

Fakulta elektrotechnická
Katedra materiálů a technologií

DIPLOMOVÁ PRÁCE

Automatizovaný proces verifikace numerické simulace
pomocí měření

Autor práce: **Bc. Lukáš Calta**
Vedoucí práce: **doc. Ing. Václav Kotlan, Ph.D.**

ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI

Fakulta elektrotechnická

Akademický rok: 2021/2022

ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

(projektu, uměleckého díla, uměleckého výkonu)

Jméno a příjmení: **Bc. Lukáš CALTA**
Osobní číslo: **E20N0071P**
Studijní program: **N0713A060011 Materiály a technologie pro elektrotechniku**
Téma práce: **Automatizovaný proces verifikace numerické simulace pomocí měření**
Zadávací katedra: **Katedra materiálů a technologií**

Zásady pro vypracování

1. Realizujte průzkum stávajících řešení verifikace numerických výsledků s ohledem na detekci zásadních předností jednotlivých systémů.
2. Na základě vstupních požadavků pro verifikace výsledků numerické simulace měření provedte návrh měřicího systému.
3. Provedte návrh algoritmu pro automatizované zpracování dat z měřicího zařízení a jejich uložení.
4. Realizujte analýzu potřebné měřicí karty s ohledem na propojitelnost s vytvořeným algoritmem.

Rozsah diplomové práce: **40 – 60**
Rozsah grafických prací: **dle doporučení vedoucího**
Forma zpracování diplomové práce: **elektronická**

Seznam doporučené literatury:

Bitter, R., Mohiuddin, T., Nawrocki, M., „LabVIEW: Advanced Programming Techniques“, CRC Press, 2000, ISBN 9781420039351
McDonough, A.L., „LabVIEW: Data Acquisition & Analysis for the Movement Sciences“, Prentice Hall, 2001, ISBN 9780130128478

Vedoucí diplomové práce: **Doc. Ing. Václav Kotlan, Ph.D.**
Katedra elektrotechniky a počítačového modelování

Datum zadání diplomové práce: **8. října 2021**
Termín odevzdání diplomové práce: **26. května 2022**





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



Doc. Ing. Aleš Hamáček, Ph.D.
vedoucí katedry

V Plzni dne 8. října 2021

Abstrakt

Tato práce shrnuje přehled možností realizace měřicích systémů pro automatický sběr dat včetně popisu jejich základní struktury, rozdělení a používaných komunikačních rozhraní. Je zde uvedeno také několik zástupců komerčně dostupných měřicích systémů. Dále jsou v teoretické části zmíněny možnosti a principy měření tří základních veličin, tedy elektrického napětí u , elektrického proudu i a teploty T .

Praktická část popisuje návrh vlastní USB měřicí karty pro měření zmíněných tří veličin, která by měla konkurovat komerčním produktům hlavně cenou, ale také praktickou kombinací dostupných měřených veličin. V práci je rozebrán jak schematický návrh celého měřicího systému, rozmístění elektronických komponent a celkové mechanické provedení, tak vytvořený program pro MCU i ovládací program v PC.

Poslední část se věnuje kalibraci a ověření reálných elektrických parametrů navržené, vyrobené a oživené měřicí karty.

V závěru práce jsou shrnuty důležité poznatky získané během vzniku této práce. Dále je uveden popis, dosažené parametry a uplatnění realizovaného zařízení a návrhy pro další vylepšení.

Klíčová slova

System pro automatický sběr dat, měření, návrh, realizace, schéma zapojení, deska plošných spojů, elektronické zařízení, napětí, proud, teplota.

Abstract

This work summarizes an overview of the implementation of measuring systems for automatic data acquisition, including a description of their basic structure, distribution and communication interfaces used. There are also several representatives of commercially available measuring systems. Furthermore, the theoretical part mentions the possibilities and principles of measuring three basic quantities, i.e. voltage u , current i and temperature T .

The practical part describes the design of own USB measuring card for measuring the three quantities, which should be compared with commercial products mainly by price, but also by a practical combination of available measured quantities. The work deals with the schematic design of the entire measuring system, the layout of electronic components and the overall mechanical design, as well as the program written for the MCU and the control software for a PC.

The last part deals with the calibration and verification of real electrical parameters of the designed, manufactured and revived measuring card.

In the conclusion of the work there are summarized the important findings obtained during the creation of this work. The following is a description, achieved parameters and application of the implemented equipment and suggestions for further improvements.

Key Words

System for automatic data acquisition, measurement, design, realization, wiring diagram, printed circuit board, electronic device, voltage, current, temperature.

Poděkování

Chtěl bych velice poděkovat svému vedoucímu diplomové práce, panu doc. Ing. Václavu Kotlanovi, Ph.D., za vstřícné vedení a podporu při tvorbě diplomové práce. Dále bych chtěl poděkovat panu Ing. Pavlu Turjanicovi, Ph.D. a panu Ing. Luďku Elisovi, Ph.D. za poskytnuté konzultace a technickou podporu během vývoje. V neposlední řadě patří velké díky mojí rodině za psychickou podporu a klidné zázemí.

Obsah

Úvod.....	- 1 -
1 Automatizovaná měření.....	- 2 -
1.1 Struktura řetězce DAQ systému.....	- 2 -
1.2 Komunikační rozhraní DAQ systémů.....	- 4 -
1.3 Vybrané měřicí karty na trhu a jejich parametry.....	- 4 -
1.4 Měřicí funkce a principy	- 7 -
1.4.1 Měření napětí	- 7 -
1.4.2 Měření proudu.....	- 7 -
1.4.3 Měření teploty	- 9 -
1.5 Zpracování měřených dat	- 10 -
1.5.1 LabVIEW	- 10 -
1.5.2 Python	- 12 -
1.5.3 Wiring	- 12 -
2 Návrh měřicí karty – hardware.....	- 14 -
2.1 Požadavky na měřené veličiny a parametry	- 14 -
2.2 Koncept zařízení a schematický návrh.....	- 14 -
2.2.1 Komunikační rozhraní	- 15 -
2.2.2 Napájení	- 16 -
2.2.3 Mikroprocesor.....	- 18 -
2.2.4 USB-UART převodník	- 19 -
2.2.5 I/O expandér	- 19 -
2.2.6 Slot pro paměťovou kartu	- 19 -
2.2.7 Resetovací obvod.....	- 20 -
2.2.8 AD převodník	- 20 -
2.2.9 Napěťové vstupy	- 22 -
2.2.10 Proudové vstupy	- 24 -
2.2.11 Měření teploty	- 25 -
2.3 Deska plošných spojů.....	- 27 -
2.3.1 Návrh DPS	- 28 -
2.4 Průběh realizace měřicí karty	- 31 -

2.5	Ochranný kryt.....	- 32 -
3	Program	- 34 -
3.1	Program pro MCU.....	- 34 -
3.1.1	Funkce „setup“	- 35 -
3.1.2	Funkce „loop“	- 35 -
3.1.3	Samostatné funkce	- 36 -
3.2	Ovládací program v PC	- 39 -
3.2.1	Block diagram.....	- 40 -
3.2.2	Front panel	- 46 -
4	Kalibrace a ověření reálných parametrů.....	- 49 -
4.1	Metody kalibrace.....	- 49 -
4.1.1	Napěťové vstupy	- 49 -
4.1.2	Proudové vstupy	- 51 -
4.1.3	Teplotní vstupy	- 55 -
4.2	Porovnání požadovaných a dosažených parametrů včetně ceny.....	- 58 -
5	Popis použití	- 60 -
	Zhodnocení a závěr.....	- 62 -
	Literatura.....	- 64 -
	Přílohy.....	I
	Příloha A – Blokové schéma zapojení.....	I
	Příloha B – Grafické zobrazení Gerber výstupů navržené DPS	II
	Příloha C – Elektronická příloha	VIII

Seznam symbolů a zkratek

Značka	Popisek	Jednotka
<i>4-W</i>	Four-wire (čtyřvodičové připojení)	-
<i>AC</i>	Alternating current (střídavý proud)	-
<i>AD</i>	Analogově-digitální	-
<i>ADC</i>	Analog-digital converter	-
<i>AGND</i>	Analog ground (analogový zemní potenciál)	-
<i>BMS</i>	Battery management system	-
<i>CAN</i>	Controller area network	-
<i>CJC</i>	Cold junction compensation	-
<i>CMM</i>	Common-mode (souhlasné napětí)	-
<i>DAC</i>	Digital-analog converter	-
<i>DAQ</i>	Data acquisition	-
<i>DC</i>	Direct current	-
<i>DMM</i>	Digital multimeter	-
<i>DPS</i>	Deska plošných spojů	-
<i>DUT</i>	Device under test	-
<i>ESD</i>	Electrostatic discharge	-
<i>FET</i>	Field effect transistor	-
<i>GND</i>	Ground (zemní potenciál)	-
<i>GPB</i>	Gain bandwidth product	-
<i>GPIB</i>	General purpose interface bus	-
<i>GUI</i>	Graphic user interface	-
<i>HART</i>	Highway addressable remote transducer	-
<i>HSPI</i>	Hardware serial peripheral interface	-
<i>HW</i>	Hardware	-
<i>i</i>	Elektrický proud	A
<i>I/O</i>	Input/Output, vstupně/výstupní	-
<i>IDE</i>	Integrated development environment	-
<i>IO</i>	Integrovaný obvod	-
<i>LAN</i>	Local area network	-
<i>LDO</i>	Low dropout	-
<i>MCU</i>	Microcontroller unit	-
<i>NI</i>	National Instruments	-
<i>NRI</i>	Negativ rail input	-
<i>NTC</i>	Negative temperature coefficient	-
<i>OS</i>	Operační systém	-
<i>OZ</i>	Operační zesilovač	-
<i>PC</i>	Personal computer	-
<i>PCI</i>	Peripheral component interconnect	-
<i>PGA</i>	Programmable-gain amplifier	-
<i>PPTC</i>	Polymeric positive temperature coefficient	-
<i>PTC</i>	Positive temperature coefficient	-
<i>PXI</i>	PCI eXtensions for instrumentation	-
<i>R</i>	Elektrický odpor	Ω
<i>RRO</i>	Rail to rail output	-
<i>RTD</i>	Resistance temperature detector	-
<i>SD</i>	Secure digital	-
<i>SMD</i>	Surface mounted device	-

<i>SoC</i>	System on chip	-
<i>Sps</i>	Samples per second, jednotka vzorkovací frekvence	-
<i>SW</i>	Software	-
<i>T</i>	Teplota	°C
<i>TCR</i>	Temperature coefficient of resistance	-
<i>TVS</i>	Transient voltage suppressor	-
<i>u</i>	Elektrické napětí	V
<i>USB</i>	Universal serial bus	-
<i>V-A</i>	Volt-ampérová (charakteristika)	-
<i>ZČU</i>	Západočeská univerzita	-
<i>ΔT</i>	Rozdíl dvou hodnot teploty	°C

Úvod

Pokud je vyvíjeno nové zařízení, které má být moderní, bezpečné, konkurence schopné, inovativní a ekonomicky přínosné, stojí za jeho vývojem mnohdy tisíce hodin výzkumu, vývoje a testování. Za účelem zefektivnění vývojových prací, zejména pak procesů měření, se v moderní době používají propracované digitální systémy s bohatými možnostmi přizpůsobení prakticky každému technickému odvětví. Tyto systémy umožňují nejen prakticky neomezené možnosti z hlediska dostupnosti měřicích funkcí a zpracování či vyhodnocení dat, ale velký význam má také jejich schopnost autonomního fungování bez přítomnosti lidské obsluhy.

Cílem této práce je seznámit se s technologickými možnostmi automatické validace parametrů palivových článků. Od zákazníka je požadováno dodání měřicího systému, který bude po počátečním nastavení schopen automaticky měřit průběh teplotní nebo časové závislosti napětí a proudu palivových článků a kontinuálně přenášet změřená data do počítače, kde budou ukládána a graficky vizualizována. Takto získaná data budou dále sloužit k verifikaci numerického modelu.

První úkol po obecném seznámení s principy a strukturami DAQ systémů bude zjistit způsoby digitálního měření a zpracování měřených veličin, tedy napětí, proudu a teploty. Druhý úkol bude vytvoření konceptu měřicího zařízení, které svými vlastnostmi splní požadavek zákazníka a zároveň si ponese výhodu oproti konkurenci díky své praktičnosti, jednoduchosti a relativně nízké ceně. Třetím úkolem bude fyzická realizace zařízení na základě navrženého konceptu, tedy výběr vhodných elektronických komponent, jejich schematické zapojení a následný návrh desky plošných spojů. DPS bude poté vyrobena, osazena vybranými součástkami a oživena. Čtvrtý úkol představuje vytvoření základního programového vybavení. Nejprve musí být napsán program pro vybraný mikrokontroler pro řízení činnosti měřicí karty, provádění základního zpracování naměřených dat a komunikace s počítačem. Poté bude následovat vytvoření ovládacího programu v PC, díky kterému uživatel snadno uvidí měřená data a případně provede jejich uložení. Pátým úkolem týkajícím se této práce je zjištění skutečných vlastností vyrobeného zařízení a provedení kalibrace pro dosažení co nejlepších měřicích vlastností.

1 Automatizovaná měření

V dnešní době se lze prakticky v každém oboru setkat s digitální technikou, která člověku umožňuje s pomocí diskrétních hodnot popsat s jistou mírou tolerance veškeré analogové jevy. Díky digitalizaci je následně umožněno všechna digitální data zpracovat, ukládat, analyzovat a rekonstruovat. Pokud potřebujeme jakoukoliv fyzikální veličinu sledovat dlouhodobě, využíváme k tomu měřicí systémy, schopné po počátečním nastavení uživatelem měřit, digitalizovat a ukládat data automaticky. Automatizovaná měření jsou zpravidla prováděna takzvanými DAQ (Data Acquisition) systémy, tedy systémy sběru dat. Jedná se o proces, při němž jsou nejprve měřené fyzikální veličiny převedeny na měřitelné elektrické signály. Příkladem může být měření teploty, kdy je fyzikální veličina teplota převedena převodníkem na elektricky měřenou veličinu napětí. Změřené elektrické signály následně mohou být analogově upravovány dle požadovaných parametrů, a nakonec převedeny do digitální podoby pro přenos do počítače, zpracování, analýzu a uložení. Současné DAQ systémy zpravidla disponují nejen měřicími funkcemi, ale také možnostmi reagovat určitou odezvou a stimulovat DUT (Device Under Test). Nejčastěji se jedná o digitální výstupy logických napěťových úrovní, reléové výstupy či analogové výstupy realizované DAC (Digital to Analog Converter).

1.1 Struktura řetězce DAQ systému

Senzory

Na začátku celého měřicího řetězce vždy stojí senzor, někdy nazývaný transducer. Ty mohou snímat měřené veličiny buď bezkontaktně nebo kontaktně. Senzory převádějí fyzikální veličiny reálného světa, jako je teplota, síla, tlak, pohyb, průtok, rychlost atd. na elektrické signály (napětí, proud). Mezi běžně používané senzory patří termočlánky, termistory a RTD, akcelerometry, tenzometry, děliče napětí a velké množství dalších. [1, 2]

Obvody pro úpravu signálu

Pro správná měření s minimální chybou a minimálním ovlivněním DUT se často mezi snímač a obvody digitalizace řadí analogové obvody pro úpravu signálů. Ty mohou plnit například funkci zesílení či útlumu signálu, filtrace šumu, buzení, linearizace či kompenzace studeného spoje u termočlánků (CJC). Jako příklad lze uvést antialiasingový filtr typu dolní propust, buzení odporového senzoru teploty zdrojem konstantního proudu, nebo zesílení napětí generovaného termočlánkem. [3, 4]

Kromě obvodů pro úpravu signálu mohou být implementovány obvody zajišťující galvanické oddělení, které jednak zvyšují bezpečnost uživatele, ale zároveň potlačují rušení v případě měření signálů nabývajících jen nízkých hodnot. Příkladem může být situace, kdy bude senzor umístěn přímo na DUT, které má nenulový potenciál. To způsobí napěťový offset a ten následně zanese chybu do měření. Dalším potenciálním zdrojem rušení jsou zářivková osvětlení v budovách, která vyzařují 400Hz rušení a některé citlivé senzory na to mohou negativně reagovat. [5]

Analogově – digitální převodníky

Nezbytnou součástí každého DAQ systému je AD převodník, který převádí analogové hodnoty na diskrétní pomocí známých operací *vzorkování*, *kvantování* a *kódování*. Hlavním parametrem určujícím přesnost měření DAQ systémů je rozlišení použitého AD převodníku udávané v bitech (12bitové, 16bitové, 18bitové atd.). Druhým limitujícím parametrem při výběru AD převodníku je jeho vzorkovací frekvence. [4]

Data loggery

Slouží pro kontinuální ukládání naměřených hodnot s předem danou periodou po definované dobu. Data logger je samostatný systém sběru dat s vestavěným procesorem a předem naprogramovaným softwarem nahaným do jednotky. Jejich typickou vlastností je, že mohou fungovat jako samostatná zařízení, jsou kompaktní, přenosné a snadno se používají pro konkrétní aplikace. Všechny data loggery musí obsahovat vlastní uložení dat, případně mohou navíc disponovat slotem pro paměťovou kartu. Běžnou funkcí data loggerů je také možnost síťového připojení s následným přenosem dat do vzdálených uložení. Pro maximální flexibilitu existují i low-power systémy napájené z baterií, které jsou zcela nezávislé na přítomnosti zdroje energie v místě prováděného měření. [4]

Data Acquisition Devices

Zařízení pro sběr dat obsahuje všechny výše uvedené bloky, ale na rozdíl od data loggeru neumí samostatně zpracovávat a ukládat naměřená data. Vyžaduje tedy připojení k počítači. Jednou z možností uživatelů pro zpracování měřených dat je využít zhotovený (často výrobcem měřicí karty dodávaný a jednoúčelový) software pro sběr dat, nebo mohou využít některé z programovacích prostředí (jazyků), jako je např. Python, C++, MATLAB, LabVIEW. V těchto programovacích prostředích si vývojář píše vlastní řídicí a vyhodnocovací systém optimalizovaný pro konkrétní aplikaci. Díky různým druhům propojovacích sběrnic a komunikačních protokolů, kterými jsou zařízení pro sběr dat vybavena, a celkové flexibilitě, je zaručena využitelnost pro mnoho druhů aplikací. [4]

Data Acquisition Systems

Modulární systémy sběru dat jsou navrženy pro vysoký počet měřicích kanálů ve složitých komplexních systémech, které potřebují integrovat a synchronizovat velké množství senzorů různých druhů. Jedná se již o cenově velmi nákladné a vysoce výkonné systémy. [4]

1.2 Komunikační rozhraní DAQ systémů

Z výše uvedeného obecného popisu DAQ řetězce je patrná existence velkého množství odlišných provedení, vzájemně se lišících v závislosti na výrobci, složitosti systému a cílové aplikaci. Nejdostupnějším, nejrozšířenějším a nejuniverzálnějším typem DAQ systémů jsou malé přenosné měřicí karty, které vyžadují nadřazený řídicí systém v podobě PC. Tyto karty obvykle disponují USB rozhraním a jejich výrobce zpravidla dodává i ovládací software pro PC, který umí komunikovat s měřicími kartami přes nastavený COM port a dále zpracovávat změřená data ať už v podobě vykreslování real-time grafů na obrazovku, či ukládání do textových nebo tabulkových souborů. Druhým hojně používaným rozhraním je Ethernet. Výhodou tohoto rozhraní je možnost nasazení měřicí karty téměř kdekoliv, kde je síťové připojení a není tedy nutné mít v místě měření PC. Třetím typem jsou vestavné měřicí karty přímo do počítačových skříní, které se připojují přes sběrnici PCI. Jejich výhodou oproti dvěma předchozím typům je několikanásobně vyšší vzorkovací kmitočet (konkrétně 100ky MSps až 1ky GSps) díky vysoké přenosové rychlosti PCI sběrnice. [6]

V komplikovanějších systémech s větším počtem měřicích modulů může být důležitým faktorem bezchybnosti měření časová synchronizace jednotlivých měřicích karet. Navíc množství měřicích modulů (které mohou dohromady tvořit desítky až stovky vstupů pro různé fyzikální veličiny) vytvoří objemný datový tok, který by výše uvedené sběrnice mohl přehltit. Proto existují DAQ systémy se sběrnici PXI. Základem je šasi s několika sloty, do kterých se zapojují jednotlivé měřicí moduly. Dále je v šasi umístěn modul řídicí jednotky, která může mít několik různých podob. Například se může jednat o jednotku provádějící pre-processing dat a umožňující propojení s řídicím PC, nebo může být řídicí jednotkou rovnou embedded počítač s operačním systémem Windows či nějakým real-time OS (např. LabVIEW Real-Time). [6]

1.3 Vybrané měřicí karty na trhu a jejich parametry

Na trhu je nepřehledné množství systémů pro automatizovaná měření a sběr dat. Jedním z největších dodavatelů měřicí techniky a DAQ systémů je společnost National Instruments.

Dále lze mezi známé výrobce zařadit Keithley, Keysight Technologies nebo LabJack. Spektrum dostupných systémů se samozřejmě liší vybaveností, měřicími funkcemi, přesností, ale také hraje důležitou roli cena. V následujících odstavcích jsou uvedeny a popsány měřicí systémy od výrobců National Instruments, LabJack a Keithley. Tab. 1 dále porovnává jejich důležité parametry a vhodnost pro požadovanou aplikaci.

USB-6009

USB-6009 je jedna ze základních USB měřicích karet od NI se snadnou možností DAQ aplikace. Na kartě se nachází 8 analogových vstupů, které mohou měřit s rozlišením 14 bitů v zapojení single-ended nebo s rozlišením 13 bitů diferenciálně. Vzorkovací frekvence je 48 kSps. Napěťový rozsah vstupů je maximálně ± 10 V oproti GND. Tedy diferenciálně lze měřit napětí 20 V. Napěťový rozsah lze softwarově upravit (snížit) a dosáhnout tak lepšího rozlišení při menším napěťovém rozsahu. Dále karta disponuje dvěma analogovými výstupy s rozlišením 12 bitů o rozsahu 0 až 5 V a výstupním kmitočtu až 150 Sps. Další funkcí je 12bitový I/O port. Na kartě je také jeden 32bitový čítač reagující na sestupnou hranu a svorky výstupního zdroje napětí 2,5 V a 5 V. Celá měřicí karta je napájena přes USB. Samozřejmostí je plná podpora karty v prostředí LabVIEW. [7]

LabJack T7

Toto DAQ zařízení od výrobce Labjack disponuje 16bitovým AD převodníkem se vzorkovací frekvencí až 100 kSps, který digitalizuje data ze 14 analogových vstupů o nastavitelném rozsahu ± 10 mV až ± 10 V. Dále T7 obsahuje dva 12bitové analogové výstupy s rozsahem napětí 0 až 5 V. Také nechybí digitální I/O piny, podpora komunikačních sběrnic SPI, I²C a dalších. Jsou zde dvě komunikační rozhraní – USB a Ethernet. Zajímavým bonusem je dostupnost různých příkladů programů v jazycích Python, C/C++, LabVIEW, MATLAB a dalších. [8]

Keithley DAQ6510

Měřicí ústředna a multimetr s funkcí data loggeru v jednom zařízení je zajímavým řešením výrobce Keithley. Od předchozích DAQ systémů se liší tím, že ke své funkci nutně nevyžaduje připojení k PC. Je vybaven displejem a softwarem pro snadné nastavení a ovládání. Díky multiplexeru (zásuvný modul, který lze dokoupit v různých provedeních) je schopen měřit až 80 DUT. Vzorkování může probíhat rychlostí až 1 MSps při rozlišení 16 bitů. Jako jediné z nalezených zařízení umožňuje měřit všechny tři požadované veličiny, tedy teplotu, napětí a proud, zároveň. K PC jej lze připojit pomocí LAN nebo USB. [9]

Tab. 1: Přehled vybraných komerčně dostupných DAQ systémů a jejich parametry

		NI-USB-6009	LabJack T7	Keithley DAQ6510
Provedení		USB připojení k PC + ovládací SW	USB připojení k PC + ovládací SW	USB/LAN připojení k PC + ovládací SW; funkce běžného DMM; autonomní sběr dat
Analogové vstupy	Počet kanálů	8	14	až 80
	Rozsah	Napětí: ± 10 V	Napětí: ± 10 V	Napětí: 100 nV až 1010 V Proud: 10 pA až 3 A
	Rozlišení AD převodníku	13 až 14 bitů	16 bitů – high speed režim 24 bitů – low speed režim	16 bitů
	Vzorkovací frekvence	48 kSps	max. 100 kSps	1 MSps
Další funkce		analogové výstupy, digitální I/O piny, čítač, výstupní zdroj napětí	analogové výstupy, digitální I/O piny, I ² C, SPI, PWM výstupy, ...	Měření odporu, kapacity, frekvence, termočlánků, termistorů, RTD
Cena		10 000 Kč	20 000 Kč	>70 000 Kč
Splňuje požadavky zadání		NE	ČÁSTEČNĚ	ANO

1.4 Měřicí funkce a principy

1.4.1 Měření napětí

Obecně platí, že pro měření napětí by měl mít daný měřicí přístroj co největší vstupní odpor, aby nedocházelo k zatěžování měřeného zdroje signálu. Tato podmínka je dnes často splněna s využitím AD převodníků nebo operačních zesilovačů vyrobených FET technologií. Během návrhu je nutno brát v úvahu povahu měřeného zdroje, a to, jestli je stejnosměrný nebo střídavý, jestli je „single-ended referenced“, „single-ended non referenced“ nebo „differential“, protože od povahy signálu se odvíjí struktura vstupních obvodů. [5]

Single-ended měření jsou taková, která měří potenciál zdroje vůči společnému zemnímu potenciálu (GND, ground), tedy na kladném vstupu je proměnné napětí a na záporném vstupu je neměnný referenční nulový potenciál. Pokud zařízení měří více kanálů, pak každý z kanálů měří potenciál vůči jednomu společnému zemnímu potenciálu. [5]

Diferenční měření naopak neměří úroveň signálu oproti společnému zemnímu potenciálu, ale úroveň dvou signálů vůči sobě. V takovém případě se řeší velikost tzv. souhlasného napětí, které se vypočítá jako polovina součtu napětí na kladném a záporném vstupu. [5]

1.4.2 Měření proudu

Pro měření elektrického proudu ve spojení s digitální měřicí technikou a mikroprocesory existují metody se snímacím (shunt) rezistorem, metody s transimpedančním zesilovačem nebo nepřímé metody měření proudu s pomocí snímače magnetického pole v okolí vodiče – Hallovým čidlem.

Metodu měření snímacím rezistorem lze dále konfigurovat na tzv. „low-side“ a „high-side“. V případě dolního snímače je výhodou nízké souhlasné napětí snímacího obvodu a také přímé spojení referenčního potenciálu snímacího obvodu se zemí. Naopak nevýhodou tohoto zapojení je nepřímé spojení zátěže měřeného obvodu se zemí, jelikož je uzemněna přes snímací rezistor. Dále není možno tímto zapojením detekovat zkrat vůči zemnímu potenciálu. U zapojení s horním snímačem je naopak výhodou přímé uzemnění jednoho pólu zátěže a také možnost detekce zkratu. Nevýhodou lze spatřovat ve vyšším souhlasném napětí snímacího obvodu, což způsobuje riziko vnášení větší chyby měření kvůli vlastnostem OZ nebo až nefunkčnosti metody. Mezi výhody měření proudu snímacím rezistorem patří použitelnost pro AC i DC proud, dobrá linearita převodu, dobrá rychlost odezvy a široký rozsah hodnot. [10]

Zapojení s transimpedančním zesilovačem se využívá pro měření velmi malých proudů a obvod je postaven na zpětnovazebním ampérmetru s operačním zesilovačem. [10]

Pro měření AC i DC proudů lze využít také snímače s Hallovou sondou, ale u těchto metod lze měřit proudy v řádu jednotek až tisíců ampér, nikoliv malých proudů v řádech mikroampér či miliampér. Přesnost měření je nižší než u metod se snímacími rezistory. [10]

Operační zesilovače pro snímání proudu

Operační zesilovače pro snímání proudu (Current sense amplifiers, current shunt monitors) jsou specializované diferenční zesilovače s velice přesně sladěným zesílením obou větví. Základním požadavkem pro měření proudu je co nejmenší vnitřní odpor měřidla. Z toho však vyplývá vznik malého úbytku napětí na snímacím rezistoru, který je následně zesilován. Hodnota úbytku napětí se může běžně pohybovat v řádech od mikrovoltů až po jednotky voltů. Proto jsou u zesilovače pro snímání proudu zásadní tyto klíčové parametry:

Rozsah souhlasného napětí – Tento parametr definuje rozsah stejnosměrného napětí vůči nulovému potenciálu připojeného na vstupy zesilovače. Zesilovače pro snímání proudu proto vynikají vysokým rozsahem CMM, který obvykle mnohonásobně převyšuje hodnotu napájecího napětí čipu. Například specializovaný obvod INA240 od výrobce Texas Instruments toleruje souhlasné napětí v rozsahu od -4 V do 80 V při napájení 2,7 V. [11]

Vstupní napěťový offset – Jedná se o diferenční DC napěťovou chybu na vstupu zesilovače. Má zásadní vliv na přesnost měření, protože ve srovnání s malými úbytky napětí na shunt rezistorech může způsobit chybu i stovky procent. Dříve se tato chyba eliminovala použitím snímacích rezistorů s vyšší hodnotou odporu, čímž vznikala větší napěťový úbytek. V dnešní době jsou již dostupné zesilovače se vstupním napěťovým offsetem pouhé jednotky až desítky mikrovoltů, umožňující velmi přesná měření při nízkých hodnotách snímacích rezistorů. [11]

Zisk – Diferenční zesilovače pro snímání proudu musí mít maximálně shodné zesílení obou větví určené rezistorovou sítí, a to v celém rozsahu provozních teplot a dalších provozních podmínek. Proto existují operační zesilovače, které obsahují již uvnitř čipu přesně trimované rezistory nastavující fixní zesílení. Dostupné hodnoty fixního zesílení jsou od 0,125 V/V až po 1000 V/V a chyba zesílení může být malá až 0,01 %. Díky integrovanému nastavení zisku je splněna i podmínka teplotní stability, kdy během ohřevu čipu je malý a jednotný teplotní drift. [11]

1.4.3 Měření teploty

Jedním možným a velice často využívaným způsobem měření teploty je zapojení termočlánu. Termočlánek je senzor tvořený dvěma vodiči vyrobenými z rozdílných kovů (dvojkovem), které jsou na obou koncích spojeny. Když jsou oba dva konce udržovány v rozdílných teplotách, tak dle Seebeckova termoelektrického jevu začne protékat obvodem elektrický proud a v případě rozpojení obvodu vznikne mezi rozpojenými konci vodiče elektrické napětí. Toto napětí je právě úměrné rozdílu teplot tzv. studeného (referenčního) a teplého (měřicího) konce. Existuje více druhů termočláneků, jednotlivé druhy se liší použitými materiály pro dva rozdílné vodiče a značí se písmeny latinské abecedy. Jako příklad lze uvést termočlánek typu K a S. Termočlánek typu K má vodiče vyrobeny ze slitin materiálů Ni-Cr a Ni-Al. Jeho použitelný teplotní rozsah je od $-200\text{ }^{\circ}\text{C}$ do $1250\text{ }^{\circ}\text{C}$ a přesnost výstupního napětí je $\pm 2,2\text{ }^{\circ}\text{C}$ nebo $0,75\%$ nad $0\text{ }^{\circ}\text{C}$. Termočlánek typu S je tvořen z materiálů Pt-10% Rh a Pt. Má pracovní rozsah teplot od $0\text{ }^{\circ}\text{C}$ do $1450\text{ }^{\circ}\text{C}$ a přesnost výstupního napětí je $\pm 1,5\text{ }^{\circ}\text{C}$ nebo $0,25\%$. [12]

Dalším způsobem měření teploty je využití odporových čidel, která se v průmyslu nazývají RTD, tedy Resistance Temperature Detectors, nebo také termistorů. Existují termistory s kladným (PTC) nebo záporným (NTC) teplotním koeficientem odporu. Jistou nevýhodou termistorů je, že většina typů nemá lineární průběh V-A charakteristiky, a proto je pro měření teploty nutné znát přesně její průběh, který může být definovaný polynomem nebo tabulkou hodnot. Průmyslově nejpoužívanější odporové senzory jsou pravděpodobně typ PT100 a PT1000. Jedná se o platinové senzory, které se vyznačují vysokou přesností, opakovatelností a stabilitou. Existuje světově uznávaný standard popisující požadavky na tato čidla – DIN/IEC 60751. Ten říká, že senzor PT100 musí mít hodnotu rezistivity $100\ \Omega$ při $0\text{ }^{\circ}\text{C}$ a teplotní koeficient rezistivity (TCR) roven $0,00385\ \Omega/^{\circ}\text{C}$. [13]

Dále standard DIN/IEC 60751:2008 rozlišuje čtyři toleranční třídy, viz Tab. 2.

Tab. 2: Toleranční hodnoty jednotlivých tříd přesnosti senzorů PT dle IEC 60751:2008, převzato z [14]

Třída přesnosti	Tolerance
AA	$\pm (0,1\text{ }^{\circ}\text{C} + 0,17\% \text{ měřené hodnoty})$
A	$\pm (0,15\text{ }^{\circ}\text{C} + 0,2\% \text{ měřené hodnoty})$
B	$\pm (0,3\text{ }^{\circ}\text{C} + 0,5\% \text{ měřené hodnoty})$
C	$\pm (0,6\text{ }^{\circ}\text{C} + 1\% \text{ měřené hodnoty})$

Pro měření teploty s odporovými senzory existuje několik variant zapojení. Základním principem bývá obvod napájený buď zdrojem napětí a fungující jako dělič napětí, nebo

napájený zdrojem konstantního proudu a fungující jako snímací rezistor proudu, který na něm způsobí úbytek napětí úměrný velikosti odporu čidla, a tedy úměrný teplotě. Z důvodu dosažení co nejlepší přesnosti měření existují zapojení, kdy je eliminován úbytek napětí na přívodních (napájecích) vodičích senzoru, známé jako tří- nebo čtyřvodičové zapojení. V případě třívodičového připojení je využito stejného úbytku napětí na přívodních vodičích a senzor je vyhodnocován ve vyváženém můstku. Čtyřvodičové připojení využívá napájení zdrojem konstantního proudu přes napájecí vodiče a úbytek na RTD je snímán párem měřicích vodičů.

Celý napájecí a měřicí obvod platinových senzorů může být velmi složitý a návrhově náročný. Proto existují řešení v podobě integrovaných obvodů, zjednodušující práci a nepřesnosti během návrhu měřicího systému. Jako příklad lze uvést obvod MAX31865, což je tzv. „resistance-to-digital“ převodník, optimalizovaný právě pro platinové senzory.

1.5 Zpracování měřených dat

Pokud uživatel chce číst a zpracovávat data z měřicí karty vlastním algoritmem, tedy bez využití komerčně dodávaných programů¹, existuje relativně velké množství řešení. Všechna řešení se odvíjejí od způsobu přenosu dat mezi měřicí kartou a PC, kompatibilitou měřicích karet a softwaru a případně také od formátu přenášených dat. Již zmíněná společnost National Instruments není jen výrobcem elektronických zařízení a měřicích přístrojů, ale dodává na trh i počítačový software, z něhož pravděpodobně nejznámějším je LabVIEW. Tedy první, a velmi rozšířenou cestou pro řízení a vyhodnocování měřicích systémů, je použití prostředí LabVIEW, popsaného v následující kapitole. Dle zdroje [15] je také velmi praktickým řešením v oblasti řízení DAQ systémů využití objektově orientovaného programovacího jazyka Python. Osobně si myslím, že v dnešní době jsou obě zmíněné varianty čtení a zpracování dat z DAQ systémů či jejich řízení velmi perspektivní, a proto jsou v následujících kapitolách popsány z bližšího pohledu.

1.5.1 LabVIEW

LabVIEW (Laboratory Virtual Instrument Engineering Workbench) od společnosti National Instruments je grafický programovací systém, který umožňuje velmi sofistikované

¹ Komerčně dodávané programy jsou myšleny jako hotová grafická uživatelská rozhraní, která mají předem jasně dané (naprogramované) funkce a ovládání. Uživatel má možnost využívat pouze těchto implementovaných operací bez jakéhokoliv upravování či modifikace pro vlastní aplikaci.

programovat jednoduché i složité systémy pro měření a řízení technologických procesů. Umí vizualizovat všechny aspekty dané aplikace, včetně konfigurace hardwaru, měření, ladění, analýzy a ukládání dat. LabVIEW nachází využití v mnoha průmyslových odvětvích, jako např. elektrotechnika, automotive, medicínství, potravinářství, doprava atd. Díky propracované struktuře umožňuje integraci nejen hardwarového vybavení dodávaného vlastním výrobcem, ale i měřicích přístrojů prakticky od libovolného výrobce. Kromě konfigurace měřicího systému a vývoje algoritmů analýzy dat umožňuje také tvorbu přehledných grafických uživatelských rozhraní (GUI). Podpora různých měřicích přístrojů od různých výrobců je umožněna dvěma faktory. Prvním faktorem je možnost instalace velmi rozmanitého množství ovladačů, které výrobci dodávají ke svým produktům právě pro zvýšení užitečnosti a efektivnosti svých měřicích přístrojů. Druhým faktorem je podpora velkého množství komunikačních sběrnic, a to jak běžných počítačových, tak i průmyslových. Jako příklad lze uvést podporu sběrnic USB, Ethernet/IP, Modbus, HART, CAN a mnoho dalších. [16–18]

Prostředí LabVIEW se uživateli zobrazuje ve dvou oknech, z nichž jedno se jmenuje Block diagram a druhé Front panel. Pro porovnání terminologie s jinými (klasickými) programovacími jazyky lze uvést dva pojmy. Pojem VI v LabVIEW je prakticky synonymem k pojmu program a v programu lze často nalézt / tvořit tzv. SubVI, což je synonymum k pojmu funkce v běžných programovacích jazycích.

Block diagram

V okně Block diagram uživatel umisťuje a propojuje jednotlivé funkční bloky, kterými tvoří celý svůj program. Ke všem funkčním blokům se přistupuje kliknutím pravého tlačítka myši, kdy se zobrazí panel Functions. Bloky lze strukturovat do cyklů jako v klasickém programování, případně vytvářet tzv. SubVI pro zpřehlednění programu. Ve spojitosti s DAQ systémy stojí za zmínku několik důležitých prvků.

NI-DAQmx – jedná se o balík pro vlastní hardware National Instruments, který umožňuje snadné nastavení a řízení měřicích karet. S využitím funkčního bloku DAQ Assistant lze poměrně snadno a rychle nastavit měřicí systém pro konkrétní aplikaci.

NI-VISA – tato knihovna je velmi užitečným nástrojem při používání komunikačních protokolů Ethernet, GPIB, serial, USB a dalších. Usnadňuje práci tím, že pro všechny typy komunikačních protokolů používá z pohledu uživatele stejné operace a stejné formáty. Například příkaz VISA pro zapsání textového řetězce ve formátu ASCII do přístrojů

ovládaných zprávami je zcela totožný pro přístroj komunikující přes USB i pro přístroj připojený přes GPIB atp. [19]

Front panel

Front panel je v LabVIEW grafické uživatelské rozhraní, ve kterém uživatel ovládá celý program či řízený systém a zároveň je zde zobrazován jeho stav. Mohou se zde nacházet ovládací tlačítka (Button), otáčecí knoflíky (Knob), indikační LED, grafy, tabulky atd. Ke všem dostupným prvkům se přistupuje přes pravé tlačítko myši, kdy se po kliknutí zobrazí panel Controls a v něm kategorie nabízených funkčních prvků.

1.5.2 Python

Z dostupné literatury (viz [15, 20]) lze jednoznačně pochopit, že programovací jazyk Python by mohl být také vhodný pro naprogramování vlastního DAQ systému. Python je univerzální objektově orientovaný programovací jazyk, který představuje mocný nástroj nejen ve webovém vývoji, ale i ve vývoji softwaru, ve zpracování dat a vědeckých výpočtů a psaní systémových skriptů. [20]

Velmi zajímavou variantou standardního programovacího jazyka Python3 je jeho „zeštíhlená a úspornější“ implementace MicroPython, která zahrnuje jakousi malou podmnožinu standardní knihovny Python3 a je optimalizována pro provoz na mikrokontrolerech, které jsou ve srovnání s počítači limitovány svým výpočetním výkonem a programovou pamětí. [21]

1.5.3 Wiring

Wiring je open-source programovací jazyk pro mikrokontrolery, který umožňuje psát multiplatformní software pro ovládání různých zařízení připojených k širokému spektru mikrokontrolerů. Přestože není chápán jako profesionální programovací jazyk, je využíván nejen začátečníky, studenty nebo výzkumníky, ale občas i profesionály za účelem prototypování, ožívování a testování zařízení během vývoje. [22]

Jednou z jeho největších výhod je velmi široká komunita, ve které jsou sdíleny nápady, myšlenky, nové poznatky a rady, díky kterým se i začátečníci mohou rychle učit. Druhým přínosem takto mohutné komunity je dostupnost nepřehledného množství knihoven pro velmi široké spektrum součástek. Jako příklad lze uvést softwarovou knihovnu pro práci s paměťovými SD kartami.

Program psaný ve Wiringu se skládá z tří hlavních částí. První část slouží pro zavedení knihoven, deklaraci proměnných, konstant apod. Druhá část programu se nazývá „`setup()`“ a jedná se o funkci, která je vykonána pouze jednou, tedy vždy po spuštění mikrokontroleru. Jsou zde obsaženy instrukce, které není potřeba vykonávat cyklicky, jako např. nastavení pinů mikrokontroleru jako vstupní či výstupní, inicializace komunikačních sběrnic atp. Třetí část nazývaná „`loop()`“ je hlavní smyčka obsahující samotný program, který mikrokontroler vykonává stále dokola, dokud nedojde k vyvolání přerušení, resetu nebo odpojení napájení. Dále mohou být součástí kódu napsané funkce, které jsou volány v hlavní smyčce. Ty slouží především ke zlepšení přehlednosti programu a zjednodušení, pokud se stejná rutina stále opakuje.

2 Návrh měřicí karty – hardware

Na základě provedené rešerše technologických řešení DAQ systémů a dostupného hardwaru na trhu vznikl návrh vlastní měřicí karty, který bude v této kapitole představen. Cílem návrhu je splnění požadavků zadavatele na měřicí funkce a rozsahy měřených veličin, ale zároveň vývoj takové měřicí karty, která je v porovnání s konkurenčními produkty na trhu levná, také snadno programovatelná a jednoduše použitelná. Není vyloučena ani možnost jejího nasazení v dalších aplikacích.

Celý projekt HW části této práce je realizován v softwaru Altium Designer.

2.1 Požadavky na měřené veličiny a parametry

Navrhovaná měřicí karta má být využita při vývoji a následné optimalizaci parametrů palivových článků, u kterých je snaha o dosažení co nejlepší efektivity během dodávání energie. Proto budou v laboratoři u různých článků probíhat měření dvou elektrických veličin – napětí a proudu – v závislosti na třetí měřené veličině – teplotě. Předem byly stanoveny požadované parametry měřicí karty, jak je uvedeno v Tab. 3.

Tab. 3: Parametry měřicí karty stanovené zadavatelem

Měřená veličina	Požadovaný rozsah	Požadované rozlišení	Upřesnění
Teplota (2x)	20 až 80 °C	0,5 °C	Senzor: PT100 4-W připojení
Napětí DC (2x)	10 mV až 1,2 V	0,01 V	-
Proud DC (2x)	3 mA až 1,5 A	0,001 A	-

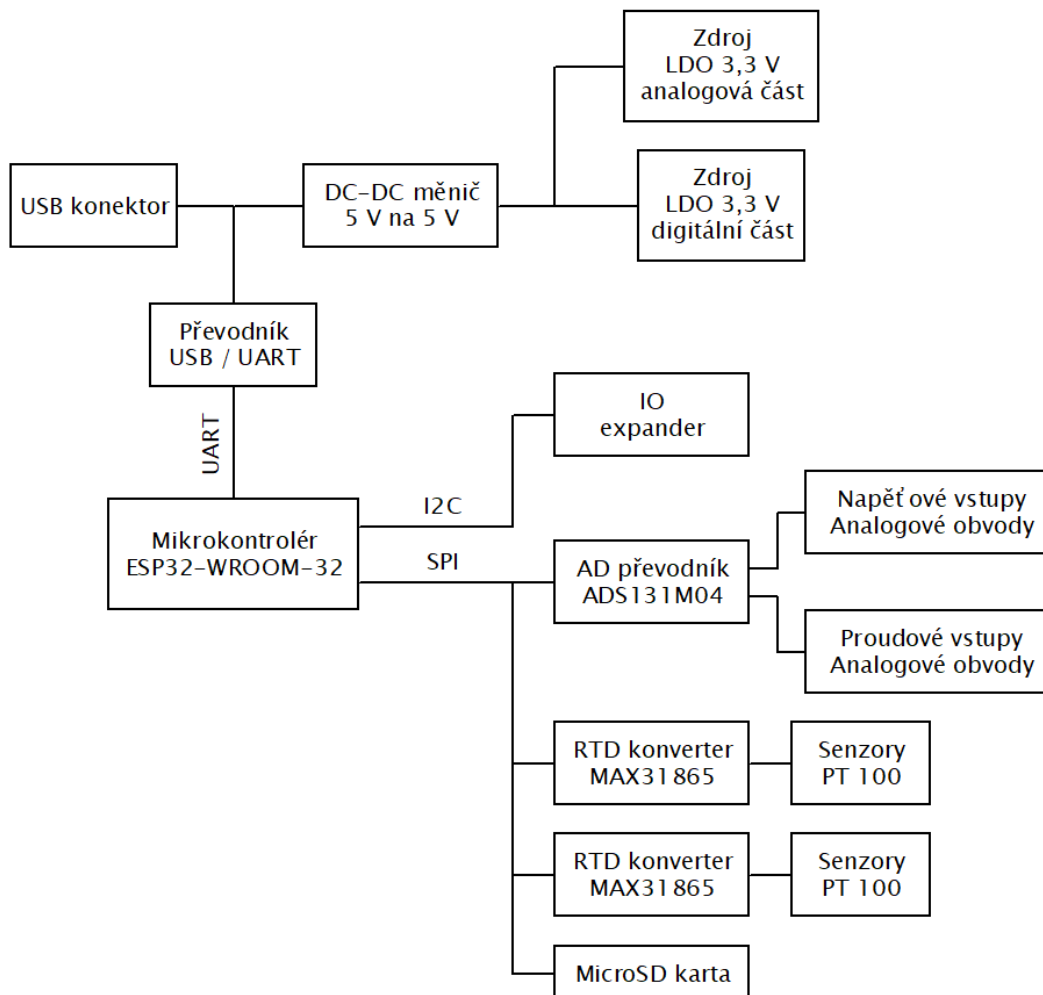
2.2 Koncept zařízení a schematický návrh

Navržená karta obsahuje celkem 6 vstupních měřicích kanálů, avšak fyzicky obsahuje pouze 4 připojovací konektory. Dva konektory slouží k čtyřvodičovému připojení platinových senzorů. Pro praktičtější použití měřicích kabelů a snadnější orientaci během zapojování sestavy je měření napětí a proudu navrženo tak, že jeden kanál (tzn. jeden čtyřpinový konektor) obsahuje jeden vstup napěťový a jeden proudový, stejně tak druhý kanál.

Pro větší variabilitu použití měřicí karty byl také přidán slot na MicroSD kartu pro záznam naměřených dat do souboru.

V případě přenášení dat do PC bude karta komunikovat přes USB s ovládacím programem vytvořeným v prostředí LabVIEW.

Zjednodušené blokové schéma zapojení navržené měřicí karty lze vidět na Obr. 1. Celé blokové schéma zapojení je uvedeno v přílohách (Příloha A – Blokové schéma zapojení).



Obr. 1: Funkční schéma zapojení měřicí karty [vlastní ilustrace]

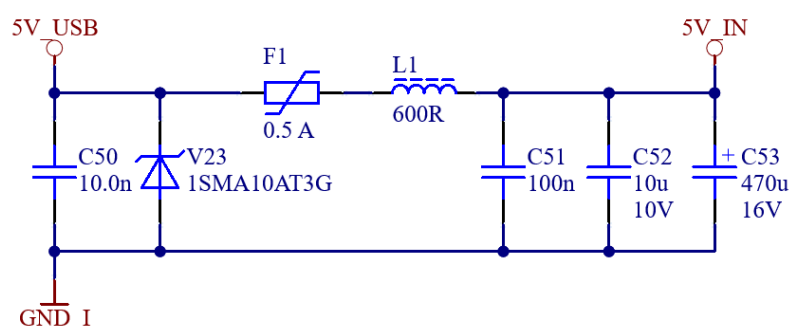
2.2.1 Komunikační rozhraní

Jak již bylo zmíněno v úvodu kapitoly, uživatelské rozhraní bude v PC realizováno v prostředí LabVIEW, a tak je jednoznačná volba připojení měřicí karty k PC přes USB. V současné době je i v oblasti měřicích systémů snaha o dosažení maximální flexibility, mobility, univerzálnosti a jednoduchosti měření. Z tohoto důvodu byl řešen koncept měřicí karty s možností bezdrátového přenosu měřených dat. Pravděpodobně nejvhodnější bezdrátovou technologií je WiFi nebo případně Bluetooth, proto návrh měřicí karty

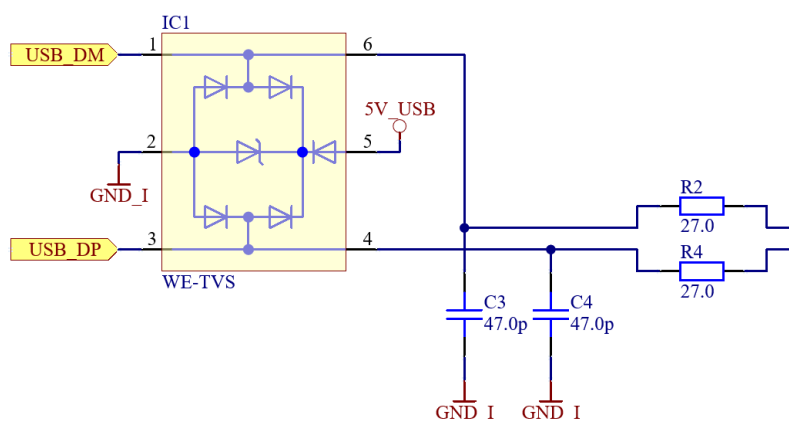
respektoval i tuto možnost bezdrátového přenosu dat a byl vybrán MCU s implementovanou podporou obou těchto bezdrátových komunikačních rozhraní.

2.2.2 Napájení

Napájení celé měřicí karty bude probíhat přímo z USB a z toho důvodu nesmí být přesažen limit maximálního dovoleného odběru proudu z USB standardu 2.0, který je maximálně 0,5 A dle zdroje [23]. Ochranu proti proudovému přetížení zajišťují vratné pojistky PPTC dimenzované na hodnotu 500 mA, které byly umístěny na vstupní (F1) i výstupní stranu napájecího DC-DC měniče. Samozřejmostí je umístění ochranného obvodu proti ESD na napájecí větvi (V23) a USB sběrnici (IC1), viz Obr. 2 a Obr. 3.



Obr. 2: Schéma zapojení vstupních ochranných obvodů na napájecí větvi



Obr. 3: Schéma zapojení TVS ochrany proti ESD na USB sběrnici

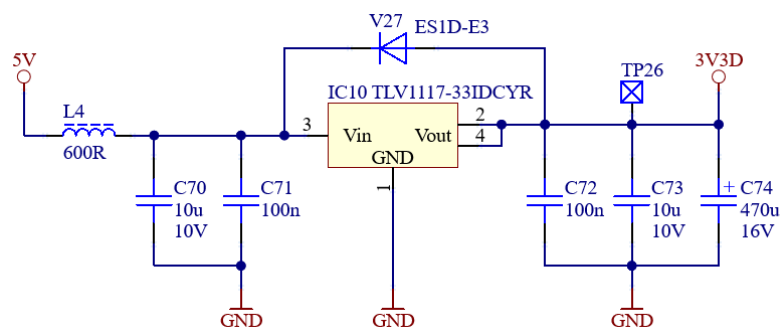
Z důvodu zvýšené ochrany PC před poškozením přepětím v případě připojení nevhodných signálů na vstupy měřicí karty byl proveden návrh s galvanickým oddělením USB. Tedy oddělení jak napájecí části, tak datových vodičů. Galvanické oddělení napájecího napětí je řešeno pomocí výše zmíněného DC-DC měniče z 5 V na 5 V. Konkrétně byl vybrán typ CRL2S0505SC od výrobce Murata Power Solutions, viz Obr. 4. Měnič má jmenovitý

výkon 2 W, účinnost 78 % a zvlnění výstupního napětí typicky 96 mV_{p-p}. Izolační schopnost součástky je dle katalogového listu minimálně 1000 VDC.



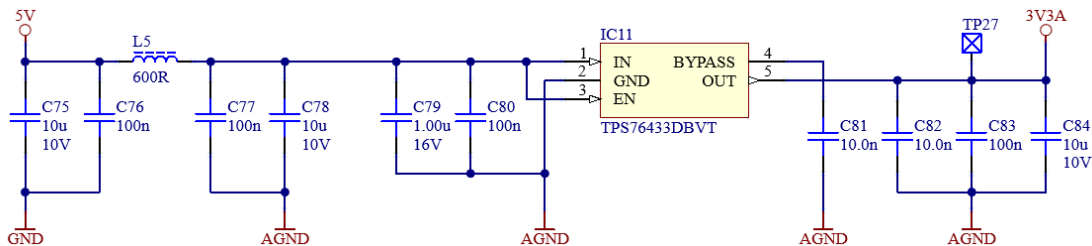
Obr. 4: DC-DC měnič typ CRL2S od výrobce Murata Power Solutions. Převzato z [24]

Digitální obvody na DPS budou napájeny z lineárního regulátoru napětí TLV1117-33 o výstupním napětí 3,3 V. Schéma zapojení je uvedeno na Obr. 5.



Obr. 5: Schéma zapojení LDO TLV1117-33 pro napájení digitálních obvodů

O napájení analogové části se postará také LDO regulátor o výstupním napětí 3,3 V, avšak bude použit integrovaný obvod TPS76433 s vysokou stabilitou a nízkým šumem výstupního napětí, jehož vstupní napětí bude filtrováno feritovou perlou a filtračními kondenzátory. Z důvodu minimalizace rizika zanášení šumu do analogové části s ADC a operačními zesilovači je navíc odděleno napájení právě této části zvlášť od ostatních analogových obvodů použitím dvou 3,3V stabilizátorů napětí poskytujících napájecí větve „3V3A“ a „3V3A_MAX“. Příklad zapojení pro větev „3V3A“ je na Obr. 6.



Obr. 6: Schéma zapojení LDO regulátoru TPS76433 pro napájení analogových obvodů

2.2.3 Mikroprocesor

Pro splnění požadavku nízké ceny celé měřicí karty jsem jako možnou variantu navrhl využití mikrokontroleru ESP32 od výrobce Espressif Systems, konkrétně distribuovaného modulu ESP32-WROOM-32 (viz Obr. 7) osazeného tímto čipem. ESP32 je moderně řešený MCU s technologií SoC (System on Chip), který implementuje technologie současného stavu vědy a techniky, jako velmi jemné strukturování waferu², různé režimy napájení a dynamické škálování výkonu. Jeho vysoce integrovaná struktura zahrnuje vestavěné anténní přepínače, výkonový zesilovač, nízkošumový přijímací zesilovač, filtry a moduly pro správu napájení. Díky tomuto řešení je možné realizovat návrh s minimálními požadavky na DPS (Desky Plošných Spojů). [25]



Obr. 7: Modul mikroprocesoru ESP32-WROOM-32D. Převzato z [26]

Díky dostupnosti standardních komunikačních sběrnic, jako je SPI, SDIO, I²C či UART, se ESP32 stává široce uplatnitelným mikrokontrolerem. Další jeho výhodou je možnost programování velmi rozšířeným programovacím jazykem Wiring, či zavedení MicroPythonu, jako opensource interpreteru programovacího jazyka Python.

Zmíněný modul ESP32-WROOM-32D je rozměrově malá DPS (šířka 18 mm, délka 19,2 mm) osazená samotným mikroprocesorem ESP32, která navíc obsahuje již osazené další komponenty nezbytné pro funkci MCU. Jedná se např. o externí paměť FLASH, planární anténu, filtr, blokovací kondenzátory, rezistory atp. Všechny piny MCU a

² Wafer je označení pro křemíkové kruhové pláty vyrobené z vysoce čistého křemíku, které slouží pro výrobu polovodičových integrovaných obvodů. Tyto pláty se řezou z ingotů, které vznikly postupným vytahováním roztaveného křemíku z nádoby. Nejčastější velikost waferů je průměr 300 mm.

napájecí kontakty jsou vyvedeny po obvodu modulu ze tří stran, a to v podobě tzv. castellated holes (prolamovaných otvorů). Rozteč vývodů je 1,27 mm a celkový počet vývodů je 39 včetně thermal padu umístěného na spodní straně a připojeného na potenciál GND.

2.2.4 USB-UART převodník

Jako součástka zprostředkovávající komunikaci mezi PC s rozhraním USB a mikrokontrolerem s rozhraním UART byl vybrán integrovaný obvod FT231XS-R. Tento obvod je napájen z USB, tedy na vstupní straně DC-DC měniče. Dva komunikační vodiče RX a TX jsou přivedeny na optočleny, které zajišťují galvanické oddělení komunikace s MCU. Integrovaný obvod převodníku dále obsahuje čtyři piny, jejichž funkce je konfigurovatelná. Zde byly využity piny CBUS1 a CBUS2, které v defaultním režimu slouží pro řízení LED diod indikujících komunikaci na vodičích RX a TX.

2.2.5 I/O expandér

Kvůli poměrně velkému množství řídicích a ovládacích signálů potřebných pro správnou funkci všech komponent na DPS bylo nutné zvýšit nedostatečný počet I/O pinů mikrokontroleru s využitím 16bitového I/O expandéru MCP23017, který je řízen mikrokontrolerem po sběrnici I²C. Tento expandér se stará o řízení všech indikačních LED diod, o přepínání kontaktů dvou relé sloužících pro změnu rozsahu proudových vstupů a o vyhodnocování stavu dvou uživatelských tlačítek přístupných ze strany měřicí karty.

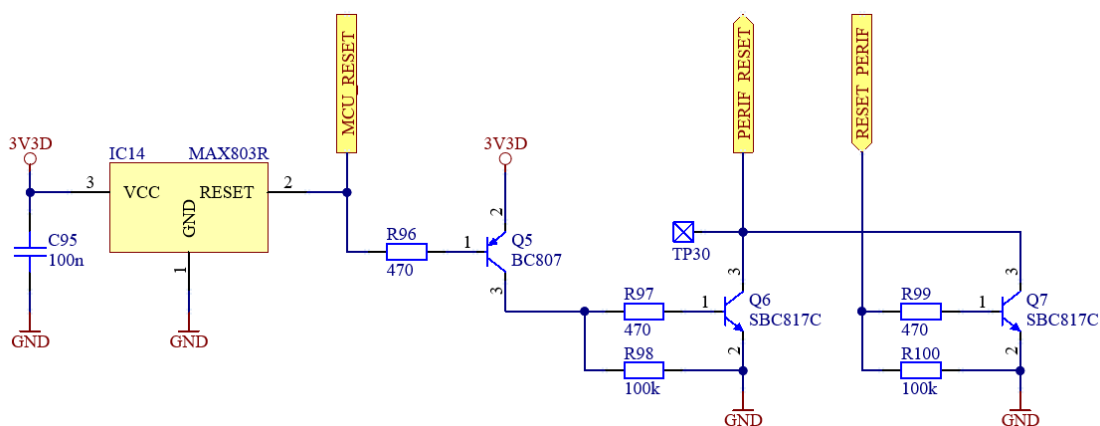
2.2.6 Slot pro paměťovou kartu

Pro možnost ukládání naměřených dat na přenosné paměťové médium byl při návrhu zvolen slot umožňující vložení paměťové karty typu MicroSD. Komunikace s vloženou paměťovou kartou probíhá po sběrnici SPI. V návrhu bylo počítáno s dvěma možnostmi konfigurace. První možností bylo připojení na stejnou sběrnici, na které jsou připojeny všechny ostatní SPI zařízení. Druhou možností bylo připojení na druhou (samostatnou) SPI sběrnici. O možnost výběru jedné z těchto dvou variant se starají tzv. pájecí jumpery – tři pájecí plošky umístěné blízko sebe v jedné řadě. Pro připojení SD karty na jednu nebo druhou sběrnici lze cínovou pájkou propojit prostřední pájecí plošku s jednou z krajních pájecích plošek. Vybraný konektor SD karty také obsahuje pin, který detekuje vložení paměťové karty jeho připojením k potenciálu GND pomocí mechanického kontaktu.

2.2.7 Resetovací obvod

Aby byla zajištěna správná funkce a nedošlo k nežádoucímu chování měřicí karty (jednotlivých integrovaných obvodů) i během nestandardních podmínek, jako je například výpadek či pokles napájecího napětí, byl na měřicí kartu zapojen kontrolní obvod MAX803, jehož výstup je připojen na resetovací piny integrovaných obvodů. Tento třívývodový mikroprocesorový integrovaný obvod sleduje hodnotu napájecího napětí a v případě, že dojde k jeho poklesu pod určitou úroveň (danou variantou použitého obvodu, zde 3 V), je výstupní pin nastaven do logické 0 a všechny připojené obvody resetovány. Tento stav drží resetovací obvod až do doby minimálně 140 ms po opětovném nárůstu napájecího napětí nad mezní hodnotu.

Výstup resetovacího obvodu není napojen přímo na jednotlivé integrované obvody, ale přes dva tranzistory ve spínacím režimu (viz Obr. 8). Díky tomuto řešení bylo umožněno připojení dalšího paralelního tranzistoru spínaného samotným mikrokontrolerem, kterým lze periferní integrované obvody hardwarově resetovat nezávisle na stavu napájecího napětí.



Obr. 8: Schéma zapojení resetovacího obvodu

2.2.8 AD převodník

Standardní AD převodník bude využit pro zpracování analogových signálů z napěťových a proudových vstupů. Požadavky na parametry nejsou nikterak náročné, protože je předpoklad měření DC napětí a proudů s pomalými změnami a minimálním rušením v laboratorním prostředí. Zpracování signálu bude probíhat diferenčním způsobem, proto byl vybírán AD převodník s čtyřmi diferenciálními kanály.

Požadavek na rozlišení AD převodníku u napěťových vstupů

Rozsah měřeného napětí má být ± 2 V s rozlišením 0,01 V. Přípustná chyba při 0,01 V je ± 5 %. Maximální chyba AD převodníku proto musí mít hodnotu určenou dle vztahu (1):

$$\begin{aligned} \frac{\Delta u}{u_{min}} \cdot 100 = \pm 5 \% \rightarrow \Delta u = \frac{\pm 5}{100} \cdot u_{min} = \\ = \frac{\pm 5}{100} \cdot 10 \cdot 10^{-3} = \pm 5 \cdot 10^{-4} \text{ V} \end{aligned} \quad (1)$$

Pokud může být maximální chyba $\pm 5 \cdot 10^{-4}$ V, tak kvantizační krok $q = 2 \cdot 5 \cdot 10^{-4} = 1 \cdot 10^{-3}$ V. Minimální rozlišení AD převodníku se vypočte dle vztahu (2):

$$n_{(u)} \geq \log_2 \frac{4}{1 \cdot 10^{-3}} \geq 12 \text{ bitů} \quad (2)$$

Požadavek na rozlišení AD převodníku u proudových vstupů

Rozsah měřeného proudu má být $\pm 1,5$ A s rozlišením 1 mA. Přípustná chyba při 1 mA je ± 5 %. Maximální chyba AD převodníku proto musí mít hodnotu určenou dle vztahu (3):

$$\frac{\Delta i}{i_{min}} \cdot 100 = \pm 5 \% \rightarrow \Delta u = \frac{\pm 5}{100} \cdot i_{min} = \frac{\pm 5}{100} \cdot 1 \cdot 10^{-3} = \pm 5 \cdot 10^{-5} \text{ A} \quad (3)$$

Pokud může být maximální chyba $\pm 5 \cdot 10^{-5}$ A, tak kvantizační krok $q = 2 \cdot 5 \cdot 10^{-5} = 1 \cdot 10^{-4}$ A. Minimální rozlišení AD převodníku se vypočte dle vztahu (4):

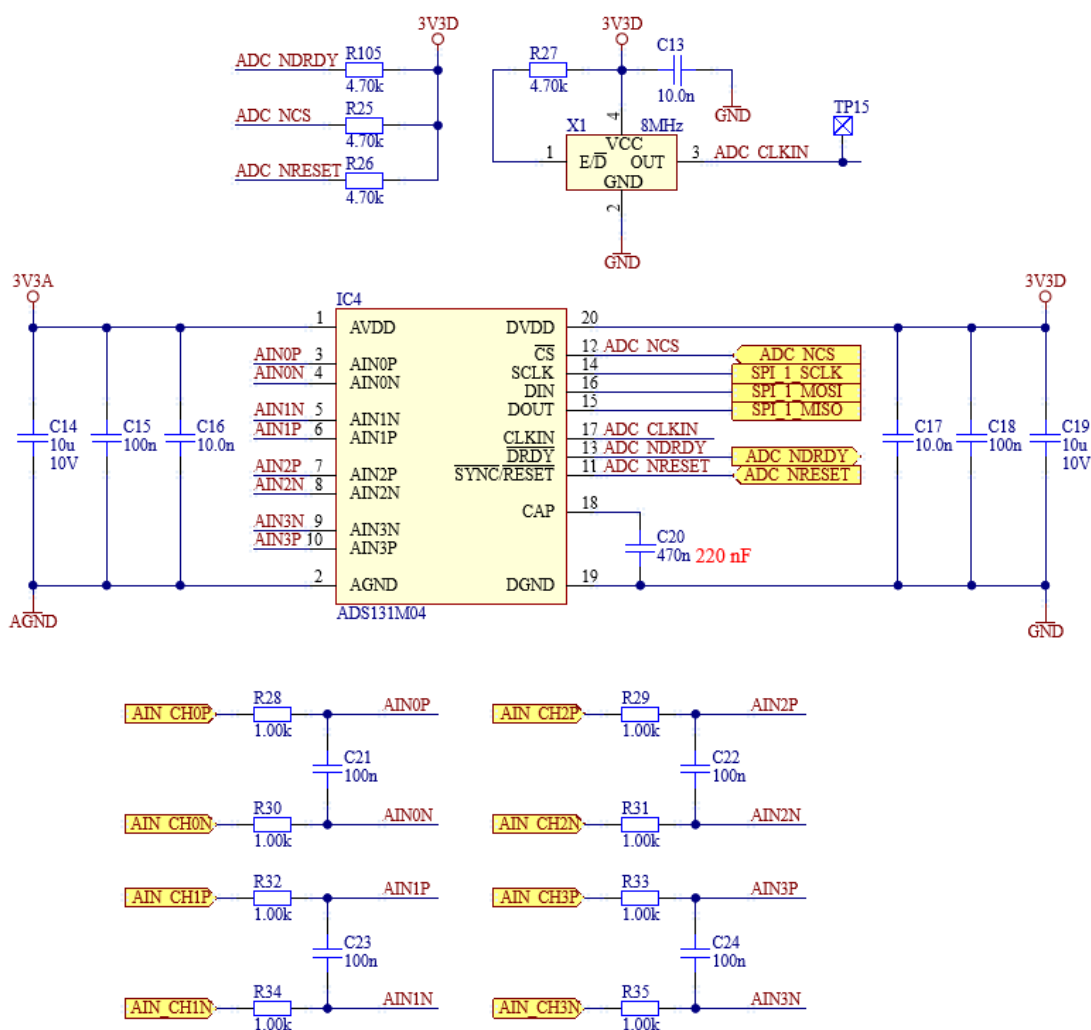
$$n_{(i)} \geq \log_2 \frac{3}{1 \cdot 10^{-4}} \geq 15 \text{ bitů} \quad (4)$$

Z vypočtených požadovaných rozlišení napěťových a proudových vstupů je patrné, že proudové vstupy vyžadují větší rozlišení. Chyba měření však není způsobena jen samotným kvantováním, ale i dalšími vlivy, jako je šum, offset napětí, nelinearita AD převodníku, teplotní drift parametrů operačního zesilovače a ADC atd. Proto lze konstatovat, že zvolením AD převodníku s nejbližším větším rozlišením, než je spočítané, by zadání pravděpodobně nebylo splněno. Nejbližší vyšší standardní rozlišení AD převodníků je 16 bitů.

Na základě provedené rešerše dostupných AD převodníků byl vybrán jako vhodný typ ADS131M04 od výrobce Texas Instruments. Jedná se o precizní 24bitový převodník s komunikačním rozhraním SPI, který obsahuje mnoho funkcí pro snížení náročnosti a ceny návrhu. Disponuje nízkošumovým PGA zesilovačem a delta-sigma převodníkem s digitálním filtrem a integrovanou 1,2V napěťovou referencí. ADS131M04 má čtyři

analogové diferenciální vstupy, na kterých probíhá simultánní vzorkování. Vzorkovací frekvence je nastavitelná na hodnotu až 32 kSps a zesílení PGA je možno nastavit až 128 V/V. Dle katalogového listu je tento AD převodník vhodný pro použití do elektroměrů, jističů, ochranných relé, zařízení pro testování baterií a BMS systémů.

Schéma zapojení AD převodníku je díky integraci většiny funkcí do pouzdra IO relativně jednoduché, a kromě samotného IO bylo nutné připojit pouze krystalový oscilátor o kmitočtu 8,192 MHz, pull-up rezistory definující logické úrovně na signálových vodičích a RC filtry na diferenční vstupy AD převodníku (viz Obr. 9).



Obr. 9: Schéma zapojení AD převodníku ADS131N04

2.2.9 Napěťové vstupy

Protože je celá měřicí karta napájena z USB, tedy napětím +5 V oproti GND, bylo vymyšleno takové řešení analogových obvodů, které si vystačí s nesymetrickým napájením 3,3 V vytvořeným LDO regulátory. Nakonec bylo navrženo zapojení s operačním

zesilovačem, který se řadí do kategorie „single supply fully differential amplifier“. Jedná se o operační zesilovač napájený nesymetrickým napětím 2,7 až 5,4 V, který pracuje v plně diferenciálním režimu a je schopen převést signál ze single-ended na diferenciální. Tato potřeba právě často vzniká v aplikacích, kde je operační zesilovač pracující v diferenciálním módu, ale má pouze nesymetrické napájení. Zvolený operační zesilovač THS4551 od výrobce Texas Instruments má parametr GBP roven 135 MHz, disponuje vlastností negative rail input (NRI) a rail-to-rail output (RRO). Má možnost nastavení výstupního souhlasného napětí v relativně širokém rozsahu, vstupní napěťový offset činí pouze $\pm 175 \mu\text{V max}$, drift vstupního napěťového offsetu je $\pm 1,8 \mu\text{V}/^\circ\text{C}$ a vstupní šum je $3,3 \text{ nV}/\sqrt{\text{Hz}}$. Mezi typické aplikace patří například vstupní obvody 24bitových delta-sigma AD převodníků, diferenciální aktivní filtry či diferenciální transimpedanční zesilovače. [27]

Vybraný operační zesilovač je tedy použit v zapojení aktivního diferenciálního filtru a má nastavený offset výstupního souhlasného napětí přesně na hodnotu jedné poloviny napájecího napětí analogové části AD převodníku.

Navržené schéma zapojení napěťových vstupů je na Obr. 10, kde si lze na vstupu všimnout základní ESD ochrany v podobě TVS diody V16, rezistorů R64, R65, R72 a R73 omezující vybíjecí proud a diody pro svedení případného přepětí.

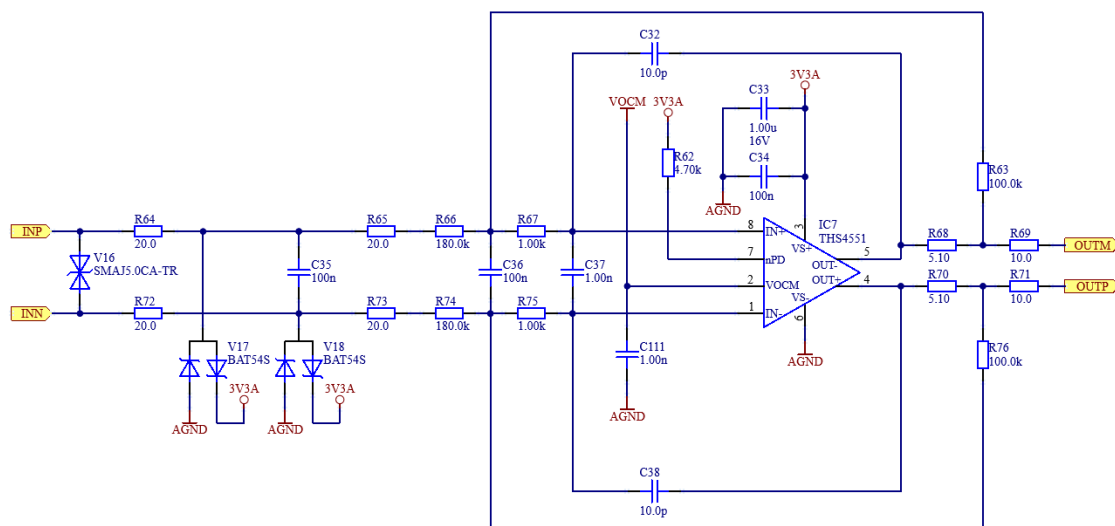
Dále si lze v zapojení všimnout zmíněného diferenciálního zapojení operačního zesilovače. Zvláštní pozornost byla věnována např. rezistorům R63, R66, R76 a R74, které nastavují zesílení (útlum) operačního zesilovače. Musí tedy být velmi přesné, a proto byla měřicí karta osazena rezistory s tolerancí 0,1 %. Hodnoty rezistorů byly určeny ze vztahu pro výpočet zesílení rozdílového zesilovače (5):

$$u_{out} = \frac{R_{63}}{R_{66}} \cdot u_{in(diff)} \quad (5)$$

Protože referenční napětí AD převodníku je 1,2 V a měřený signál může nabývat hodnoty (absolutní) až 2 V, při zvolení rezistoru $R_{63} = 100 \text{ k}\Omega$ je hodnota rezistoru R_{66} :

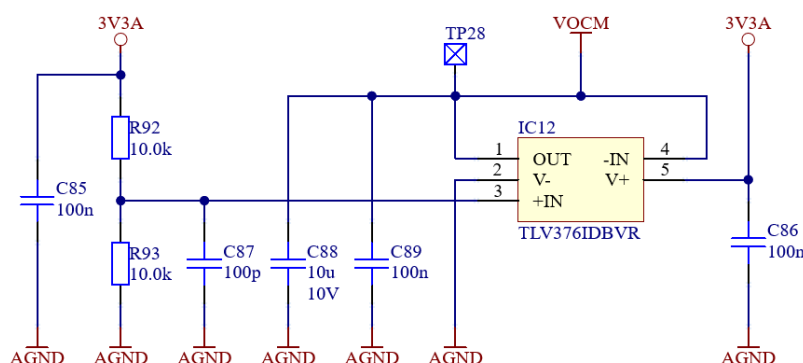
$$R_{66} = R_{63} \cdot \frac{u_{in(diff)}}{u_{out}} = 100 \cdot 10^3 \cdot \frac{2}{1,2} = 166666,7 \Omega \quad (6)$$

Nejbližší vyšší hodnota rezistoru z řady E12 je $R_{66} = 180 \text{ k}\Omega$.



Obr. 10: Schéma zapojení analogového obvodu napěťových vstupů

Ve schématu zapojení si lze také všimnout přivedené napěťové úrovně „VOCM“, která je vytvořena z napájecího napětí 3,3 V napěťovým děličem a napěťovým sledovačem z OZ, která posouvá výstupní napětí o cca 1,65 V, viz Obr. 11.



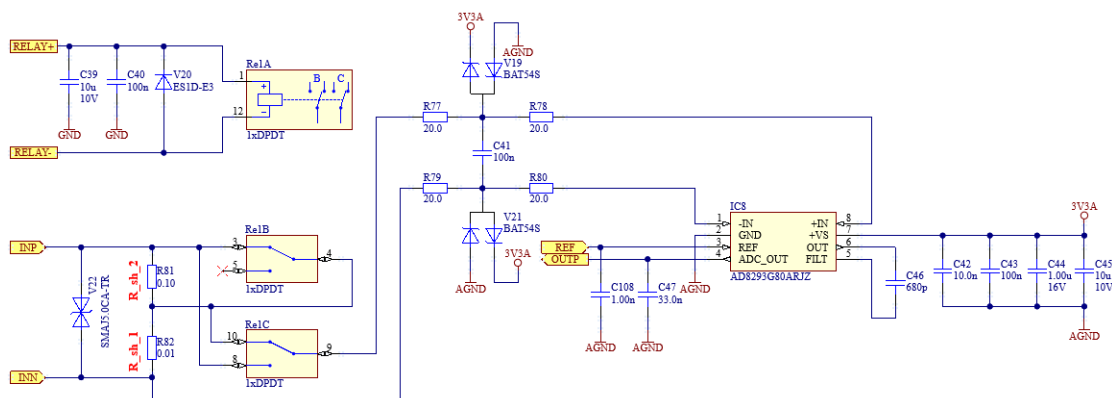
Obr. 11: Obvod napěťového děliče a napěťového sledovače pro vytvoření offsetového napětí VOCM

2.2.10 Proudové vstupy

Měření proudu je realizováno snímacími rezistory. Pro dosažení co nejlepší přesnosti měření bylo zvoleno sériové zapojení dvou shunt rezistorů, díky kterým jsou k dispozici dva rozsahy. Pokud jsou zapojeny oba dva rezistory, vzniká na nich větší úbytek napětí, který lze snadněji měřit v případném okolním šumu. V okamžiku, kdy MCU vyhodnotí, že se blíží překročení spodního rozsahu, dojde k sepnutí relé, které svými kontakty přemostí (zkratuje) rezistor s větší hodnotou odporu, a měřený proud tak již poteče pouze přes jeden rezistor, čímž vznikne menší úbytek napětí. Tento způsob měření proudu (zkratování jednoho rezistoru) byl upřednostněn před způsobem přepínání mezi dvěma různými rezistory, aby v měřeném obvodu nedocházelo ke krátkodobému rozepnutí uzavřeného elektrického

obvodu během přepnutí kontaktů a případnému ovlivnění zjišťovaných vlastností měřených palivových článků.

Signál ze snímacích rezistorů je dále přiveden do operačního zesilovače AD8293G80. Jedná se o operační zesilovač od výrobce Analog Devices určený přímo pro snímání proudů. Vyniká nízkým offsetovým napětím $20 \mu\text{V}$, nízkým napěťovým driftem $0,3 \mu\text{V}/^\circ\text{C}$, nízkým driftem zisku $25 \text{ ppm}/^\circ\text{C}$, velmi nízkým šumem $0,7 \mu\text{V}_{\text{p-p}}$ a rail-to-rail výstupem. Celková přesnost aplikace je podpořena interně nastaveným zesílením o hodnotě 80 a také integrovanými rezistory pro RC filtr. [28] Poměrně velké zesílení umožňuje použití snímacích rezistorů o relativně malé hodnotě odporu, díky čemuž dochází k minimálnímu ovlivnění měřeného systému. Takto upravený signál je následně přiveden přes RC filtr do AD převodníku. Schéma zapojení je zobrazeno na Obr. 12.



Obr. 12: Schéma zapojení analogového obvodu proudových vstupů

Kromě již zmíněné reléové části se zde nachází totožný ochranný obvod proti ESD jako u napěťových vstupů a dále samotný operační zesilovač s kapacitní bankou pro odfiltrování zákmitů na napájecí větvi. Výstupní napětí tohoto operačního zesilovače s výstupem referencovaným proti potenciálu GND je posunuto o napětí $1,2 \text{ V}$ (vytvořené zcela stejným způsobem jako v případě VOCM u napěťových vstupů), aby mohl být měřen kladný i záporný proud. Takto stejnosměrně posunutý signál je dále veden na neinvertující vstup AD převodníku, na kterém je měřen oproti pevně nastavenému napětí $1,2 \text{ V}$ přivedenému na invertující vstup AD převodníku.

2.2.11 Měření teploty

Návrh měřicích obvodů teploty vycházel z požadavku zadání na využití senzorů PT100 (viz Obr. 13).

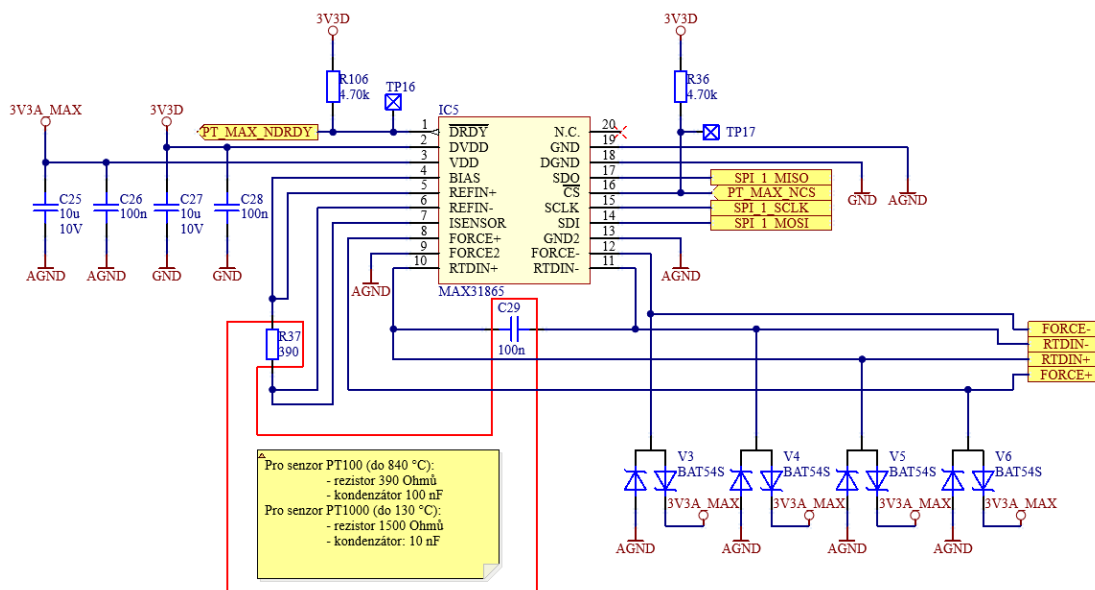


Obr. 13: Dva RTD senzory typu PT100 třídy přesnosti A pro měření teploty

Jak již bylo nastíněno v kapitole 1.4.3 věnované principům měření teploty, existuje několik integrovaných obvodů usnadňujících návrh měřicího systému se standardními senzory díky integraci většiny důležitých prvků do jednoho pouzdra. V rámci tohoto návrhu byl vybrán RTD-digitální převodník MAX31865. Pro realizaci funkčního měřicího systému je nutno připojit k tomuto integrovanému obvodu externí referenční rezistor, s jehož napěťovým úbytkem (tvořícím referenční napětí ADC) je s pomocí integrovaného 16bitového AD převodníku porovnáván napěťový úbytek na platinovém odporovém senzoru. Úbytky napětí jsou zajištěny interním nastavitelným zdrojem konstantního proudu. Právě z důvodu, že externí referenční rezistor slouží k porovnání úbytku napětí s měřicím RTD, je důležitá jeho přesnost a stabilita. Zároveň má návrhář možnost volby hodnoty odporu tohoto referenčního rezistoru v určitém rozmezí (dle katalogového listu konkrétně 350Ω až $10 \text{ k}\Omega$) a díky tomu lze například zvýšit rozlišení měření teploty v případě, že není využit celý měřicí rozsah použitého RTD. Jinými slovy, pokud RTD typ PT1000 použitelný pro rozsah -200 až $+850 \text{ }^\circ\text{C}$ (a tomu odpovídající hodnoty odporu cca 185Ω až 3900Ω) budeme používat pouze do hodnoty $100 \text{ }^\circ\text{C}$, referenční rezistor nemusí mít hodnotu 3900Ω , ale bitový rozsah ADC můžeme využít pouze do hodnoty odporu RTD, která odpovídá hodnotě maximální měřené teploty, tedy v uvedeném příkladu pro $100 \text{ }^\circ\text{C}$ by bylo možné použít referenční rezistor $1,5 \text{ k}\Omega$, protože tato hodnota nepřekračuje hranice stanovené výrobcem integrovaného obvodu.

U této měřicí karty, která bude vyhodnocovat senzory PT100, byl navržen referenční rezistor 390 Ω s tolerancí 0,1 % v SMD pouzdře velikosti 0805.

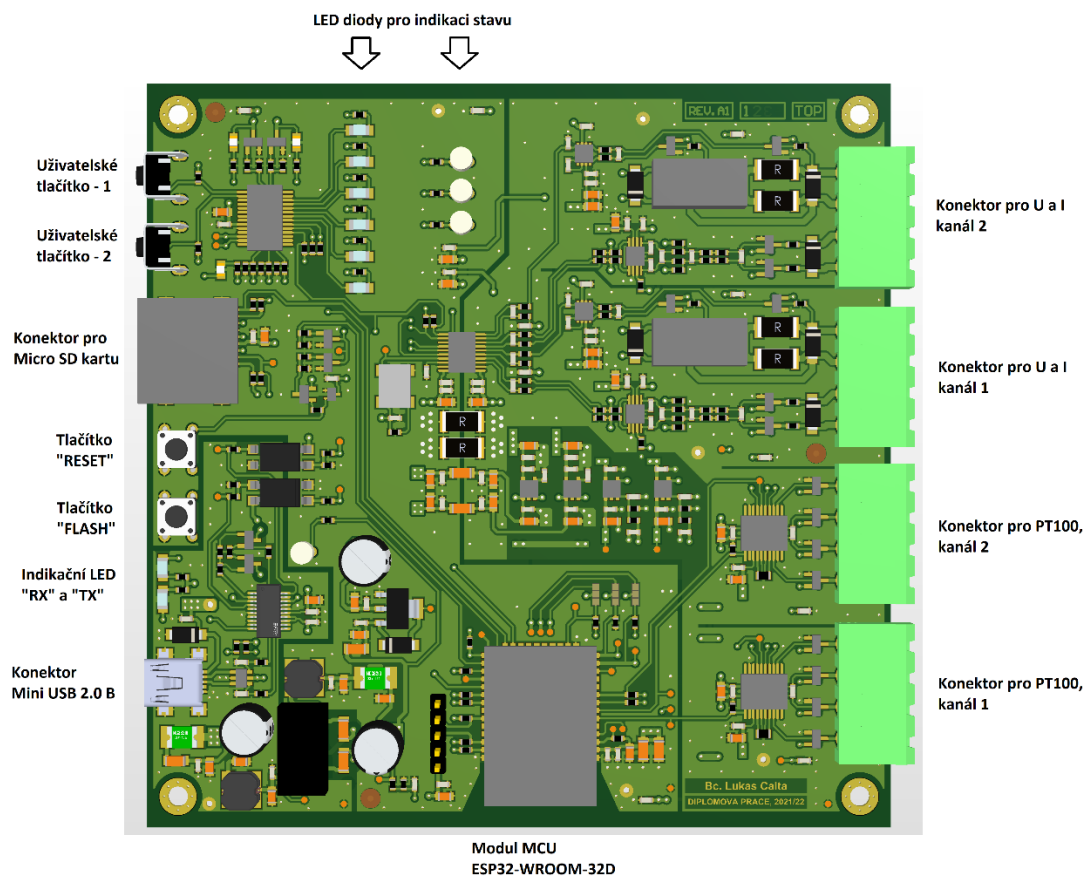
Z důvodu zajištění co největší přesnosti měření teploty byla navržena taková konfigurace zapojení RTD-digitálního převodníku, která umožňuje čtyřvodičové připojení senzoru PT100. Zároveň byly na každý vodič zapojeny dvojité diody BAT54S proti GND i kladnému potenciálu jako minimální ochrana proti ESD. Schéma zapojení je uvedeno na následujícím Obr. 14.



Obr. 14: Schéma zapojení RTD-digitálního převodníku MAX31865 pro čtyřvodičové měření teploty

2.3 Deska plošných spojů

Návrh desky plošných spojů probíhal od samého počátku tak, aby výsledná elektronická sestava mohla být zabudována do průmyslové krabičky. Zároveň byl kladen důraz na logické a praktické rozmístění všech konektorů a dalších prvků, jako jsou ovládací tlačítka či indikační LED diody, viz Obr.15. Jako nejvhodnější řešení se jevílo umístění měřicích konektorů na jednu stranu měřicí karty, přičemž budou vyvedeny úhlově do strany DPS. Ostatní konektory a ovládací tlačítka směřují na opačnou stranu desky plošných spojů. Detailní popis uživatelsky důležitých prvků poskytuje Obr. 15.



Obr. 15: Grafické znázornění navržené DPS s popisem jednotlivých částí

Z hlediska elektronického návrhu byly jednotlivé obvody rozděleny na digitální část – vázanou na nulový potenciál „GND“, a analogovou část – vázanou na nulový potenciál „AGND“. Tomuto oddělení, jehož hlavním cílem je co nejlepší eliminace rušení analogových signálů digitálními, odpovídá také rozmístění těchto obvodů na samotné desce plošných spojů. Mezi další faktory ovlivňující rozmístění komponent na DPS lze zařadit správné umístění modulu mikroprocesoru s anténou ESP32-WROOM-32D, umístění montážních otvorů v každém rohu DPS, případný potřebný volný prostor po stranách pro zasunutí DPS do montážních otvorů v krabičce atd.

Na základě doporučení a díky širokému sortimentu byla z dostupného katalogu výrobce Fischer elektronik vybrána vhodná krabička, která umožňuje vložení elektronického zařízení na DPS o rozměrech 120 mm x 120 mm, proto byly zvoleny tyto rozměry i pro navrhovanou měřicí kartu.

2.3.1 Návrh DPS

Pro návrh desky plošných spojů posloužil propracovaný profesionální nástroj Altium Designer. Protože v daném projektu (zde „Caltal_DP_merici_karta“) je schematická část

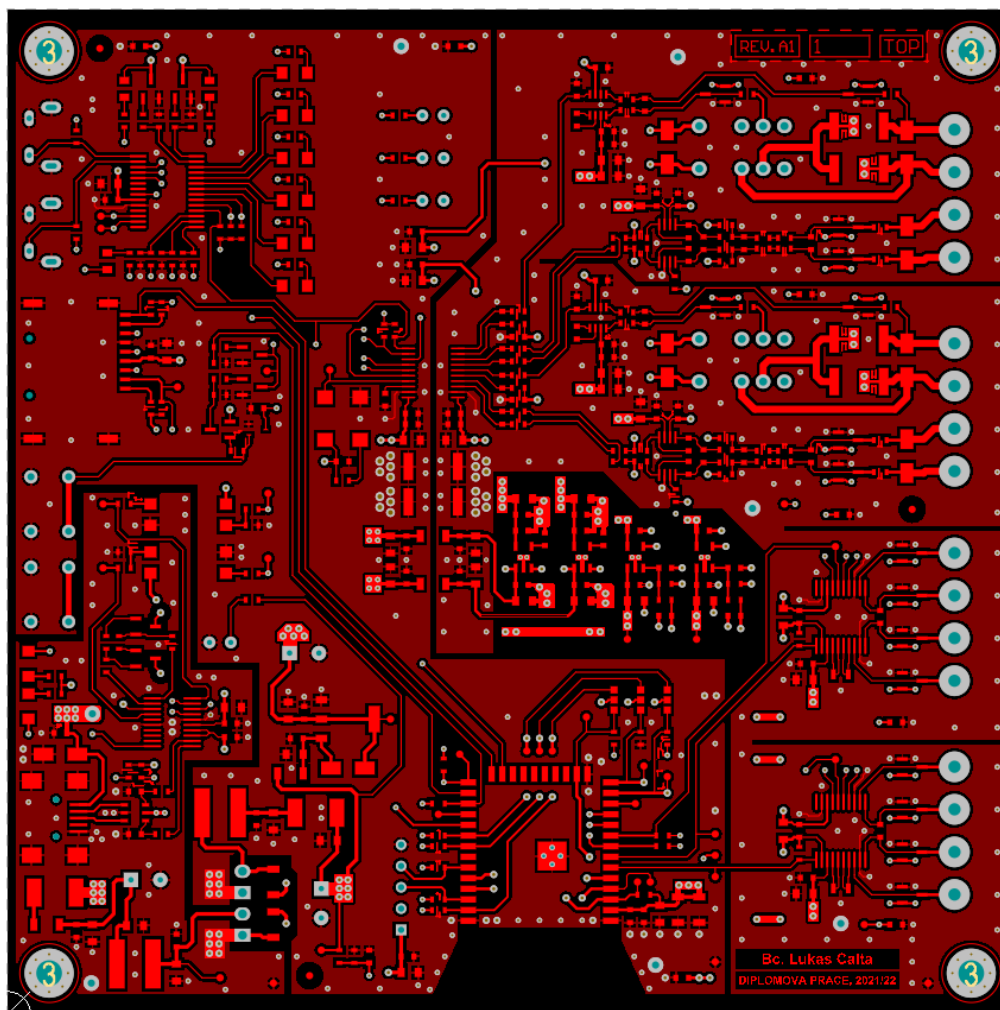
svázána s návrhem DPS, lze v knihovně vytvořit součástku obsahující jak schematickou značku, tak i footprint. Během kreslení schéma zapojení byly využívány jednak součástky dostupné v knihovně ZČU, ale několik dalších součástek (např. konektor pro paměťovou kartu, modul MCU, LDO regulátory a mnoho dalších) nebylo v databázi, a proto musely být nově vytvořeny.

Postup vytváření součástky je takový, že nejprve je nakreslena její schematická značka. Následuje vytvoření footprintu (tzn. rozmístění pájecích plošek dle typu pouzdra součástky), který je standardně doporučen v katalogovém listu výrobce součástky – jsou uvedeny doporučené velikosti i rozteče pájecích plošek a také rozměr pouzdra součástky. Kromě pájecích plošek musí být nakreslen obrys součástky, vytvořen její název, plochy pro nanesení pájecí pasty atd. Každý takový objekt má přidělenou vrstvu (vizuálně odlišenou charakteristickou barvou a názvem), ve které musí být nakreslen, aby výrobce věděl, který prvek je měď, potisk, obrys pro nanesení nepájivé masky atp. Posledním krokem při tvorbě součástky do knihovny je provázání pinů ve schematické značce s kontaktními ploškami footprintu.

Model součástky lze také stáhnout na webech různých prodejců elektronických součástek. Pro zajištění maximální úspěšnosti návrhu je však důležité důkladně zkontrolovat zejména jejich footprint. Vlastní zkušenost potvrdila, že i takto nabízené modely mohou obsahovat chyby. Díky dvěma takovým odhaleným chybám u footprintu součástek (konektor pro SD kartu – posunutí celé řady pájecích plošek, modul MCU – chybná pozice thermal padu) mohly být včas opraveny a zakoupené součástky tak na vyrobenou DPS poté pasovaly.

Po dokončení a důkladné kontrole schématu zapojení byl projekt překlopen do fáze rozmístění všech komponent – nastíněno v kapitole 2.3.

Propojení všech komponent je realizováno na čtyřvrstvé desce plošných spojů o celkové tloušťce 1,6 mm, jejíž vodivé vrstvy nesou název „TOP Layer“ (viz Obr. 16), „Int1 (GND)“, „Int2 (PWR)“ a „Bottom Layer“. Pohled na všechny vrstvy je k dispozici v přílohách (Příloha B – Grafické zobrazení Gerber výstupů navržené DPS). Jak názvy vrstev napovídají, vnitřní dvě jsou určeny pro rozvod napájení, vnější vrstvy jsou zejména signálové. Při pohledu na Obr. 15 je patrné izolační oddělení digitálního (oblast nalevo) a analogového (oblast napravo) zemního potenciálu. Tyto dvě měděné plochy jsou propojeny pouze v jednom místě, a to co nejbližší AD převodníku pro měření napětí a proudu.



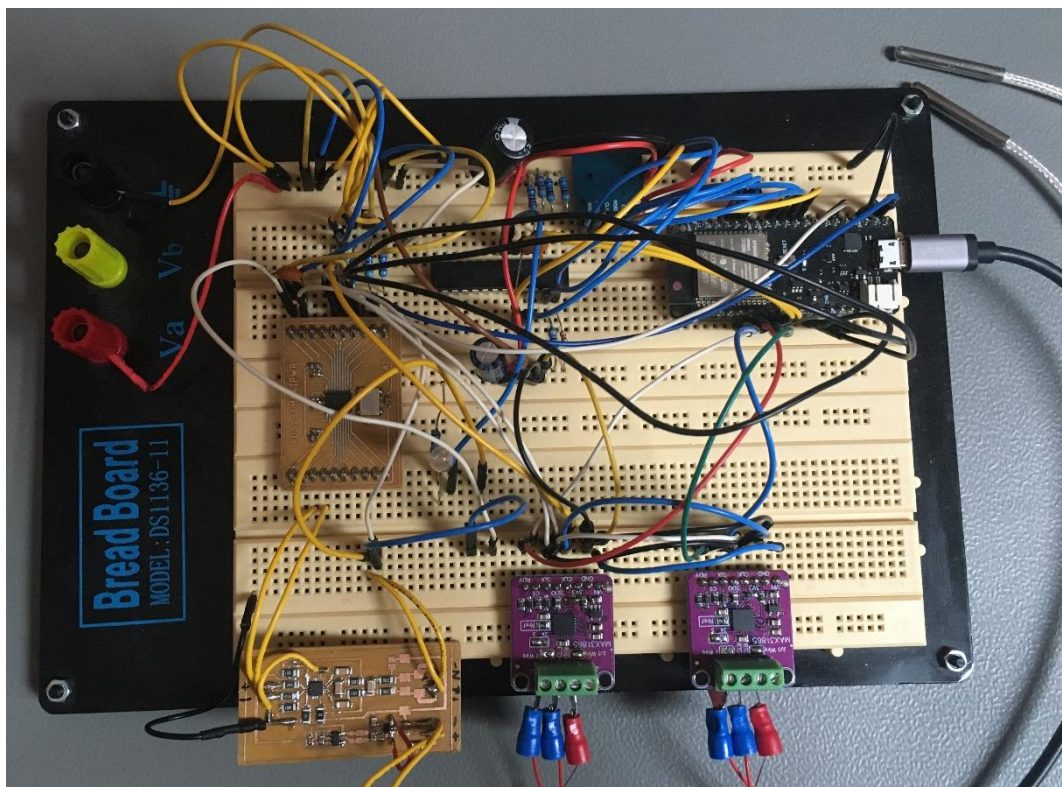
Obr. 16: Náhled na vrstvu mědi „TOP Layer“ navrhované DPS

Při návrhu takto složité desky plošných spojů je důležité důkladné nastavení návrhových pravidel, která zajišťují jejich dodržení (respektive upozorňují návrháře na jejich porušení). Mezi taková základní pravidla patří minimální izolační vzdálenosti, minimální vzájemné vzdálenosti součástek, minimální šířky cest, minimální šířka pájecí masky a mnoho dalších.

Během návrhu DPS bylo dbáno i na dodržení všech důležitých pravidel týkajících se pozicování součástek. Například blokové kondenzátory byly umístěny co nejbližší integrovaným obvodům, přičemž přívod napájení je veden nejprve na kondenzátor a následně na napájecí pin. Přepětové ESD ochrany leží co nejbližší vstupním konektorům, také bylo dbáno na vhodné připojení cest přivádějící proud na snímací rezistory a cest odvádějící signál napětového úbytku (tzn. eliminace napětových úbytků zejména na pájeném spoji). Důraz byl kladen i na správné rozložení proudových smyček v zemních plochách a důkladné propojení jednotlivých vrstev pokovenými otvory.

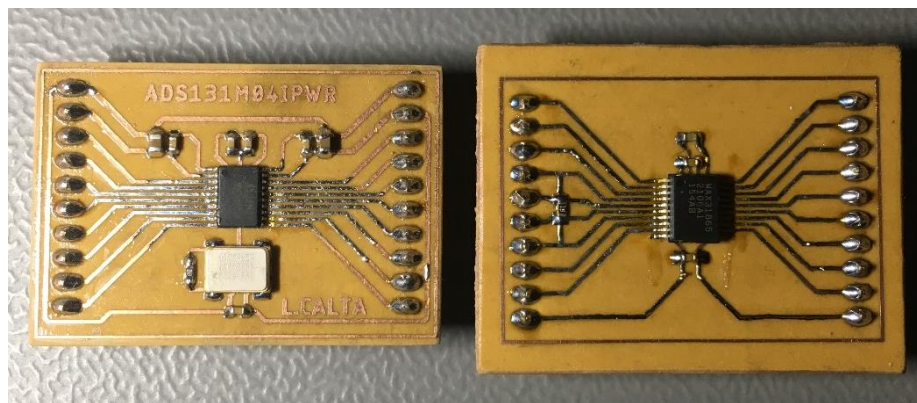
2.4 Průběh realizace měřicí karty

Na začátku vývoje měřicí karty bylo nezbytné znát přesné požadavky na parametry měření, ale zároveň požadavky na fyzické provedení konečného výrobku. Realizace měřicí karty probíhala určitým způsobem paralelně s jejím teoretickým návrhem, kdy navržená dílčí elektronická zapojení byla zapojena na propojovacím nepájivém poli (viz Obr. 17). Cílem bylo praktické ověření funkčnosti zvolených měřicích principů a metod, nikoliv jejich přesnosti.



Obr. 17: Zapojení několika dílčích obvodů měřicí karty na nepájivém propojovacím poli

V případě komponent typu AD převodník a RTD-digitální převodník bylo nutné navrhnout vývojové desky plošných spojů (viz Obr. 18) nesoucí pouze nezbytné součástky. Takto vytvořené vývojové moduly rovněž pomohly k ověření funkčnosti zapojením do nepájivého pole.



Obr. 18: Vlastní vývojové moduly – AD převodník ADS131M04 (vlevo) a RTD-digitální převodník MAX31865 (vpravo)

Samotný vývoj HW poznamenala globální krize týkající se nedostatku elektronických polovodičových součástek. Jako příklad lze uvést fakt, že původní návrh uvažoval jako hlavní měřicí prvek AD převodník ADS1248, který disponoval funkcemi a vhodnými parametry pro měření všech tří veličin (napětí, proudu i teploty). Ve fázi realizace, kdy byl vyroben prototypový modul, zapojený do systému na nepájivém poli a napsán základní obslužný program i s vlastní knihovnou obsahující nezbytné metody pro práci s tímto převodníkem, se součástka stala nedostupnou a musela být vytvořena alternativní varianta návrhu, kdy proběhla významná úprava celého schématu zapojení.

Díky částečné realizaci navrhovaného měřicího systému na nepájivém propojovacím poli mohly být vyřešeny případné problémy se zapojením jednotlivých pinů a komunikačních sběrnic mikrokontroleru. Například proběhlo ověření správné funkce HSPI komunikační sběrnice mikrokontroleru, na které jsou dle návrhu zapojeny dva převodníky senzorů PT100 a AD převodník.

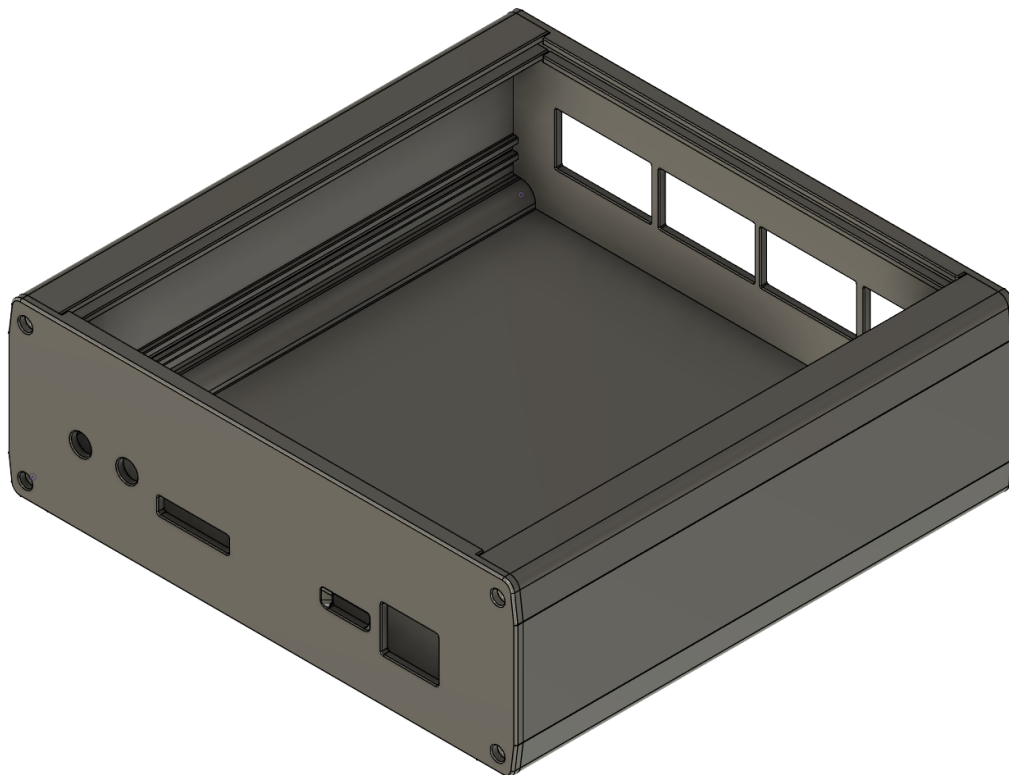
2.5 Ochranný kryt

Po osazení a oživení vyrobené desky plošných spojů měřicí karty následoval návrh a realizace ochranného krytu – krabičky – pro zajištění základní ochrany před poškozením DPS a pohodlnou manipulaci. Návrh krabičky proběhl v nástroji Fusion360 od společnosti Autodesk. Krabička se skládá celkem ze 4 dílů – tělo, přední a zadní štítek a průhledové víko. Tělo a štítky byly vytištěny na 3D tiskárně z PLA šedého filamentu, průhledové víko je vystřižené z 2 mm silné desky polykarbonátu.

Kompletace krytu probíhá tak, že nejprve je pomocí čtyř vrtů do plastu přišroubován zadní štítek. Následně se vsune polykarbonátová destička do drážek v horní části těla

krabičky. Poté lze zasunout DPS (s odpojenými konektory) do drážek ve spodní části krabičky. Nakonec se dalšími čtyřmi vruty připevní čelní štítek.

Díky vystouplým drážkám na předním i zadním štítku je zamezeno nechtěnému prohýbání polykarbonátového víka ve vertikálním směru i samotných štítků ve směru horizontálním. Sestava nakreslená ve Fusion360 je zachycena na Obr. 19.



Obr. 19: Krabička pro měřicí kartu navržena v programu Fusion360

3 Program

Měřicí karta je koncipována tak, že samotné MCU sbírá data z jednotlivých převodníků, na základě uložených koeficientů a vzorců přepočítává získaná data na skutečné hodnoty měřených veličin a ty poté ukládá na paměťovou kartu nebo posílá přes USB sběrnici do PC, kde jsou data dále zpracována. Proto lze softwarovou část rozdělit na „Program pro MCU“ a „Ovládací program v PC“.

3.1 Program pro MCU

Během vývoje softwaru měřicí karty byly otestovány možnosti obou dříve zmiňovaných vývojových prostředí, a to jak Thonny s programovacím jazykem MicroPython, tak Arduino IDE s programovacím jazykem Wiring. I přes velmi přívětivou syntaxi jazyka MicroPython a dostupnost řady užitečných knihoven a balíčků bylo rozhodnuto o realizaci a dokončení celého řídicího SW v prostředí Arduino IDE. Hlavním důvodem pro toto rozhodnutí byl fakt, že existuje znatelně širší podpora v komunitě okolo zvolené platformy a také, že psaní vlastních knihoven nebo úprava volně dostupných knihoven pro vybrané součástky se zpočátku zdálo snazší v prostředí Arduino IDE.

Obsluha jednotlivých komponent mikrokontrolerem probíhá jednak přímo po I/O pinech v režimech „logická 1“ nebo „logická 0“ nebo přes sběrnice typu I²C či SPI, ale také přes 16bitový I/O expandér řízený po zmíněné I²C sběrnici.

Program pro MCU se skládá z několika dílčích částí:

- a) Import knihoven – pro obsluhu některých obvodů byly použity knihovny obsažené v instalačním balíku Arduino nebo volně dostupné knihovny. Jedná se o knihovny:
 - a. Arduino.h
 - b. Wire.h
 - c. SPI.h
 - d. FS.h
 - e. SD.h
 - f. ADS131M04.h (převzato z [29], upraveno)
 - g. MCP23017.h (převzato z [30])
- b) Deklarace konstant
- c) Deklarace proměnných

- d) Vytvoření objektů
- e) Funkce setup
- f) Smyčka loop
- g) Další samostatné funkce

3.1.1 Funkce „setup“

V této funkci jsou nejprve inicializovány sběrnice, následuje nastavení všech využitých pinů mikrokontroleru na vstupní nebo výstupní a definování jejich klidových logických úrovní. Poté jsou volány funkce „setMCP()“ a „setADC()“, které se starají o počáteční nastavení registrů I/O expandéru a AD převodníku. Dále bylo nutné zapnout hardwarové přerušování na pinu, k němuž je připojen výstupní pin I/O expandéru vyvolávající přerušování v okamžiku změny logického stavu registru (tzn. jakéhokoliv ze vstupních pinů). Toto přerušování volá funkci „userBut()“, která nastaví proměnnou „interrupted“ do log. 1 a indikuje tak stisk „nějakého“ tlačítka. Tato změna bude dále zpracována ve funkci „loop“. Poslední volanou funkcí v této části programu je „checkSD()“, která zjistí, jestli je vložena paměťová karta a případně provede její inicializaci.

3.1.2 Funkce „loop“

Tuto hlavní smyčku programu lze rozdělit na několik částí. V první části se nepřetržitě kontroluje, zda jsou na sběrnici UART nějaká nová příchozí data. Pokud ano, je volána funkce „recvCommand()“.

Ve druhé části je odměřována doba od posledního odebraného vzorku odeslaného do PC a v případě, že tato doba je již větší než nastavená vzorkovací perioda a zároveň proměnná typu boolean nazvaná „loggPC“ má hodnotu log. 1 (tzn. že povoluje odesílání dat do PC), je po UART odeslána zpráva s novými naměřenými hodnotami. Obdobnou funkci plní i třetí část, avšak ta zajišťuje ukládání dat s nastavenou periodou na paměťovou kartu, pokud je proměnná „loggSD“ v log. 1 a zároveň pin „SD_CD“, který detekuje vložení MicroSD karty, je v logické nule (stav, kdy je paměťová karta vložena).

Ve čtvrté části je volána funkce „checkBut()“, jejíž algoritmus je inspirován příkladem z knihovny „MCP23017.h“ a následně upraven pro vlastní potřebu. Provádí se zde ošetření zákmitů tlačítek (tzv. debouncing) pomocí zjišťování stavu registrů dvakrát po sobě s daným časovým zpožděním a jejich porovnání. V případě, že dojde ke stisknutí některého tlačítka, ve funkci „if-else“ je poté porovnána hodnota proměnné nesoucí adresu pinu, na kterém došlo ke změně logického stavu, a adresy pinu s připojeným konkrétním tlačítkem.

V případě shody je provedena operace přiřazená právě funkci tohoto tlačítka, například může být změněna hodnota proměnné „loggSD“ na opačnou hodnotu za účelem manuálního spuštění/zastavení ukládání dat na paměťovou kartu.

Jako poslední je zde volána funkce „checkRange()“ zajišťující automatické nastavení správného rozsahu proudových vstupů a kontroly přesažení rozsahu na všech vstupech.

3.1.3 Samostatné funkce

Pro požadovanou funkci měřicí karty a přehlednou strukturu výše popsané hlavní smyčky programu bylo napsáno několik důležitých vlastních funkcí:

- a) `recvBytes()` – Funkce „`Serial.readBytes()`“ přečte příchozí zprávu a uloží do pole proměnných s názvem „`buff`“ typu `char`. Následně je celé pole proskenováno znak po znaku, kdy se ze znaků tvoří textové řetězce, které se ukládají do pole proměnných „`inData`“. V případě, že čteným znakem je „`|`“, jedná se o oddělovač, kterým je zajištěno ukládání příchozí zprávy do další buňky v poli „`inData`“. Pokud přečteným znakem je „`*`“, jedná se o symbol konce zprávy. Ukázka kódu je na Obr. 20.

```
292 void recvBytes()
293 {
294     int p = 0;
295     char buff[100];
296     Serial.readBytes(buff, 100);
297
298     for (int i = 0; i < 100; i++)
299     {
300         if (buff[i] == '|')
301         {
302             p += 1;
303         }
304         else if (buff[i] == '*')
305         {
306             checkCommand(inData[0], inData[1], inData[2], inData[3]);
307         }
308         else
309         {
310             inData[p] = inData[p] + buff[i];
311         }
312     }
313
314     inData[0] = "";
315     inData[1] = "";
316     inData[2] = "";
317     inData[3] = "";
318 }
```

Obr. 20: Ukázka funkce „`recvBytes()`“ v programu pro MCU

- b) `checkCommand()` – Tato funkce provádí kontrolu shody přečtené zprávy s předem definovanými tvary příkazů (textových řetězců) a v případě shody

vykonává operace odpovídající daným shodám (např. přepočítání příchozí hodnoty vzorkovací frekvence na vzorkovací periodu v milisekundách a uložení do proměnné „samplePeriodPC“. Seznam všech ovládacích příkazů je uveden v Tab. 4 v kapitole 3.2 Ovládací program v PC a ukázka kódu je na Obr. 21.

```

320 void checkCommand(String message, String messageVal_1, String messageVal_2, String messageVal_3)
321 {
322     if (message == "OK?")
323     {
324         Serial.println("OK");
325     }
326     else if (message == "GA")
327     {
328         Serial.println(measALL());
329     }
330     else if (message == "LPCon")
331     {
332         loggPC = 1;
333         preferences.begin("card", false);
334         preferences.putBool("loggPC", loggPC);
335         //loggPC = preferences.getBool("loggPC", -1);
336         preferences.end();
337         Serial.println("OK");
338     }
339     else if (message == "T.DCoff")

```

Obr. 21: Ukázka části funkce „checkCommand()“ v programu pro MCU

- c) measAll() – Funkce vrací textový řetězec v přesně definovaném tvaru, kterému bude rozumět i program v PC. Řetězec obsahuje aktuální naměřené hodnoty všech měřicích kanálů. Po zavolání funkce dochází k rychlému navzorkování všech měřicích kanálů (pomocí dalších funkcí) několikrát po sobě (počet vzorků je nastaven v proměnné „numOfSamples“) a uložení do pole proměnných. Tyto hodnoty jsou poté zprůměrovány, díky čemuž jsou eliminovány případné zákmity. Po zprůměrování naměřených hodnot je vytvořen textový řetězec, kde hodnoty jednotlivých kanálů jsou odděleny středníkem a vypsány v pořadí: „ U_1 (10^{-5} V); I_1 (10^{-5} A); U_2 (10^{-5} V); I_2 (10^{-5} A); T_1 (10^{-1} °C); T_2 (10^{-1} °C)“. Důvodem použití podílů jednotek je snadnější následné zpracování hodnot na straně PC.
- d) readADC() – Do pole proměnných „measuredDataADC“ tato funkce ukládá naměřené hodnoty ze čtyř kanálů AD převodníku, které jsou již přepočítány na skutečné hodnoty měřených veličin včetně vynásobení korekčními koeficienty zesílení a odečtení chyby offsetu. Tyto korekční koeficienty byly zjištěny kalibrací. Ukázka kódu je na Obr. 22.

```

544 void readADC() {
545     adcOutput res;
546     while (!adc.isDataReady()) {}
547     if (adc.isDataReady())
548     {
549         res = adc.readADC();
550
551         result = res.ch0;
552         measuredDataADC[0] = (double)(1.2) / (double)(0x7FFFFFFF) * ((double)result) *
553                               ((double)(1.8 + 0.04)) * (U1_G_C) + (U1_O_C);
554         //LED_ch_x(3);
555
556         result = res.ch1;
557         if (range_1 == 0)
558         {
559             measuredDataADC[1] = (double)(1.2) / (double)(0x7FFFFFFF) * ((double)result) *
560                                   ((double)(1.0 / (80.0 * 0.01))) * (I1_UG_C) + (I1_UO_C);
561         }
562         else if (range_1 == 1)
563         {
564             measuredDataADC[1] = (double)(1.2) / (double)(0x7FFFFFFF) * ((double)result) *
565                                   ((double)(1.0 / (80.0 * 0.11))) * (I1_LG_C) + (I1_LO_C);
566         }
567         //LED_ch_x(4);

```

Obr. 22: Ukázka části funkce „readADC()“ v programu pro MCU

- e) readRegRTD(int channelRTD) – Tato funkce slouží pro načtení hodnoty registrů obsahujících výsledek A/D převodu do 8bitových proměnných „reg1“ a „reg2“ a jejich sloučení pomocí bitového posunu do 16bitového tvaru v proměnné „fullreg“. Poté je ještě hodnota uložena do proměnné „resistance“ typu double. Pro správné měření je nutno nejprve provést nastavení některých registrů převodníku. Např. „config registr“ s adresou 0x80 je potřeba nastavit na hodnotu 0xA3, čímž je převodník nastaven na čtyřvodičové připojení RTD senzoru. Celá obsluha převodníku je realizována bez použití knihovny a je založena na práci s metodami třídy SPI, např. SPI.beginTransaction(), SPI.transfer() atd.
- f) convertToTemperature() – Na základě hodnoty A/D převodu uložené do proměnné „resistance“ v předchozí funkci je zde proveden přepočítání na skutečnou hodnotu měřené teploty.
- g) logToSD(String dataToLogg) – Funkce zajišťující uložení textového řetězce na paměťovou kartu. Je zde využita funkce „appendFile()“ dostupná v knihovně v instalačním balíku Arduino, která otevře soubor obsahující naměřená data a na jeho konec přidá další řádek textu.
- h) checkRange() – Zmíněná funkce zajištění změny rozsahu je realizována tak, že při každém jejím zavolání je nejprve provedena funkce „readADC()“ pro zjištění aktuálních hodnot na vstupech. Dále je ve strukturách „if-else“ rozlišeno několik důležitých stavů, které mohou nastat. Pokud je aktuálně nastavený spodní rozsah

(relé sepnuto) a zároveň měřená hodnota proudu je větší než 125 mA, dojde ke změně rozsahu na větší rozepnutí relé (přepsáním hodnoty registru I/O expanderu). Pokud je naopak aktuální nastavený horní rozsah a zároveň hodnota měřeného proudu je menší než 120 mA, sepnutím relé je nastaven rozsah spodní. Zde si lze všimnout menší hystereze (5 mA), která zajišťuje, aby nedošlo k nechtěnému nekontrolovanému rozkmitání relé na mezní hodnotě proudu pro spodní a horní rozsah. Třetím možným stavem je překročení maximálního rozsahu, tedy stav, kdy je nastaven horní rozsah a hodnota měřeného proudu je vyšší než 1,5 A. V tomto okamžiku dochází k odeslání varovné zprávy po UART. Obdobným způsobem je hlídáno překročení rozsahu napěťových vstupů (mezní hodnota napětí 2 V).

3.2 Ovládací program v PC

Program v PC byl navržen v prostředí LabVIEW za účelem jednoduchého a intuitivního ovládání vyrobené měřicí karty a přehledného zobrazování měřených hodnot. Měřicí kartu lze ovládat příkazy v podobě textových řetězců s předem definovaným formátem odesílaných přes UART. V následující Tab. 4 jsou uvedeny všechny definované příkazy.

Tab. 4: Seznam příkazů pro ovládání měřicí karty

Zpráva	Funkce
"OK?*"	Ověřit funkčnost komunikace
"GA*"	Vyžádání jednoho vzorku ze všech kanálů
"LPCon*"	Spustit odesílání dat do PC s předem nastavenou periodou
"LPCoff*"	Zastavit odesílání dat do PC
"LSDon*"	Spustit ukládání dat na SD s předem nastavenou periodou
"LSDoff*"	Zastavit ukládání dat na SD
"FPC [hodnota]*"	Nastavení vzorkovací frekvence pro PC
"FSD [hodnota]*"	Nastavení vzorkovací frekvence pro SD
"VCC*"	Změřit hodnotu napájecího napětí a odeslat do PC
"FN [název souboru]*"	Nastavení nového názvu souboru na SD
"PAR [frekvence vzorkování pro PC] [frekvence vzorkování pro ukládání na SD] [název souboru na SD]*"	Nastavení vzorkovací frekvence pro PC i SD a názvu souboru na SD v jednom příkazu (využito v LabVIEW)

V Tab. 4 si lze všimnout, že některé příkazy jsou čistě ovládací, některé slouží pro nastavení určitého parametru v měřicí kartě a obsahují tak ještě za samotným příkazem hodnotu oddělenou oddělovačem „|“. Jeden příkaz je víceparametrový a slouží pro nastavení všech tří základních parametrů v jedné zprávě. Každý příkaz, aby byl platný, musí být ukončen znakem „*“.

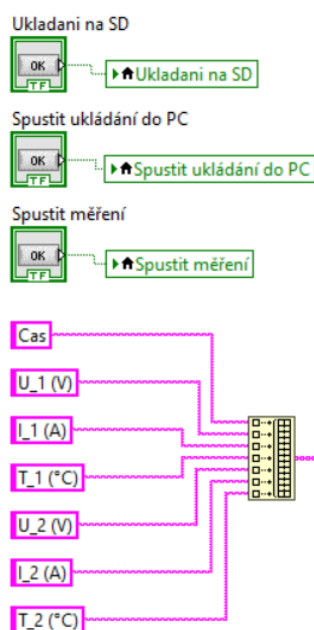
Detailnímu popisu ovládacího softwaru jsou věnovány následující dvě kapitoly, z nichž jedna pojednává o samotném programu (Block diagram) a druhá o uživatelském rozhraní (Front panel).

3.2.1 Block diagram

Hlavní program („MeasCard.vi“) lze obdobně jako u firmwaru MCU rozdělit na několik částí, které jsou po spuštění programu vykonány postupně jedna po druhé.

První část programu

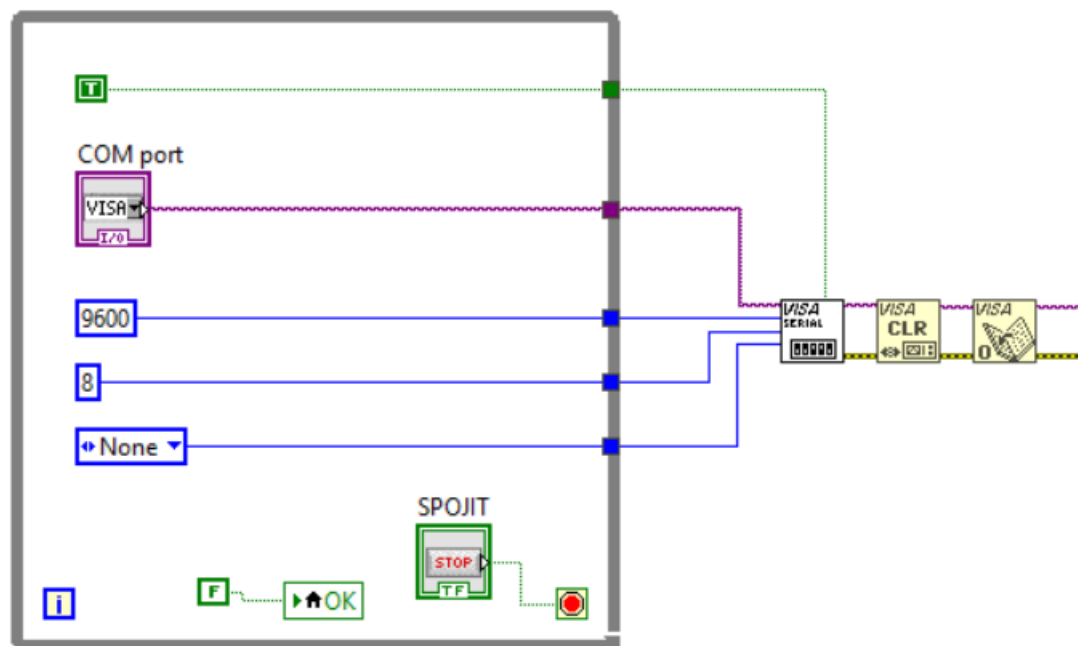
V první části (viz Obr. 23) jsou vytvořeny tři lokální proměnné propojené s výstupním logickým signálem tří hlavních ovládacích tlačítek. K těmto proměnným typu boolean je přístupováno v dalších částech programu. Dále je zde definováno několik konstant textových řetězců (např. „Cas“, „U_1 (V)“ atd.), ze kterých je s využitím funkčního bloku „Build Array“ vytvořeno pole. Výstupní textové pole slouží v další části programu pro zápis hlavičky v souboru pro ukládání naměřených dat. Po vykonání těchto prvních instrukcí program vstupuje do další části.



Obr. 23: První část programu – vytvoření konstant a proměnných

Druhá část programu

Druhá část programu obsahuje několik konstant a jednu proměnnou pro nastavení parametrů využití komunikační sběrnice UART (komunikační rychlost, počet přenášených bitů atd. – viz Obr. 24). Proměnná, kterou uživatel může libovolně měnit ve front panelu, má podobu rozbalovacího seznamu a vždy jsou v ní uvedeny všechny dostupné COM porty. Tato druhá část programu je uzavřena ve while cyklu s podmínkou ukončení v případě stisknutí tlačítka „SPOJIT“. Díky použití while cyklu nedojde po zapnutí programu ihned ke spojení s předvoleným COM portem, ale obsluha má možnost vybrat správný port. Následně může být stisknuto tlačítko „SPOJIT“ a program předává nastavené konstanty a proměnnou do funkčního bloku „VISA Configure Serial Port VI“. Jak již název bloku napovídá, dochází v něm ke konfiguraci sériového portu a výstupem je jedinečný identifikátor odkazující na relaci I/O zařízení, se kterým VI komunikuje. Druhým výstupem je kanál pro chybové hlášení. Následuje (pouze z preventivních důvodů) blok „VISA Clear“ a za ním blok „VISA Open“ který zahajuje komunikaci se zařízením specifikovaným v identifikátoru.



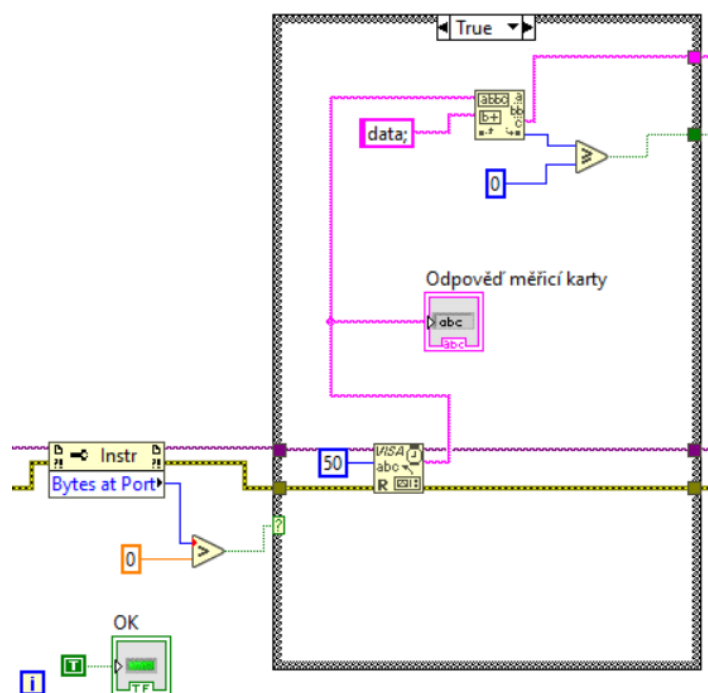
Obr. 24: Druhá část programu – nastavení parametrů a inicializace UART

Třetí část programu

Třetí a zároveň hlavní část programu je také uzavřena ve while cyklu, který běží až do okamžiku, kdy uživatel stiskne tlačítko „STOP“, čímž ukončuje běh celého programu. Uvnitř tohoto cyklu lze provádět veškeré interakční úkony s měřicí kartou, jako je nastavování jejích parametrů, spouštění či zastavování měření atp., a také je zde nastavena vizualizace naměřených dat a možnost výběru cesty k souboru pro ukládání dat.

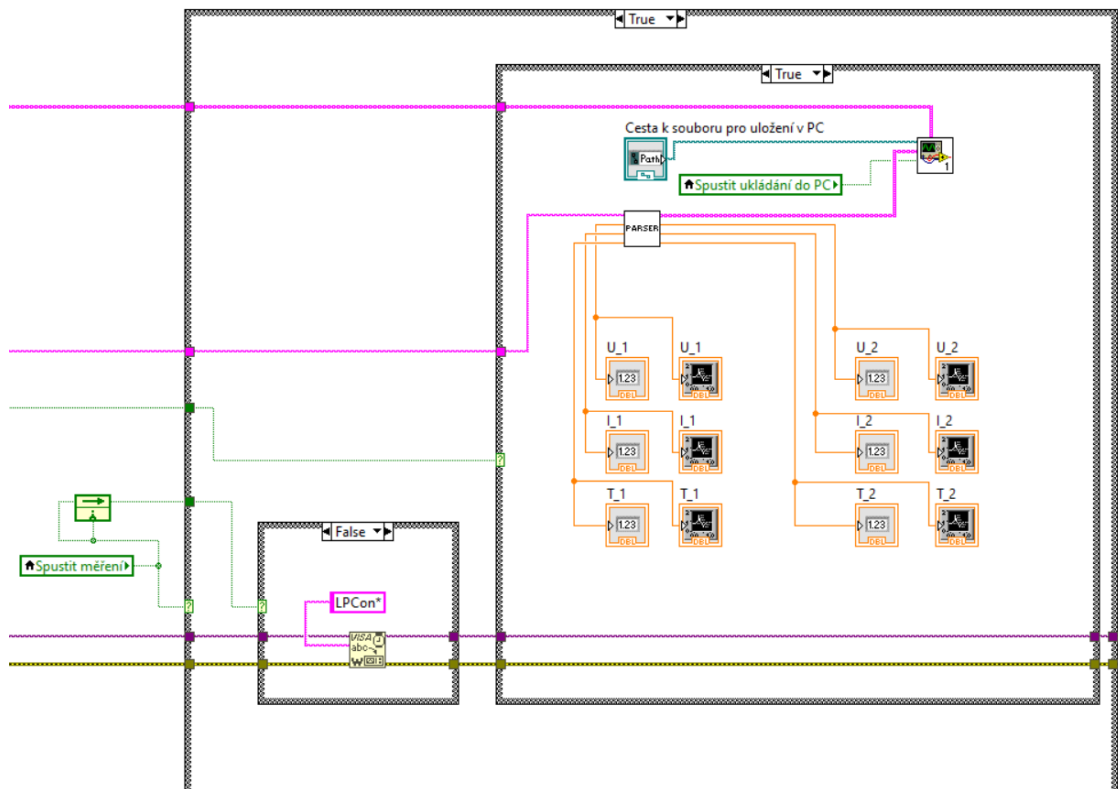
Hlavními bloky, které rozhodují o běhu programu, jsou zde tři tzv. case struktury. Na jejich vstup je připojen signál, který může nabývat určitých (předem známých) stavů. Každému takovému stavu (zapsanému v hlavičce této struktury) odpovídá v case struktuře jeden scénář, který je vykonán právě v okamžiku rovnosti hodnoty vstupního signálu a hodnoty uložené v hlavičce struktury.

Na samém počátku této hlavní while smyčky je umístěn blok, zjišťující, zda jsou na sběrnici přítomna nějaká data, a pokud jsou, na svém výstupu vypíše počet dostupných bytů. Tato hodnota je porovnána s konstantou o hodnotě nula. Výsledkem je logická nula nebo jednička přivedená do první case struktury. Program umístěný v této první case struktuře (viz Obr. 25) zajišťuje příjem dat přicházejících po UART sběrnici pomocí bloku „VISA Read“, pokud je vstupní signál ve stavu „True“. Blok „VISA Read“ předává na svůj výstup textový řetězec příchozí zprávy, který je vypsán do informačního panelu a zároveň je s pomocí bloku „Match Pattern“ vyhodnoceno, zda se jedná o balík naměřených dat opatřený na prvním místě identifikačním textem „data“, nebo o jinou zprávu. V případě že se jedná o naměřená data, je tento fakt indikován výstupním signálem True (odeslaným do další části programu) a zároveň je na výstupu textový řetězec s naměřenými daty (již bez identifikačního textu „data“) pro následné rozparsování. V případě stavu „False“ není v této case struktuře vykonán žádný příkaz.



Obr. 25: Třetí část programu – zpracování příchozích zpráv na UART

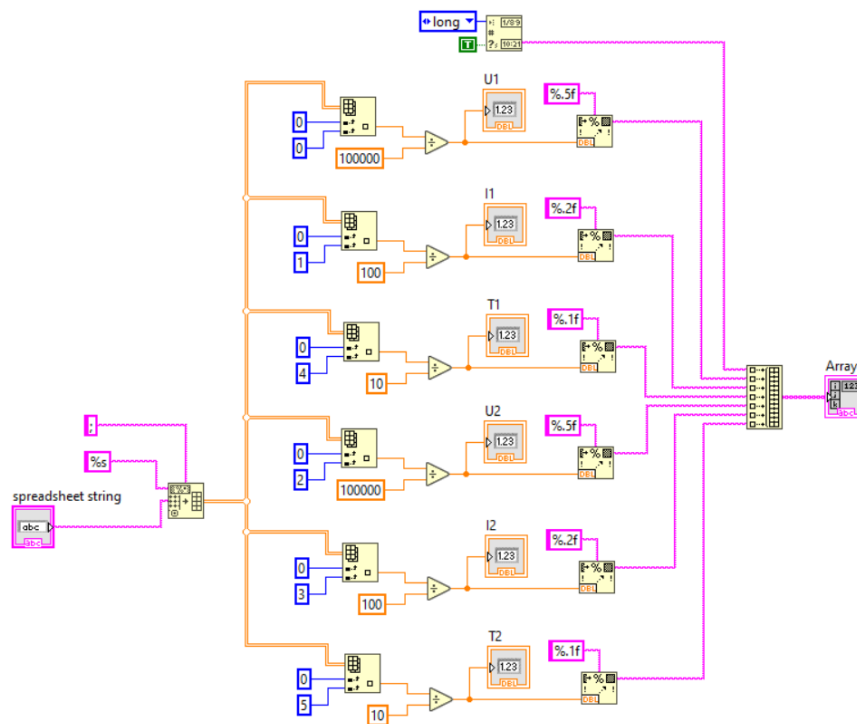
Na první zmíněnou navazuje druhá case struktura (viz Obr. 26), která na svém vstupu také rozeznává logický stav True nebo False, odpovídající zapnutému nebo vypnutému stavu uživatelského tlačítka „SPUSTIT MĚŘENÍ“ s mechanickou funkcí přepínání stavu při jeho stisku. Do této case struktury vedou další signály, které jsou uvnitř zpracovány: dříve uvedený logický signál, indikující, zda přišla naměřená data; samotná naměřená data; textový řetězec s hlavičkou do souboru pro ukládání dat a další logický signál, který poskytuje informaci o stavu tlačítka z předchozího cyklu programu.



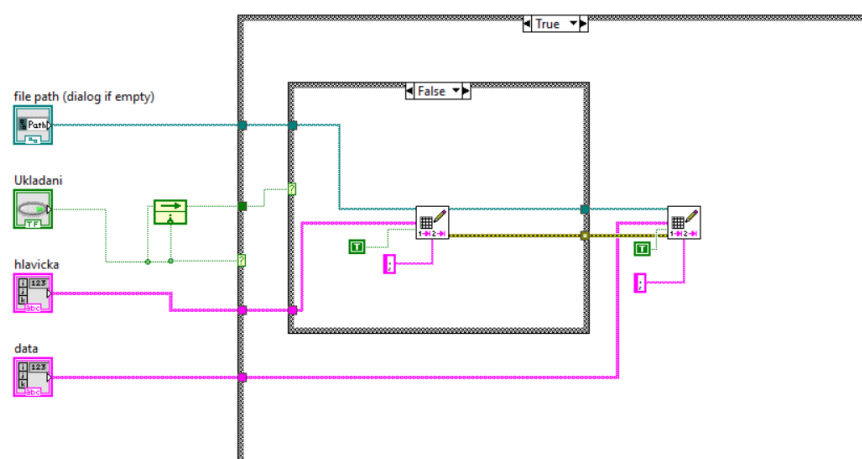
Obr. 26: Třetí část programu – program vykonávaný při spuštěném měření

Pokud je vstupní logický signál True, tak uvnitř této struktury jsou vstupní hodnoty zpracovány ve dvou case strukturách. V první z nich je vyhodnoceno, zda právě došlo ke stisku tlačítka „SPUSTIT MĚŘENÍ“ (tedy aktuální logický stav a stav z předchozího cyklu je odlišný). Pokud ano, je odeslán po UART sběrnici příkaz, aby měřicí karta začala vzorkovat a odesílat data do PC. Pokud ne, jedná se již o druhý nebo další cyklus od spuštění měření a příkaz se neodesílá. Ve druhé z case struktur jsou zpracovány naměřené hodnoty s využitím dvou SubVI – „MeasCard_Parser.vi“ (viz Obr. 27) a „MeasCard_SaveData.vi“ (viz Obr. 28). Parser zajišťuje rozdělení textového řetězce na jednotlivé hodnoty a jejich převod na formát double s definovaným počtem desetinných míst. Tyto hodnoty jsou jednak přivedeny na indikační panely pro zobrazení ve front panelu a zároveň uloženy do pole a

opatřeny časovým razítkem ve formátu hh:mm:ss. Pokud je stisknuto uživatelské tlačítko „UKLÁDÁNÍ DO PC“, je využito SubVI pro uložení dat. Zde, pokud bylo stisknuto tlačítko „UKLÁDÁNÍ DO PC“ poprvé (vyhodnoceno obdobným způsobem jako při spouštění měření), je do souboru v uživateli nastavené cestě uložena hlavička. V případě opakovaného stisku tlačítka pro zapnutí ukládání dat do stejného souboru je pokaždé zapsána nová hlavička pro vizuální oddělení jednotlivých měření.

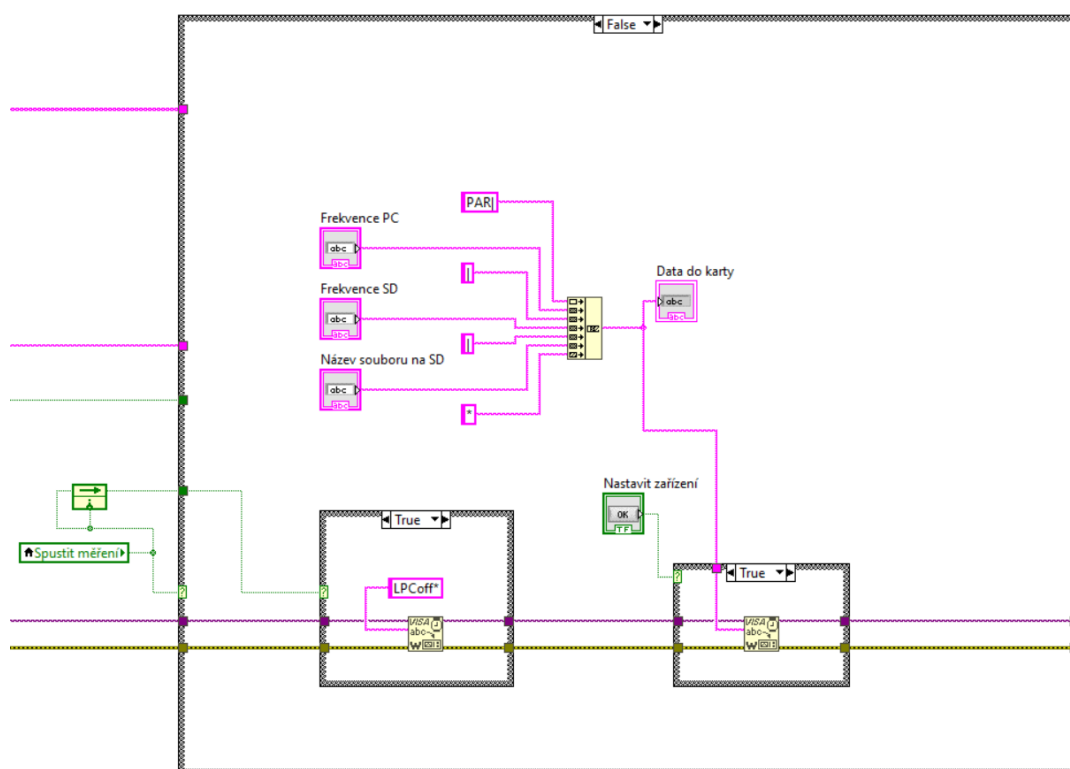


Obr. 27: SubVI: „MeasCard_Parser“



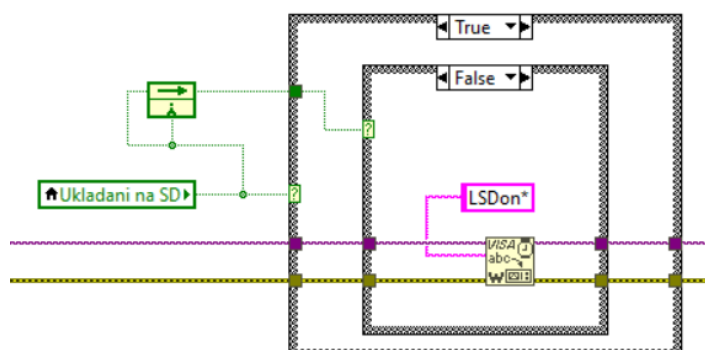
Obr. 28: SubVI: „MeasCard_SaveData“

Pokud je tlačítko „SPUSTIT MĚŘENÍ“ ve stavu False (měření vypnuto), case struktura odešle (pouze v prvním cyklu po vypnutí tlačítka tlačítka) příkaz po UART, aby měřicí karta přestala odesílat naměřené hodnoty. Dále uživatel v tomto vypnutém stavu (který lze nazvat „Stand-by“) může zapisovat a tlačítkem „NASTAVIT“ odesílat parametry, jako je vzorkovací frekvence pro PC/SD či název souboru na SD, do měřicí karty. Tato část programu je na Obr. 29.



Obr. 29: Třetí část programu – stav při vypnutém měření

Třetí vnořená case struktura v hlavní while smyčce zajišťuje odeslání příkazu pro zapnutí/zastavení ukládání dat na paměťovou kartu do měřicí karty – viz Obr. 30.



Obr. 30: Třetí část programu – spuštění ukládání na SD kartu

3.2.2 Front panel

Front panel je jinými slovy grafické uživatelské rozhraní. To znamená, že obsahuje všechny důležité prvky, kterými se program ovládá anebo naopak jejichž prostřednictvím program zobrazuje stav systému. Uživatelské rozhraní vycházející z programu popsaného v předchozí kapitole je vizuálně rozděleno na tři bloky orientované horizontálně vedle sebe.

První blok (viz Obr. 31) byl pojmenován „NASTAVENÍ“ a jsou v něm umístěna všechna pole obsahující určitý uživatelský vstup – výběr COM portu, cesta k souboru pro ukládání hodnot, frekvence vzorkování či název souboru na SD. Doplňujícím oknem je okno „Zpráva pro kartu“, ve kterém se zobrazuje textový řetězec, který bude po stisknutí tlačítka odeslán. Dále se zde nacházejí dvě tlačítka – „SPOJIT“ a „NASTAVIT“. Funkce obou tlačítek byla popsána v přechozí kapitole. Po odeslání parametrů do měřicí karty a jejich zpracování karta odesílá zpětnou vazbu, která informuje, zda nastavení proběhlo v pořádku, případně jaký je aktuální stav nebo že příkaz není definován. Pro zobrazení těchto informací slouží textové okno pojmenované „Odpověď měřicí karty“. Posledním oknem je „Chybové hlášení“, které oznamuje případnou chybu v běhu programu nebo její kód.

Obr. 31: Grafické uživatelské rozhraní – blok "NASTAVENÍ"

Prostřední blok s názvem „MĚŘENÍ“ (viz Obr. 32) obsahuje číslicové indikátory zobrazující aktuálně měřené hodnoty na všech měřicích vstupech. Tyto indikátory jsou uspořádány do tabulky a přehledně popsány. Napěťové indikátory zobrazují hodnoty s rozlišením 1 mV, proudové s rozlišením 0,1 mA a teplotní s rozlišením 0,1 °C. Pod těmito indikátory jsou umístěna celkem čtyři tlačítka. Tlačítko „SPUSTIT MĚŘENÍ“ je v neaktivním stavu šedě podbarvené a po jeho stisknutí a spuštění měření indikuje tento stav oranžovým podbarvením. Tlačítko „UKLÁDÁNÍ DO PC“, stejně jako tlačítko „UKLÁDÁNÍ NA SD“, je v neaktivním stavu také šedě podbarveno a v případě, že bylo stisknuto a dochází k ukládání dat, je podbarveno zeleně. Čtvrté tlačítko „STOP“ zastavuje běh celého programu.

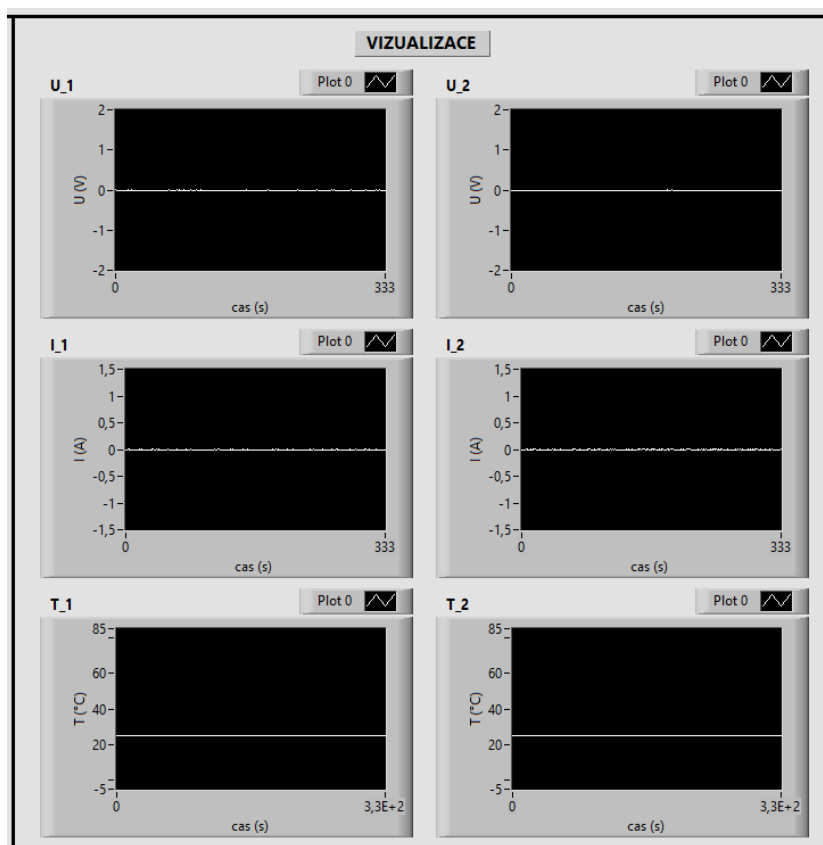
MĚŘENÍ		
	Kanál 1	Kanál 2
Napětí (V)	0,000	0,000
Proud (mA)	0,0	0,0
Teplota (°C)	24,8	24,9

UKONČIT MĚŘENÍ
UKLÁDÁNÍ DO PC
UKLÁDÁNÍ NA SD

Zastavit program
STOP

Obr. 32: Grafické uživatelské rozhraní – blok "MĚŘENÍ"

Třetí blok „VIZUALIZACE“ (viz Obr. 33) zaznamenává v jednotlivých grafech časový průběh měřených hodnot na každém kanálu. Svislé osy mají defaultně nastavené pevné měřítko, které má uživatel možnost nastavit na režim „AutoScale“. Časové osy jsou defaultně v režimu „AutoScale“.



Obr. 33: Grafické uživatelské rozhraní – blok "VIZUALIZACE"

Posledním krokem při vývoji ovládacího SW bylo vygenerování snadno přenositelného spustitelného souboru „MeasCard.exe“. Pohled na celé okno naprogramovaného GUI je na Obr. 34.



Obr. 34: Grafické uživatelské rozhraní – program spuštěn, připojena měřicí karta, nastaveny požadované parametry a spuštěno měření i ukládání do souboru v PC

4 Kalibrace a ověření reálných parametrů

Po osazení desky plošných spojů a odladění programu pro MCU i ovládacího programu v PC mohlo být přistoupeno ke kalibraci a následnému ověření přesnosti měřicí karty.

4.1 Metody kalibrace

4.1.1 Napět'ové vstupy

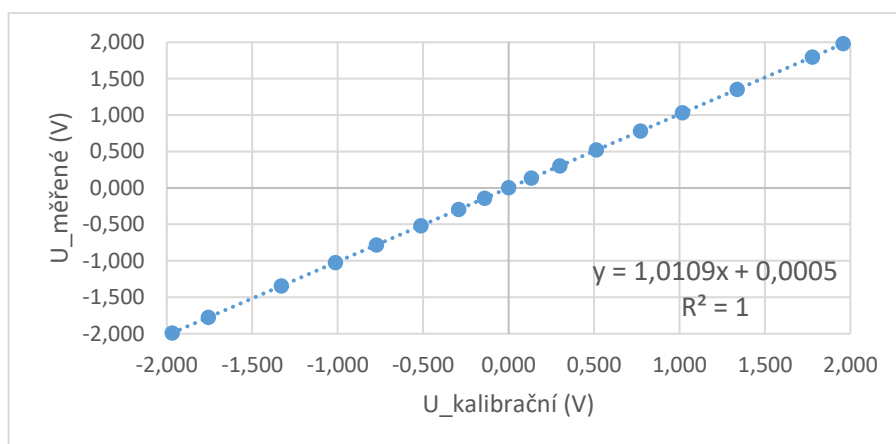
Pro stanovení kalibračních konstant napět'ových vstupů byl sestaven obvod umožňující nastavení napětí v rozsahu $\pm 2 V$. Díky použití lithiového článku o jmenovitém napětí 3,6 V jako zdroje napětí došlo k minimalizaci vnášení šumu do měřeného signálu. Tento zdroj napětí napájel trimr o jmenovité hodnotě 4,7 k Ω , jehož laděním bylo následně nastavováno napětí v požadovaném rozsahu. K takto realizovanému regulovatelnému zdroji napětí o minimálním šumu byl paralelně připojen napět'ový vstup měřicí karty i vstup digitálního kalibračního voltmetru Keithley DAQ6510. V celém rozsahu bylo postupně nastavováno napětí a odečítány a zapisovány údaje z kalibračního voltmetru (např. U_{I_kal}) a zároveň z indikátorů v ovládacím programu měřicí karty (např. $U_{I_měř}$) – viz Tab. 5. Z takto získaných hodnot byly dále sestrojeny závislosti (kalibrační charakteristiky), kde byla na vodorovné ose vynesena skutečná (kalibrační) hodnota a na svislé ose kartou měřená hodnota.

Kalibrační charakteristika napět'ového vstupu 1 (viz Obr. 35) byla proložena lineární funkcí, jejíž předpis je vidět v grafu. Směrnice přímky má hodnotu $k = 1,0109$, což znamená, že měřicí karta nyní ukazuje větší hodnotu, než je skutečná. Proto musí být původní vypočtená hodnota v měřicí kartě vydělena tímto lineárním koeficientem. Absolutní člen indikuje kladný offset vstupu, proto ve výpočtu skutečného napětí musí být hodnota o 0,0005 V snížena.

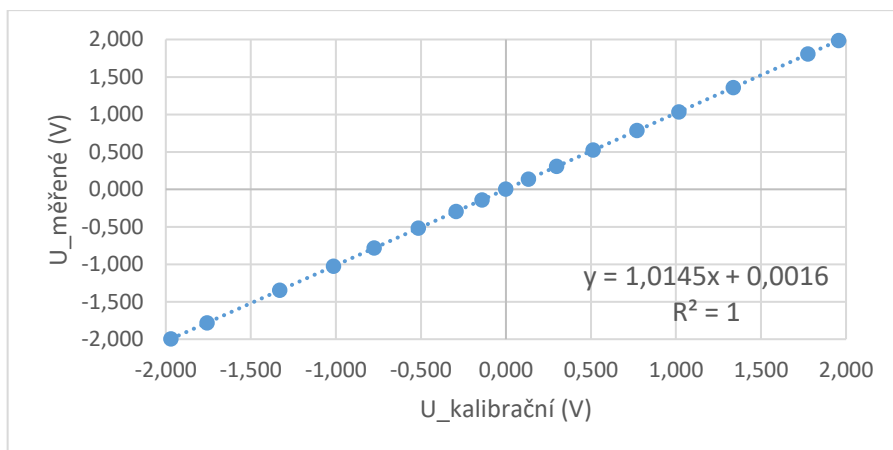
Kalibrační charakteristika druhého napět'ového vstupu (viz Obr. 36) má po lineárním proložení směrnici $k = 1,0145$ a offset 0,0016 V.

Tab. 5: Naměřené hodnoty při kalibraci napěťových vstupů měřicí karty

U_{I_kal} (V)	$U_{I_měř}$ (V)	U_{2_kal} (V)	$U_{2_měř}$ (V)
-1,969	-1,990	-1,969	-1,996
-1,757	-1,777	-1,757	-1,782
-1,330	-1,344	-1,330	-1,348
-1,014	-1,025	-1,014	-1,027
-0,774	-0,782	-0,774	-0,784
-0,5136	-0,5189	-0,5136	-0,5197
-0,2922	-0,2949	-0,2922	-0,2949
-0,1402	-0,1411	-0,1402	-0,1406
0,0000	0,0008	0,0000	0,0019
0,1331	0,1346	0,1331	0,1364
0,2985	0,3031	0,2985	0,3054
0,5128	0,5195	0,5128	0,5224
0,771	0,780	0,771	0,784
1,017	1,029	1,017	1,034
1,337	1,353	1,337	1,359
1,777	1,796	1,777	1,804
1,957	1,978	1,957	1,986



Obr. 35: Kalibrační charakteristika napěťového vstupu kanálu 1



Obr. 36: Kalibrační charakteristika napětového vstupu kanálu 2

4.1.2 Proudové vstupy

Kalibrace proudových vstupů proběhla s využitím regulovatelného laboratorního zdroje, který napájel výkonový rezistor přes sériově zapojený digitální kalibrační ampérmetr Keithley DAQ6510 i samotné proudové vstupy měřicí karty. Nastavováním různých hodnot napětí a tomu odpovídajícímu proudu v obvodu byla obdobným způsobem jako u napětových vstupů provedena kalibrace. Kalibrace je provedena zvlášť pro spodní a horní měřicí rozsah. Naměřené hodnoty jsou uvedeny v Tab. 6 a Tab. 7.

Dle lineárního proložení naměřené kalibrační charakteristiky spodního rozsahu proudového vstupu kanálu 1 (viz Obr. 37) také karta ukazuje větší hodnotu, než je skutečná (směrnice $k = 1,0135$), a proto bude provedena korekce ve výpočtu. Offset má hodnotu $-0,0006 A$. Horní rozsah tohoto vstupu má po lineárním proložení kalibrační charakteristiky (viz Obr. 38) směrnici opět větší než 1, $k = 1,0655$, a offset záporný o hodnotě $-0,0069 A$.

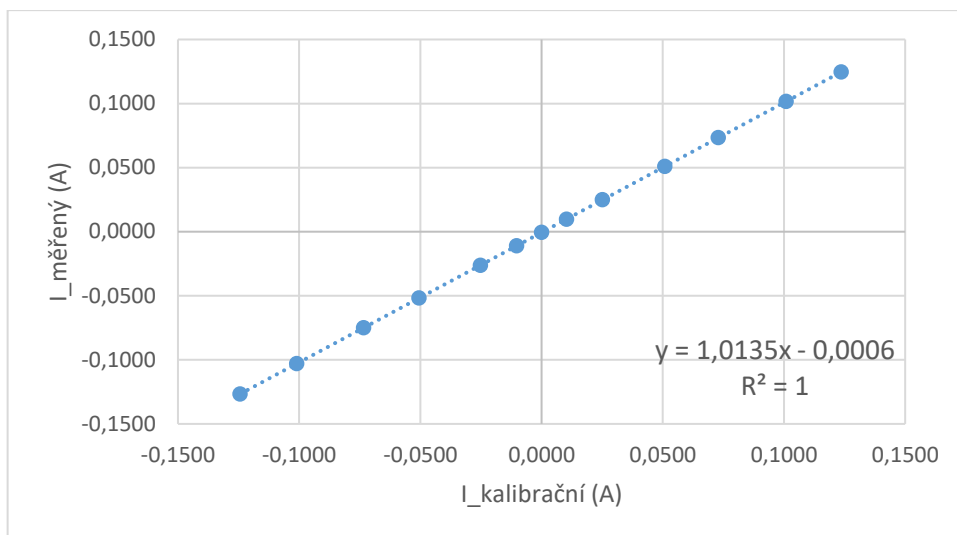
Na Obr. 39 a Obr. 40 jsou kalibrační charakteristiky druhého proudového vstupu. Spodní rozsah má směrnici kalibrační křivky $k = 1,016$ a offset $-0,0006 A$. Horní rozsah má směrnici kalibrační křivky $k = 1,0645$ a offset $-0,0069 A$.

Tab. 6: Naměřené hodnoty při kalibraci spodního i horního měřicího rozsahu proudového vstupu kanálu 1

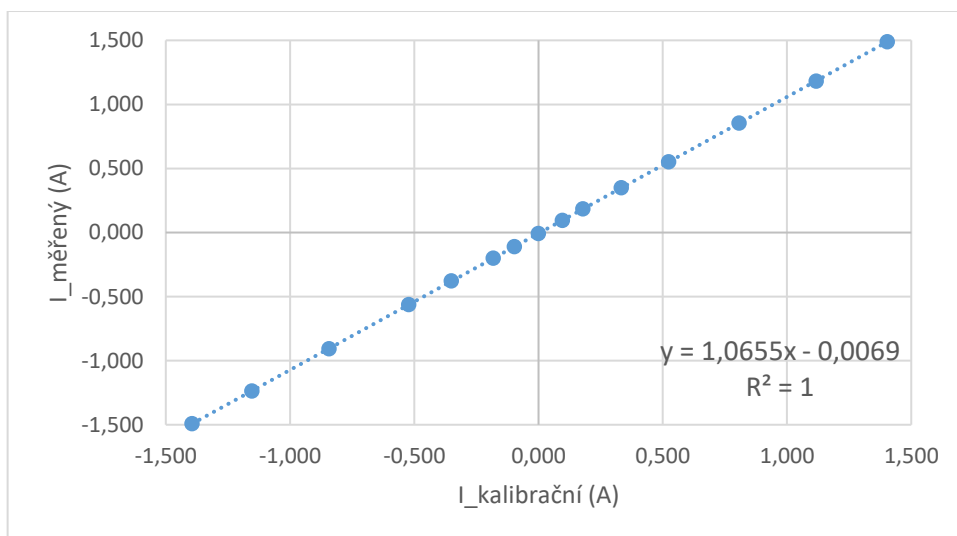
Rozsah ± 125 mA		Rozsah $\pm 1,5$ A	
I_{I_kal} (A)	$I_{I_měř}$ (A)	I_{I_kal} (A)	$I_{I_měř}$ (A)
-0,1243	-0,1266	-1,394	-1,492
-0,1009	-0,1029	-1,153	-1,238
-0,0733	-0,0750	-0,843	-0,907
-0,0506	-0,0519	-0,522	-0,562
-0,0252	-0,0262	-0,350	-0,379
-0,0103	-0,0111	-0,182	-0,200
0,0000	-0,0006	-0,0964	-0,1095
0,0103	0,0098	0,0000	-0,0069
0,0252	0,0249	0,0965	0,0957
0,0509	0,0510	0,179	0,186
0,0730	0,0734	0,333	0,349
0,1009	0,1016	0,524	0,552
0,1236	0,1246	0,808	0,854
		1,118	1,182
		1,404	1,489

Tab. 7: Naměřené hodnoty při kalibraci spodního i horního měřicího rozsahu proudového vstupu kanálu 2

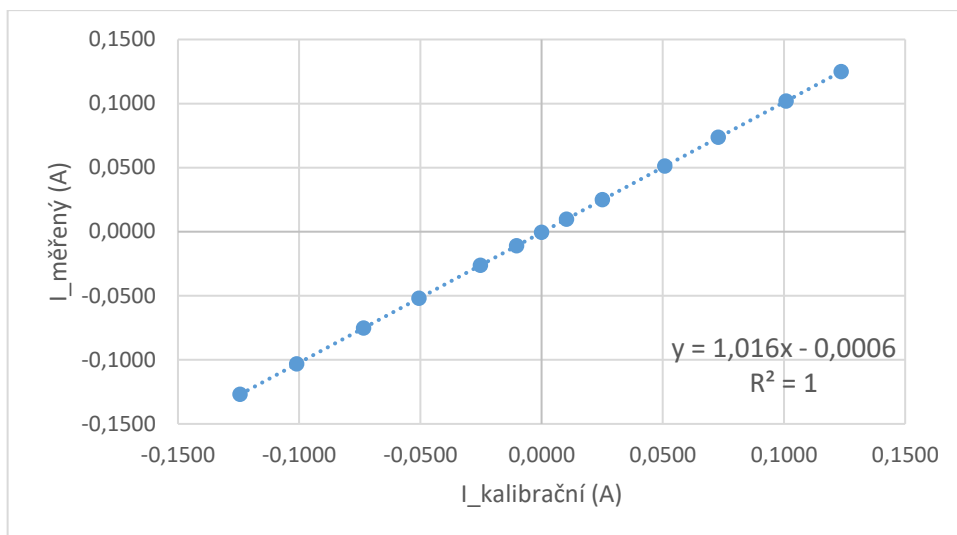
Rozsah ± 125 mA		Rozsah $\pm 1,5$ A	
I_{2_kal} (A)	$I_{2_měř}$ (A)	I_{2_kal} (A)	$I_{2_měř}$ (A)
-0,1243	-0,1269	-1,394	-1,492
-0,1009	-0,1032	-1,153	-1,236
-0,0733	-0,0752	-0,843	-0,907
-0,0506	-0,0520	-0,522	-0,561
-0,0252	-0,0263	-0,350	-0,379
-0,0103	-0,0111	-0,182	-0,200
0,0000	-0,0006	-0,0964	-0,1093
0,0103	0,0098	0,0000	-0,0069
0,0252	0,0249	0,0965	0,0957
0,0509	0,0511	0,179	0,186
0,0730	0,0736	0,333	0,348
0,1009	0,1018	0,524	0,552
0,1236	0,1250	0,808	0,854
		1,118	1,180
		1,404	1,487



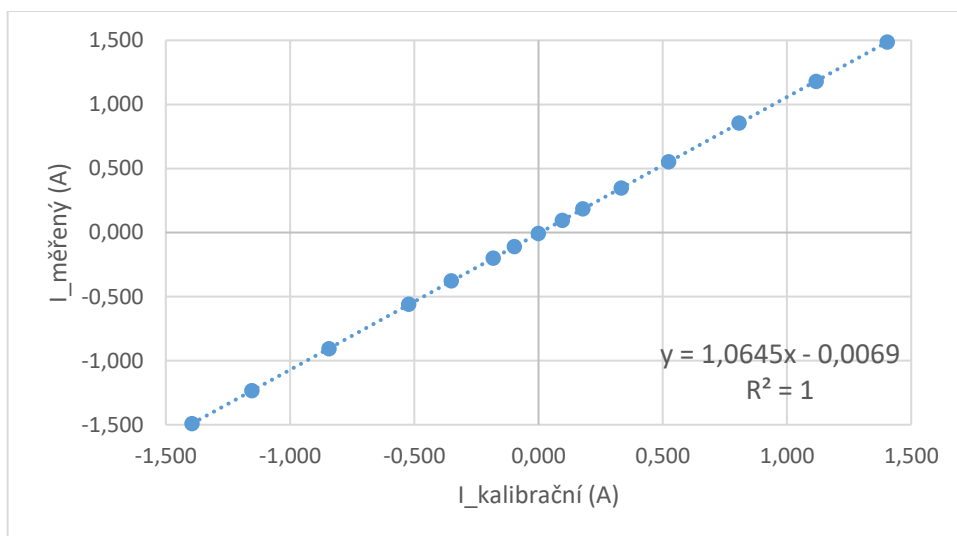
Obr. 37: Kalibrační charakteristika spodního rozsahu proudového vstupu kanálu 1



Obr. 38: Kalibrační charakteristika horního rozsahu proudového vstupu kanálu 1



Obr. 39: Kalibrační charakteristika spodního rozsahu proudového vstupu kanálu 2



Obr. 40: Kalibrační charakteristika horního rozsahu proudového vstupu kanálu 2

V následující Tab. 8 jsou uvedeny vypočtené kalibrační konstanty a také hodnoty šumu jednotlivých vstupů. Hodnota šumu byla stanovena měřením po dobu jedné hodiny při zkratovaných napěťových vstupech a nezapojených proudových vstupech, kdy šum byl určen jako rozdíl maximální a minimální naměřené hodnoty.

Tab. 8: Kalibrační konstanty a šum jednotlivých vstupů a rozsahů měřicí karty

Vstup	Kalibrační konstanty		Šum
	Offset	Zesílení	
U_1	-0,00080 V	0,9892175	0,19 mV _{pp}
U_2	-0,00190 V	0,9857072	0,22 mV _{pp}
I_{1_spodni}	0,00063 A	0,9866798	0,02 mA _{pp}
I_{1_horni}	0,00690 A	0,9385265	
I_{2_spodni}	0,00063 A	0,9842520	0,03 mA _{pp}
I_{2_horni}	0,00690 A	0,9394082	

4.1.3 Teplotní vstupy

V případě teplotních vstupů bylo provedeno srovnávací měření dvěma metodami – v peci LAC LE, která je schopna vytápět do 1100 °C, a vyhřívané vodní lázni s cirkulací.

Měření v peci

Zmíněná pec není schopna udržovat teplotu s přesností ani na jednotky °C. Z toho důvodu bylo s jejím využitím provedeno pouze srovnávací měření, kdy jako srovnávací měřicí přístroj posloužila měřicí karta NI-9211 s připojeným termočlánkem typu K. Během měření bylo nutné vypořádat se s dalším faktorem, který velice výrazně ovlivňuje přesnost měření – rozdílnost provedení senzorů, a tedy i jejich rozdílná tepelná kapacita. Tepelná kapacita termočlánku o rozměrech nepřesahujících 1 mm je výrazně menší, než tepelná kapacita platinového senzoru o průměru 6 mm a délce 50 mm (případně menšího o průměru 4 mm a délce 30 mm), který byl připojen k vyrobené měřicí kartě. Z toho důvodu termočlánek reaguje na změny teploty mnohem rychleji oproti senzoru PT100.



Obr. 41: Pohled do pece s vloženými teplotními senzory

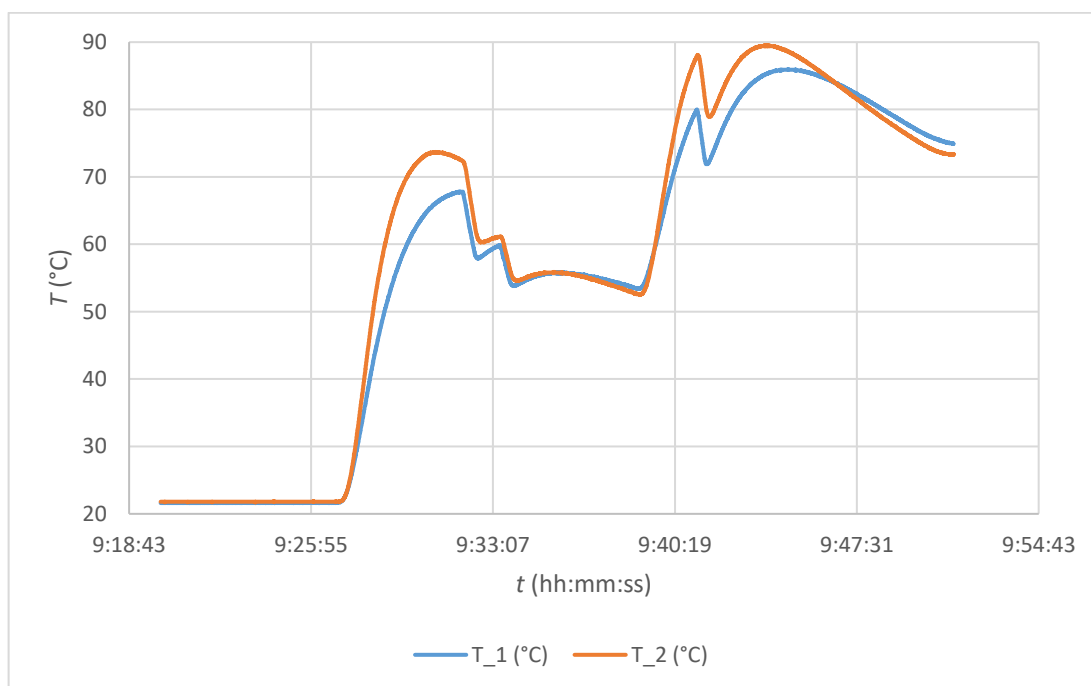
Jak si lze všimnout na Obr. 41, při srovnávacím měření byl do pece umístěn srovnávací termočlánek, senzor PT100 o průměru 6 mm třídy přesnosti A připojený na kanál 1 měřicí karty a senzor PT100 o průměru 4 mm připojený na kanál 2 měřicí karty. Všechny senzory byly pro zajištění co největší homogenity teploty v měřené oblasti vzájemně umístěny do středu komory. Srovnání proběhlo na třech stanovených teplotách a po dostatečně dlouhé době pro ustálení. Ustálena musela být jednak teplota v peci (která však z důvodu regulace topných elementů nebyla ideálně konstantní) a také teplota senzorů. Změřené hodnoty jsou uvedeny v následující Tab. 9.

Tab. 9: Naměřené hodnoty teploty při srovnávacím měření a odchylky od srovnávacího přístroje.

NI-9211 (TC typu K)	Karta_CH1 (PT100 ø 6 mm)		Karta_CH2 (PT100 ø 4 mm)	
<i>T</i> (°C)	<i>T</i> (°C)	ΔT (°C)	<i>T</i> (°C)	ΔT (°C)
20,9	21,6	0,7	21,8	0,9
55,8	55,2	-0,6	54,8	-1
78,8	79,7	0,9	78,3	-0,5

Z uvedených hodnot v Tab. 9 je patrné, že rozdíl v naměřených teplotách mezi NI-9211 a vstupy vyrobené měřicí karty je po ustálení maximálně ± 1 °C. Nelze však dokázat, že

srovnávací přístroj ukazuje správnou hodnotu, protože není kalibrováný. Proto je měření bráno pouze jako orientační.



Obr. 42: Měřicí kartou zaznamenaný teplotní průběh při náhodném zahřívání a ochlazování pece

Obr. 42 zobrazuje naměřený teplotní průběh vytvořený náhodným zahříváním a ochlazováním pece. Lze si všimnout, že na měřicím kanálu 1 (modrý průběh T₁), kde byl připojen větší senzor s větší tepelnou kapacitou, dochází k pomalejším reakcím na změny teploty. Při zcela ustálené teplotě (začátek průběhu) se zobrazovaný údaj na obou kanálech téměř shoduje. Rozdíl je zhruba 0,2 °C, to může být způsobeno nepřesností senzoru. V případě, kdy byly na oba vstupy připojeny stejné senzory (PT100 o třídě přesnosti A), se zobrazovaný údaj shodoval na jednom desetinném místě na obou kanálech.

Měření ve vodní lázni

Druhá metoda srovnávacího měření proběhla ve vyhřívané vodní lázni s cirkulací, která je schopna ohřát vodu až na 70 °C. Lázeň poskytuje velmi dobrou stabilitu teploty a rozlišení ukazatele aktuální teploty 0,1 °C. Během srovnávacího měření byly do lázně ponořeny dva senzory PT100 třídy přesnosti A připojené na oba vstupy měřicí karty a lázeň byla zahřívána od pokojové teploty až na hodnotu 70 °C s krokem 10 °C. Po ustálení teploty byla vždy odečtena aktuální hodnota ukazatele na displeji vodní lázně, i teploty zobrazené v ovládacím programu měřicí karty. Jak je patrné z Tab. 10, karta vykazuje velmi vysokou přesnost shody s měřidlem ve vodní lázni. Naměřené hodnoty všech tří ukazatelů se po ustálení vždy

shodovaly v řádu desetin °C, avšak stejně jako v případě měření v peci, nelze potvrdit skutečnou přesnost jak referenčního měřidla ve vodní lázni, tak měřicí karty.

Tab. 10: Naměřené hodnoty při srovnávacím měření teploty ve vodní lázni

Lázeň	Karta_CH1 (PT100 Tř. A)	Karta_CH2 (PT100 Tř. A)
<i>T</i> (°C)		
30,8	30,8	30,8
40,9	40,9	40,9
50,1	50,1	50,1
60	60	60
70,1	70,1	70,1

Díky využití těchto dvou metod lze dokázat, že pro kalibraci teplotních snímačů je výrazně lepší prostředí cirkulující kapaliny než prostředí zahřívajícího vzduchu v peci, a to zejména díky výrazně lepší stabilitě teploty vodní lázně dané větší tepelnou kapacitou vody.

4.2 Porovnání požadovaných a dosažených parametrů včetně ceny

Po provedení kalibrace měřicí karty byly opět porovnány měřené hodnoty měřicí karty a srovnávacího přístroje. Během tohoto měření se sledovaly hodnoty s rozlišením na tři desetinná místa. V konečném výsledku lze konstatovat, že u napěťových i proudových vstupů se v celých měřicích rozsazích shodovaly všechny měřené hodnoty měřicí karty i srovnávacího voltmetru/ampérmetru v řádu 10^{-3} základní jednotky. Měřicí karta tedy vykazuje velmi dobrou linearitu a přesnost v celém měřicím rozsahu. Stejně tak je velmi dobrá linearita teplotních vstupů i jejich přesnost.

V Tab. 11 je obsažen souhrn základních požadovaných a skutečných parametrů navržené měřicí karty.

Kromě požadovaného rozlišení měřicích vstupů bylo dalším cílem dosáhnout přijatelné a konkurenceschopné ceny měřicí karty. Odhadovaná cena materiálu pro výrobu jednoho kusu je uvedena v Tab. 12. Lze konstatovat, že tato cena je zcela přijatelná a nepřevyšuje cenu nalezených výrobků na trhu, které by splňovaly zadané požadavky.

Tab. 11: Souhrn požadovaných a skutečných parametrů měřicí karty

	Napětové vstupy	Proudové vstupy	Teplotní vstupy
Požadovaný rozsah	10 mV až 1,2 V	3 mA až 1,5 A	20 až 80 °C
Skutečný rozsah	±2 V	±1,5 A	-20 až 115 °C
Požadované rozlišení	10 mV	1 mA	0,5 °C
Skutečné efektivní rozlišení	1 mV	0,1 mA	0,1 °C
Šum	< 0,25 mV _{pp}	< 0,03 mA _{pp}	< 0,1 °C
Vzorkovací frekvence	max. 25 Hz (softwarově omezeno)		
Vstupní odpor	356 kΩ	0,11 Ω	-

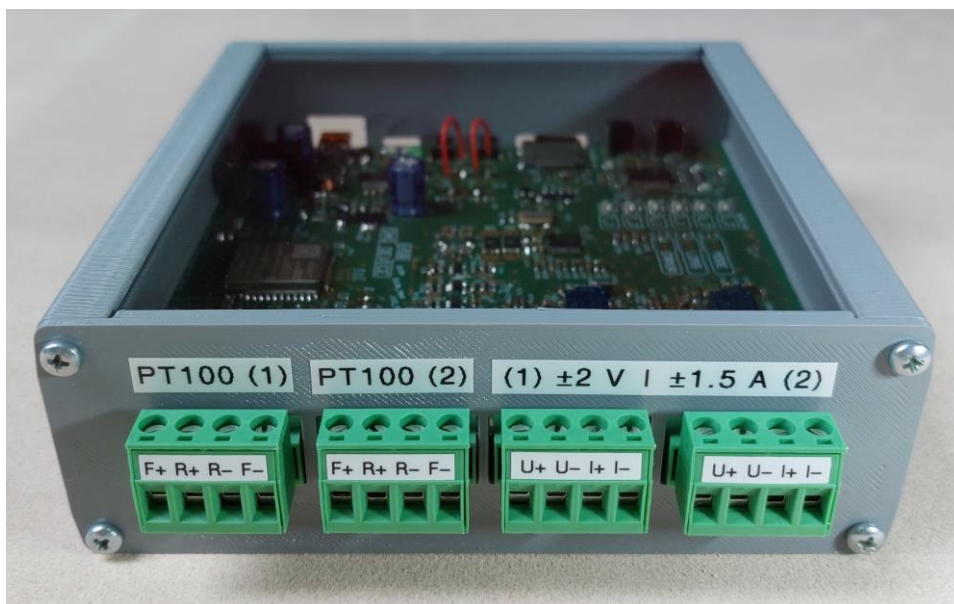
Tab. 12: Odhadovaná cena materiálu na výrobu jedné měřicí karty

Položka	Odhadovaná cena (Kč)
Elektronické součástky	4 000
Pájecí pasta	25
Deska plošných spojů	1 250
Šablona pro pájecí pastu	250
Tisknutá krabička	200
<i>Celková odhadovaná cena</i>	5 725

Uvedena je pouze cena samotného materiálu. Pokud by vývoj karty neprobíhal v rámci studentské práce, ale jednalo by se o vývoj produktu určeného pro uvedení na trh, musela by být započítána i cena lidské práce, ceny licencí vývojových nástrojů a náklady spojené s testováním elektromagnetické kompatibility a dalších potřebných certifikačních procesů spojených s uvedením výrobku na trh.

5 Popis použití

Měřicí karta umožňuje měřit napětí, proud a teplotu. Při pohledu na zadní stranu krabičky jsou vidět čtyři zasouvací šroubovací konektory. Popis funkce každé svorky je vidět na popisovacích štítkách na Obr. 43.



Obr. 43: Pohled na připojovací konektory a jejich funkci

Jak si lze všimnout na Obr. 44, z přední strany krabičky jsou uživateli přístupna dvě tlačítka, slot pro vložení paměťové karty a USB konektor. Tlačítko šedé barvy je programově nastaveno na funkci ručního spuštění / zastavení měření a ukládání dat na paměťovou kartu. Frekvence ukládání je uložena v paměti a lze ji změnit z ovládacího programu v PC. Červené tlačítko má funkci spuštění / zastavení měření a odesílání dat na UART sběrnici. Paměťová karta musí být typu MicroSD a naformátována na systém souborů FAT nebo FAT32. Na DPS jsou umístěna ještě další dvě tlačítka, avšak není k nim přístup přes čelní panel, protože tato dvě tlačítka slouží pro reset měřicí karty a uvedení MCU do režimu nahrávání nového firmwaru. Konektor typu USB Mini slouží jak pro napájení, tak komunikaci s PC. Vedle USB konektoru je také malý průhled na dvě LED diody, které indikují přenos dat po UART.



Obr. 44: Pohled na přední stranu měřicí karty a ovládací prvky

Měřicí karta je naprogramována tak, aby v případě výpadku napájení nebo odpojení a opětovném připojení měřicí karty zachovala stav své funkce stejný jako před událostí. Pokud například před dočasným výpadkem napájení měřicí karta automaticky měřila a ukládala data na paměťovou kartu, po opětovném připojení bude pokračovat v ukládání hodnot.

Ovládání měřicí karty pomocí dodaného SW je popsáno v kapitole 3.2.2.

Díky několika indikačním LED diodám je uživateli signalizován stav měřicí karty. Zelená LED dioda umístěná v blízkosti USB konektoru indikuje přítomnost napájecího napětí. Červená LED dioda umístěná vedle konektoru pro SD kartu svým bliknutím indikuje uložení informace na paměťovou kartu. Dvě červené LED umístěné v rohu měřicí karty vedle šedého tlačítka svým svitem indikují nastavení spodního rozsahu proudových vstupů. Dále je zde šest LED diod modré barvy, které mohou indikovat odebrání vzorku každého vstupu zvlášť, avšak v aktuální verzi firmwaru je tato funkce deaktivována pro snížení vizuálního ovlivnění uživatele.

Zhodnocení a závěr

Cílem této diplomové práce bylo seznámení se se současnými možnostmi automatického ověření parametrů palivových článků, konkrétně měření teplotní nebo časové závislosti napětí a proudu dodávaného palivovými články do zátěže. Bylo zjištěno, že na trhu je široké spektrum měřicích systémů pro automatický sběr dat, ale zařízení, které bude kombinovat funkce dvoukanalového měření napětí, proudu a teploty s podporou připojení senzorů PT100, není v nabídce mnoho za přijatelnou cenu. Jedním z technicky vhodných kandidátů by mohl být systém DAQ6510, který však svojí pořizovací cenou přesahuje 70 000 Kč.

Po provedené rešerši komerčně dostupných měřicích DAQ systémů následoval úkol v podobě návrhu vlastního konceptu a realizace měřicí karty dle předem zjištěných možností měření požadovaných veličin a jejich digitálního zpracování. Vyrobená měřicí karta se vyznačuje přijatelnými rozměry pro pohodlnou manipulaci a je připojitelná k PC pomocí USB kabelu. Zároveň bylo počítáno s provozem měřicí karty bez ovládacího PC, a proto jsou uživateli k dispozici dvě fyzická ovládací tlačítka (zapnutí/vypnutí měření a ukládání hodnot) a slot pro vložení paměťové karty. Jednotlivé stavy měřicí karty indikuje několik LED diod.

O řízení karty se stará mikrokontroler ESP32 na modulu ESP32-WROOM-32D od společnosti Espressif, jehož výhodou oproti ostatním mikrokontrolerům jsou integrované RF obvody a tedy možnost bezdrátové komunikace (WiFi, Bluetooth). Zároveň lze tento mikrokontroler programovat v mnoha různých vývojových prostředích i různými programovacími jazyky. Napájení měřicí karty a přenos dat zajišťuje konektor USB Mini. V návrhu je implementováno galvanické oddělení napájecí i komunikační linky, díky němuž jsou chráněna zařízení komunikující s měřicí kartou. Měření napětí v rozsahu ± 2 V je realizováno standardním zapojením diferenciálního operačního zesilovače doplněného o vstupní ochranu před ESD. Měření proudu probíhá pomocí dvojice sériově zapojených snímacích rezistorů. Díky kontaktům relé je možnost jeden z dvojice rezistorů zkratovat a zvýšit tak rozsah měřicí karty z ± 125 mA na $\pm 1,5$ A. Druhé kontakty relé se starají o přepínání místa snímání napěťového úbytku, díky čemuž je eliminována chyba způsobená napěťovým úbytkem na proudových kontaktech relé. Analogový signál je následně digitalizován AD převodníkem. Měření teploty je realizováno RTD-digitálními převodníky v konfiguraci pro čtyřvodičové připojení senzorů PT100.

Fyzický výrobek byl po ručním osazení zhruba 356 součástkami elektricky oživen s minimem problémů při první vyrobené verzi DPS. Program pro MCU vznikl v prostředí

Arduino IDE a skládá se z několika importovaných knihoven a vlastních funkcí. Ovládání karty probíhá přes UART předem definovanými příkazy v podobě textových řetězců. Ovládací program v PC vznikl v LabVIEW. Umožňuje uživateli spojení s měřicí kartou na vybraném COM portu a nastavení základních parametrů, které jsou poté uloženy v kartě. Kromě tohoto nastavení lze také vybrat cestu k souboru ve formátu .csv, do kterého program může ukládat měřená data. Dále jsou v uživatelském rozhraní přehledně umístěny číselné indikátory aktuálně měřených hodnot na všech šesti vstupech a také grafy zaznamenávající časové průběhy jednotlivých vstupů.

Po provedené kalibraci byla zjištěna přesnost měření srovnáním se srovnávacími přístroji. Efektivní rozlišení (tzn. počet desetinných míst, která se shodovala se srovnávacím přístrojem v celém rozsahu a lze je považovat za přesné údaje) je u napěťových vstupů 1 mV, u proudových vstupů 0,1 mA a u teplotních vstupů 0,1 °C. Lze konstatovat, že požadavek na rozlišení i rozsah všech měřících vstupů byl splněn. Zároveň byla praktickým měřením na palivovém článku ověřena funkčnost měřicí karty pro cílenou aplikaci. Pokud nebudou do nákladů na tuto měřicí kartu zahrnuty náklady spojené s uvedením výrobku na trh ani náklady na lidskou práci, protože se jedná o studentskou kvalifikační práci určenou pro laboratorní účely, byla splněna i podmínka, aby měřicí karta cenově konkurovala komerčním produktům.

Myslím si, že realizovaná měřicí karta je praktické zařízení, které najde uplatnění i při dalších aplikacích, které vyžadují současné měření napětí, proudu a teploty. Jako možné vylepšení pro druhou verzi považuji zvýšení efektivního rozlišení napěťových vstupů snížením šumu. Zároveň bych rád přepracoval galvanické oddělení datových vodičů RX a TX, které v současnosti umožňují přenos rychlostí maximálně 9600 baudů.

Na úplný závěr práce je nutné připomenout, že automatický sběr dat je klíčový pro oblast numerického modelování, kde nám poskytuje velmi cenné informace a hodnoty pro kalibraci modelu. Měřicí karta a navržený a realizovaný software pro její obsluhu a záznam dat tak přispívá k možnosti vylepšení a ověření numerických modelů v cílové aplikaci, kterou je výzkum efektivity palivových článků.

Literatura

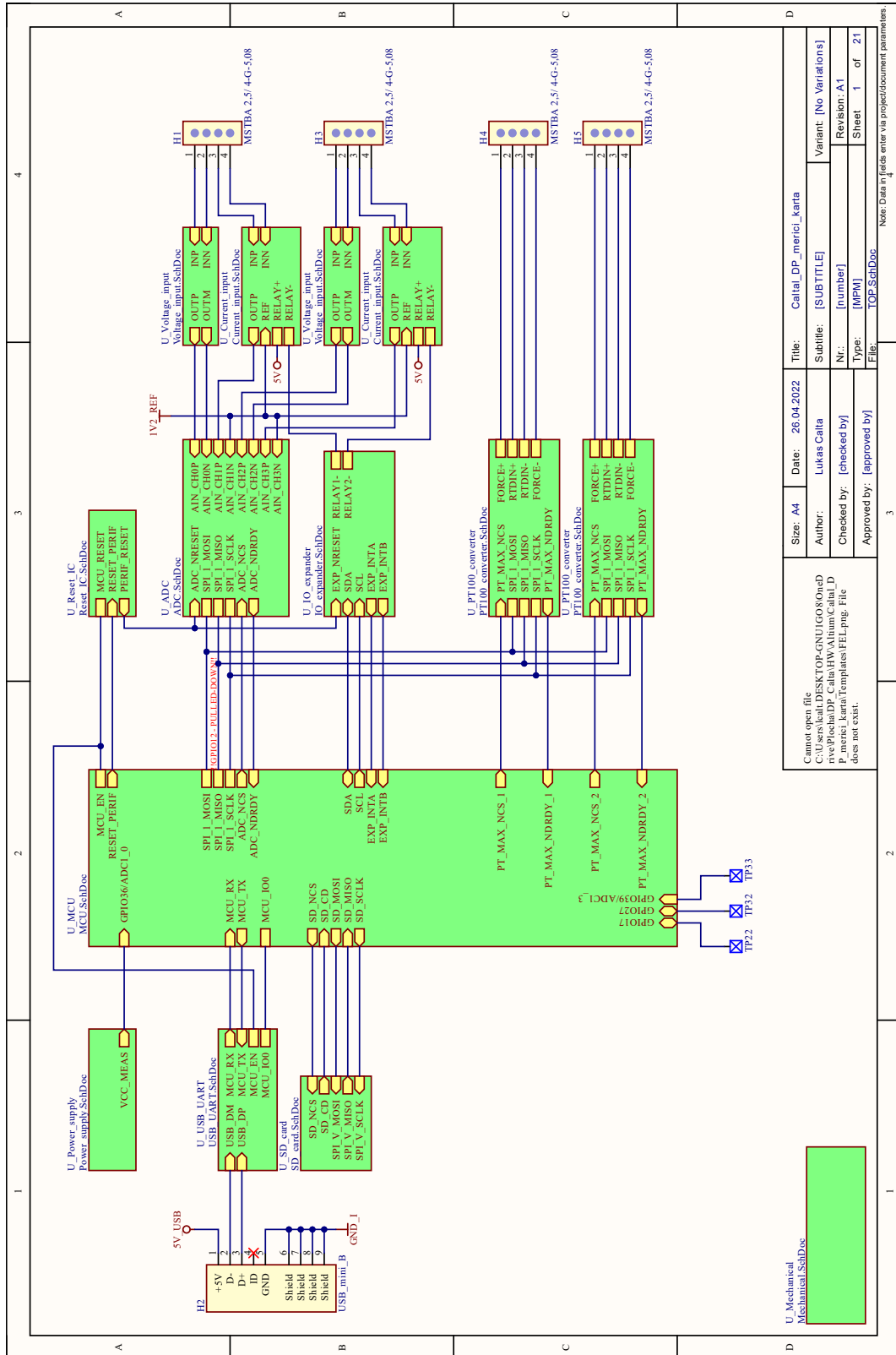
- [1] MAURIZIO, Di Paolo Emilio. *Data Acquisition Systems*. New York: Springer-Verlag New York Inc., 2015. ISBN 9781489987419.
- [2] PARK, John and Steve MACKAY. *Practical Data Acquisition for Instrumentation and Control Systems*. B.m.: Elsevier Science & Technology, 2003. ISBN 9780750657969.
- [3] OMEGA. *A Complete Guide to Data Acquisition (DAQ) Systems* [online]. [vid. 2021-03-25]. Dostupné z: <https://www.omega.com/en-us/resources/daq-systems>
- [4] MEASUREMENT COMPUTING. *DATA ACQUISITION – A GUIDE TO DAQ SYSTEMS* [online]. [vid. 2021-03-25]. Dostupné z: <https://www.mccdaq.com/data-acquisition>
- [5] DEWESOFT. *What is Data Acquisition (DAQ)?* [online]. 2020 [vid. 2021-03-25]. Dostupné z: <https://dewesoft.com/daq/what-is-data-acquisition>
- [6] NATIONAL INSTRUMENTS. *Data Acquisition (DAQ)* [online]. [vid. 2021-03-30]. Dostupné z: <https://www.ni.com/cs-cz/shop/pc-based-measurement-and-control-system.html>
- [7] NATIONAL INSTRUMENTS. *USB-6009* [online]. Dostupné z: <https://www.ni.com/cs-cz/support/model.usb-6009.html>
- [8] LABJACK CORPORATION. *LabJack T7* [online]. [vid. 2021-04-13]. Dostupné z: <https://labjack.com/products/t7>
- [9] KEITHLEY. *DAQ6510 Data Acquisition and Logging, Multimeter System Datasheet* [online]. [vid. 2021-04-13]. Dostupné z: <https://www.farnell.com/datasheets/2607098.pdf>
- [10] ŠVARNÝ, Jiří. *Měření a snímání elektrického proudu* [online]. 2020 [vid. 2021-04-05]. Dostupné z: <https://portal.zcu.cz/CoursewarePortlets2/DownloadDokumentu?id=189223>
- [11] WICHT, Bernhard. *Current Sense Amplifiers*. Springer. 2003.
- [12] JAKAR ELECTRONICS. *Termočlánek - termoelektrický snímač teploty* [online]. [vid. 2022-04-15]. Dostupné z: <https://www.jakar.cz/advisor/co-je-termoclanek>
- [13] OMEGA. *RTD sensors* [online]. [vid. 2021-03-30]. Dostupné z: <https://www.omega.com/en-us/resources/rtd-hub>
- [14] LAURILAL, Heikki. *Pt100 temperature sensor – useful things to know* [online]. 2018 [vid. 2021-10-19]. Dostupné z: <https://blog.beamex.com/pt100-temperature-sensor>

- [15] JOHN M. HUGHES. *Real World Instrumentation with Python*. Sebastopol: O'Reilly Media, Inc., 2011. ISBN 978-0-596-80956-0.
- [16] NATIONAL INSTRUMENTS. *What Is LabVIEW?* [online]. [vid. 2021-04-01]. Dostupné z: <https://www.ni.com/cs-cz/shop/labview.html>
- [17] BEHZAD, Ehsani. *LabVIEW: Data Acquisition & Analysis for the Movement Sciences*. B.m.: Packt Pub, 2016. ISBN 9781782172161.
- [18] BITTER, Rick, Taqi MOHIUDDIN and Matt NAWROCKI. *LabVIEW: Advanced Programming Techniques*. B.m.: CRC Press, 2000. ISBN 978-1420039351.
- [19] NATIONAL INSTRUMENTS. *NI-VISA Overview* [online]. [vid. 2021-04-01]. Dostupné z: <https://www.ni.com/cs-cz/support/documentation/supplemental/06/ni-visa-overview.html>
- [20] WARCHOL, Kit. *What Is Python Used For? 5 Industries That Can't Do Without It* [online]. [vid. 2021-04-02]. Dostupné z: <https://skillcrush.com/blog/what-is-python-used-for/>
- [21] GEORGE ROBOTICS LIMITED. *MicroPython* [online]. [vid. 2021-04-02]. Dostupné z: <https://micropython.org>
- [22] WIRINGPROJECT. *Wiring* [online]. [vid. 2021-11-21]. Dostupné z: <http://wiring.org.co>
- [23] SENGUPTA, Anirban. *Introduction to USB Power Delivery* [online]. 2016 [vid. 2021-04-06]. Dostupné z: <https://www.electronicdesign.com/technologies/interconnects/article/21801531/introduction-to-usb-power-delivery>
- [24] MURATA POWER SOLUTIONS. *Datasheet CRL2 Series* [online]. [vid. 2021-04-02]. Dostupné z: https://cz.mouser.com/datasheet/2/281/kdc_crl2-951994.pdf
- [25] ESPRESSIF SYSTEMS. *ESP32* [online]. [vid. 2021-04-02]. Dostupné z: <https://www.espressif.com/en/products/socs/esp32>
- [26] ESPRESSIF SYSTEMS. *ESP32-WROOM-32D* [online]. [vid. 2022-02-08]. Dostupné z: <https://www.soselectronic.cz/products/espressif/esp32-wroom-32d-esp32-wroom-32d-n4-291230>
- [27] TEXAS INSTRUMENTS. *THS4551 Datasheet* [online]. 2017 [vid. 2021-04-02]. Dostupné z: https://www.ti.com/lit/ds/symlink/ths4551.pdf?HQS=dis-mous-null-mousermode-dsf-pf-null-ww&ts=1649967846520&ref_url=https%253A%252F%252Fwww.mouser.com%252F

- [28] ANALOG DEVICES. *AD8293 Datasheet* [online]. [vid. 2021-11-06]. Dostupné z: https://www.analog.com/media/en/technical-documentation/data-sheets/ad8293g80_160.pdf
- [29] ETCHEZURI, Lucas. *Arduino library - ADS131M04* [online]. 2020 [vid. 2022-02-10]. Dostupné z: <https://github.com/LucasEtchezuri/Arduino-ADS131M04>
- [30] LEMASLE, Bertrand. *Arduino library - MCP23017* [online]. [vid. 2022-02-10]. Dostupné z: <https://www.arduino.cc/reference/en/libraries/mcp23017/>

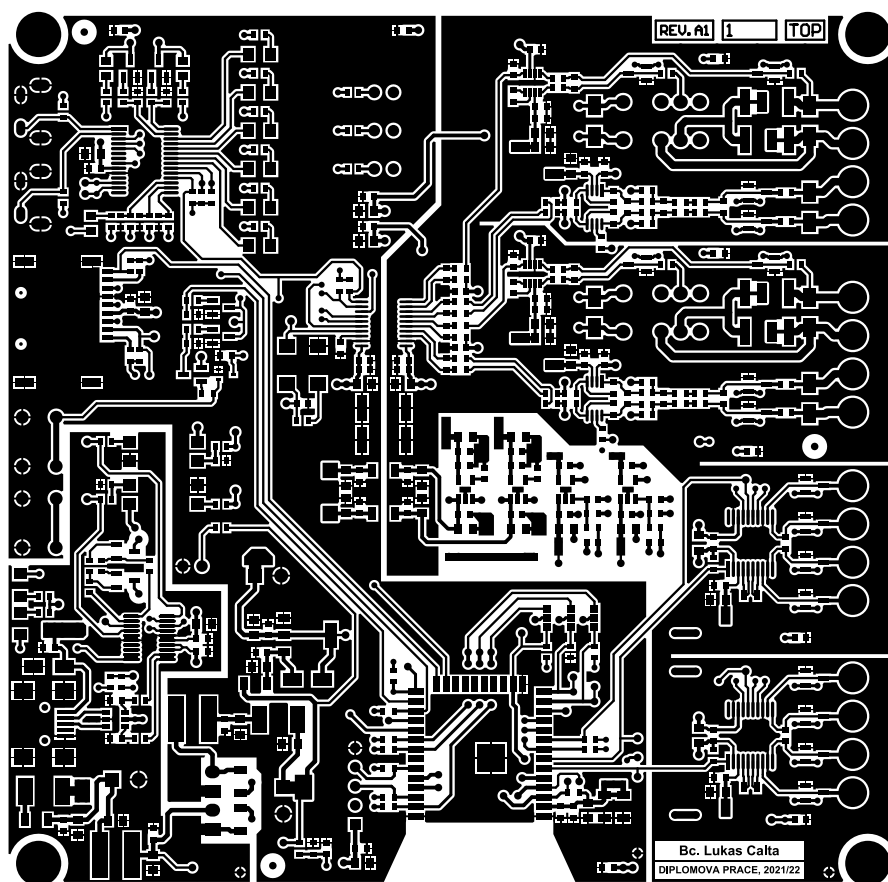
Přílohy

Příloha A – Blokové schéma zapojení

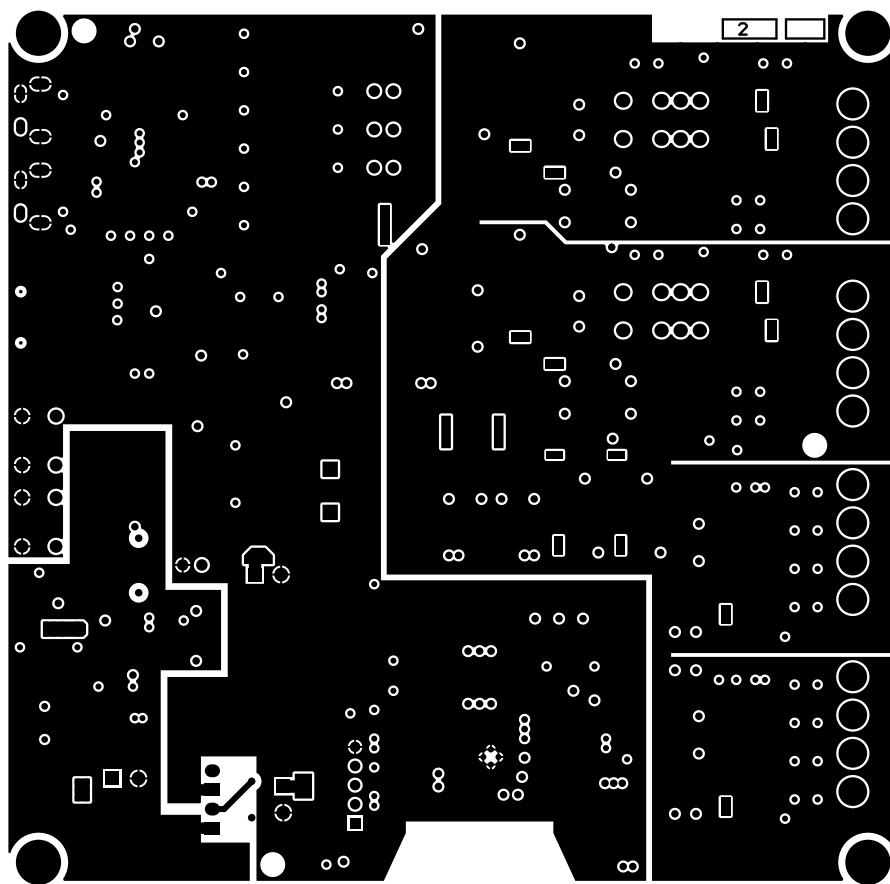


Obr. 45: Blokové schéma zapojení měřicí karty (Altium Designer)

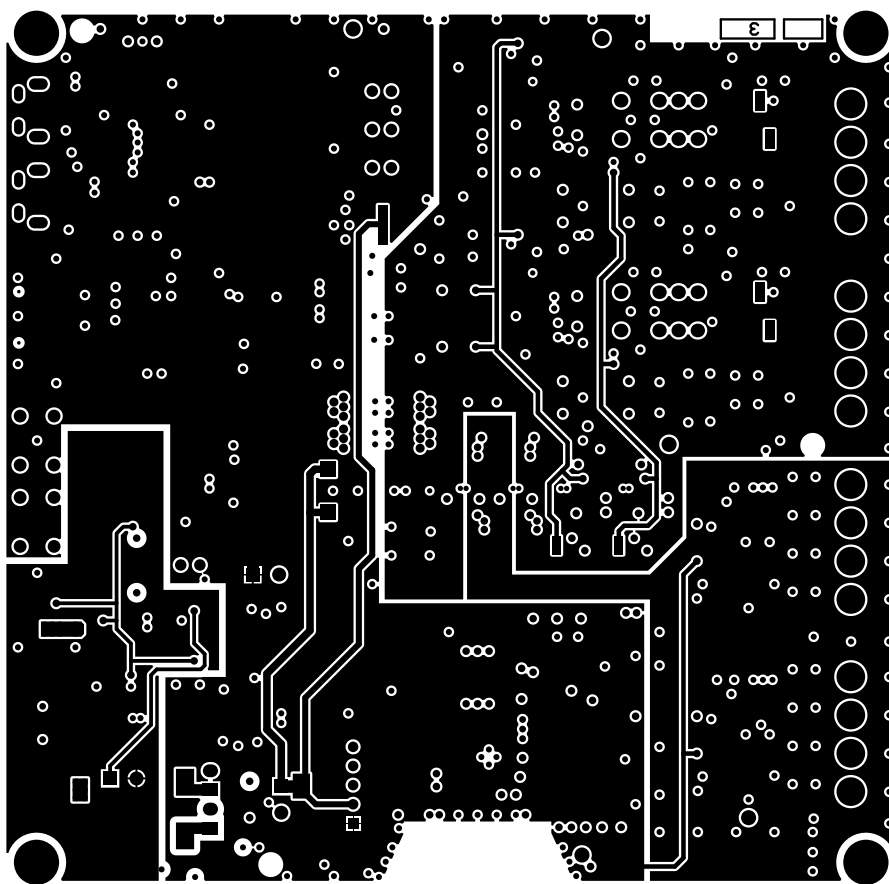
Příloha B – Grafické zobrazení Gerber výstupů navržené DPS



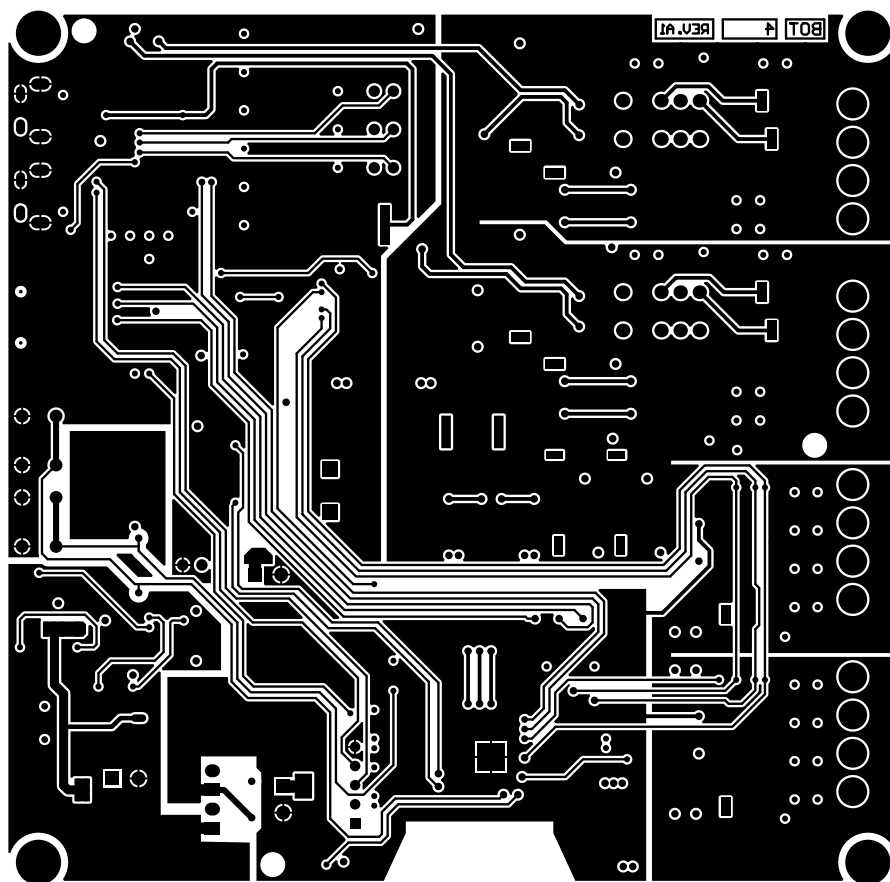
Obr. 46: Grafické znázornění Gerber výstupu horní vrstvy mědi DPS (.GTL)



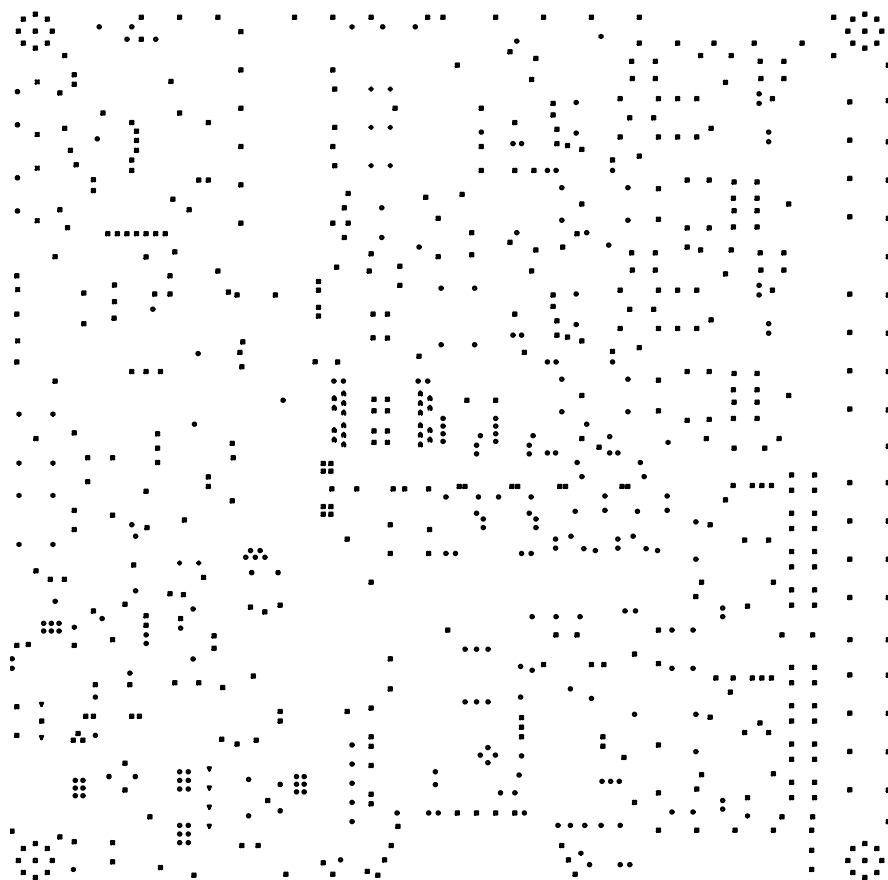
Obr. 47: Grafické znázornění Gerber výstupu vnitřní vrstvy 1 mědi DPS (.G1)



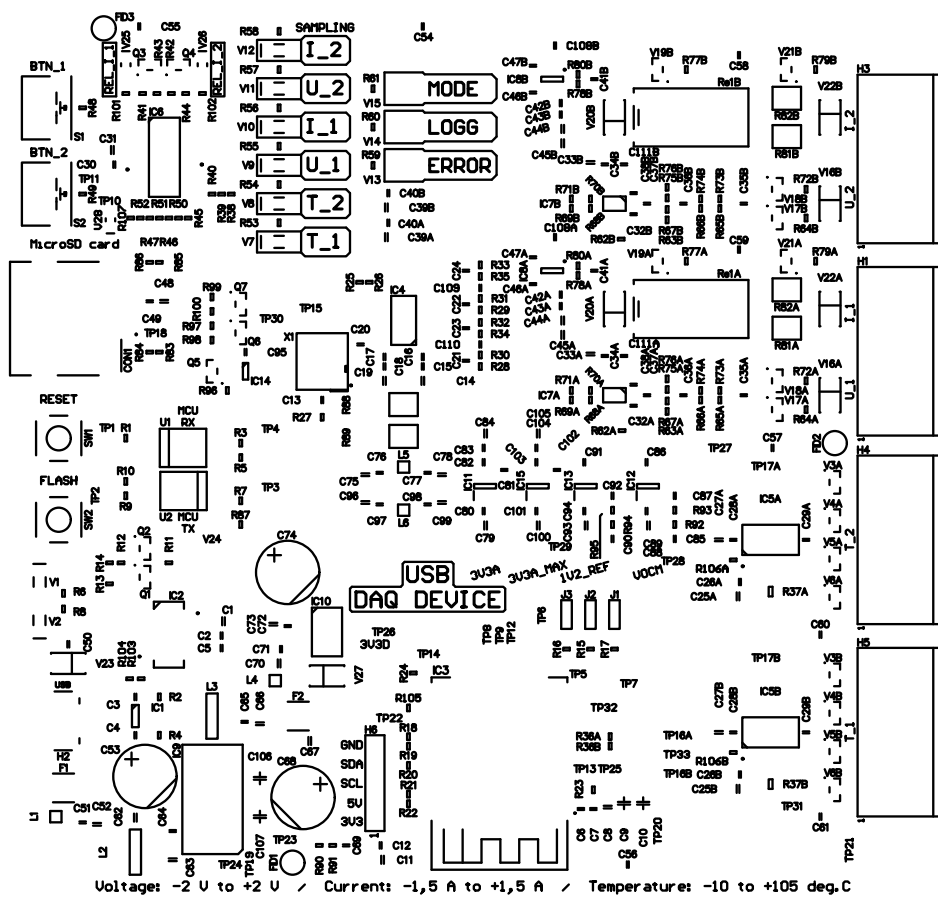
Obr. 48: Grafické znázornění Gerber výstupu vnitřní vrstvy 2 mědi DPS (.G2)



Obr. 49: Grafické znázornění Gerber výstupu spodní vrstvy mědi DPS (.GBL)



Obr. 50: Grafické znázornění Gerber výstupu pro vrtání DPS (.GD1)



Obr. 51: Grafické znázornění Gerber výstupu horní vrstvy potisku DPS (.GTO)

Příloha C – Elektronická příloha

Tato elektronická příloha obsahuje kompletní schéma zapojení navržené měřicí karty a také všechna potřebná Gerber data potřebná pro výrobu DPS. Dále je přiložen program pro MCU ESP32 a projekt ovládacího programu pro PC vytvořený v LabVIEW.