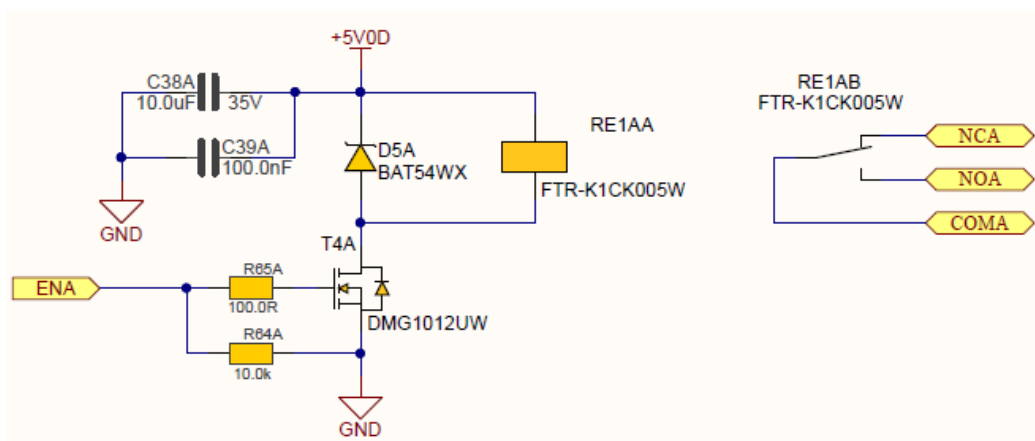


Obrázek 13: Schéma zapojení IO expandéru MCP23017-E/SO

2.9 Relé s přepínacími kontakty

Při testování některých zařízení, např. řídicí jednotky kotle, bude nutné umět spínat síťové napětí 230 V. Relé se také budou využívat k přepínání napájecích zdrojů, např. při měření spotřeby elektronických zařízení s různým typem napájení.

Požadavek na relé je schopnost spínání 230 V a max 10 A. Z důvodu dimenzování bylo zvoleno relé s kontakty, které jsou schopny spínat až 16 A. Řídicí signál z IO expandéru spíná MOSFET tranzistor, který má gate ošetřen pull-down rezistorem. Tento MOSFET již spíná samotné 5V relé. Jelikož při odpojení od napájení by mohlo vzniknout na cívce přepětí a poškodit další součástky, je v zapojení paralelně k relé umístěna dioda v závěrném směru, sloužící pro vybití energie akumulované v ovládací cívce relé. Schéma zapojení je uvedeno na *Obrázku 14*.



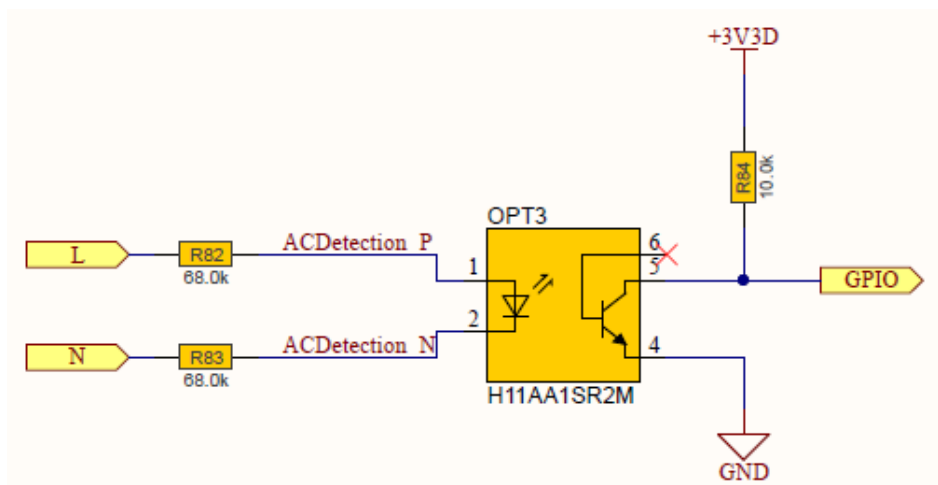
Obrázek 14: Schéma zapojení relé s přepínacími kontakty

2.10 Detekce síťového napětí

Testovaná elektronická zařízení často obsahují výstupy, kde je spínáno síťové napětí 230 V. Pro diagnostiku a vyhodnocení, zdali zařízení správně funguje a spíná v době, kdy je to požadováno, potřebujeme mít k dispozici vstup, který takové napětí spolehlivě detekuje a upraví do digitálně vyhodnotitelné podoby.

Průmyslově nejpoužívanější řešení je tzv. detekce průchodu nulou. Zapojení, viz *Obrázek 15*, využívá optočlen, který má na vstupu zapojené paralelně a inverzně dvě infračervené diody. To znamená, že optočlen lze sepnout kladnou i zápornou polaritou napětí. Pokud bude okamžitá hodnota síťového napětí procházet nulou, optočlen se zavře a Raspberry Pi toto vyhodnotí jako logickou úroveň „1“. Při kladné i záporné hodnotě napětí (o určité minimální absolutní hodnotě) bude výstupní tranzistor optočlenu sepnutý a Raspberry Pi signál vyhodnotí jako logickou úroveň „0“. V zapojení je využit optočlen, který je svými vlastnostmi přizpůsoben právě aplikacím jako je detekce přítomnosti napětí, a to AC i DC.

Na vstupu jsou, obdobně jako v případě digitálních vstupů, předradné rezistory. Pro dostatečnou izolační vzdálenost a elektrickou pevnost se využívají rezistory v pouzdře MELF.

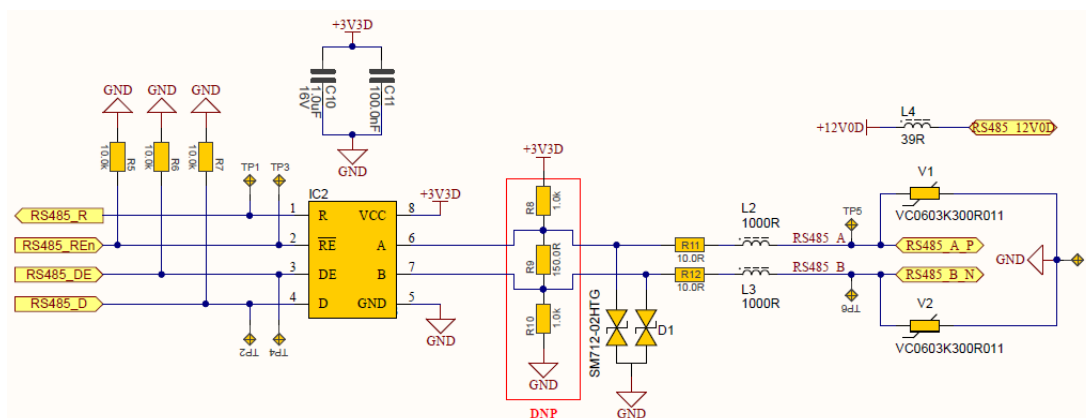


Obrázek 15: Schéma zapojení pro detekci síťového napětí

2.11 Rozhraní RS-485

RS-485 je rozšířený průmyslový standard (ANSI/TIA/EIA-485) pro komunikaci mezi různými zařízeními. Firma ji velice často do svých vyvíjených zařízení implementuje. Z důvodu možnosti komunikace s diagnostikovanými zařízeními je důležité realizovat toto rozhraní i na navrhovaném Testing boardu. Na lince RS-485 může komunikovat až 32 zařízení. RS-485 představuje sériovou poloduplexní komunikaci a využívá dva datové vodiče, ozn. např. A a B. Pokud je na vodiči A záporné napětí (obvykle -2 V) a na vodiči B kladné napětí (obvykle +2 V), je vyslán stav logické „1“. Při opačné polaritě na vodičích je vyslán stav logické „0“. K propojení se nejčastěji využívá kroucený pár, který umožňuje komunikaci na větší vzdálenosti. Při komunikaci na vzdálenost desítek až stovek metrů se vedení zakončuje zakončovacími odpory, nazývanými terminátory. Jejich účelem je zabránit odrazům signálu od konců vedení a zvýšit odolnost linky proti rušení. Hodnota terminátoru bývá volena 110 až 150 Ω .

Na Testing boardu je pro komunikaci na rozhraní RS-485 využit převodník úrovní typu SN65HVD78 od výrobce Texas Instruments [10]. Schéma zapojení včetně přepět'ových ochran je uvedeno na *Obrázku 16*.

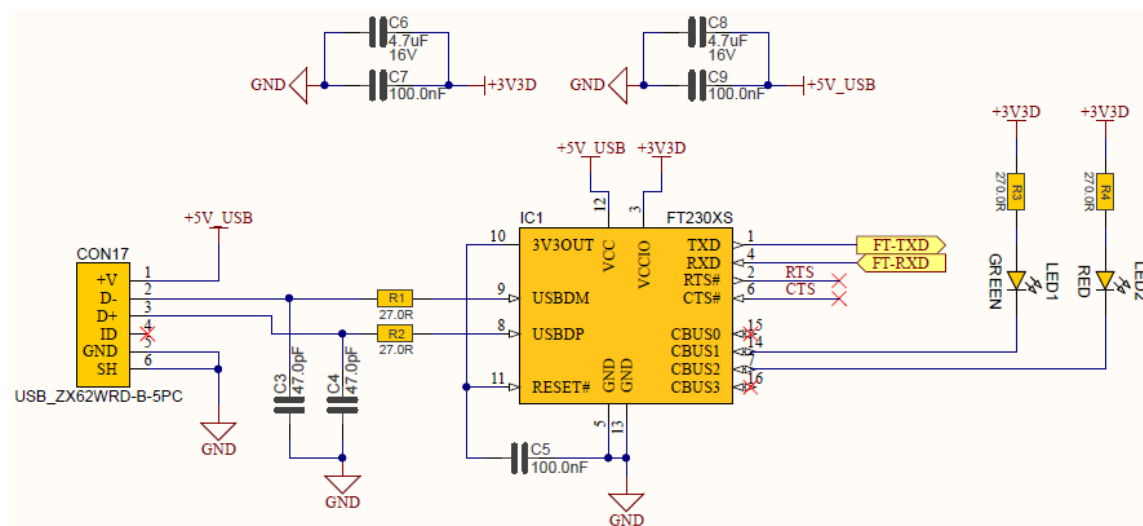


Obrázek 16: Schéma zapojení převodníku RS-485 s integrovaným obvodem SN65HVD78

2.12 Převodník USB na UART

Zde se jedná o servisní rozhraní, které nebude využito v provozu, ale poslouží pro přístup do konzole, update OS atd. Pro připojení a komunikaci s PC chceme využít běžný USB port. Samotné Raspberry Pi sice má 4 USB porty, ale RPi je v pozici master, proto není možné využít ho pro komunikaci s PC, které je rovněž jako master.

Aby mohlo být Raspberry Pi připojeno k PC, bude využita sériová UART sběrnice. Tato sběrnice má dva vodiče, označené TX a RX. Jeden vodič data vysílá a druhý přijímá. Na tuto sběrnici je připojen převodník UART na USB, typ FT230XS. K převodníku je připojen konektor typu USB micro. Z něho je již možné vést propojovací kabel k PC. Schéma zapojení na *Obrázku 17* je stejné jako zapojení doporučené v datasheetu [19].



Obrázek 17: Schéma zapojení převodníku USB na UART – FT230XS

2.13 Napájecí zdroj

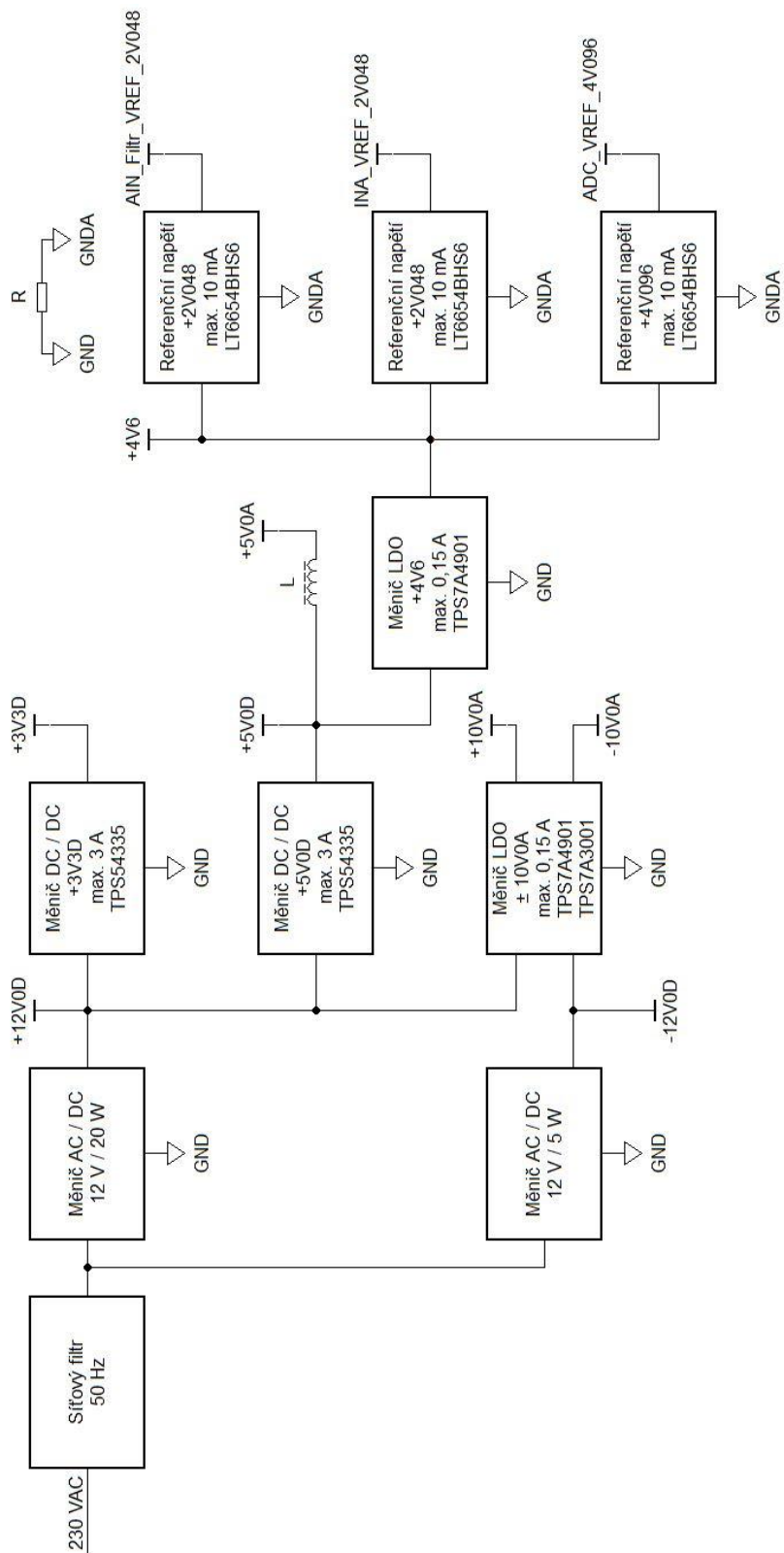
Při návrhu napájení existovalo mnoho variant. Hlavní otázka byla, jestli využít externí zdroj a připojit již DC napětí, nebo mít součásti DPS i zdroj síťový. I přes značné prostorové nároky na síťový zdroj bylo rozhodnuto, že bude na desku připojeno 230 V AC a všechny potřebné napájecí měniče budou součástí zařízení (viz *Obrázek 18*, str. 37). Protože je v návrhu i symetrické napájení, je potřeba použít také symetrický napájecí zdroj.

Pro dostatečné dimenzování napájecích zdrojů byla v *Tabulce 6* provedena sumace maximální možné spotřeby jednotlivých obvodů, která je uvedena v datasheetu každé součástky.

Tabulka 6: Potřebný příkon jednotlivých obvodů Testing boardu

| Obvod | Maximální spotřeba dle datasheetu | Napájecí napětí | Příkon |
|----------------------------------|-----------------------------------|-----------------|---------------|
| Digitální vstupy (4x) | 1,5 mA | 3,3 V | 4,95 mW |
| Digitální výstupy (9x) | 100 mA | 3,3 V | 0,33 W |
| PWM výstupy (2x) | 1 mA | 3,3 V | 3,3 mW |
| Relé s přepínacími kontakty (2x) | 160 mA | 5 V | 0,8 W |
| RS485 (1x) | 70 mA | 3,3 V | 0,23 W |
| Detekce AC (1x) | 0,5 mA | 3,3 V | 1,65 mW |
| Vstupní filtry (4x) | 25 mA | +10 V | 0,25 W |
| | 25 mA | -10 V | 0,25 W |
| Měření proudu (2x) | 30 mA | 5 V | 0,15 W |
| AD převodník (1x) | 12 mA | 3,3 V | 40 mW |
| Převodník USB / UART (1x) | 8 mA | 3,3 V | 26 mW |
| IO expander (2x) | 300 mA | 3,3 V | 1 W |
| Rezistorová síť | 1 mA | 3,3 V | 3,3 mW |
| Raspberry Pi 4 Model B | 3000 mA | 5 V | 15 W |
| Celkový potřebný příkon | | | 18,1 W |

Zdroj záporného napětí bude napájet jen malou část odvodů, které potřebují maximálně 0,25 W, proto bude na každou větev použit jinak výkonný zdroj.



Obrázek 18: Blokové znázornění zapojení napájecí kaskády

Dále je nutné určit, jaké úrovně napětí je potřeba mít na výstupu zdrojů. Z Tabulky 6 je patrné, že se pracuje s napěťovými úrovněmi 3,3 V; 5 V; ± 10 V. Pro napájení budou použity dva zdroje 12 V, které se zapojí sériově a jejichž střed bude 0 V (GND).

2.13.1 Síťový filtr

Za vstupní svorkou fáze sítě je zapojena tavná pojistka, chránící celé zařízení v případě zkratu. Následuje přepětová ochrana v podobě varistoru, který je dimenzován na 250 VAC. Za varistorem následuje odrušovací filtr (viz Obrázek 19, str. 39).

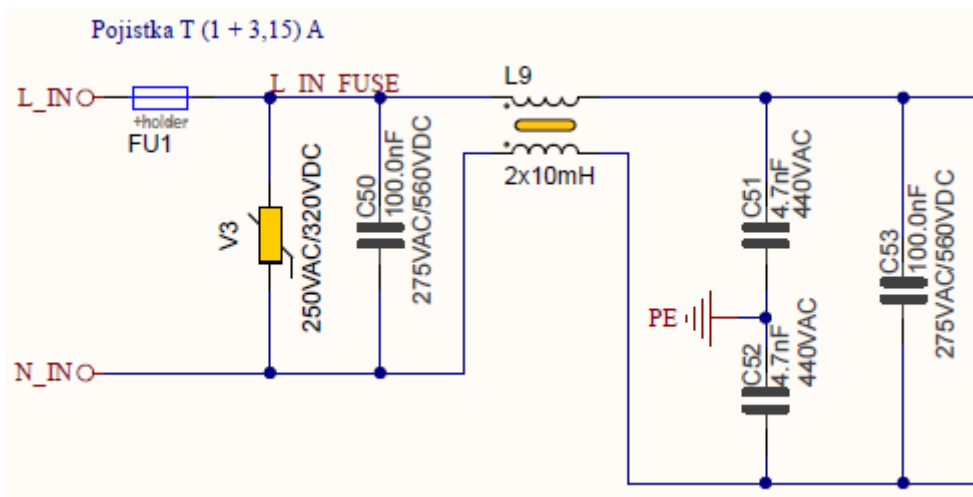
V současnosti je většina elektronických zařízení napájena spínanými napájecími zdroji, které při své činnosti generují napětí a proudy se strmými hranami. Spektrum těchto signálů pokrývá rozsah 0,15 až 30 MHz, kde způsobuje rušení šířící se po vedení a pásmo 30 až 1000 MHz, které ruší vyzařováním. Z tohoto důvodu zařízení musí splňovat normy pro EMC ČSN EN 50081-1 A 50081-2.

Rozdílový mód rušení – pro nízké frekvence, řádově do stovek kHz, se rušení šíří stejným způsobem jako napájení. Proud tedy teče ve smyčce tvořené vodiči L a N.

Souhlasný mód rušení – pro vyšší kmitočty nad 1 MHz vytvářejí parazitní kapacity ve zdroji rušení a v rušeném zařízení rušivý souhlasný proud, který teče směrem k rušenému zařízení po obou napájecích vodičích a vrací se do zdroje rušení přes zem.

Kondenzátor připojený mezi L – N slouží pro zkratování rušení v rozdílovém módu a kondenzátory připojené mezi L – PE a N – PE slouží pro zkratování rušení v souhlasném módu.

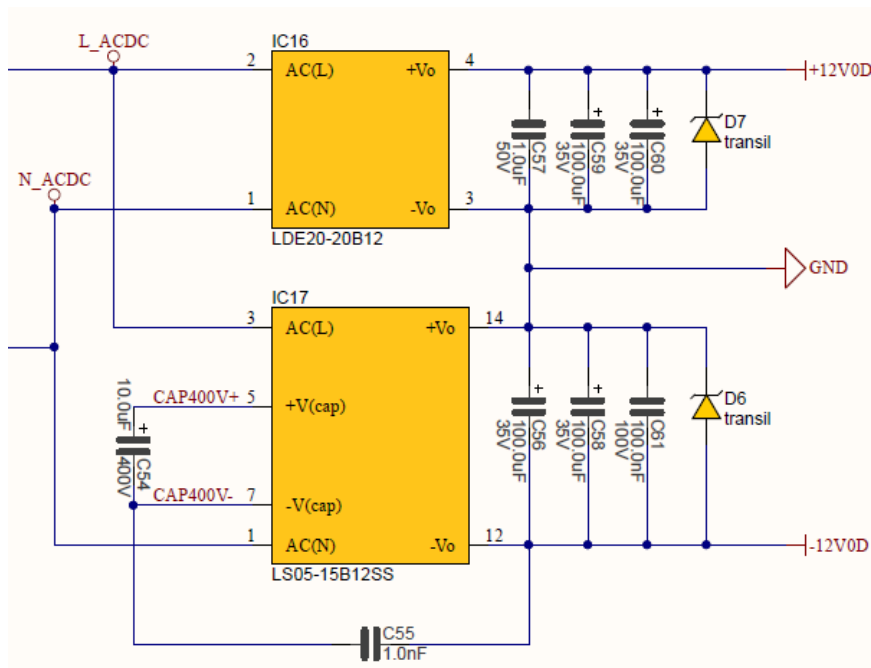
Proudově kompenzovaná tlumivka se dvěma vinutími na společném jádru slouží pro potlačení rušivého proudu v souhlasném módu, který teče oběma vinutími stejným směrem (viz zdroj [6], [7]).



Obrázek 19: Schéma zapojení použitého síťového filtru

2.13.2 Měníč AC/DC

Pro zápornou větev byl zvolen 5W zdroj s účinností 76 %, pro kladnou větev zdroj s výkonem 20 W a účinností 86 %. Oba jsou spínané zdroje určené pro zapájení přímo do desky plošného spoje. Zapojení měničů (viz *Obrázek 20*) bylo doplněno o výstupní kondenzátory a přepět'ové ochrany, jak doporučuje datasheet [16], [17].



Obrázek 20: Schéma zapojení měničů AC/DC pro kladné a záporné napětí 12 V

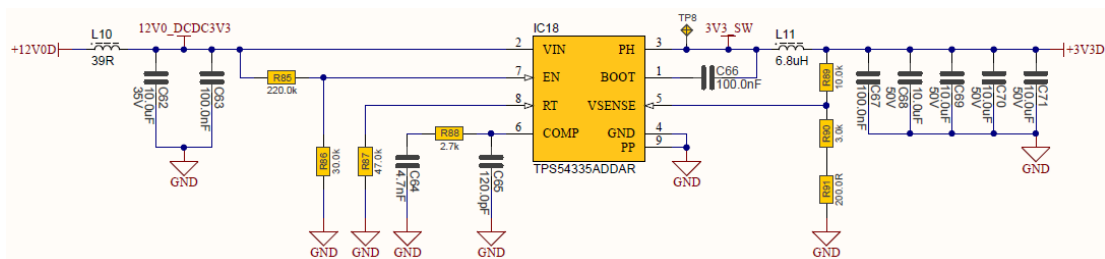
2.13.3 Měníč DC/DC

Pulzní měniče jsou využity pro snížení napětí z 12 V na 5 V a 3,3 V. Integrovaný obvod byl zvolen od firmy Texas Instruments, typ TPS54335 s výstupním proudem až 3 A. Zapojení uvedené na *Obrázku 21* je převzaté z katalogového doporučení [11]. Jedná se o klasické zapojení step-down měniče, kdy je IO doplněn na vstupu o odrušovací feritovou perlu, vstupní kondenzátory a napěťový dělič zavedený na pin Enable pro aktivaci měniče. Dále je v zapojení cívka jako prvek pro zachování nepřerušovaného proudu, výstupní filtrační kondenzátory a zpětnovazební odporový dělič napětí. Pro dosažení požadovaného napětí na výstupu bylo nutné určit hodnotu rezistorů ve zpětné vazbě, přičemž hodnota jednoho rezistoru musí být zvolena v řádu jednotek až desítek k Ω . Hodnota druhého rezistoru pro oba měniče je poté vypočtena dle vztahů (3) a (4).

$$\text{Zdroj 3,3 V: } R_2 = \frac{V_{REF}}{V_{OUT}-V_{REF}} \times R_1 = \frac{0,8}{3,3-0,8} \times 10000 = 3200 \Omega \quad (3)$$

$$\text{Zdroj 5 V: } R_2 = \frac{V_{REF}}{V_{OUT}-V_{REF}} \times R_1 = \frac{0,8}{5-0,8} \times 10510 = 2000 \Omega \quad (4)$$

Hodnota V_{REF} je uvedena v datasheetu [11] a má hodnotu 0,8 V. V_{OUT} je požadované výstupní napětí.



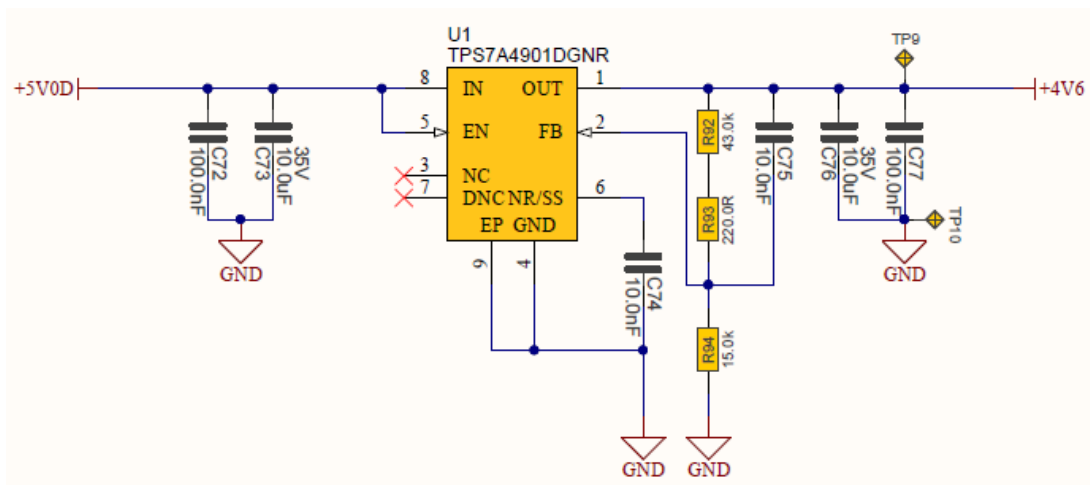
Obrázek 21: Schéma zapojení DC/DC měniče z 12 V na 3,3 V

2.13.4 LDO regulátor

O napájení analogové části obvodů se starají lineární regulátory napětí. Pro napájení obvodů IN250 a analogové části AD převodníku je potřeba napětí 5 V, pro napájení vstupních obvodů a filtrů analogových vstupů ± 10 V a 4,6 V pro napájení obvodů referenčního napětí. Při návrhu bylo převzato doporučené zapojení (uvedené na *Obrázku 22*) a dopočteny správné hodnoty zpětnovazebních rezistorů dle vztahu (5) uvedeného v datasheetu [12].

$$\text{Zdroj 4,6 V: } R_1 = R_2 \times \left(\frac{V_{OUT}}{V_{FB(nom)}} - 1 \right) = 15000 \times \left(\frac{4,6}{1,185} - 1 \right) = 43228 \Omega \quad (5)$$

Hodnota V_{OUT} představuje požadované výstupní napětí a $V_{FB(nom)}$ je hodnota udaná v datasheetu [12] a její hodnota je 1,185 V. Rezistor R_2 musí být zvolen, a to dle doporučení $\frac{V_{FB(nom)}}{R_2} > 5 \mu\text{A}$.



Obrázek 22: Schéma zapojení LDO regulátoru napětí z 5 V na 4,6 V

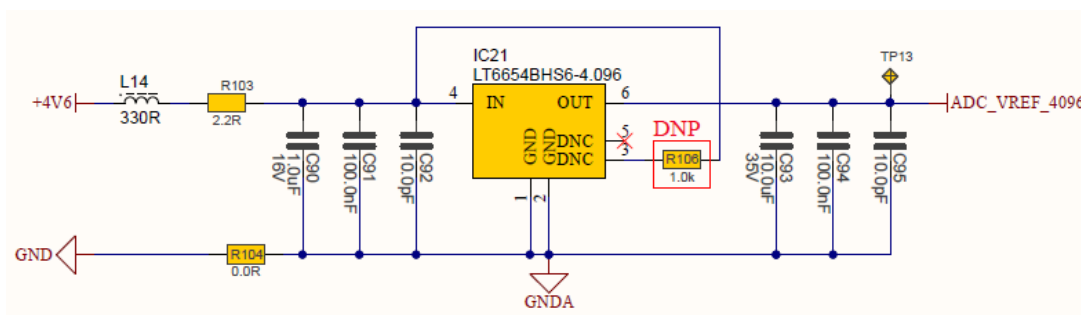
2.13.5 Referenční napětí

Referenční napětí je vytvořená napěťová hladina, která může sloužit např. k porovnávání s jiným napětím za účelem zjištění, jestli je měřená hodnota vyšší nebo nižší (komparátor, jednobitový ADC). Dále se referenční napětí využívá v AD a DA převodnících pro nastavení hodnoty napětí plného rozsahu. Požadavkem na referenční napětí je co největší přesnost a stabilita v závislosti na čase a teplotě, co nejmenší (ideálně nulový) pokles napětí se zatížením.

Na Testing boardu je nutné přivést referenční napětí do AD převodníku (hodnota 4,096 V) a také do vstupních filtrů z důvodu posunu měřeného střídavého napětí o polovinu rozsahu ADC, tedy 2,048 V. Dále je potřeba referenční napětí pro senzor proudu INA250 (2,048 V), aby bylo možno měřit proud kladné i záporné polarity.

Integrovaný obvod jako zdroj referenčního napětí je využit typ LT6654 od firmy Analog Devices. Jedná se o napěťovou referenci s vysokou přesností ($\pm 0,1\%$), nízkým šumem (1,6 ppm_{p-p} při 0,1 – 10 Hz), nízkým driftem (20 ppm/°C), nízkým úbytkem napětí (maximálně 100 mV) a s nízkou vlastní spotřebou (350 μ A), viz datasheet [22].

Do zapojení je implementována feritová perla kvůli EMC rušení, dále filtrační a blokovací kondenzátory na vstup i na výstup. Celé schéma zapojení je uvedeno na *Obrázku 23*.

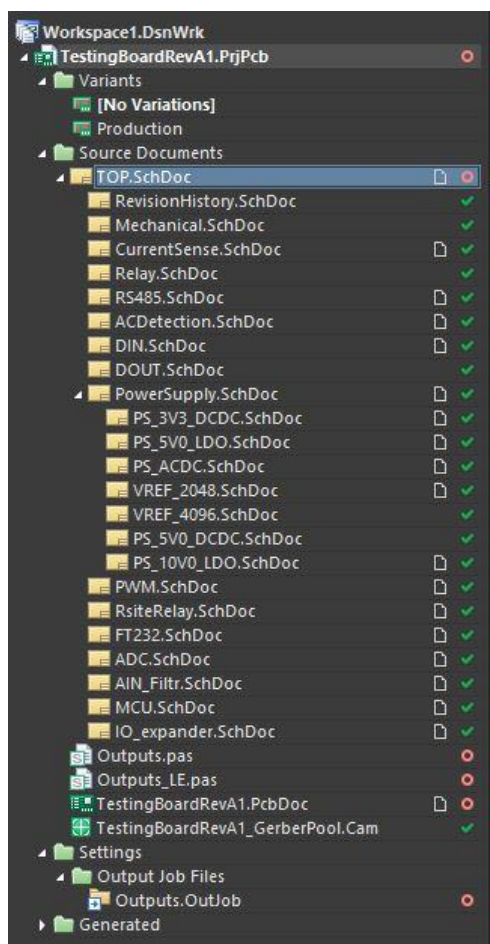


Obrázek 23: Schéma zapojení obvodu referenčního napětí LT6654BHS6

3 Praktická realizace

Projekt Testing board byl vytvořen v softwaru Altium Designer od australské společnosti Altium Ltd. Jedná se o profesionální softwarový balík pro kompletní návrh desek plošných spojů a elektroniky.

Jednotlivé návrhy jsou v AD děleny na projekty, které se dále dají různě seskupovat. Jak lze vidět na *Obrázku 24*, projekt TestingBoardRevA1.PrjPcb obsahuje mnoho souborů, které byly vytvořeny během vývoje Testing boardu. Je vytvořeno celkem 24 listů schéma zapojení, jeden soubor s deskou plošného spoje, jedna varianta osazení, ve které nejsou osazeny některé specifické součástky (např. součástky určující adresy IO), a technologické výstupy.



Obrázek 24: Pohled na hierarchicky řazené soubory v projektu Testing board revA1

3.1 Návrh schémat zapojení

Jako první krok po spuštění prostředí AD se založí nový projekt. Po založení a pojmenování projektu následuje vytvoření jednotlivých listů schématu, které se následně přiřadí k vytvořenému projektu.

Pro přehlednost celého zapojení je schéma rozděleno na jednotlivé listy, z nichž každý obsahuje zapojení vždy jedné funkce, např. Relay, DIN atd.

Altium Designer umožňuje tzv. hierarchický návrh schémat. Po nakreslení všech dílčích obvodů byl vytvořen jeden list s názvem TOP, do jehož pracovní plochy se naimportovala všechna nakreslená podřazená schémata v podobě bloků. Tyto bloky obsahují pouze vstupní a výstupní porty nadefinované ve schématu, které slouží k propojení s ostatními bloky. Každý blok se může vložit vícekrát. Díky tomu se nemusí schéma, např. digitálních vstupů, kreslit 9x, ale pouze jednou a poté je 9x importováno na list TOP.

3.2 Návrh DPS

Když je hotové schéma zapojení, následuje založení souboru plošného spoje, do kterého jsou importována data ze všech souborů v projektu. To znamená footprinty součástek, konstrukční otvory, popisky atd. Jako první je nutné nastavit pravidla návrhu, která jsou uvedena v kapitole 3.2.1.

Součástky jsou rozděleny do skupin, které se automaticky vytvoří podle bloků definovaných ve schématech. Slouží, stejně jako schematické bloky, k zjednodušení a přehlednosti návrhu. Je-li vytvořeno více stejných bloků, a tím i stejný počet skupin součástek, při rozmisťování stačí, aby návrhář rozmístil jednu skupinu součástek. Její rozmístění je pak možné nakopírovat na ostatní stejné skupiny.

Pro analogové obvody je oddělena analogová zem, aby nedošlo k nežádoucímu ovlivnění uzavíráním proudů digitálních obvodů přes analogové části. Tato analogová zem je spojena se zemí digitálních obvodů pouze v jednom bodě.

Návrh uspořádání elektronických součástek je u některých IO uveden v datasheetu jako doporučený layout, aby bylo dosaženo co nejlepších parametrů a minimálního vlivu na okolní obvody. Například u DC/DC měničů, LDO regulátorů a referenčních obvodů. Obecně je důležité dodržovat umístění blokovacích kondenzátorů co nejbližší integrovaným obvodům, umístění vyhlazovacích kondenzátorů spínaných zdrojů co nejbližší k jejich výstupu, umístění přepět'ových ochran co nejbližší ke konektorům atd.

Když je návrh rozmístění součástek jednotlivých funkčních bloků hotový, následuje propojení všech cest. Pro Testing board byla zvolena čtyřvrstvá deska plošných spojů. Horní a spodní vrstva slouží především k vedení signálových cest. Jedna vnitřní vrstva je využita pouze pro rozlití polygonu na potenciálu GND a GNDA. Druhá vnitřní vrstva je využita pro rozvod napájecích větví. Polygon rozvádí napájení 3,3V větve a vhodně dimenzovanými cestami (příp. tzv. regiony) je vedeno ostatní napájení, tedy 5 V, ± 10 V, ± 12 V a referenční napětí. Bylo dbáno na umístění dostatečného množství prokovených otvorů (tzv. vias).

3.2.1 Pravidla návrhu DPS

Aby elektronická zařízení fungovala správně, spolehlivě a dle požadavků zákazníka, je nutné dodržet velké množství zásad, jak navrhovat plošný spoj. Při návrhu desky byl brán ohled na níže uvedený výčet pravidel.

- Návrhové kritérium požaduje co nejmenší sumární délku spojů, minimální křížení spojů a rovnoměrné rozmístění spojů.
- Dále se nemají umísťovat blízko sebe součástky a spoje, které se negativně ovlivňují, a to např. spínaný zdroj vedle AD převodníku, elektrolytický kondenzátor vedle chladiče vyzařujícího teplo atd.
- Z pohledu konstrukčního kritéria je nutné správné rozmístění prvků, které budou dále určitým způsobem využité, přístupné, viditelné či ovladatelné. Proto jsou konektory umísťovány na okraj desky, velké součástky na místo, kde nebudou překážet konstrukčním prvkům atp.

- Dalším důležitým aspektem při návrhu je technologické kritérium. To říká, že deska plošného spoje musí být navržena tak, aby byla vyrobitelná (rozměry, konstrukční třída), osaditelná (vliv tvaru a vzájemné vzdálenosti součástek) a spolehlivě pájitelná. Pokud by například součástka v pouzdře 0402 byla z jedné strany připojena cestou 0,2 mm a z druhé strany cestou 0,8 mm, mohlo by během pájení dojít k jejímu postavení na jednu stranu vlivem nerovnoměrného odvodu tepla (tzv. tombstoning).

Software Altium Designer, jako většina návrhových programů, umožňuje nastavení velkého množství pravidel. Díky nastaveným pravidlům hlídá návrháře při návrhu DPS a případně upozorňuje, pokud dojde k porušení nastaveného pravidla.

Mezi základní pravidla patří dodržení izolačních mezer (stanovuje norma ČSN EN 61010-1), dimenzování šířky spojů na velikost protékaného proudu, minimální vzájemná vzdálenost součástek, překrývání popisků atd. Pravidla jednotlivých kategorií (jako např. izolační vzdálenosti nebo tloušťky spojů) se navíc řadí podle priorit od nejjobecnějších až po konkrétní, méně častá a důležitější (např. pravidlo pro všechny izolační vzdálenosti je, že nemohou mít šířku menší než 0,2 mm, ale vyšší prioritu má pravidlo pro síťové napětí, kde musí být izolační mezera min. 5 mm). Důležitá nastavená pravidla jsou uvedena v *Tabulce 7* na straně 47.

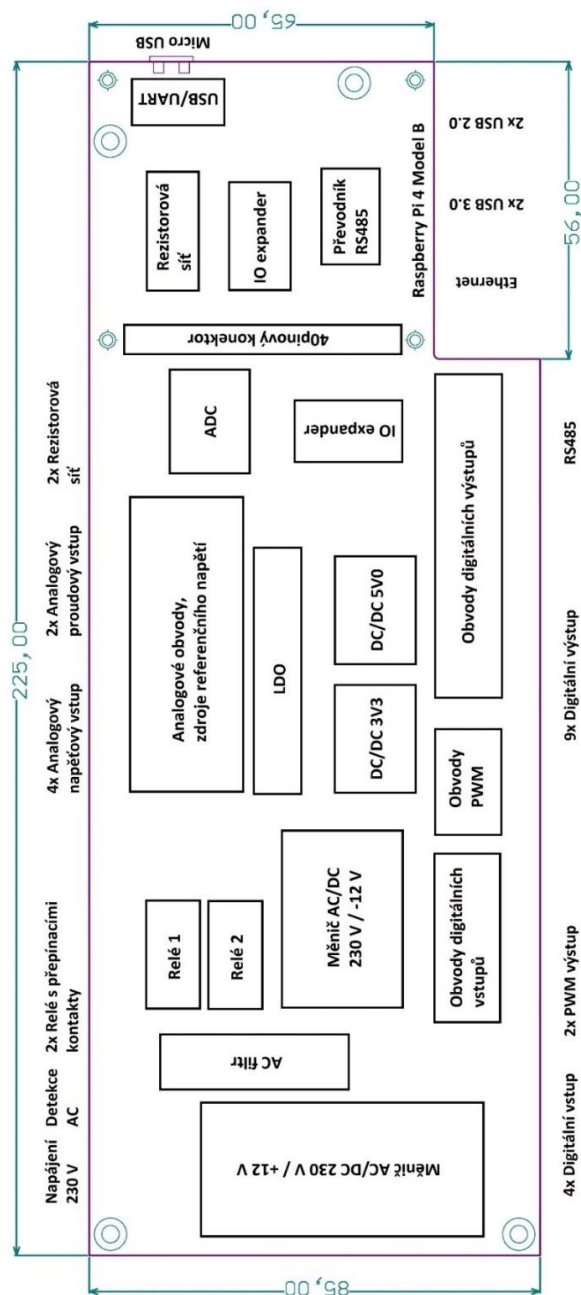
Další nastavení je možné v oblasti manažeru polygonů. Zde se nastavují priority překrývání, způsob připojení pájecích plošek, odstranění tzv. mrtvé mědi a mnoho dalšího.

Tabulka 7: Základní nastavená pravidla při návrhu desky plošných spojů Testing boardu

| <u>Izolační vzdálenosti</u> | | |
|---|-----------------|---|
| Objekt 1 | Objekt 2 | Minimální velikost izolační mezery |
| GND | GNDG | 0,254 mm |
| otvory | ostatní | 1,5 mm |
| vstupní cesty | vše | 0,3 mm |
| L, N, PE | L, N, PE | 3 mm |
| L, N, PE, vývody relé | vše | 5 mm |
| vše | okraj desky | 1 mm |
| via | pájecí ploška | 0,2 mm |
| vše | vše | 0,2 mm |
| <u>Minimální šířka spojů</u> | | |
| ke kontaktům relé | | 3,5 mm |
| napájení | | 0,8 mm |
| vstupní cesty | | 0,3 mm |
| vše | | 0,2 mm |
| <u>Technologická pravidla</u> | | |
| Min. průměr otvorů | | 0,3 mm |
| Min. vzdálenost konektorů od okraje DPS | | 0 mm |
| Min. vzájemná vzdálenost součástek | | 0,5 mm |
| Min. vzdálenost objektů od okraje DPS | | 1 mm |
| Označení nezakončeného spoje min. délky | | 0 mm |

3.3 Konstrukční provedení

Jednotlivé obvody byly rozmístěny s ohledem na oddělení části, kde se vyskytuje síťové napětí 230 V, od částí bezpečného napětí. Dále jsou odděleny analogové obvody od digitálních. Rozmístění jednotlivých obvodů a konektorů je znázorněno na následujícím Obrázku 25.



Obrázek 25: Základní rozměry Testing boardu, rozmístění funkčních bloků

Řídící počítač se s periferiemi propojuje pomocí 2řadého 40pinového konektoru, tzv. pinheaderu, typu samec. Na desce plošného spoje je umístěn 40pinový konektor typu samice – protikus ke konektoru na Raspberry Pi. Dále jsou zde kromě upevňovacích otvorů pro šrouby M3 také konstrukční otvory pro umístění čtyř distančních sloupků o délce 11 mm a rozměru vnějšího i vnitřního závitu M2,5. Rozložení a vzájemná pozice konektoru a konstrukčních otvorů jsou zrcadlově shodné s rozložením na Raspberry Pi. Díky tomu je možné řídicí počítač jednoduše vložit do konektoru na DPS a upevnit k distančním sloupkům pomocí čtyř šroubů velikosti M2,5 x 6 mm. Z důvodu příliš vysokých konektorů USB a Ethernet byl v DPS vyfrézován otvor, do něhož jsou zmíněné konektory zapuštěny.

Původní myšlenka byla využít pro zakrytování testing boardu průmyslovou krabicí s možností uchycení na DIN lištu. Postupem vývoje a návrhu DPS bylo zjištěno, že veškeré krabice dostupné na trhu nebudou vyhovovat svými rozměry. Především kvůli velikosti připojeného Raspberry Pi. Z toho důvodu bylo od původního řešení ustoupeno a rozhodnuto o návrhu vlastního krytu, který bude vytisknut na 3D tiskárně.

Kryt (viz *Obrázek 26* na str. 50 nebo *Přílohu C*) je navržen ve volně dostupné studentské verzi programu Autodesk Fusion360. Skládá se ze dvou dílů. Spodní díl (S) slouží pro vložení Testing boardu a uchycení pomocí šroubů M3 (a). Současně jsou do dalších otvorů na tomto dílu (b) skrz DPS zašroubovány distanční sloupky, ke kterým je přišroubováno Raspberry Pi připojené k DPS. Dále jsou po obvodu rozmístěny tři otvory (c) pro spojení s horním dílem třemi šrouby M3 x 8 mm. Horní díl (H) slouží především jako kryt proti dotyku nebezpečného napětí a jako ochrana proti poškození součástek na DPS. Testing board obsahuje poměrně velké množství konektorů, proto bylo velmi důležité přesně umístit do krabičky prostupy pro všechny tyto konektory (d). Neméně důležitým prvkem krytu jsou také ventilační otvory (e) pro odvod tepla vyzářeného především z RPi a napájecích zdrojů.



Obrázek 26: Pohled na díly krytu s označenými pozicemi vyjmenovaných prvků

3.4 Výroba

Po dokončení tvorby schémat a desky plošného spoje byla podle zavedených firemních postupů provedena kontrola návrhu kompetentní osobou. Po implementování připomínek následovalo již generování technologických výstupů, tzv. gerber dat. Gerber data obsahují informace o jednotlivých vrstvách mědi, vrtání otvorů, frézování, pozicích zaměřovacích bodů, pájecí masce, pájecí pastě, potisku, rozmístění testpointů atd. Na základě zaslaných gerber dat byla první revize desky plošného spoje vyrobena firmou Gatema v počtu 2 kusů. Během realizace objednávky byly zadány parametry DPS, které jsou uvedeny v *Tabulce 8*.

Tabulka 8: Parametry zadané při objednávce výroby desky plošných spojů pro Testing board

| Specifikace DPS | | | |
|------------------------------|--------|---------------------------------|------------------------|
| Název DPS | | TestingBoardA1 | |
| Počet vrstev | | 4 | |
| Specifikace materiálu | | | |
| Typ | FR4 | Min. spoj/izolace vnější vrstvy | $\geq 150 \mu\text{m}$ |
| Materiál Tg | 150 °C | Tloušťka Cu vnější | 18 μm |
| Tloušťka | 1,5 mm | Tloušťka Cu vnitřní | 35 μm |
| Specifikace DAT | | | |
| Formát dodaných dat | | Jeden kus, panelizace NE | |
| Typ souboru | | Gerber Pool | |
| Rozměry | | | |
| X | | 225 mm | |
| Y | | 85 mm | |
| Povrchová úprava | | | |
| Povrchová úprava | | Bezolovnatý HASL | |
| Maska vrchní | Zelená | Potisk vrchní | Bílá |
| Maska spodní | Zelená | Potisk spodní | Bílá |
| Ostatní požadavky | | | |
| Prokovené frézování | | ANO | |

Na plošném spoji je umístěno celkem 484 komponentů, z toho velké množství součástek je v pouzdře 0402 o rozměrech 1 mm x 0,5 mm. Dále je na desce integrovaný obvod v pouzdře QFN-48 s kovovou pájecí ploškou pro odvod tepla. Z tohoto důvodu deska nemohla být osazena vlastní rukou, ale na speciálním pracovišti pro osazování prototypových kusů. Pro osazení bylo nutné zaslat technologické výstupy, jako je osazovací plán, seznam materiálu včetně produktových kódů a skladových kódů.

4 Zprovoznění a ověření vlastností

4.1 Elektrické oživení

Nově navržené zařízení, které ještě nikdy nebylo provozováno, je nutné nejprve důkladně otestovat. Testování slouží pro odhalení případné výrobní vady, nebo chyby při osazování, ale také pro zjištění chyb, ke kterým mohlo dojít během samotného návrhu.

Při manipulování s náchylnými elektronickými součástkami a deskami plošných spojů je nutné dbát zásad ochrany před elektrostatickými výboji používáním prostředků ESD (obaly, podložky, náramky).

Po obdržení osazených DPS nejprve proběhla vizuální kontrola okem, zdali není na desce viditelná vada. Dále byly Testing boardy zkoumány pod mikroskopem a zjišťována správná orientace osazených součástek a také případné viditelné zkraty mezi vývody IO. Následovalo zkoušení důležitých bodů (vstupní cesty napájení, výstupy zdrojů) testerem vodivosti taktéž proti zkratům. Během tohoto zkoušení nebyl odhalen žádný problém.

Dále byl pomocí dvou feritových perel odpojen síťový zdroj od dalších obvodů v kaskádě. Díky tomu bylo možné změřit zvlášť síťový zdroj a také separátně dva DC/DC měniče. Měřením bylo zjištěno, že na výstupu AC/DC měničů je přesně ± 12 V. K otestování DC/DC měničů byl využit laboratorní napájecí zdroj s nastaveným proudovým omezením na 30 mA. Výstupní napětí bylo nastaveno na 12 V a připojeno na vstup obou měničů. Miliampérmetrem byl měřen odběr jednotlivých měničů a v obou případech protékal proud necelých 10 mA. Takové hodnoty se shodovaly s předpokladem. Měřením výstupního napětí se ověřila správnost návrhu zpětnovazebních odporových děličů, protože výstupní napětí byla 3,3 V a 5 V s přesností na desetiny voltu. Dále byly změřeny hodnoty referenčních

napětí. Na prvním kusu se ukázalo, že je vše dle předpokladu. Na druhém byla naměřena hodnota reference pro obvody INA250 4,098 V místo 2,048 V, protože došlo k omylu během osazování. Proto musela být z osazovacího pracoviště objednána správná součástka a provedena výměna. Žádný další problém zjištěn nebyl, a proto se mohlo přistoupit k vrácení feritových perel a prvnímu spuštění přímo ze sítě.

Během návrhu i osazování může dojít k omylu, což potvrdil špatně osazený obvod referenčního napětí. Také došlo k odhalení chyby v samotném návrhu. Nedopatřením byla zvolena velikost pouzdra předřadného rezistoru u digitálních vstupů 0402 místo 2512. Z toho důvodu musí být na rezistoru výkonová ztráta max. 62,5 mW a je omezen rozsah vstupního napětí z 0 V až 24 V na 0 V až 7 V.

První spuštění tedy proběhne tak, aby při případném (ještě neodhaleném) problému vznikly co nejmenší škody. První spuštění desky je provedeno bez zapojeného Raspberry Pi. Po zapnutí napájení jsou pro jistotu znovu ověřena napětí zdrojů. Když zdroje fungují správně a odběr proudu je v očekávaných mezích, následuje připojení Raspberry Pi a softwarové testování všech funkcí.

4.2 Základní ovládací program

Pro ovládání GPIO pinů a komunikačních sběrnic na Raspberry Pi je velice vhodné prostředí jazyka Python. Protože jsou využity sběrnice I²C a SPI na jiných pinech, než jsou nastaveny defaultně, musel být upraven konfigurační soubor „config.txt“ připsáním těchto řádků:

1. „dtoverlay = i2c-gpio, bus = 3, i2c_gpio_delay_us = 1, i2c_gpio_sda = 22, i2c_gpio_scl = 23“ – pro nastavení sběrnice I²C na GPIO 22 a 23

2. „dtoverlay = spi1-lcs“ – pro aktivaci sběrnice SPI1 s řídicím pinem cs1.

Byl napsán skript, viz *Přílohu E*, kterým je možno otestovat jednotlivé funkce Testing boardu. Ovládací program se skládá ze tří hlavních částí.

První část obsahuje import knihoven, zadání nastavených adres IO expandérů, zavedení proměnných s adresami registrů pro čtení a ovládání IO pinů a spuštění komunikace na sběrnicích.

V druhé části jsou definovány funkce pro ovládání Testing boardu, např. funkce „Zapni_Rele_1()“, nebo funkce „Nacti_ACdetekci()“.

Třetí část tvoří while cyklus, který uživateli nabízí dostupné funkce a jejich textové zkratky pro vyvolání. Uživatel zadá z klávesnice jako vstup jednu z nabízených zkratk formou textu a potvrdí klávesou „Enter“. Tuto vstupní informaci skript vyhodnotí a provede příslušnou operaci, např. pošle do registru IO expandéru byte pro nastavení nového slova na portu A, aby bylo sepnuto relé. Při požadavku na zjištění stavu digitálních vstupů je jejich stav po přečtení a vyhodnocení vypsán na obrazovce.

Po spuštění skriptu v terminálovém okně je na obrazovku vypsána nabídka textových zkratk pro vyvolání jednotlivých funkcí, viz *Obrázek 27*.

```
-----  
Lukáš Calta, Testing board: Program pro základní ovládání  
Možnosti klávesových zkratk:  
"a" - zapni rele 1  
"b" - vypni rele 1  
"c" - zapni rele 2  
"d" - vypni rele 2  
"e" - vypis stav digitalnich vstupu  
"ac" - vypis stav AC detekce  
"[X]1" - zapni digitalni vystup X (0-9)  
"[X]0" - vypni digitalni vystup X (0-9)  
"pwm[X]" - nastaveni PWM vystupu X (1-2)  
"[X]ntclow/mid/high" - nizka/nominalni/vysoka teplota pro NTC10K kanalu X (1-2)  
"[X]pt100low/mid/high" - nizka/nominalni/vysoka teplota pro PT100 kanalu X (1-2)  
"[X]pt1000low/mid/high" - nizka/nominalni/vysoka teplota pro PT1000 kanalu X (1-2)  
jina klavesa = konec programu  
  
Co si přejete udělat: a
```

Obrázek 27: Screenshot výpisu terminálové aplikace pro základní otestování Testing boardu

4.3 Zprovoznění SPI

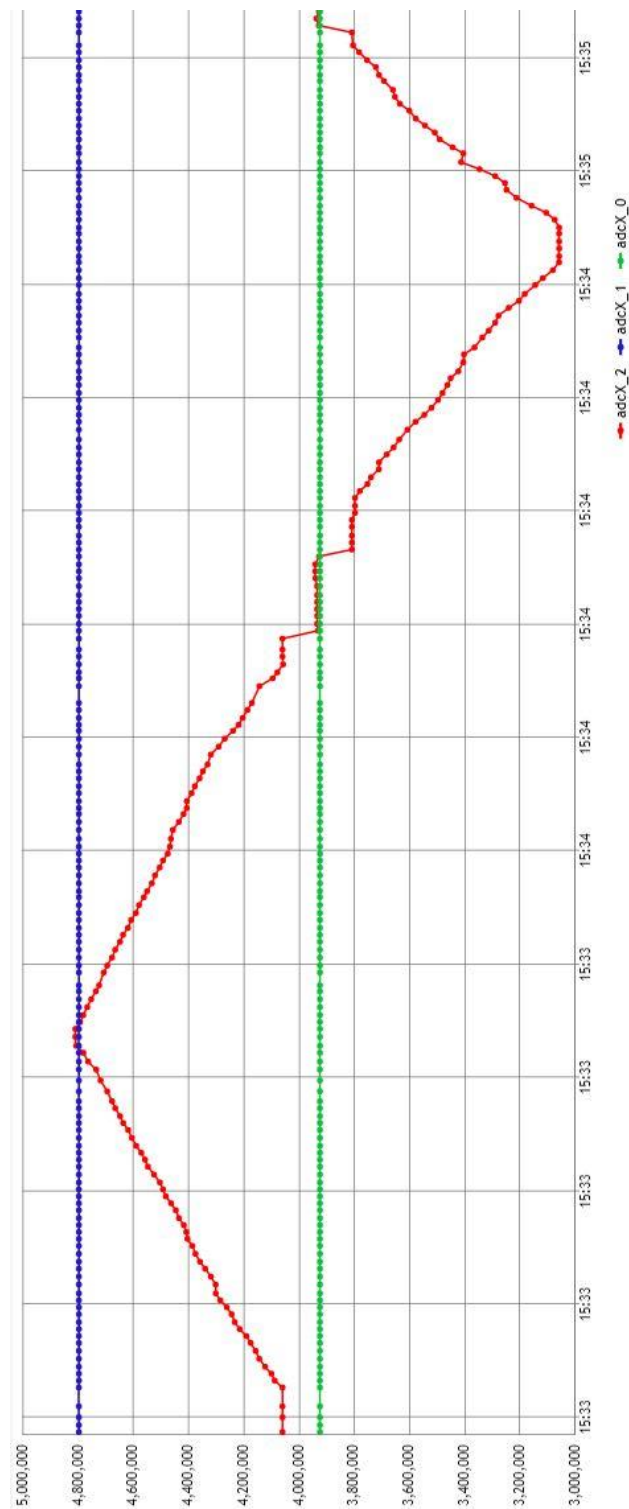
Většina funkcí byla vlastním úsilím zprovozněna bez potíží, avšak výjimku tvořila komunikace RPi s AD převodníkem, kdy RPi nedostávalo odezvu na odeslané příkazy. Proto byl využit 4kanálový osciloskop s možností analýzy komunikačních sběrnic a ve spolupráci se softwarovým vývojářem proběhla diagnostika jednotlivých komunikačních vodičů. Bylo zjištěno, že napěťová úroveň signálu MISO je 1,7 V místo 3,3 V. Nejpravděpodobnější příčinou tohoto jevu bylo spojení pull-up a pull-down rezistorů. Tedy že vznikl napěťový dělič neznámého poměru, který způsobil nedefinovanou logickou úroveň. Pin MISO musí být ve výchozím stavu v logické „1“. V konfiguraci systému Raspberry Pi však bylo zjištěno, že vstupní pin MISO je nadefinovaný jako pull-down. Následně bylo provedeno přenastavení. Další test již proběhl s pozitivním výsledkem a bylo možné pokračovat konfigurací ADC.

4.4 Webový server

Pro Testing board byl softwarovým vývojářem ve firmě napsán skript v programovacím jazyce Bash, který slouží pro komunikaci s AD převodníkem a čtení dat z něho – zatím jen pro nezbytné otestování funkčnosti. Ve skriptu je nastaveno propojení s webovým serverem firmy (identifikační kód Testing boardu, adresa serveru atd). Dále jsou nastaveny všechny parametry ADC, jako např. rychlost vzorkování, single-ended mód atd. Po připojení k PC můžeme v terminálu sériového rozhraní (např. s využitím programu PuTTY) zadávat příkazy: *getadc [číslo kanálu]* – pro vypsání aktuální změřené hodnoty převedené na odpovídající dekadické číslo rozsahu ADC, *getadc [číslo kanálu] [počet odebraných vzorků]* – měření a průběžné odesílání zadaného počtu naměřených hodnot požadovaného kanálu na server, kde se hodnoty rovnou vykreslují do grafu v časové závislosti, *getadcall [počet odebraných vzorků]* - měření a průběžné odesílání zadaného počtu naměřených hodnot všech kanálů na server, kde se hodnoty vykreslují do grafu v časové závislosti. Všechna změřená data se také mohou ze serveru stáhnout ve formátu .CSV pro další zpracování. Grafický průběh lze vidět na *Obrázku 28*, str. 56.

Měřením bylo zjištěno, že zapojení AD převodníku ADS1258, které využívá unipolární referenční napětí, nemá rozlišení udávaných 24 bitů, ale 23 bitů. Toto zjištění však nemá

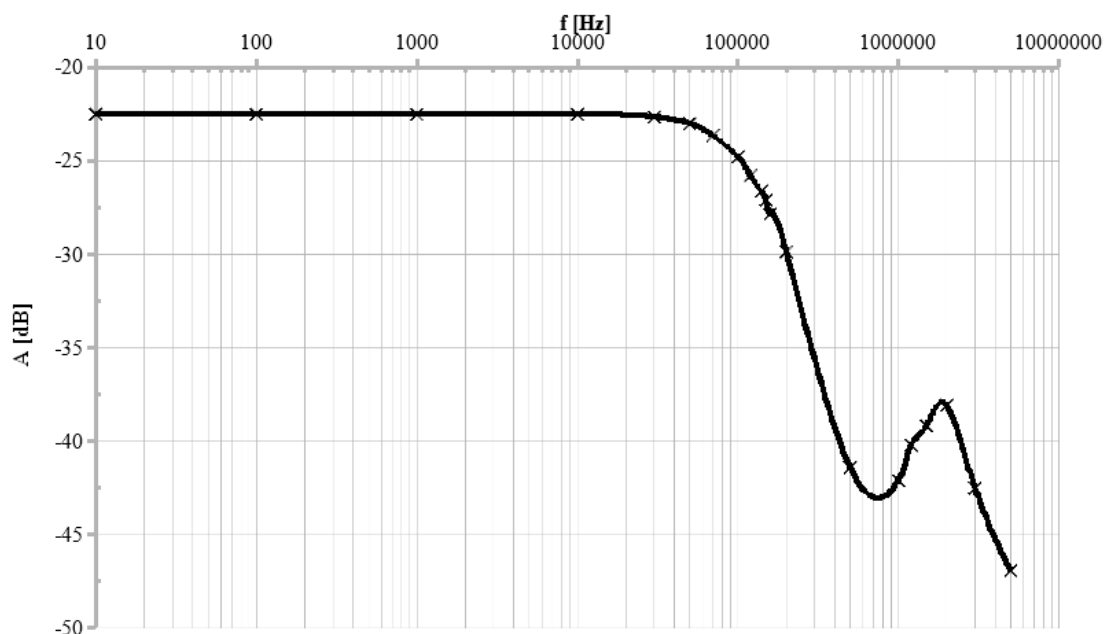
podstatný vliv pro naši aplikaci, protože požadavek na měření napětí je měření 0,01 V s přesností do 5 % a tento cíl byl splněn.



Obrázek 28: Snímek vykresleného grafu na webu – závislost měřeného napětí 0 V (zeleně), 6 V (modře) a náhodně nastaveného průběhu (červeně) na čase

4.5 Dosažené vlastnosti a parametry Testing boardu

Požadavkem na vstupní obvody analogových napěťových vstupů bylo zesílení signálu $A_U = 0,0758$ a přenášené pásmo kmitočtů $0 - 20$ kHz s konstantní amplitudou. Dále byl požadován offset měřeného signálu tak, aby při měření -24 V vedl do AD převodníku kladný signál blízký se hodnotě 0 V. Ověření splnění těchto požadavků proběhlo s využitím funkčního generátoru (sinusovým signálem) a osciloskopu. Skutečné zesílení bylo změřeno $A_{Uskut} = 0,076$. Změřená amplitudová frekvenční charakteristika je vidět na *Obrázku 29*.



Obrázek 29: Skutečná amplitudová frekvenční charakteristika filtru analogových napěťových vstupů

Pro zjištění funkčnosti a parametrů dalších obvodů byl využit testovací skript a laboratorní přístroje jako voltmetr, ampérmetr, ohmmetr, laboratorní zdroj, umělá zátěž. Byla zjištěna správná funkčnost digitálních vstupů i výstupů, funkční PWM výstupy i analogové napěťové a proudové vstupy. Při zadání požadovaných stavů teplotních senzorů docházelo ke spínání odpovídajících rezistorů. V případě přítomnosti 230 V byla tato skutečnost indikována výpisem v terminálovém okně. Obě relé na příkaz přepínala.

Všechny změřené a vypočtené parametry Testing boardu jsou shrnuty v *Tabulce 9* na str. 58.

Tabulka 9: Změřené skutečné parametry Testing boardu

| | |
|--|---|
| Napájecí napětí | 230 VAC |
| Klidový odběr ze sítě | 46 mA |
| Výstupní napětí síťového zdroje | ± 12 V |
| Výstupní napětí DCDC měniče 3V3D | 3,03 V |
| Výstupní napětí DCDC měniče 5V0D | 5,01 V |
| Výstupní napětí LDO $\pm 10V0$ | +10,39 V a -10,1 V |
| Výstupní napětí LDO 4V6 | 4,6 V |
| Digitální výstupy – otevřený kolektor | |
| Výstupní impedance | 90 Ω |
| Proudová zatížitelnost | 30 mA |
| Maximální frekvence | 100 kHz |
| Digitální vstupy | |
| Vstupní impedance | 1,6 k Ω |
| Vstupní rozsah | 0 V až 7 V |
| Zaručená napěťová úroveň logické 0 | 0 V až 1,2 V |
| Zaručená napěťová úroveň logické 1 | 1,8 V až 7 V |
| Analogové napěťové vstupy | |
| Vstupní rozsah | ± 27 V |
| Max. kmitočet měřeného signálu | 20 kHz |
| Šum ADC kanálů | 40 μV_{pp} |
| ENOB pro napěťové vstupy | 16 |
| Měření 0,01 V s přesností | do 5 % |
| Analogové proudové vstupy | |
| Vstupní rozsah | ± 10 A |
| Max. kmitočet měřeného signálu | 10 kHz |
| Šum ADC kanálů | 5 mV _{pp} (≈ 25 mA na vstupu) |
| ENOB pro proudové vstupy | 9 |
| Měření 0,1 A s přesností | do 12,5 % |
| Detekce AC | 230 V ± 20 %, 50 Hz |
| Frekvence signálu PWM | max 19,2 MHz |
| Kontakty relé | max. 230 V / 10 A |

5 Závěr

Hlavním cílem bakalářské práce bylo navržení a realizace elektronického zařízení pro testování a měření nově vyvinutých a vyrobených prototypů různých elektronických zařízení. Díky intenzivnímu vývoji byly splněny všechny body zadání a výsledkem je otestovaný funkční Testing board, který je schopen generovat stimuly a detekovat odezvu testovaných elektronických zařízení díky implementaci řady funkcí. Po připojení k internetu, přes WiFi nebo Ethernet, lze veškerá změřená data odeslat a uložit na server, kde jsou viditelná v podobě grafických závislostí a také dostupná ke stažení v přehledných tabulkách ve formátu CSV.

Testing board je koncipován jako kompaktní měřicí zařízení, které lze kamkoliv přenést, připojit k síťovému napájení 230 V a přes vyvedené konektory uskutečnit měření dle konkrétní aplikace. Disponuje digitálními signálovými vstupy a výstupy, PWM signálovými výstupy, analogovými napěťovými i proudovými vstupy, dvěma přepínatelnými rezistorovými sítěmi, dvěma relé s přepínacími kontakty, detekcí síťového napětí a sběrnici RS-485 pro komunikaci s diagnostikovanými zařízeními. Kromě testovacích a měřicích obvodů je také Testing board vybaven sériovým převodníkem USB – UART. Díky tomu lze řídicí počítač Raspberry Pi jednoduše konfigurovat a programovat pro konkrétní aplikaci připojením k PC pomocí kabelu s konektorem USB micro.

Po otestování dílčích funkcí a změření elektrických parametrů Testing boardu byly zjištěny v drtivé většině pozitivní výsledky. Například měření napětí v řádu setin voltů s přesností lepší než 5 % je velice uspokojující hodnota pro zamýšlenou aplikaci. Jako slabé místo lze považovat měření proudu, protože z důvodu zašuměného ADC kanálu od obou proudových vstupů je možné měřit proud v rozsahu ± 10 A s rozlišením 9 bitů. Takové rozlišení neumožňuje přesné měření, a proto bude v druhé revizi kladen důraz na odhalení příčiny šumu a jeho odstranění.

Praktické využití navrženého Testing boardu je plánováno ve firmě Logic Elements, s.r.o. zabývající se vývojem elektroniky, a to např. pro testování řídicí jednotky kotlů, testování řídicích jednotek kuchyňského vybavení atd.

Přínos bakalářské práce pro můj profesní rozvoj

Díky realizaci tohoto projektu jsem se naučil pracovat s návrhovým programem Altium Designer, získal velké množství nových zkušeností a znalostí v oblasti návrhu elektronických obvodů, zjistil náročnost vývoje nového elektronického zařízení a našel směr, kterým bych se rád vydal ve své budoucí kariéře.

Seznam literatury a informačních zdrojů

- [1] Interní dokumentace firmy Logic Elements, s. r. o.
- [2] TKOTZ, Klaus. Příručka pro elektrotechnika. 2. dopl. vyd. Přeložil Jiří HANDLÍŘ. Haan-Gruiten: Verlag Europa-Lehrmittel, 2014. ISBN 978-3-8085-3034-4.
- [3] Electronics tutorials. Sallen and Key Filter. [online]. Poslední změna 10. 1. 2020. [Cit. 10. 1. 2020]. Dostupné z:
<https://www.electronics-tutorials.ws/filter/sallen-key-filter.html>
- [4] Raspberry Pi 4 Model B 4GB. T.S.BOHEMIA. [Obrázek]. Copyright © 2020 [cit. 10. 5. 2020]. Dostupné z:
https://www.tsbohemia.cz/raspberry-pi-4-model-b-4gb_d329082.html
- [5] Úvod do Altium Designeru I. Vývoj.HW.cz. Vše o elektronice a programování [online]. Copyright © 1997 [cit. 10. 5. 2020]. Dostupné z:
<https://vyvoj.hw.cz/navrh-obvodu/software/uvod-do-altium-designeru-i.html>
- [6] Odrušení, odrušovací filtry, příklady odrušení – Časopis Elektro. Odborné časopisy [online]. Copyright © 2014 [cit. 10. 5. 2020]. Dostupné z:
<http://www.odbornecasopisy.cz/elektro/casopis/tema/odruseni-odrusovaci-filtry-priklady-odruseni--15088>
- [7] Jak funguje EMC filtr. SOS electronic. [online]. Copyright © SOS electronic s.r.o. 1991 [cit. 10. 5. 2020]. Dostupné z:
<https://www.soselectronic.cz/articles/schurter/jak-funguje-emc-filtr-2164>
- [8] Datasheet INA250. Texas Instruments. [online]. Poslední změna 02/2017. [cit. 21. 5. 2020]. Dostupné z:
<http://www.ti.com/lit/ds/symlink/ina250.pdf>
- [9] Datasheet ADS1258. Texas Instruments. [online]. Poslední změna 03/2011. [cit. 21. 5. 2020]. Dostupné z:
<http://www.ti.com/lit/ds/symlink/ads1258.pdf>
- [10] Datasheet SN65HVD7x. Texas Instruments. [online]. Poslední změna 03/2019. [cit. 21. 5. 2020]. Dostupné z:
<http://www.ti.com/lit/ds/symlink/sn65hvd78.pdf>
- [11] Datasheet TPS5433xA. Texas Instruments. [online]. Poslední změna 02/2016. [cit. 21. 5. 2020]. Dostupné z:
<http://www.ti.com/lit/ds/symlink/tps54335a.pdf>

- [12] Datasheet TPS7A49. Texas Instruments. [online]. Poslední změna 05/2015. [cit. 21. 5. 2020]. Dostupné z:
<http://www.ti.com/lit/ds/symlink/tps7a49.pdf>
- [13] Datasheet H11AA1M. Fairchild. [online]. Poslední změna 04/2015. [cit. 21. 5. 2020]. Dostupné z: <https://www.onsemi.com/pub/Collateral/H11AA4M-D.pdf>
- [14] Datasheet MCP23017. Microchip. [online]. Poslední změna 06/2016. [cit. 21. 5. 2020]. Dostupné z:
<http://ww1.microchip.com/downloads/en/DeviceDoc/20001952C.pdf>
- [15] Datasheet KPS2801. Ecom. [online]. Poslední změna 05/2007. [cit. 21. 5. 2020]. Dostupné z: https://www.ecom.cz/open_sheet/sheet_name=D06102
- [16] Datasheet LDE20. Ecom. [online]. Poslední změna 10/2019. [cit. 21. 5. 2020]. Dostupné z: https://www.ecom.cz/open_sheet/sheet_name=D72733
- [17] Datasheet LS05. Ecom. Poslední změna 04/2014. [cit. 21. 5. 2020]. Dostupné z: https://www.ecom.cz/open_sheet/sheet_name=D39843
- [19] Datasheet FT230X. FTDI Chip. [online]. Poslední změna 05/2016. [cit. 21. 5. 2020]. Dostupné z:
https://www.ftdichip.com/Support/Documents/DataSheets/ICs/DS_FT230X.pdf
- [20] Datasheet Raspberry Pi 4 Model B. Raspberrypi.org. [online]. Poslední změna 01/2019. [cit. 21. 5. 2020]. Dostupné z:
https://www.raspberrypi.org/documentation/hardware/raspberrypi/bcm2711/rpi_D ATA_2711_1p0_preliminary.pdf
- [21] Active Low-Pass Filter Design. Texas Instruments. [online]. Poslední změna 09/2002. [cit. 21. 5. 2020]. Dostupné z:
<http://www.ti.com/lit/an/sloa049b/sloa049b.pdf?ts=1590859121298>
- [22] Datasheet LT6654. Analog Devices. [online]. Poslední změna 05/2017. [cit. 21. 5. 2020]. Dostupné z:
<https://www.analog.com/media/en/technical-documentation/data-sheets/6654fh.pdf>
- [23] How delta-sigma ADCs work, Part 1. Texas Instruments. [online]. Poslední změna 2011. [cit. 21. 5. 2020]. Dostupné z:
<http://www.ti.com/lit/an/slyt423a/slyt423a.pdf?ts=1591190331183>
- [24] How delta-sigma ADCs work, Part 2. Texas Instruments. [online]. Poslední změna 2011. [cit. 21. 5. 2020]. Dostupné z:
<http://www.ti.com/lit/an/slyt438/slyt438.pdf?ts=1591190613324>

- [25] PINKER, Jiří a KOUCKÝ, Václav. *Analogové elektronické systémy*. 4. vyd. Plzeň: Západočeská univerzita, 2010. 2 sv. ISBN 978-80-7043-917-3

Seznam obrázků

| | |
|---|----|
| OBRÁZEK 1: PRINCIP CELÉHO KONCEPTU MONITOROVACÍHO ZAŘÍZENÍ | 12 |
| OBRÁZEK 2: ZJEDNODUŠENÉ BLOKOVÉ SCHÉMA ZAPOJENÍ TESTING BOARDU | 14 |
| OBRÁZEK 3: ILUSTRÁČNÍ OBRÁZEK POUŽITÉHO RASPBERRY PI 4 MODEL B. ZDROJ [4] | 16 |
| OBRÁZEK 4: SCHÉMA ZAPOJENÍ OBVODU DIGITÁLNÍHO VSTUPU | 18 |
| OBRÁZEK 5: SCHÉMA ZAPOJENÍ OBVODU DIGITÁLNÍHO VÝSTUPU | 19 |
| OBRÁZEK 6: SCHÉMA ZAPOJENÍ SIGNÁLOVÉHO VÝSTUPU PWM | 20 |
| OBRÁZEK 7: SCHÉMA ZAPOJENÍ AD PŘEVODNÍKU ADS1258IRTCT | 24 |
| OBRÁZEK 8: ROZDÍLOVÝ ZESILOVAČ VE VSTUPNÍM ANALOGOVÉM OBVODU | 25 |
| OBRÁZEK 9: NAVRŽENÝ KMITOČTOVÝ FILTR TYPU SALLÉN-KEY | 26 |
| OBRÁZEK 10: AMPLITUDOVÁ FREKVENČNÍ CHARAKTERISTIKA ANALOGOVÝCH NAPĚŤOVÝCH VSTUPŮ SIMULOVANÁ V PROGRAMU TINATI | 26 |
| OBRÁZEK 11: SCHÉMA ZAPOJENÍ ANALOGOVÉHO PROUDOVÉHO VSTUPU S INTEGROVANÝM OBVODEM INA250A1 | 28 |
| OBRÁZEK 12: SCHÉMA ZAPOJENÍ PŘEPÍNATELNÉ REZISTOROVÉ SÍTĚ PRO SIMULACI TEPLOTNÍCH SENZORŮ | 30 |
| OBRÁZEK 13: SCHÉMA ZAPOJENÍ IO EXPANDÉRU MCP23017-E/SO | 31 |
| OBRÁZEK 14: SCHÉMA ZAPOJENÍ RELÉ S PŘEPÍNACÍMI KONTAKTY | 32 |
| OBRÁZEK 15: SCHÉMA ZAPOJENÍ PRO DETEKCI SÍŤOVÉHO NAPĚTÍ | 33 |
| OBRÁZEK 16: SCHÉMA ZAPOJENÍ PŘEVODNÍKU RS-485 S INTEGROVANÝM OBVODEM SN65HVD78 | 34 |
| OBRÁZEK 17: SCHÉMA ZAPOJENÍ PŘEVODNÍKU USB NA UART – FT230XS | 35 |
| OBRÁZEK 18: BLOKOVÉ ZNÁZORNĚNÍ ZAPOJENÍ NAPÁJECÍ KASKÁDY | 37 |
| OBRÁZEK 19: SCHÉMA ZAPOJENÍ POUŽITÉHO SÍŤOVÉHO FILTRU | 39 |
| OBRÁZEK 20: SCHÉMA ZAPOJENÍ MĚNIČŮ AC/DC PRO Kladné a záporné napětí 12 V | 39 |
| OBRÁZEK 21: SCHÉMA ZAPOJENÍ DC/DC MĚNIČE Z 12 V NA 3,3 V | 40 |
| OBRÁZEK 22: SCHÉMA ZAPOJENÍ LDO REGULÁTORU NAPĚTÍ Z 5 V NA 4,6 V | 41 |
| OBRÁZEK 23: SCHÉMA ZAPOJENÍ OBVODU REFERENČNÍHO NAPĚTÍ LT6654BHS6 | 42 |
| OBRÁZEK 24: POHLED NA HIERARCHICKY ŘAZENÉ SOUBORY V PROJEKTU TESTING BOARD REV A1 | 43 |
| OBRÁZEK 25: ZÁKLADNÍ ROZMĚRY TESTING BOARDU, ROZMÍSTĚNÍ FUNKČNÍCH BLOKŮ | 48 |
| OBRÁZEK 26: POHLED NA DÍLY KRYTU S OZNAČENÝMI POZICEMI VYJMENOVANÝCH PRVKŮ | 50 |
| OBRÁZEK 27: SCREENSHOT VÝPISU TERMINÁLOVÉ APLIKACE PRO ZÁKLADNÍ OTESTOVÁNÍ TESTING BOARDU | 54 |
| OBRÁZEK 28: SNÍMEK VYKRESLENÉHO GRAFU NA WEBU – ZÁVISLOST MĚŘENÉHO NAPĚTÍ 0 V (ZELENĚ), 6 V (MODŘE) A NÁHODNĚ NASTAVENÉHO PRŮBĚHU (ČERVENĚ) NA ČASE | 56 |
| OBRÁZEK 29: SKUTEČNÁ AMPLITUDOVÁ FREKVENČNÍ CHARAKTERISTIKA FILTRU ANALOGOVÝCH NAPĚŤOVÝCH VSTUPŮ | 57 |
| OBRÁZEK 30: DESKA PLOŠNÝCH SPOJŮ TESTING BOARDU – HORNÍ VRSTVA MĚDI „TOP“ | 1 |
| OBRÁZEK 31: DESKA PLOŠNÝCH SPOJŮ TESTING BOARDU – VNITŘNÍ VRSTVA MĚDI „IN1“ | 2 |
| OBRÁZEK 32: DESKA PLOŠNÝCH SPOJŮ TESTING BOARDU – VNITŘNÍ VRSTVA MĚDI „IN2“ | 3 |
| OBRÁZEK 33: DESKA PLOŠNÝCH SPOJŮ TESTING BOARDU – SPODNÍ VRSTVA MĚDI „BOT“ | 4 |
| OBRÁZEK 34: MODEL DESKY PLOŠNÝCH SPOJŮ TESTING BOARDU – POHLED SHORA | 5 |

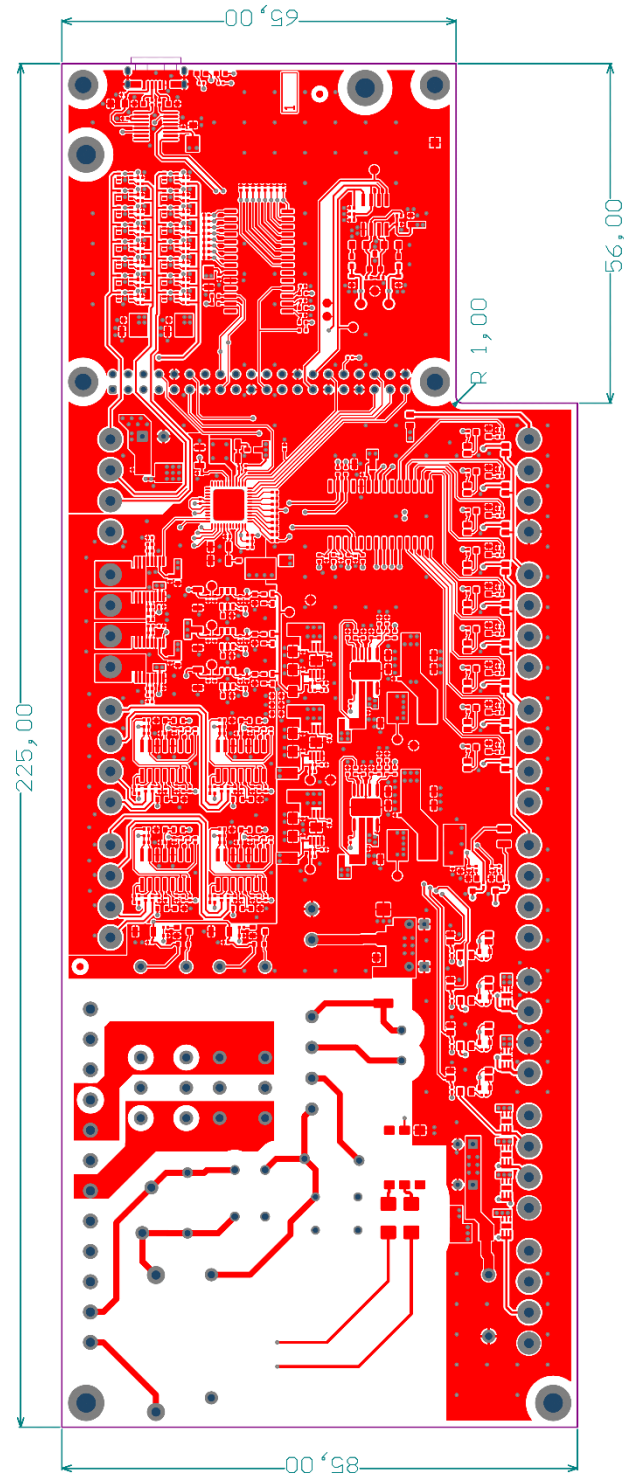
| | |
|--|---|
| OBRÁZEK 35: MODEL DESKY PLOŠNÝCH SPOJŮ TESTING BOARDU – POHLED ZDOLA..... | 6 |
| OBRÁZEK 36: POHLED NA PŘEDNÍ A PRAVOU STRANU KRYTU..... | 7 |
| OBRÁZEK 37: POHLED NA ZADNÍ A LEVOU STRANU KRYTU..... | 7 |
| OBRÁZEK 38: POHLED SHORA NA OSAZENOU DESKU PLOŠNÝCH SPOJŮ TESTING BOARDU | 8 |
| OBRÁZEK 39: POHLED ZDOLA NA OSAZENOU DESKU PLOŠNÝCH SPOJŮ TESTING BOARDU..... | 8 |
| OBRÁZEK 40: POHLED NA KOMPLETNÍ TESTING BOARD Z PŘEDNÍ A PRAVÉ STRANY..... | 9 |
| OBRÁZEK 41: POHLED NA KOMPLETNÍ TESTING BOARD ZE ZADNÍ STRANY..... | 9 |

Seznam tabulek

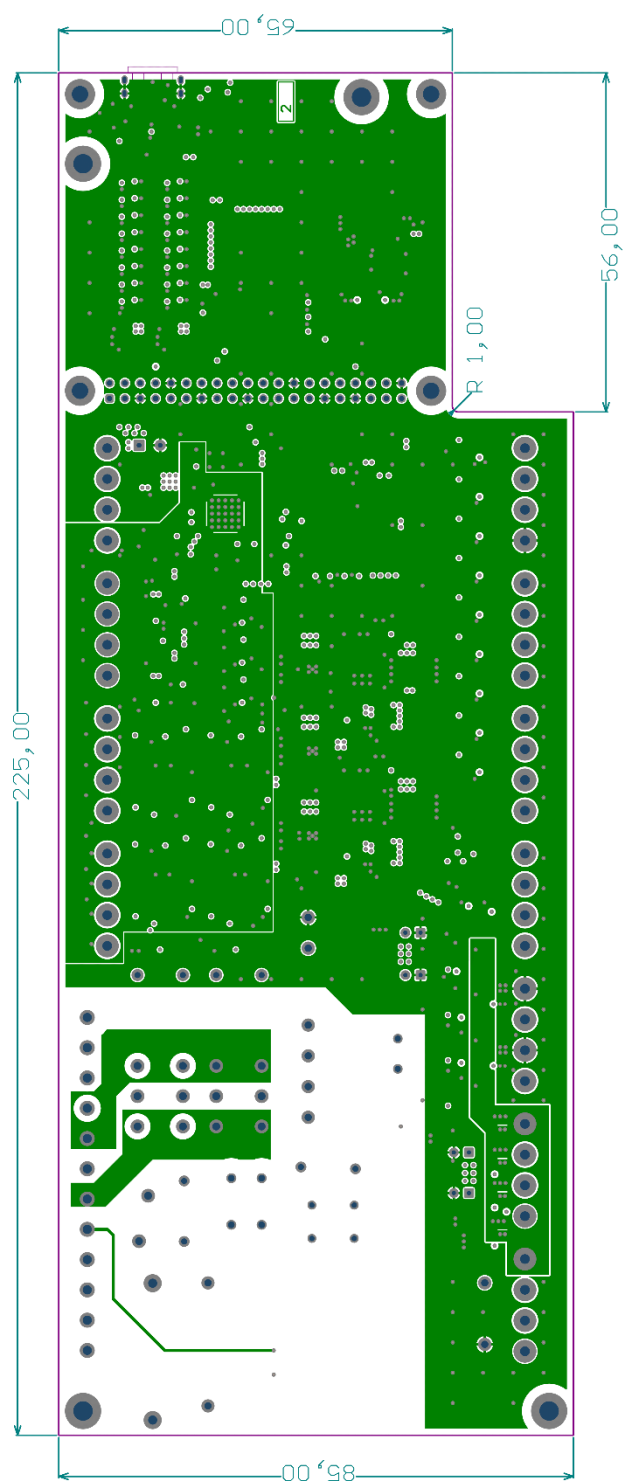
| | |
|--|----|
| TABULKA 1: POŽADOVANÉ FUNKCE TESTING BOARDU VČETNĚ JEJICH ROZSAHU A POČTU..... | 13 |
| TABULKA 2: ZÁKLADNÍ PARAMETRY VYBRANÉHO ŘÍDÍČÍHO POČÍTAČE RASPBERRY PI 4 MODEL B..... | 16 |
| TABULKA 3: ZÁKLADNÍ PARAMETRY VYBRANÉHO AD PŘEVODNÍKU | 23 |
| TABULKA 4: VARIANTY INTEGROVANÉHO OBVODU INA250..... | 27 |
| TABULKA 5: VÝZNAMNÉ HODNOTY ODPORU POUŽÍVANÝCH TEPLOTNÍCH SENZORŮ..... | 29 |
| TABULKA 6: POTŘEBNÝ PŘÍKON JEDNOTLIVÝCH OBVODŮ TESTING BOARDU | 36 |
| TABULKA 7: ZÁKLADNÍ NASTAVENÁ PRAVIDLA PŘI NÁVRHU DESKY PLOŠNÝCH SPOJŮ TESTING BOARDU..... | 47 |
| TABULKA 8: PARAMETRY ZADANÉ PŘI OBJEDNÁVCE VÝROBY DESKY PLOŠNÝCH SPOJŮ PRO TESTING BOARD | 51 |
| TABULKA 9: ZMĚŘENÉ SKUTEČNÉ PARAMETRY TESTING BOARDU..... | 58 |

Přílohy

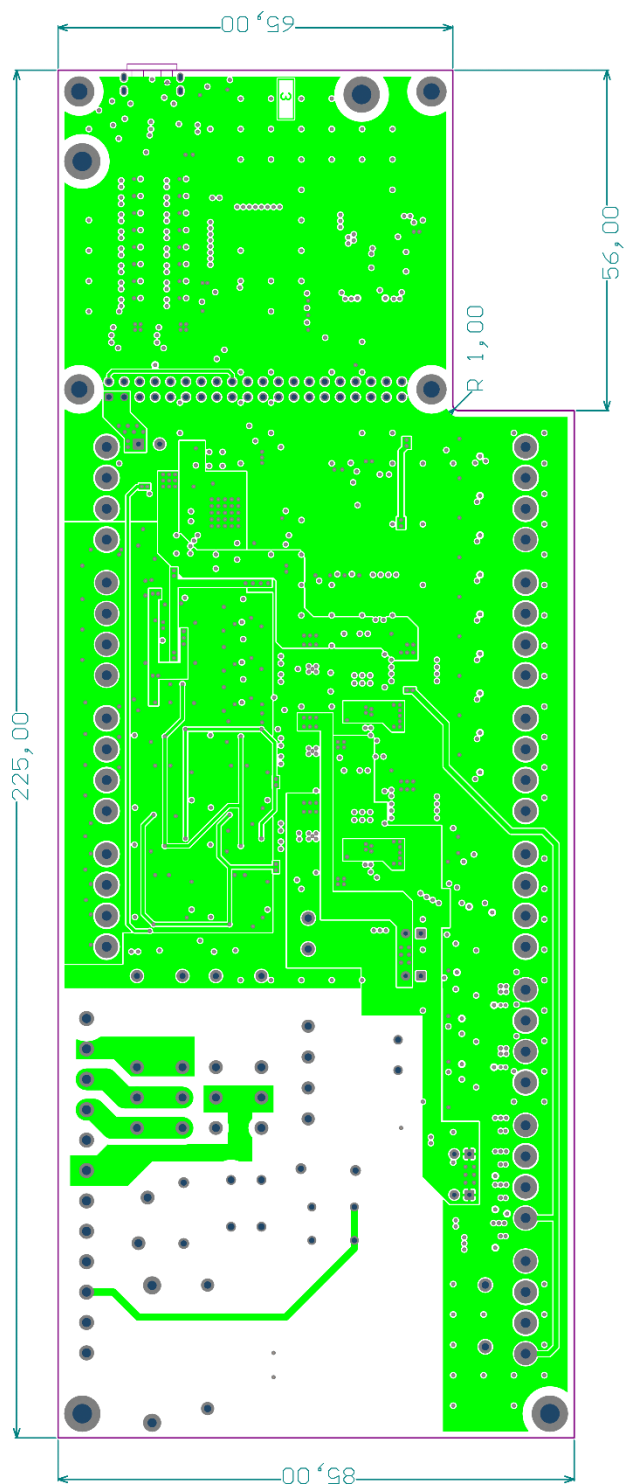
Příloha A – Jednotlivé vrstvy mědi DPS



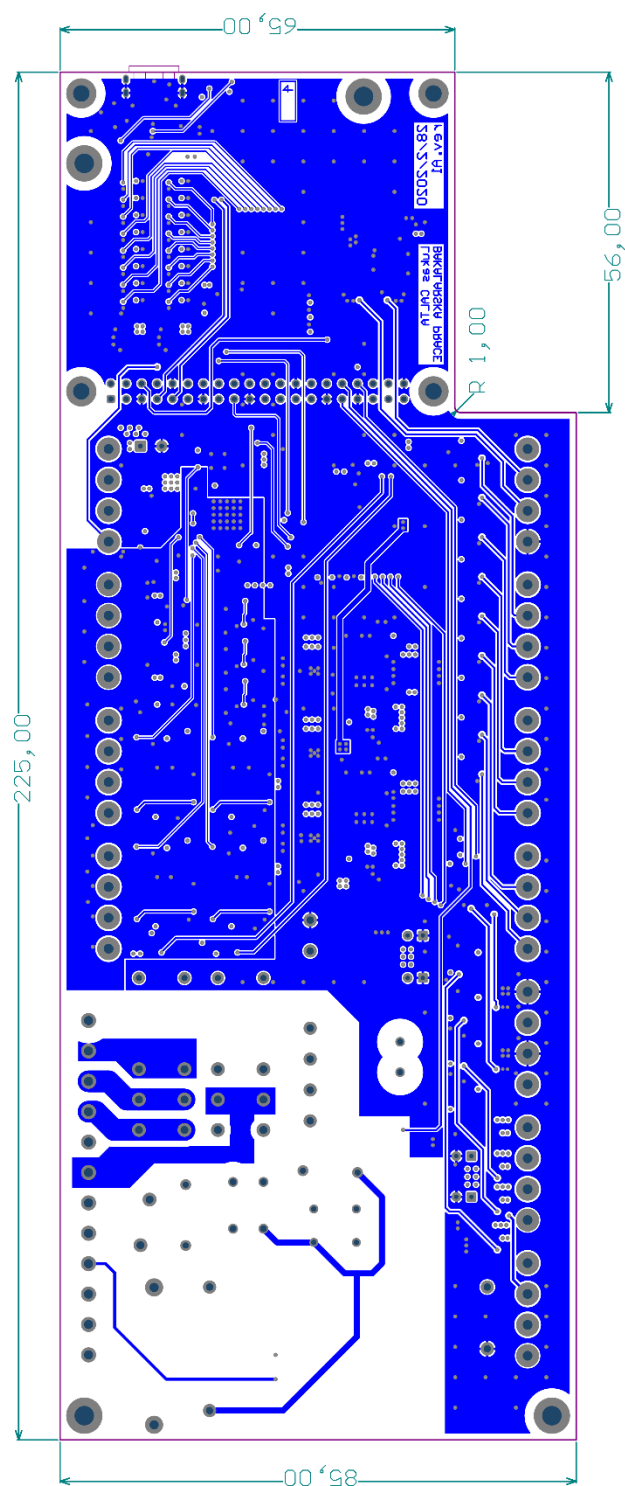
Obrázek 30: Deska plošných spojů Testing boardu – horní vrstva mědi „TOP“



Obrázek 31: Deska plošných spojů Testing boardu - vnitřní vrstva mědi „IN1“

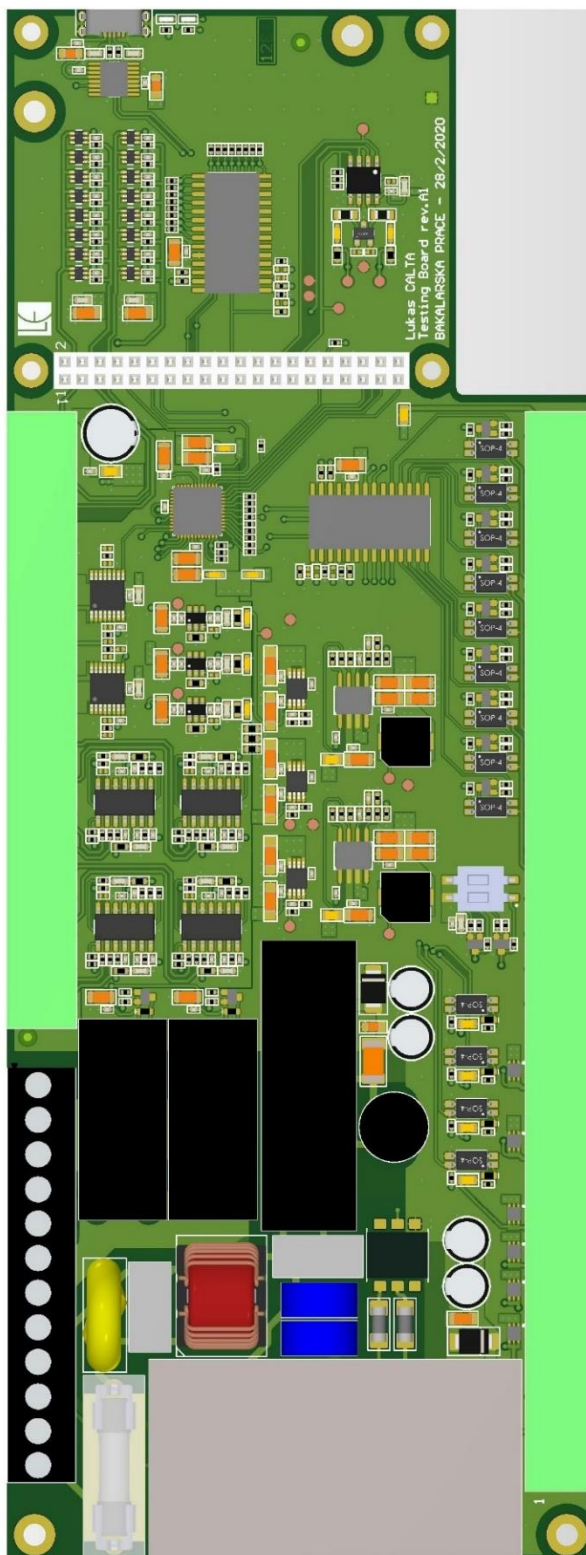


Obrázek 32: Deska plošných spojů Testing boardu – vnitřní vrstva mědi „IN2“

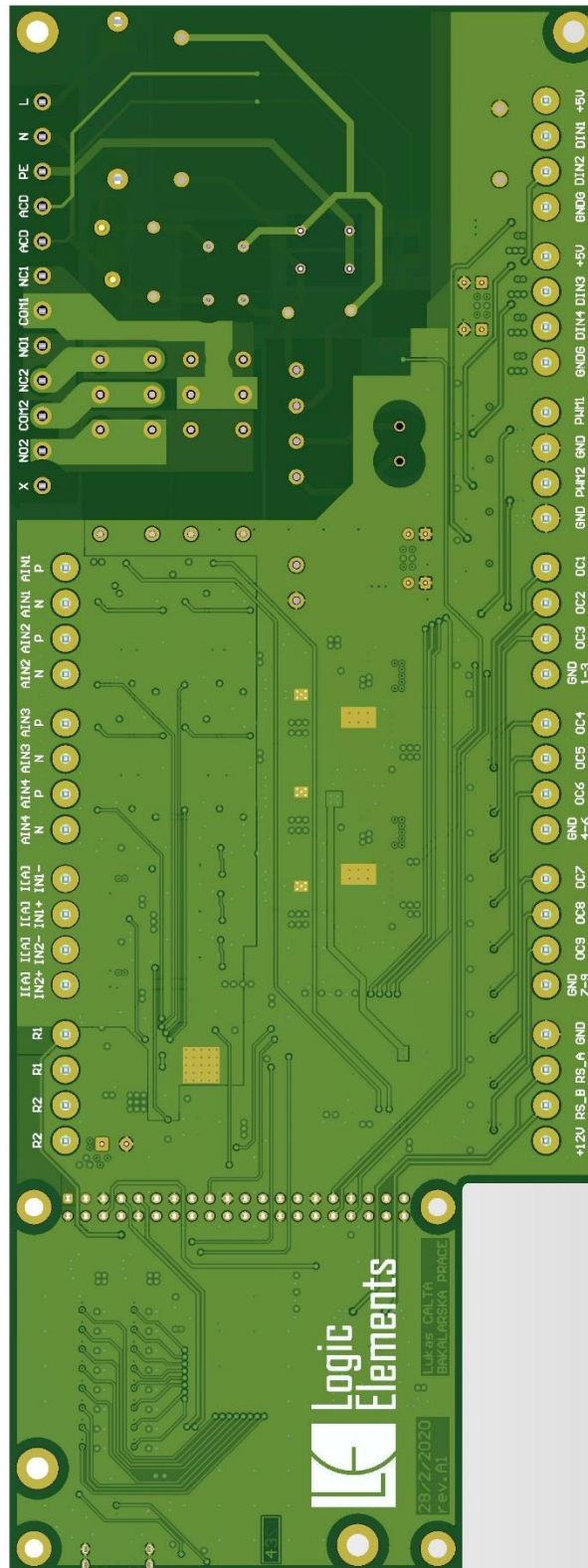


Obrázek 33: Deska plošných spojů Testing boardu – spodní vrstva mědi „BOT“

Příloha B – Model DPS



Obrázek 34: Model desky plošných spojů Testing boardu – pohled shora

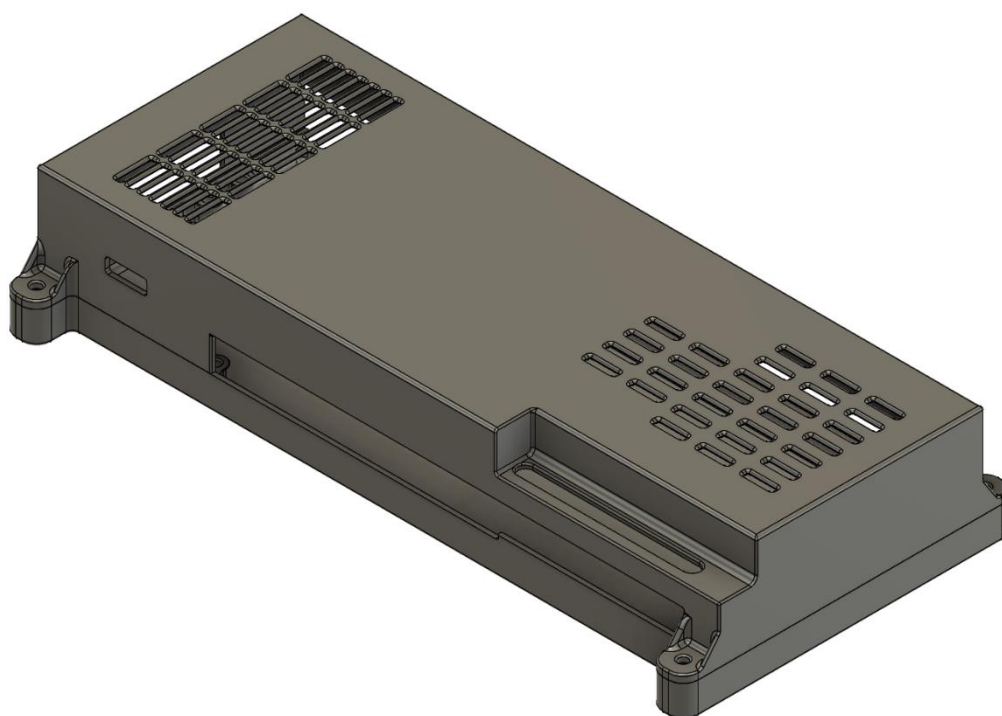


Obrázek 35: Model desky plošných spojů Testing boardu – pohled zdola

Příloha C – 3D model krytu pro Testing board

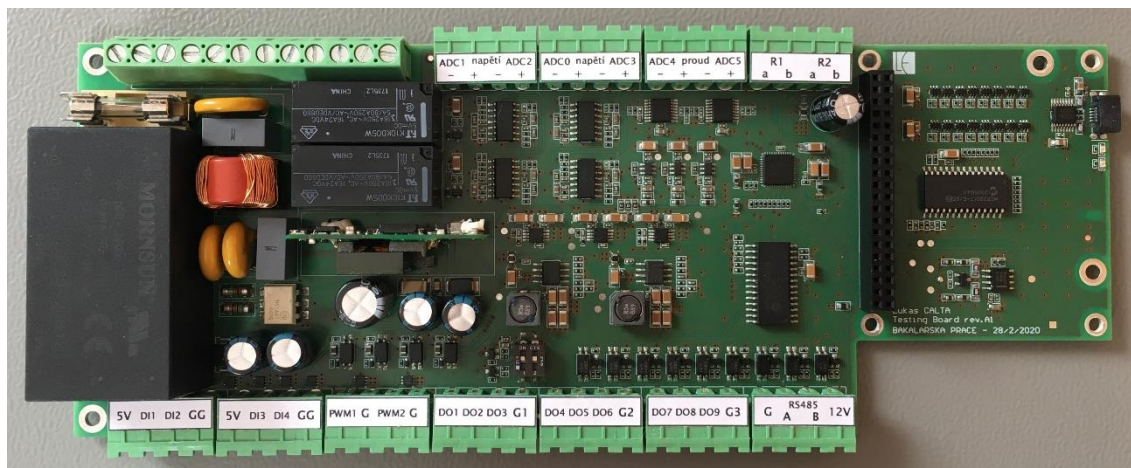


Obrázek 36: Pohled na přední a pravou stranu krytu

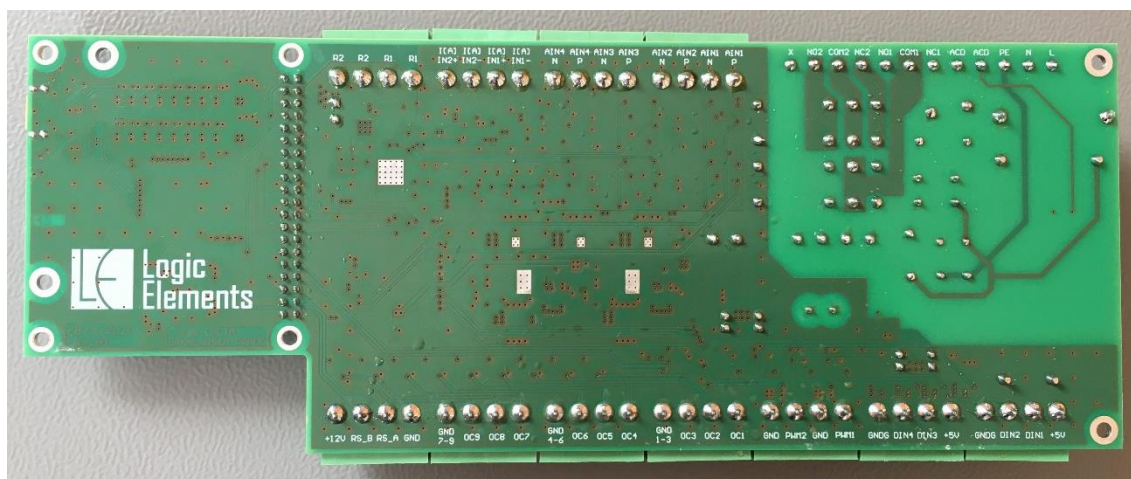


Obrázek 37: Pohled na zadní a levou stranu krytu

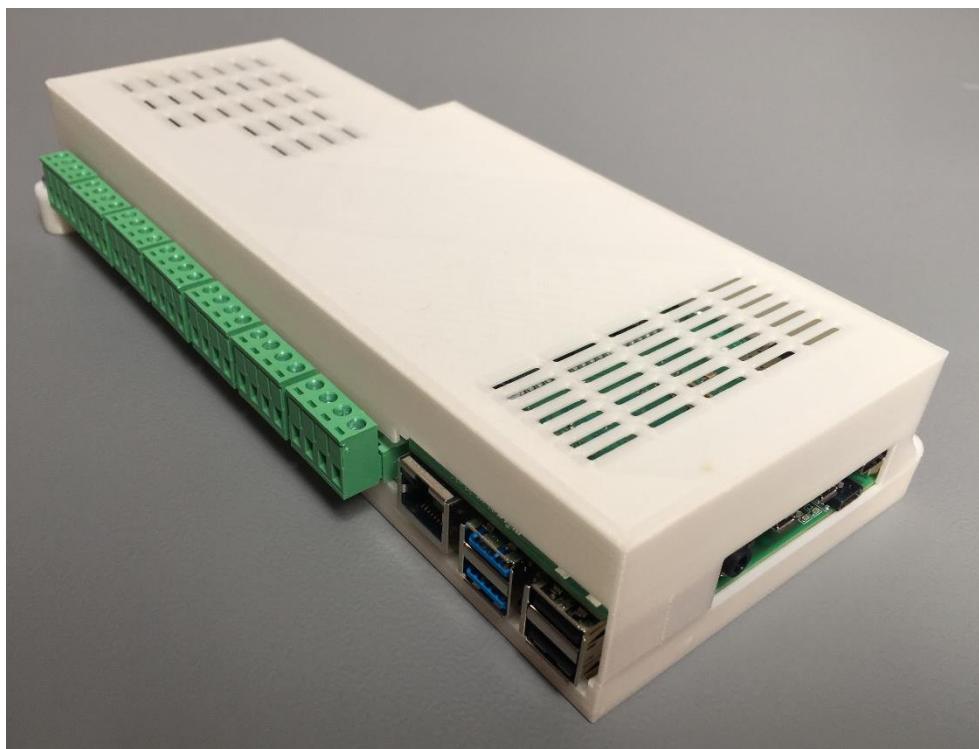
Příloha D – Foto reálného výrobku



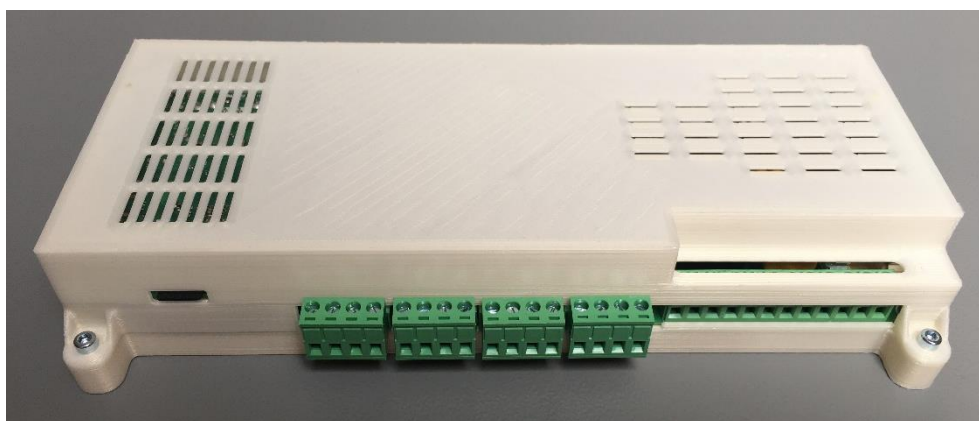
Obrázek 38: Pohled shora na osazenou desku plošných spojů Testing boardu



Obrázek 39: Pohled zdola na osazenou desku plošných spojů Testing boardu



Obrázek 40: Pohled na kompletní Testing board z přední a pravé strany



Obrázek 41: Pohled na kompletní Testing board ze zadní strany

Příloha E – Výťah z testovacího skriptu všech funkcí kromě ADC a RS-485

```
#přidání knihoven
import smbus
import time
import RPi.GPIO as GPIO
GPIO.setwarnings(False)
ACDet = 31
PWMvystup1 = 32
PWMvystup2 = 33
GPIO.setmode(GPIO.BOARD)
GPIO.setup(ACDet, GPIO.IN)
GPIO.setup(PWMvystup1, GPIO.OUT)
GPIO.setup(PWMvystup2, GPIO.OUT)
PWM1 = GPIO.PWM(PWMvystup1, 256)
PWM2 = GPIO.PWM(PWMvystup2, 256)
bus = smbus.SMBus(3) # SDA - header 15, SCL - header 16
DEVICE1 = 0x21 # Expander 1 - Digitální vstupy, výstupy - otevřený
kolektor
DEVICE2 = 0x22 # Expander 2 - RsiteRelay
IODIRA = 0x00 # Nastavení vstupů/výstupů PORTA
IODIRB = 0x01 # Nastavení vstupů/výstupů PORTB
GPIOA = 0x12 # Registr pro čtení vstupů PORTA
GPIOB = 0x13 # Registr pro čtení vstupů PORTB
OLATA = 0x14 # Registr pro zápis výstupů PORTA
OLATB = 0x15 # Registr pro zápis výstupů PORTB
bus.write_byte_data(DEVICE1, IODIRA, 0b00001111) # Nastavení PORTA GPA0-3
jako vstup, GPA4-7 jako výstup
bus.write_byte_data(DEVICE1, OLATA, 0b00000000) # Nastavení log. úrovní
na výstupu PORTA
bus.write_byte_data(DEVICE2, IODIRA, 0b00000000) # Nastavení PORTA PA0-7
jako výstup
bus.write_byte_data(DEVICE2, OLATA, 0b00000000) # Nastavení log. úrovní
na výstupu PORTA
bus.write_byte_data(DEVICE1, IODIRB, 0b00000000) # Nastavení PORTB GPA0-7
jako výstup
bus.write_byte_data(DEVICE1, OLATB, 0b00000000) # Nastavení log. úrovní
na výstupu PORTB
bus.write_byte_data(DEVICE2, IODIRB, 0b00000000) # Nastavení PORTB GPA0-7
jako výstup
bus.write_byte_data(DEVICE2, OLATB, 0b00000000) # Nastavení log. úrovní
na výstupu PORTB
time.sleep(1)
bus.write_byte_data(DEVICE1, OLATA, 0b00110000)
bus.write_byte_data(DEVICE1, OLATB, 0b00000000)
bus.write_byte_data(DEVICE2, OLATA, 0b00000000)
bus.write_byte_data(DEVICE2, OLATB, 0b00000000)
# Definování všech funkcí
# Načtení stavu digitálních vstupů
def Vypis_Digitalni_Vstupy():
    value = bus.read_byte_data(DEVICE1, GPIOA)
    prevod = value & 0x0F
    hodnota = (prevod)
    hodnota1 = bin(hodnota & 0b1)
    hodnota2 = bin(hodnota >> 1 & 0b1)
    hodnota3 = bin(hodnota >> 2 & 0b1)
    hodnota4 = bin(hodnota >> 3 & 0b1)
    print('\n' + 'D3: ' + hodnota4[2] + ' D2: ' + hodnota3[2] + ' D1: '
+ hodnota2[2] + ' D0: ' + hodnota1[2] + '\n')
    time.sleep(0.1)
#ovladani rele 1
```

```

def Zapni_Rele_1():
    aktual = bus.read_byte_data(DEVICE1, GPIOB)
    zapsat = (aktual | 0b01000000)
    bus.write_byte_data(DEVICE1, OLATB, zapsat)

def Vypni_Rele_1():
    aktual = bus.read_byte_data(DEVICE1, GPIOB)
    zapsat = (aktual & 0b10111111)
    bus.write_byte_data(DEVICE1, OLATB, zapsat)

#zjisteni stavu AC
def Nacti_ACdetekci():
    if (GPIO.input(ACDet)):
        print('\nNeni pritomno sitove napeti.\n')
    else:
        print('\nJe pritomno sitove napeti!')

#ovladani digitalnich vystupu
def Zapni_D1():
    aktual = bus.read_byte_data(DEVICE1, GPIOA)
    zapsat = (aktual | 0b00010000)
    bus.write_byte_data(DEVICE1, OLATA, zapsat)

def Vypni_D1():
    aktual = bus.read_byte_data(DEVICE1, GPIOA)
    zapsat = (aktual & 0b11101111)
    bus.write_byte_data(DEVICE1, OLATA, zapsat)

#nastveni PWM 1
def PWM1out(strida):
    PWM1.start(strida)

#simulace teplotnich senzorů
def _1NTC_low():
    #aktual = bus.read_byte_data(DEVICE2, GPIOA)
    zapsat = (0b10000000)
    bus.write_byte_data(DEVICE2, OLATB, zapsat)

def _1NTC_mid():
    #aktual = bus.read_byte_data(DEVICE2, GPIOA)
    zapsat = (0b01000000)
    bus.write_byte_data(DEVICE2, OLATB, zapsat)

def _1PT1000_high():
    #aktual = bus.read_byte_data(DEVICE2, GPIOA)
    zapsat = (0b00000001)
    bus.write_byte_data(DEVICE2, OLATB, zapsat)

# While smyčka
while True:
    print('\n-----\n')
    print('Lukáš Calta, Testing board: Program pro základní
ovládání\nMožnosti klávesových zkratk:\n"a" - zapni rele 1\n"b" - vypni
rele 1\n"c" - zapni rele 2\n"d" - vypni rele 2\n"e" - vypis stav
digitalnich vstupu\n"ac" - vypis stav AC detekce\n"[X]1" - zapni
digitalni vystup X (0-9)\n"[X]0" - vypni digitalni vystup X (0-
9)\n"pwm[X]" - nastaveni PWM vystupu X (1-2)\n"[X]ntclow/mid/high" -
nizka/nominalni/vysoka teplota pro NTC10K kanalu X (1-
2)\n"[X]pt100low/mid/high" - nizka/nominalni/vysoka teplota pro PT100

```

```
kanalu X (1-2)\n"[X]pt1000low/mid/high" - nizka/nominalni/vysoka teplota
pro PT1000 kanalu X (1-2)\njina klavesa = konec programu\n')
volba = input('Co si přejete udělat: ')
if(volba == 'a'):
    Zapni_Rele_1()
elif(volba == 'b'):
    Vypni_Rele_1()
elif(volba == '11'):
    Zapni_D1()
elif(volba == '10'):
    Vypni_D1()
elif(volba == 'pwm1'):
    volba2 = int(input('Zadejte stridu signalu pwm1: '), 10)
    PWM1out(volba2)
elif(volba == '1ntclow'):
    _1NTC_low()
else:
    break;
```

Příloha F – CD

Příloha CD obsahuje elektronickou verzi této bakalářské práce ve formátu PDF („CaltaLukas_BP“), program pro základní otestování funkčnosti Testing boardu kromě ADC a RS-485 („BP_Ovladani_TB_bez_ADC_a_RS485.py“) a složku se soubory využitými pro výrobu a osazení desky plošného spoje („Vystupy“).