

UNIVERZITA PARDUBICE

Fakulta elektrotechniky a informatiky

4kanálový multimetr

Lukáš Venci

Bakalářská práce

2023

Univerzita Pardubice
Fakulta elektrotechniky a informatiky
Akademický rok: 2022/2023

ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

(projektu, uměleckého díla, uměleckého výkonu)

Jméno a příjmení: **Lukáš Venc**
Osobní číslo: **I20066**
Studijní program: **B0714P060001 Aplikovaná elektrotechnika**
Téma práce: **4kanálový multimetr**
Zadávající katedra: **Katedra elektrotechniky**

Zásady pro vypracování

Navrhnete a realizujete 4kanálový multimetr, který umožňuje současné měření dvou napětí a dvou proudů.

Multimetr je připojen k počítači přes USB, napájení je získáno rovněž z USB.

Komunikace je řešena přes virtuální sériový port (uvažujte běžné komunikační parametry 9600, 8, N, 1). Naměřené údaje budou odesílány v textové podobě, naměřená data všech kanálů se budou odesílat 1x za sekundu.

Všechny měřicí vstupy budou schopny zpracovat signály obou polarit, budou v diferenčním provedení a s potlačením rušivých signálů nad 20 Hz.

Napěťové vstupy budou mít přepínatelné rozsahy (vstupní odpor min. 100 k Ω): 200 mV, 2 V, 20 V, 200 V.

Proudové vstupy budou mít přepínatelné rozsahy (úbytek na bočníku max. 200 mV, souhlasné napětí min. -20 V až +20 V): 2 mA, 20 mA, 200 mA, 2 A.

Přepínání rozsahů bude realizováno mechanickými přepínači pro každý kanál nezávisle.

Požadované vlastnosti kanálů: rozlišení alespoň 10 bitů, INL < 2 LSB, DNL < 2 LSB, GE < 5 LSB, OE < 5 LSB.

Pro realizaci použijte vhodné monolitické přístrojové zesilovače.

Zajistěte dostatečnou ochranu počítače proti přepětí například pomocí transilů, galvanickým oddělením, izolovaným DC/DC měničem, apod..

Rozsah pracovní zprávy: **40**
Rozsah grafických prací:
Forma zpracování bakalářské práce: **tištěná/elektronická**

Seznam doporučené literatury:

VOBECKÝ, Jan. a Vít ZÁHLAVA. Elektronika: součástky a obvody, principy a příklady. 3., rozš. vyd. Praha: Grada Publishing, 2005. ISBN 978-80-247-1241-3.

MATOUŠEK, David. Aplikace mikrokontrolérů ATmega644. 1. vyd. Praha: BEN – technická literatura, 2013, ca 200 s. v různém stránkování. ISBN 978-80-7300-492-7.

VÁŇA, Vladimír. Mikrokontroléry ATMEL AVR: programování v jazyce C : popis a práce ve vývojovém prostředí CodeVisionAVR C. 1. vyd. Praha: BEN – technická literatura, 2003, 215 s. ISBN 80-730-0102-0.

Vedoucí bakalářské práce: **Ing. Bc. David Matoušek, Ph.D.**
Katedra elektrotechniky

Datum zadání bakalářské práce: **15. listopadu 2022**
Termín odevzdání bakalářské práce: **12. května 2023**

Ing. Zdeněk Němec, Ph.D. v.r.
děkan

L.S.

Ing. Jan Pidanič, Ph.D. v.r.
vedoucí katedry

Prohlášení autora

Prohlašuji:

Tuto práci jsem vypracoval samostatně. Veškeré literární prameny a informace, které jsem v práci využil, jsou uvedeny v seznamu použité literatury.

Byl jsem seznámen s tím, že se na moji práci vztahují práva a povinnosti vyplývající ze zákona č. 121/2000 Sb., autorský zákon, zejména se skutečností, že Univerzita Pardubice má právo na uzavření licenční smlouvy o užití této práce jako školního díla podle § 60 odst. 1 autorského zákona, a s tím, že pokud dojde k užití této práce mnou nebo bude poskytnuta licence o užití jinému subjektu, je Univerzita Pardubice oprávněna ode mne požadovat přiměřený příspěvek na úhradu nákladů, které na vytvoření díla vynaložila, a to podle okolností až do jejich skutečné výše.

Beru na vědomí, že v souladu s § 47b zákona č. 111/1998 Sb., o vysokých školách a o změně a doplnění dalších zákonů (zákon o vysokých školách), ve znění pozdějších předpisů, a směrnicí Univerzity Pardubice č. 9/2012, bude práce zveřejněna v Univerzitní knihovně a prostřednictvím Digitální knihovny Univerzity Pardubice.

V Pardubicích dne 2. 5. 2023

Lukáš Vencel

Poděkování

Tímto bych chtěl poděkovat Ing. Bc. Davidu Matouškovi, Ph.D. za vedení bakalářské práce a odborné rady, které mi velmi pomohly při vypracování tohoto zadání.

Dále bych chtěl poděkovat mému kolegovi Pavlu Šavrdovi, Dis., který mi poskytl laboratoř pro realizaci bakalářské práce.

Anotace

Tématem bakalářské práce je realizace multimetru, který dokáže vyčítat čtyři hodnoty zároveň. Data jsou vyčítána přes USB rozhraní. Rozsahy jsou realizované pomocí mechanických přepínačů.

Klíčová slova

4kanálový multimetr, Vyčítání dat pomocí USB, A/D převodník, mikrokontroler, SPI

Title

Quad channel multimeter

Annotation

The topic of the bachelor's thesis is the realisation of a multimeter that is capable of measuring four values simultaneously. The data is read via a USB interface. The ranges are implemented using mechanical switches.

Keywords

Quad channel multimeter, Data reading via USB, Analog to digital converter, microcontroller, SPI

Obsah

Seznam zkratk	9
Seznam obrázků	10
Seznam tabulek	10
Úvod	11
1 Multimetr	12
1.1 Analogový multimetr	12
1.2 Digitální multimetr.....	12
1.2.1 Multimetr použitý k porovnání výsledků měření.....	13
1.3 Chyby měření.....	13
1.3.1 Absolutní chyba měření.....	14
1.3.2 Relativní chyba měření.....	14
1.3.3 Náhodné chyby.....	14
1.3.4 Systematické chyby	14
2 Vlastní návrh multimetru	15
2.1 Měření stejnosměrného napětí	15
2.2 Měření stejnosměrného proudu.....	16
2.3 Mikrokontroler	17
2.4 Operační zesilovač.....	18
2.4.1 Typy zapojení.....	19
2.5 A/D převodník.....	20
2.5.1 Použité A/D převodníky.....	21
2.6 Napájení	23
2.7 Komunikace USB-UART	25
2.8 Volba měřicích rozsahů.....	26
3 Výroba a realizace prototypu	27
3.1 Návrh DPS	27
3.2 Výrobní data.....	27
3.3 Osazování a oživení	27
3.4 Problémy a chyby řešené při realizaci	28

3.5 Kalibrace měření	28
3.6 Popis kódu pro mikrokontroler	28
3.7 Naměřené hodnoty.....	32
3.8 Další možnosti modifikace	32
3.9 Výsledný vzhled.....	32
Závěr	33
Literatura	34
PŘÍLOHA A – Schéma obvodu.....	35
PŘÍLOHA B – DPS	38
PŘÍLOHA C – Kód programu	39
PŘÍLOHA D – Naměřené hodnoty	44

Seznam zkratek

I/O	INPUT/OUTPUT – Vstup/Výstup
SMD	Surface Mount Device – Součástka pro povrchovou montáž
ADC	Analog Digital Converter – Analogově digitální převodník
USB	Universal serial bus – Univerzální sériová sběrnice
SPS	Samples Per Second – Snímků za vteřinu
SAR	Successive Approximation ADC – A/D převodník s postupnou aproximací
VREF	Voltage Reference – Referenční napětí
SPI	Sereal Pheripetal Interface – Sériové periferní rozhraní
MISO	Master In Slave Out
MOSI	Master Out Slave In
SS	Slave Select
SCK	Hodinový signál SPI sběrnice
RST	Reset
VCC	Napájecí napětí
GND	Ground – zkratka pro uzemnění
DPS	Deska plošného spoje

Seznam obrázků

Obrázek 1: Analogový multimetr	12
Obrázek 2: Digitální multimetr UNI-T.....	13
Obrázek 3: Schéma zapojení obvodu pro měření napětí	16
Obrázek 4: Schéma zapojení obvodu pro měření proudu.....	17
Obrázek 5: ATMEGA16-8AU	18
Obrázek 6: Schématická značka OZ s popisem vstupů.....	19
Obrázek 7: Schématické zapojení diferenčního zesilovače.....	20
Obrázek 8: Schématické zapojení sledovače napětí	20
Obrázek 9: Princip činnosti SAR	22
Obrázek 10: Registr pro povolení interního A/D převodníku [2]	22
Obrázek 11: Registr pro povolení multiplexeru [2].....	23
Obrázek 12: Zapojení obvodu A/D převodníku [8].....	23
Obrázek 13: Schéma zapojení vstupní napájecí části.....	24
Obrázek 14: Schéma zapojení zdroje kladného napětí +2,5V.....	24
Obrázek 15: Schéma zapojení zdroje záporného napětí -2,5V.....	25
Obrázek 16: UART paket [10]	26
Obrázek 17 Diagram kalibrace A/D převodníku [8]	28
Obrázek 18: Ilustrační zapojení SPI sběrnice [11]	30
Obrázek 19: Registry po povolení SPI sběrnice [2]	31
Obrázek 20: kompletní osazený výrobek	32

Seznam tabulek

Tabulka 1: Vlastnosti ideálního a reálného OZ [3]	19
---	----

Úvod

Digitální multimetry jsou v dnešní době velmi používaná zařízení. Díky jednoduchému ovládání jsou součástí vybavení každého elektrikáře nebo jakékoli elektrotechnické laboratoře. Oproti analogovým měřicím přístrojům lze díky displeji a přesnému měření rychle vyčíst měřenou hodnotu.

Cílem práce je vytvořit multimetr, který umožní měřit pomocí čtyř kanálů. Konkrétně umožní měřit dvě napětí od 200 mV do 200 V a dva proudy od 2 mA do 2 A. Díky tomu, že zařízení zvládne měřit tolik hodnot zároveň, lze ho využít například v laboratoři. Hlavní výhodou je, že celý obvod nepotřebuje být napájen z externího zdroje, ale je napájen pomocí USB, z kterého jsou zároveň posílána naměřená data do počítače, kde jsou poté zobrazena. Svým rozměrem se jedná o zařízení, které je spíše určeno na používání na stole. Není zcela kompaktní, aby bylo používáno v terénu.

Hlavním cílem práce je seznámení s funkcemi multimetrů, návrhem desky plošného spoje s vhodným výběrem součástek, zařízení výroby desky plošných spojů, osazením a oživením multimetru.

1 Multimetr

Multimetr je zařízení, které je základem pro každého, kdo se pohybuje v elektrotechnickém oboru. Jedná se v mnoha případech o přenosné zařízení, které nám umožňuje měřit mnoho elektrických i neelektrických veličin. Je možné měřit například napětí, proud, odpor, frekvenci, testovat polovodičové prvky jako jsou diody a tranzistory. Hlavními parametry přístroje je přesnost a maximální rozsah měřené veličiny.

1.1 Analogový multimetr

Jedná se o zařízení, které je schopné měřit napětí, proud, odpor. Mohou obsahovat stupnici pro měření frekvence a výkonu měřeného signálu. V podstatě se jedná o ampérmetr. Jeho funkce je založena na proudu protékajícím cívku. Cívka se pohybuje v magnetickém poli vytvářeném permanentním magnetem. K cívce je připojený ukazatel. Když cívku protéká proud, působí na cívku vychylovací moment a díky ukazateli jsme schopni podle stupnice určit hodnotu měřené veličiny. Pro měření odporu a napětí jsou součástí další obvody, které to umožňují. Poté proud protékající cívku reprezentuje napětí nebo odpor. [1]

Hlavní nevýhodou je menší přesnost než u digitálních multimetrů a složitější vyčítání hodnoty.



Obrázek 1: Analogový multimetr

1.2 Digitální multimetr

Digitální multimetry jsou technologicky novější zařízení než analogové. V dnešní době jsou více používané pro svoji jednoduchost ovládání a relativně velké přesnosti měřené veličiny. Kromě napětí, odporu a proudu umožňují měřit kapacity, indukčnosti, frekvenci,

testovat polovodičové prvky a mnoho dalšího. Počet funkcí, které zařízení umí, se odvíjí od ceny výrobku. Hlavní výhodou digitálních multimetrů je automatická polarita měřené veličiny a v mnoha případech automatické nastavení rozsahu. Přenosné multimetry jsou nejčastěji napájeny 9 V baterií, laboratorní pomocí 230 V.

Princip je založen na změření analogové veličiny, která je pomocí děličů a operačních zesilovačů připravena na převod do digitální podoby pomocí A/D převodníku. Po převedení mikrokontroler zpracuje digitální signál a zobrazí ho na displeji zařízení.



Obrázek 2: Digitální multimetr UNI-T

1.2.1 Multimetr použitý k porovnání výsledků měření

K porovnání jednotlivých měření jsem vybral multimetr UNI-T UT 804. Tento multimetr jsem vybral, jelikož ho používám v práci a dosahuje velmi přesného výsledku měření pro porovnání výsledků s mým projektem. Jedná se o stolní multimetr, který se využívá pro měření v laboratořích. U měření stejnosměrného napětí dosahuje přesnosti měření 0,025 %, u stejnosměrného proudu 0,1 %.

1.3 Chyby měření

Chyby měření elektrických i neelektrických veličin jsou běžnou součástí každého měření. Při každém typu měření existují chyby s tím spojené. Může se jednat o špatnou kalibraci měřicího přístroje, špatně zvoleným postupem celého měření nebo se jedná o lidské pochybení, které může být způsobené špatným vyčtením hodnoty z měřicího zařízení nebo například zaokrouhlením měřené hodnoty.

1.3.1 Absolutní chyba měření

Absolutní chyba v měření elektrických i neelektrických veličin určuje rozdíl mezi změřenou a skutečnou hodnotou. Nebere se ohled na to, zda je výsledná hodnota větší nebo menší než skutečná hodnota. Výsledná hodnota z výpočtu chyby vyjde vždy kladná, protože se jedná o absolutní hodnotu výpočtu. Vyjadřuje se ve stejných jednotkách jako měřená veličina, například Volty nebo Ohmy.

$$\Delta_x = x_i - X_i$$

1.3.2 Relativní chyba měření

Relativní chyba měření je typ chyby, který vyjadřuje rozdíl mezi skutečnou a naměřenou hodnotou veličiny v procentech skutečné hodnoty. Tato hodnota se používá k porovnání přesnosti při měření různých veličin s různými jednotkami. V případech, kdy je skutečná měřená hodnota velmi malá, může i malá absolutní chyba měření způsobit, že relativní chyba měření může být vysoká. Tento typ chyby se používá například při určení odchylky mezi etalonem a jiným měřicím zařízením.

$$\delta_x = \frac{\Delta x}{X_i} \cdot 100 [\%]$$

1.3.3 Náhodné chyby

Náhodné chyby ovlivňují průběhy měření takovým způsobem, který nelze nijak předvídat. Výsledné hodnoty měřené veličiny budou vycházet vyšší nebo nižší než skutečná měřená veličina. Nejčastější příčina této chyby může být způsobena například chybou přesnosti měřicího přístroje, lidského faktoru při zaokrouhlování hodnoty nebo zdrojem šumu v měřeném obvodu.

Pro náhodné chyby lze použít průměrování výsledků měření nebo použití měřicích zařízení s větší přesností měřené veličiny a menšími náhodnými chybami.

1.3.4 Systematické chyby

Systematické chyby se mění předvídatelným způsobem. Měřená veličina se mění od skutečné veličiny vždy stejným způsobem. Tyto chyby mohou být způsobeny vadným zařízením, špatnou kalibrací nebo chybou offsetu, kdy není správně nastavený nulový bod a měřená veličina je o tento údaj rozdílná.

2 Vlastní návrh multimetru

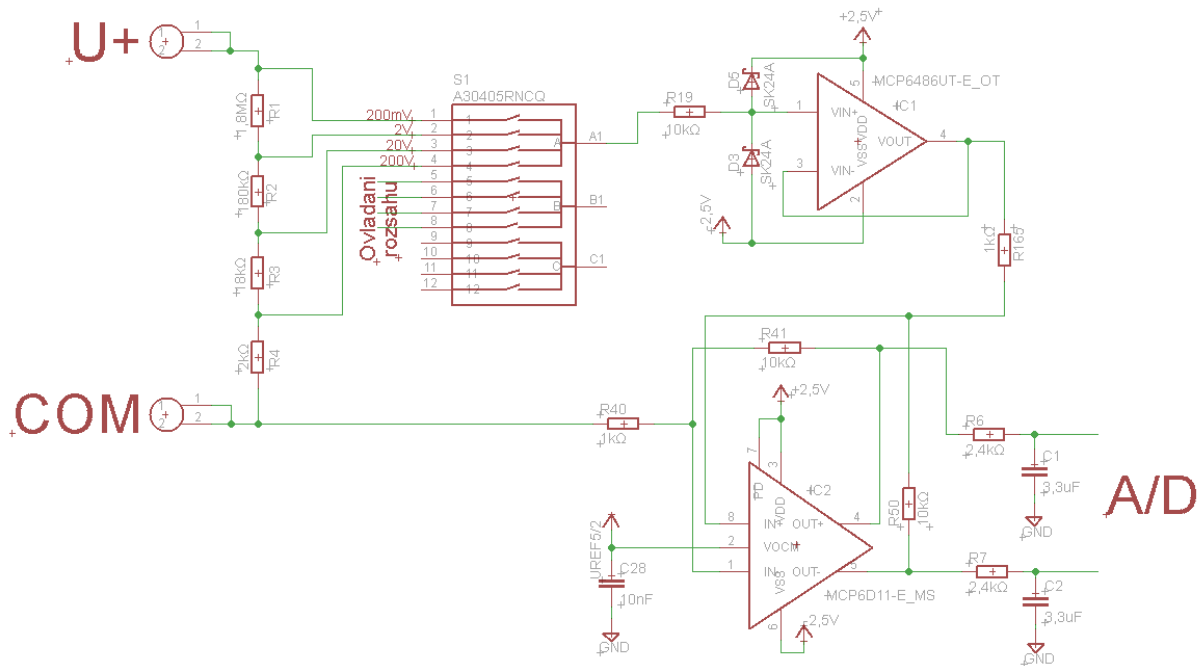
Tato kapitola se zabývá obecnými znalostmi potřebnými pro pochopení funkce komponent a výběrem jednotlivých součástí prototypu zařízení.

2.1 Měření stejnosměrného napětí

Pro měření stejnosměrného napětí se multimetr zapojuje paralelně s měřeným obvodem. V ideálním případě by měl být vnitřní odpor multimetru co největší, ideálně nekonečný, aby byl měřený obvod co nejméně zatěžován. V reálném případě se vnitřní odpor zařízení pohybuje v jednotkách až desítkách $M\Omega$. Změna rozsahů je zpravidla realizována pomocí napěťového děliče, kde pomocí přepínače nastavíme požadovaný dělicí odpor pro vyčítání měřené hodnoty. Dále může být měřené napětí zesíleno diferenčním zesilovačem, kvůli přesnějšímu převedení na digitální hodnotu pomocí A/D převodníku a pozdějšího zpracování mikrokontrolerem.

Návrh obvodu pro konkrétní aplikaci

Pro splnění podmínek zadání bakalářské práce bylo potřeba navrhnout odporový dělič s minimálním odporem $100\text{ k}\Omega$ a nastavováním jednotlivých napěťových rozsahů 200 mV , 2 V , 20 V , 200 V . Za vstupními svorkami je navržen odporový dělič pro tyto rozsahy. Celkový vnitřní odpor měřicího obvodu přístroje je zvolen na $2\text{ M}\Omega$. Tyto rezistory jsou z odporové řady E12. Při měření maximálního napětí z nastaveného rozsahu je výstupní napětí z odporového děliče $0,2\text{ V}$. Nastavení rozsahů je realizováno pomocí otočného přepínače. Za přepínačem se nachází rezistor s odporem $10\text{ k}\Omega$, který snižuje proud protékající odvodem a diodový omezovač napětí, který chrání komponenty proti přepětí. Operační zesilovač IC1, zapojený jako sledovač napětí je zde použitý z důvodu oddělení impedance vstupní části od A/D převodníku. Jelikož A/D převodník dokáže převést do digitální podoby napětí až $4,096\text{ V}$ je v obvodu navržený diferenční zesilovač IC2, který měřené napětí zesiluje 5x pro dosažení větší přesnosti. Z důvodu potlačení rušivých signálů je mezi diferenčním zesilovačem a A/D převodníkem zařazena dolní propust tvořená RC filtrem pro potlačení rušivých signálů nad 20 Hz . Poté je pomocí A/D převodníku analogová hodnota převedena na diskretní a dále zpracována pomocí mikrokontroleru.



Obrázek 3: Schéma zapojení obvodu pro měření napětí

2.2 Měření stejnosměrného proudu

Měření stejnosměrného proudu probíhá pomocí multimetru, který je zapojený v sérii s měřeným obvodem. Princip je založený na rezistoru se známým odporem připojeným v obvodu a měření úbytku napětí na rezistoru. Výsledný proud lze pomocí známého rezistoru a změřeného úbytku napětí na rezistoru dopočítat pomocí Ohmova zákona.

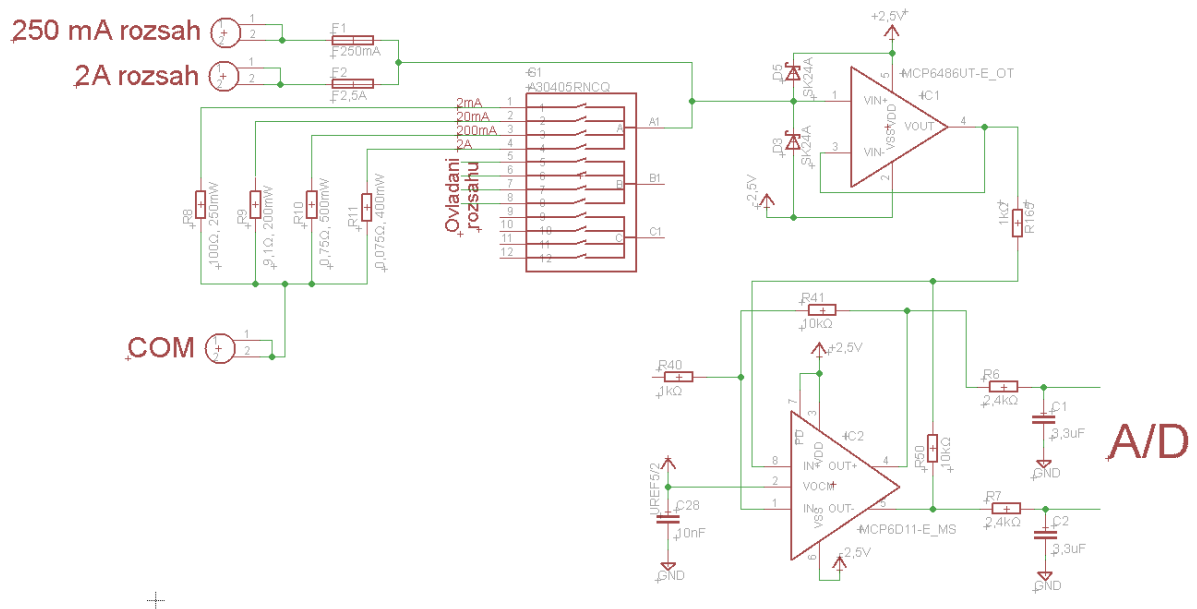
$$I = \frac{U_R}{R}$$

Je kladen důraz na to, aby byla hodnota vnitřního odporu co nejmenší, ideálně nulová, aby nebyl ovlivněn měřený obvod. V reálném případě se pohybuje v jednotkách, maximálně desítkách Ω . Hodnota vnitřního odporu je závislá na nastavení měřicího rozsahu přístroje.

Návrh obvodu pro konkrétní aplikaci

Návrh obvodu pro měření proudu je realizovaný pro čtyři přepínatelné rozsahy 2 mA, 20 mA, 200 mA a 2 A. Hlavní podmínkou realizace byl maximální úbytek napětí na rezistoru stanovený na 200 mV. Pro splnění podmínek jsem zvolil velikost rezistorů tak, aby při měření maximální hodnoty z nastaveného rozsahu byl úbytek napětí menší než maximální stanovený limit.

Princip měření proudu viz. obrázek 4 spočívá v přepínání jednotlivých rezistorů. Jedná se o zapojení, kdy se pomocí otočného přepínače připojuje konkrétní rezistor. Hlavní výhodou oproti odporovému děliči, kde jsou rezistory zapojené v sérii je, že při poruše jednoho z měřicích rezistorů jsou zbylé rozsahy pro měření proudu stále funkční. Z důvodu ochrany obvodu je vstupní kladná svorka rozdělena na dva samostatné vstupy. Každý vstup obsahuje odpovídající ochranu proti překročení maximálního proudu v podobě proudové pojistky. Na rezistory je paralelně připojený obvod pro měření úbytku napětí na rezistoru. Za přepínačem se nachází diodový omezovač pro ochranu obvodu proti přepětí a operační zesilovač IC1, zapojený jako sledovač napětí pro impedanční oddělení vstupní části od měřicí části. Pomocí diferenčního zesilovače IC2 je vstupní signál zesílen 5x pro dosažení lepších výsledků a lepšího zpracování A/D převodu. Mezi výstupem diferenčního zesilovače a vstupem A/D převodníku je realizovaný RC filtr typu dolní propust pro potlačení rušivých signálů nad 20 Hz.



Obrázek 4: Schéma zapojení obvodu pro měření proudu

2.3 Mikrokontroler

Mikrokontroler (MCU) je mikropočítač, který je umístěn v jednom čipu. Je to kompaktní integrovaný obvod, který se skládá z procesoru, paměti: RAM, EEPROM, FLASH, A/D převodníků, komparátorů a vstupně/výstupních portů, které lze libovolně programovat. Využívají se v mnoha řadách aplikací k ovládání funkcí domácích spotřebičů nebo v automobilovém průmyslu, kde jsou součástí řídicích jednotek vozů. Nejčastěji se programují pomocí jazyka C a program je nahráván pomocí speciálního programátoru. Mohou být využité jak k jednoduchým aplikacím, tak i k ovládání složitých systémů.

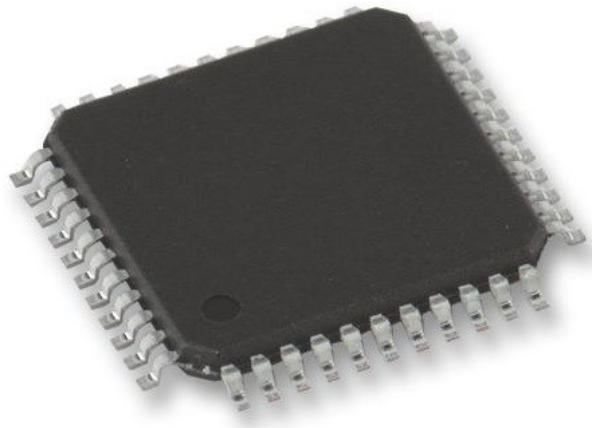
Zvažované varianty

Zvažoval jsem dva typy mikroprocesorů. První varianta spočívala v použití mikroprocesoru ESP32. Jedná se o 32bitový mikroprocesor od výrobce ESPRESSIF. Tento mikrokontroler disponuje interním 12bitovým A/D převodníkem a obsahuje také možnost Wifi nebo Bluetooth připojení, do projektu to ale nebylo potřebné.

ESP32 disponuje řadou funkcí, ale s vedoucím práce jsme rozhodli, že je pro aplikaci v tomto projektu předimenzovaný, proto jsem zvolil variantu 8bitových mikroprocesorů z rodiny AVR. Výběr vhodného mikrokontroleru byl v době návrhu složitý, protože v této době bylo mnoho variant na celosvětovém trhu nedostupných.

Zvolená varianta

Do projektu jsem zvolil ATMEGA 16 v SMD variantě. Jedná se o 8bitový AVR mikrokontroler od firmy ATMEL. Obsahuje 32 digitálních I/O, které jsou rozdělené do čtyřech portů (A, B, C, D), integrovaný 8 kanálový 10bitový A/D převodník, SPI a UART. [2] Integrovaný A/D převodník je v tomto řešení použitý pro výběr měřených rozsahů ze čtyř přepínačů. A/D převodník je v multiplexním provedení a je součástí každého z portů ze skupiny pinů A. Rozlišení převodníku v tomto případě není důležité, protože zde u tohoto měření není potřeba znát měřenou hodnotu velmi přesně, protože se jedná pouze o zjištění rozsahu měření. Pro přesné určení měřené veličiny jsem zvolil externí 12bitové A/D převodníky, které komunikují pomocí SPI sběrnice. Rozhraní UART je použité pro komunikaci s čipem FT232RL, který realizuje komunikaci mezi mikrokontrolerem a zařízením pro zobrazování výsledků měření.

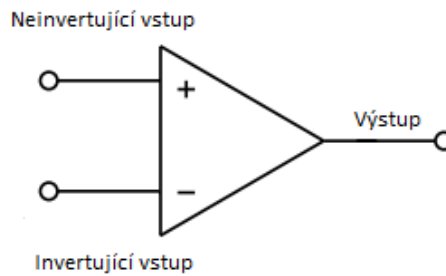


Obrázek 5: ATMEGA16-8AU

2.4 Operační zesilovač

Operační zesilovač byl univerzální zesilovací prvek, který byl původně určený k matematickým operacím na analogových počítačích. V dnešní době se jedná o stejnosměrný zesilovač, který je schopný velkého zesílení, schopný stabilní činnosti

v uzavřené zpětnovazební smyčce. Jedná se o zařízení, který má dva vstupy a jeden výstup. [3]



Obrázek 6: Schématická značka OZ s popisem vstupů

Parametry operačních zesilovačů

V tabulce jsou zobrazeny parametry ideálního a reálného operačního zesilovače.

Tabulka 1: Vlastnosti ideálního a reálného OZ [3]

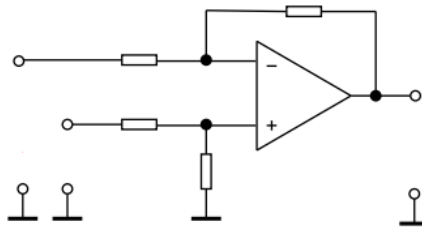
	Vstupní odpor	Výstupní odpor	Šířka pásma	Velikost zesílení	Offset
Ideální zesilovač	∞	0	∞	∞	0
Reálný zesilovač	jednotky M Ω	jednotky Ω	desítky MHz	až 10^6	>0

2.4.1 Typy zapojení

Diferenční zesilovač

Diferenční zesilovač je typ operačního zesilovače, který je určen k zesílení rozdílu mezi invertujícím a neinvertujícím vstupem. Tento typ se používá pro zesílení malých signálů mezi dvěma body.

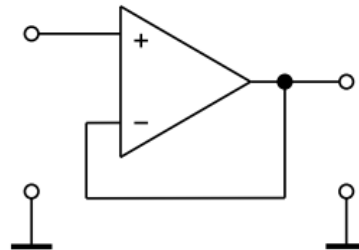
Tyto zesilovače lze konfigurovat mnoha způsoby, jako je například nastavení velikosti zesílení pomocí zpětnovazebního rezistoru a také se často realizují filtry pro potlačení nežádoucího rušení. Pro speciální aplikace lze použít tzv. nízkošumové zesilovače, které jsou vhodné pro velmi přesné měření signálu. [4]



Obrázek 7: Schématické zapojení diferenčního zesilovače

Sledovač napětí

Operační zesilovač zapojený jako sledovač napětí je typ neinvertujícího zapojení. Není určen k zesilování signálu. Jeho zesílení je 1x, tzn. $V_{in} = V_{out}$. Jeho hlavní použití je k oddělení impedance v různých částech obvodu. V mém projektu je použitý pro impedanční oddělení napěťových děličů od měřicí části s diferenčním zesilovačem a A/D převodníkem.



Obrázek 8: Schématické zapojení sledovače napětí

2.5 A/D převodník

A/D (Analogově/Digitální) převodníky jsou zařízení, které jsou určeny k převodu časově proměnného analogového signálu na digitální hodnoty. Hlavním účelem A/D převodníků je digitalizovat analogové spojité signály za účelem následného zpracování dalšími obvody pracující s diskrétními signály. Výkon a přesnost převodníku je určen rozlišením a vzorkovací frekvencí samotného obvodu.

Rozlišení

Rozlišení je jeden z nejdůležitějších údajů převodníku. Udává, s jakou přesností bude analogový spojité signál převeden na diskrétní hodnotu. Nejčastěji se toto číslo vyjadřuje v bitech a udává, kolika digitálními hodnotami lze analogový signál popsat. Například u 14bitového převodníku dokáže obvod vytvořit 2^{14} (16384) digitálních úrovní, s kterými lze dále pracovat. Obecně lze říct, že čím více bitů má převodník, tím je samotný převod do digitální podoby přesnější.

Vzorkování

Vzorkování je proces, při kterém se převádí vzorkovaný analogový signál na diskrétní signál. Proces spočívá v pravidelném snímání hodnot signálu pravidelnou frekvencí, která musí být pro přesnost převodu minimálně 2x větší než frekvence vzorkovaného signálu.

Diferenciální nelinearita – DNL

„Diferenciální nelinearita DNL je pro každé jeho kódové slovo (mimo první a poslední) definována odchylkou bitové šířky w_k (Bin Width) od rozlišnosti ideálního kvantizátoru q .“ [5]

Integrální nelinearita – INL

„Integrální nelinearita INL je pro každé jeho kódové slovo (mimo prvního a posledního) definována odchylkou středů bitových šířek kódových slov w_k od průběhu převodní charakteristiky ideálního n bitového A/Č převodníku.“ [5]

Gain Error (GE)

Chyba zisku je typ chyby, který udává, jak dobře se shoduje sklon skutečné přenosové funkce se sklonem ideálního převodníku. Může být způsobena mnoha faktory, jako jsou tolerance jednotlivých komponent, teplota nebo nedokonalosti ve výrobě součástky. Pro odstranění této chyby lze použít například kalibraci nebo úpravu zesílení, díky kterému lze odchylku odstranit a tím zlepšit přesnost A/D převodu. Chybu zisku lze upravit i softwarovým výpočtem hodnoty. [6]

Offset Error (OE)

Chyba offsetu je odchylka skutečné přenosové funkce od přenosové funkce ideálního A/D převodníku. Může být způsobena mnoha faktory, jako jsou tolerance jednotlivých komponent, teplota nebo nedokonalosti ve výrobě součástky. Může být také způsobena faktory jako je rušení nebo šum. Chyba je vyjádřena jako procento z celého rozsahu A/D převodníku. Chybu lze zmenšit pomocí kalibrace a tím se omezí chyba přesnosti celého převodníku. [7]

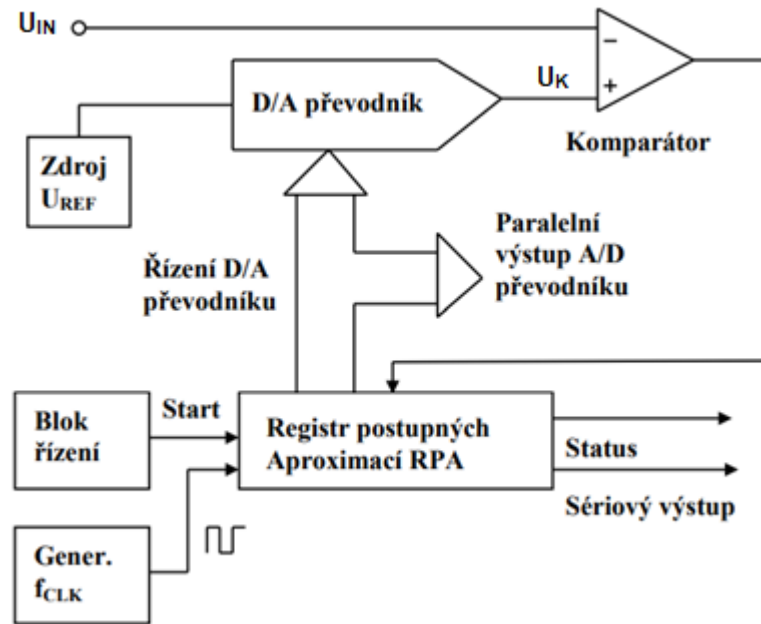
2.5.1 Použité A/D převodníky

S postupnou Aproximací

A/D převodník s postupnou aproximací (SAR) je typ, který se používá v různé řadě aplikací. Základní princip využívá postupné aproximace s váhově odstupňovanými vzorky náboje, které jsou generovány D/A převodníkem se spínanými kondenzátory, které mají váhově odstupňované kapacity.

Převod probíhá v n – krocích, kde n udává počet bitů A/D převodníku. Jakmile registr postupné aproximace převede digitální kód ze vstupního signálu, je tento kód převeden pomocí D/A převodníku zpět na analogový signál a je komparátorem porovnán se vstupním analogovým signálem. Pokud je signál v tolerančních mezích, je digitální kód připraven na výstupu A/D převodníku. [5]

Převodníky se vyrábějí s přesností až 20bitů. Součástí ATMEGA16 jsou tyto převodníky v 10bitové variantě, kterými jsou ovládány jednotlivé měřené rozsahy.



Obrázek 9: Princip činnosti SAR

A/D převodník integrovaný v mikroprocesoru

V mikrokontroleru je z výroby integrovaný A/D převodník. Jedná se o 8kanálový, 10bitový převodník s postupnou aproximací, který je integrovaný v kanálech PA0 – PA7. V případě, že je mikrokontroler v provedení SMD variantě, je 7 těchto kanálů v diferenční variantě (dokáže zpracovat obě polaroty signálu) a má nastavitelné zesílení. Pro přesnost měření, ale byly použité pouze pro určování nastavených měřících rozsahů pomocí přepínače.

Pro použití interního A/D převodníku je potřeba nastavit piny PA jako vstupní a povolit převodník pomocí registru a ADCSRA viz. obrázek 10. Je nutné vybrat multiplexer pro vyčítání jednotlivých kanálů viz. obrázek 11. [2]

Bit	7	6	5	4	3	2	1	0	
	ADEN	ADSC	ADATE	ADIF	ADIE	ADPS2	ADPS1	ADPS0	ADCSRA
Read/Write	R/W	R/W	R/W	R/W	R/W	R/W	R/W	R/W	
Initial Value	0	0	0	0	0	0	0	0	

Obrázek 10: Registr pro povolení interního A/D převodníku [2]

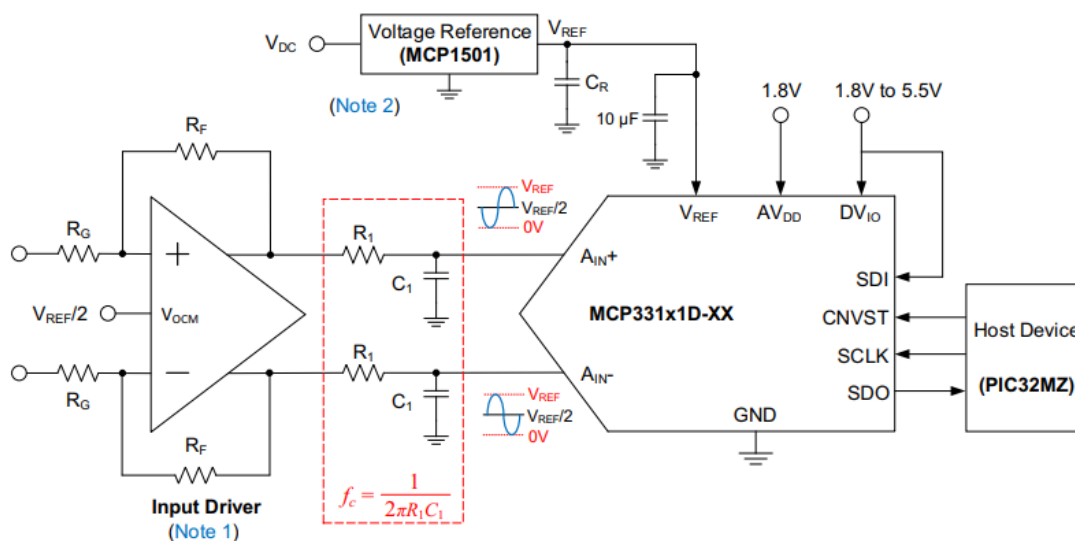
Bit	7	6	5	4	3	2	1	0	
	REFS1	REFS0	ADLAR	MUX4	MUX3	MUX2	MUX1	MUX0	ADMUX
Read/Write	R/W	R/W	R/W	R/W	R/W	R/W	R/W	R/W	
Initial Value	0	0	0	0	0	0	0	0	

Obrázek 11: Registr pro povolení multiplexeru [2]

A/D převodník měřicí části

Hlavní podmínkou pro výběr převodníku pro měřicí část bylo alespoň 10bitů a $INL < 2$ LSB, $DNL < 2$ LSB, $GE < 5$ LSB, $OE < 5$ LSB. Bylo potřeba zvolit takový převodník, aby byl schopen zpracovávat diferenční hodnoty (kladné i záporné). Pro tyto potřeby jsem zvolil A/D převodník MCP33141. Jedná se o sérii převodníků SAR 12, 14 a 16bitových. Vyrábějí se ve dvou variantách. 500 kps a 1 Msps. [8] Pro splnění podmínek parametrů a dostatečné přesnosti jsem zvolil variantu 12bitového převodníku s 500 kps.

Pro správnou funkčnost jsem zvolil variantu s diferenčním zesilovačem, která dokáže zpracovat signál obou polarit od $-V_{REF}$ do V_{REF} .



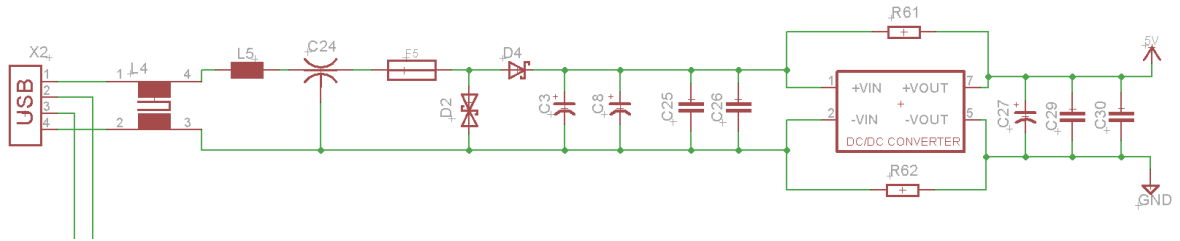
Obrázek 12: Zapojení obvodu A/D převodníku [8]

2.6 Napájení

vstupní napájecí část

Vstupní část napájení je řešena pomocí napájení z USB dle zadání práce. Pro snadné řešení jsem zvolil USB typ B, které je pro tuto aplikaci plně vyhovující. Na vstupu je zapojený filtr souhlasného napětí a potlačovací filtr s tří terminálovým kondenzátorem, který je ideální pro potlačení šumu a rušení na vysokých frekvencích signálu. Dále je zde použitý obousměrný transil, který chrání vstupní část obvodu proti přepětí a izolovaný

DC/DC měnič, který galvanicky odděluje vstupní napájecí část s USB a napájení měřicího obvodu multimetru.



Obrázek 13: Schéma zapojení vstupní napájecí části

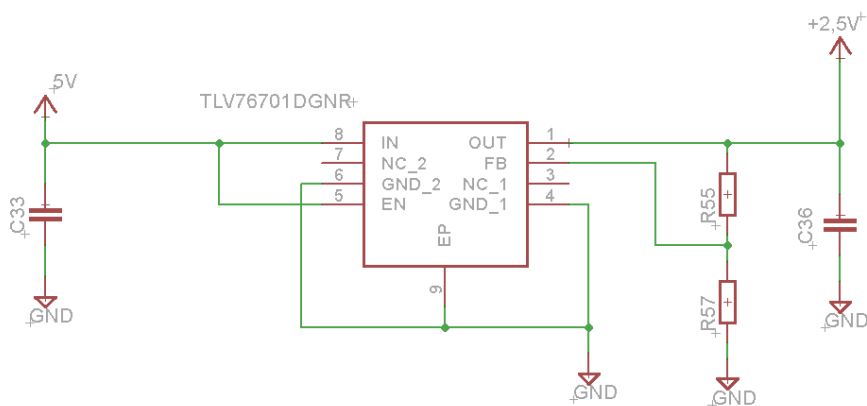
Napájení měřicí části

Pro A/D převodníky bylo nutné zvolit předepsané napěťové reference. Na desce plošného spoje jsem realizoval dvě tyto reference. První napěťová reference 1,8 V je určena pro napájení jednotlivých převodníků. Druhá napěťová reference 4,096 V určuje rozsah převodu. Převodník je schopný převádět analogový signál až na tuto úroveň napěťové reference. Rozsah diskretních hodnot je od 0 až do hodnoty 4095. Přesnost přenosu je 1 mV.

Napájení operačních zesilovačů

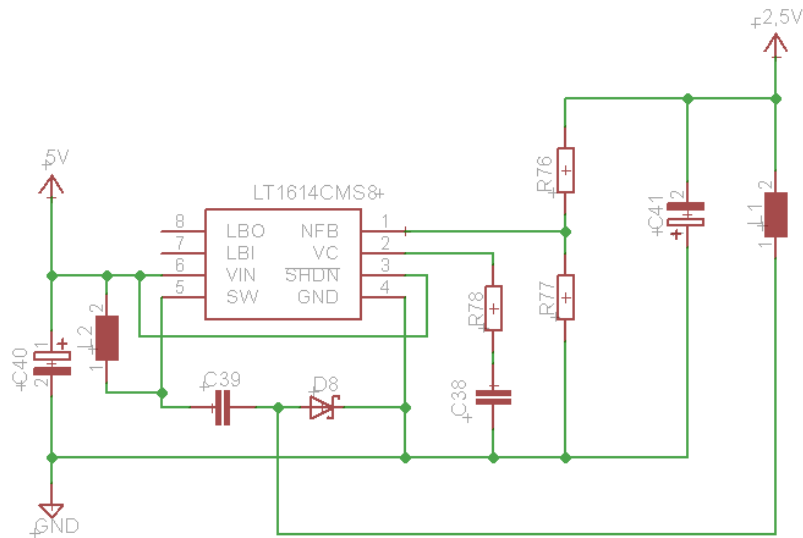
Dále jsem realizoval napájecí napětí $\pm 2,5$ V pro napájení operačních zesilovačů, konkrétně pro diferenční zesilovače a sledovače napětí.

Pro +2,5 V jsem zvolil TLV76706 od firmy Texas Instruments. Jedná se o stabilizátor napětí, který stabilizuje ze vstupního rozsahu 0,8 – 14,6 V na požadované výstupní napětí. Pro zapojení stabilizátoru jsem použil doporučené zapojení dle datasheetu výrobce a určil hodnoty jednotlivých rezistorů odporového děliče, které určují velikost výstupního napětí.



Obrázek 14: Schéma zapojení zdroje kladného napětí +2,5V

Pro plnou funkčnost operačních zesilovačů jsem zvolil zdroj záporného napětí integrovaný obvod LT1614 od firmy Analog Devices, který dokáže ze vstupního kladného napětí vytvořit požadované záporné výstupní napětí. Opět jsem dle datasheetu výrobce použil doporučené zapojení a do počítal velikosti jednotlivých rezistorů pro výstupní napětí z odporového děliče.



Obrázek 15: Schéma zapojení zdroje záporného napětí -2,5V

2.7 Komunikace USB-UART

USB

USB (Universal Serial bus) je sériové rozhraní, které umožňuje univerzální připojení různých zařízení k počítači. K celé funkci USB se používají 4 vodiče, GND, VCC, D+ a D-. VCC vodič je používán pro 5V napájení zařízení připojeného k USB.

Datová komunikace mezi hostitelem a zařízením probíhá pomocí vodičů D+ a D- a GND. Využívá se diferenciální přenos dat, tzn. že data, která jsou přenášena pomocí D+ a D- a jsou vůči sobě kódována. Díky tomuto kódování se zvyšuje rychlost přenosu dat a odolnost vůči rušení. [9]

UART

UART (Universal Asynchronnost Receiver/Transmitter) komunikační protokol, který se používá pro vysílání nebo příjem dat. Ke své komunikaci používá asynchronní přenos.

UART je způsob přenosu dat, pomocí paketu. Skládá se ze START bitu, datových bitů, paritního bitu a STOP bitu. Počet posílaných bitů je od 5 do 9. Standardní nastavení bitů je 8. V případě, že není nastavený paritní bit, může být dlouhá až 9 bitů.

Přenos začíná překlopením START bitu z vysoké úrovně na nízkou po dobu jednoho hodinového cyklu. Když přijímací zařízení detekuje tento stav, začne číst bity z datového rámce. Datový rámec obsahuje aktuální přenášená data. Paritní bit se používá pro detekci

chyb v přenosu. Tento bit lze nastavit na lichý, sudý nebo nemusí být vůbec nastaven. Pokud je paritní bit nastavený, přijímač kontroluje paritu přijatých dat a detekuje, zda při přenosu nedorazily chybné pakety.

Komunikace může probíhat jak polo-duplexně, tak duplexně. Rychlost přenosu dat udává, kolik bitů za vteřinu může být přeneseno za jednu sekundu přes komunikační kanál.

Jedná se o protokol, který poskytuje spolehlivý a efektivní přenos dat. [10]



Obrázek 16: UART paket [10]

Zvolená varianta komunikace USB-UART

Jelikož samotný procesor neumožňuje komunikaci přes rozhraní USB, pro aplikaci jsem zvolil čip FT232R od společnosti FTDI. Jedná se o komponent, který umožňuje obousměrnou komunikaci o rychlost 3 Mb/s. Pro potřeby zařízení stačí, aby pouze jednosměrně posílal naměřená data z mikroprocesoru na výstup USB. Obsahuje programovatelné piny, na které je možné připojit indikační LED, které mohou indikovat jednotlivé stavy komunikace. Díky internímu oscilátoru obvod v základní konfiguraci nepotřebuje externí zdroj hodinového signálu. V případě aplikace čipu v tomto zařízení je připojený externí krystal, který generuje frekvenci 12 MHz.

V základní konfiguraci lze pouze připojit napájení a piny pro komunikaci RxD a TxD. Čip FTDI FT232R se konfiguruje pomocí programu FT Prog. V případě přeměny vodičů RxD a TxD lze problém vyřešit pomocí softwarového přepnutí těchto vodičů.

2.8 Volba měřicích rozsahů

Na desce multimetru se nacházejí celkem čtyři přepínače. Tento výběr byl z důvodu nastavení rozsahů na každém měřicím kanále zvlášť. Hlavní parametr, který velmi ztěžoval výběr, byl maximální proud, který může protékat přes jednotlivé vývody. Z tohoto důvodu jsem vybral přepínač s dostatečnou rezervou, aby zde nenastal problém. V přepínači jsou využité dva póly z každé polohy přepínače. První pól je připojen na výstup z děliče měřené veličiny. Druhý pól je použitý pro napěťový dělič pro určení rozsahů. Výstup druhého pólu přepínače je připojený na mikrokontroler, který využívá integrovaný A/D převodník. Dle změřeného napětí na odporovém děliči mikrokontroler určuje měřený rozsah a použije se vhodný vzorec pro výpočet měřené veličiny. Toto zapojení jsem zvolil z důvodu jednoduchosti, bezproblémového fungování a malého nároku na použité piny mikrokontroleru.

3 Výroba a realizace prototypu

V této kapitole se chronologicky zaměřuji na postup celé prototypové výroby prvního kusu 4kanálového multimetru. Kapitola zahrnuje celou výrobu až po konečné oživení s popisem jednotlivých bloků programu, který celé zařízení ovládá.

3.1 Návrh DPS

Celý obvod byl realizován v „moderní“ variantě tvořenou SMD součástkami. Hlavní výhodou SMD je možnost vytvořit menší plošné spoje než pomocí vývodových součástek. V mé práci jsem rozměry projektu nijak neřešil, ale soustředil jsem se hlavně na to, aby celé zařízení bylo přehledně zapojené. Hlavní důvod, proč jsem zvolil návrh celého obvodu v SMD je ten, že v tomto provedení se vyrábí více součástek a je jich i více dostupných na celosvětovém trhu.

Vybíral jsem takové SMD součástky, které mají jednotlivé vstupy/výstupy vyvedeny pomocí malých pinů z důvodu ručního letování pomocí pájecí stanice. V případě osazování strojem je možné zvolit i součástky, které mají pouze letovací plošky.

Zapojení je složitější, proto je deska tvořená ze dvou měděných vrstev. V jedné vrstvě toto zapojení nelze realizovat. Z důvodu možného rušení mezi signálovými vodiči je po celém obvodu realizován polygon, který je tvořen zemí GND. Díky tomu je zajištěn i dobrý odvod tepelných ztrát od jednotlivých součástek. Kvůli možnému vytvoření antény z polygonu jsou v celém obvodu a v každém záhybu vytvořené pokovené otvory, které toto riziko odstraňují.

3.2 Výrobní data

Po dokončení návrhu desky a finálním odsouhlasení jsem začal s tvorbou výrobních dat. Zvolil jsem formát dat, který vyžadoval výrobce. Jedná se o Gerber formát. Je to standard, který se používá pro výrobu DPS. Výrobní data se skládají z mnoha souborů. Každý soubor reprezentuje jednu část, která je na desce potřeba udělat. Jedná se o hlavní a spodní vrstvu, data pro souřadnice pro otvory pokovovacích otvorů a velikostmi vrtáků, velikost desky a potisk, který udává informace o názvu jednotlivých součástek umístěných na DPS. Výrobní data byla následně zaslána do výrobní firmy, kde pracovníci odsouhlasili kompatibilitu.

3.3 Osazování a oživení

Kvůli možnému výskytu chyb v zapojení jsem se rozhodl osadit projekt vlastními silami. Hlavní nevýhoda při osazování prototypu strojem je, že při chybném návrhu zapojení některé z komponent, se problémové místo spatně hledá. Oblast hledání je mnohem větší než při ručním osazování.

Osazovat jsem začal nejprve napájecí 5 V část společně s čipem FTDI a mikrokontrolerem. Díky tomuto osazení a oživení tohoto bloku jsem byl schopen začít

poprvé komunikovat s počítačem a vyčítat zkušební data. Poté bylo možné osadit napájecí bloky pro měřicí část, a nakonec i všechny zbylé komponenty.

3.4 Problémy a chyby řešené při realizaci

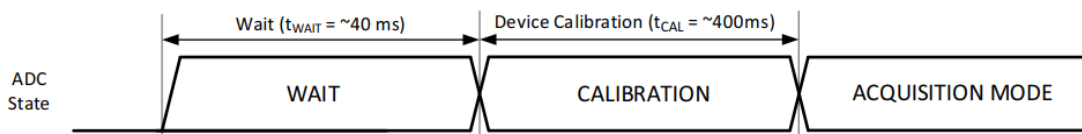
Při osazování a oživování, zejména u prototypové výroby, se můžeme setkat s řadou chyb v návrhu DPS. V mém případě se jednalo o chyby, které bylo možné jednoduchou úpravou desky odstranit. Jednalo se například o špatně nakreslené napájení pro mikrokontroler, konkrétně napájení interních A/D převodníků. Další problém, který nastal při návrhu, byl nefunkční operační zesilovač zapojený jako sledovač napětí a při oživování jednotlivých kanálů způsobil nefunkčnost jednoho z nich.

Další problém, který mi způsobil neúplnou funkčnost měření, byl způsoben špatným nastudováním datasheetu pro parametry diferenčního zesilovače. Zesílení pomocí zpětné vazby bylo nastaveno za hranici zesílení udávanou výrobcem. Měření nefungovalo v plném rozsahu. Chyba byla opravena zparalelněním rezistoru na zpětné vazbě. Nyní je zesílení upraveno z původních 10x na 5x.

3.5 Kalibrace měření

Po připojení napájení je třeba jednotlivé A/D převodníky zkalibrovat, aby výsledek měřené veličiny byl co nejpřesnější. Kalibrace externích A/D převodníků probíhá automaticky při spuštění. Ve chvíli, kdy je připojené napájení a hodnoty zdrojů reference jsou ustálené, A/D převodník spustí kalibraci. Tato kalibrace trvá přibližně 400 ms viz. obrázek 3.5.1. V době kalibrace nesmí být ze zařízení vyčítána data. Pokud by data byla vyčítána, mohlo by dojít ke špatné kalibraci a velké odchylce od měřeného signálu.

Pro zvýšení přesnosti měření lze softwarově upravit velikosti rezistorů odporového děliče při zpětném dopočítávání hodnot měřené veličiny. Přesným měřením a úpravou programu lze dosáhnout vysoké přesnosti.



Obrázek 17 Diagram kalibrace A/D převodníku [8]

3.6 Popis kódu pro mikrokontroler

Komunikace USB – UART

Tato část kódu reprezentuje inicializaci a následné ovládání sériové komunikace UART. Funkce UART_inicializace se stará o inicializaci jednotlivých parametrů komunikace. UBRRL pomocí hodnoty 51 nastavuje rychlost přenosové komunikace na 9600 za

frekvence hodinového signálu 8MHz. Dále funkce nastavuje parametry rámce znaku 8, N, 1 a zapnutí přijímače a vysílače.

Funkce UART_TX je použita pro odesílání jednoho bytu. Funkce čeká v nekonečné smyčce, dokud není bit UDRE v registru UCSRA nastaven a poté zapisuje hodnotu do registru UDR, která provádí odesílání dat.

Funkce UartPosliString nejdříve projde celý řetězec UART_TX a poté celý řetězec pošle pomocí UART na výstup USB.

```
void uart_inicializace()
{
    UBRR1L = 51;
    UCSRC |= (1<<URSEL)|(1<<UCSZ1)|(1<<UCSZ0);
    UCSRB = (1<<RXEN)|(1<<TXEN);
}
void UART_TX(char a)
{
    while(!(UCSRA & (1<<UDRE)));
    UDR = a;
}

void UartPosliString(char *text)
{
    int i=0;
    while(text[i])
    {
        UART_TX(text[i]);
        i++;
    }
}
```

Ovládání rozsahů

Tato část kódu je určena pro inicializaci interního A/D převodníku a následného vyčítání binárních hodnot, které ovládají jednotlivé měřicí rozsahy.

Funkce ADC_Interni_Inicializace je použita k inicializaci interního multiplexeru a A/D převodníku pomocí registru ADCSRA. Vstupy portu A jsou nastavené jako vstupní.

Před samotným převodem je pomocí registru ADMUX nastaveno, z jakého vstupního pinu bude A/D převodník vyčítat. Poté je zahájen přenos. Po startu přenosu registr ADCSRA čeká, dokud není dostupné celé digitální číslo. Do proměnné AinLow запиše nejnižší bit a poté do Ain nejvyšší bit. Poté se tyto proměnné sečtou. Výsledek je vrácen pomocí parametru return.

```
void ADC_interni_inicializace()
{
    DDRA=0x0; //nastaveni PA jako vstupy
    ADCSRA = 0x87; //povoleni A/D
    ADMUX = 0x40; //registr multiplexeru MUX4
}
```

```

int ADC_interni_cteni(char channel)
{
    int Ain,AinLow;
    Ain = 0;
    AinLow=0;

    ADMUX &= (0xF0);
    ADMUX |= (channel & 0x0F);           //nastaveni vstupniho kanalu

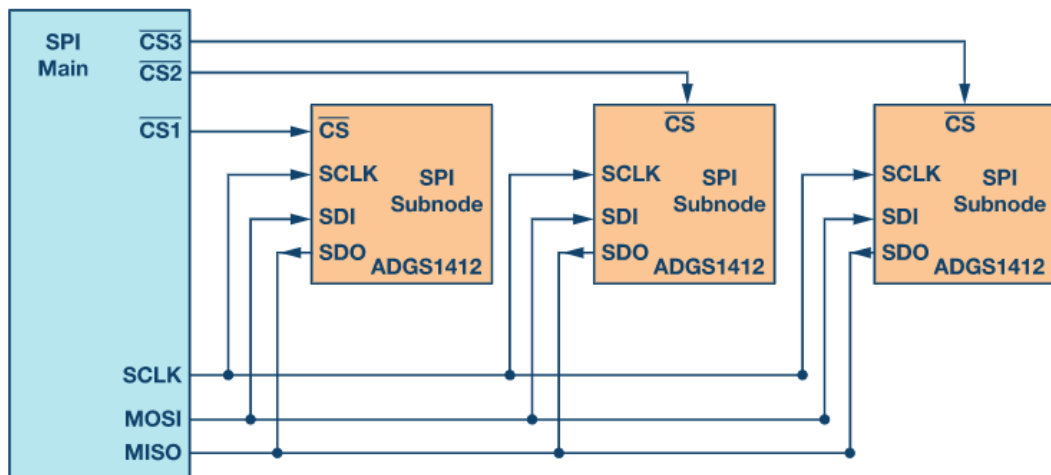
    ADCSRA |= (1<<ADSC);                //start prevodu
    while((ADCSRA&(1<<ADIF))==0);       //hlidani konce prevodu

    _delay_us(10);
    AinLow = (int)ADCL;                  //cteni nejnizsiho bitu
    Ain = (int)ADCH*256;                 //precteni nejvyssich dvou bitu
    Ain = Ain + AinLow;
    return(Ain);
}

```

Komunikace s externím A/D převodníkem

Pro komunikaci mezi mikrokontrolerem a A/D převodníky je realizována tzv. SPI sběrnice. Jedná se o sériový komunikační kanál, který se skládá ze čtyř jednotlivých vodičů (MISO, MOSI, SCK, SS). Zařízení se rozdělují na Master (mikrokontroler) a Slave (A/D převodník). Master řídí celou komunikaci pomocí hodinového signálu SCK. Adresace jednotlivých Slave zařízení zde není řešena pomocí adresy, jako u I2C, ale pomocí jednotlivých SS pinů. Tímto vodičem je pomocí náběžné nebo sestupné hrany (záleží na konkrétním zařízení) zahájena komunikace. SS se zapojuje na jednotlivé GPIO piny mikrokontroleru. SS nemá tyto piny přesně určené. Data mezi Master a Slave jsou posílána přes vodiče MISO a MOSI za hodinového signálu SCK. [11]



Obrázek 18: Ilustrační zapojení SPI sběrnice [11]

Provedení komunikace

V případě zapojení v mé aplikaci používají A/D převodníky tuto komunikaci. Tyto převodníky jsou řízeny pomocí MISO, SCK a SS. V případě tohoto zařízení není potřeba vodič MOSI, protože A/D převodník žádná data nepřijímá. Pro funkční komunikaci musí ale tento pin být také nastaven.

V první fázi bylo třeba pomocí registrů povolit SPI komunikaci a nastavit, aby se mikrokontroler začal chovat jako Master. Pomocí obrázku 19, registru SPCR jsem tyto hodnoty správně nastavil. Jedná se o registry SPE (SPI Enable) a MSTR (Master Select). Do těchto bitů je nutné nastavit 1. Poté je potřeba nastavit SS, SCK, MOSI jako výstupní piny a MISO jako vstupní pin.

Bit	7	6	5	4	3	2	1	0	
	SPCR								
	SPIE	SPE	DORD	MSTR	CPOL	CPHA	SPR1	SPR0	
Read/Write	R/W	R/W	R/W	R/W	R/W	R/W	R/W	R/W	
Initial Value	0	0	0	0	0	0	0	0	

Obrázek 19: Registry po povolení SPI sběrnice [2]

Tato funkce reprezentuje celkovou konverzi dat a následné vyčítání hodnoty z A/D převodníku. Pomocí proměnné `int` a se vybírá konkrétní A/D převodník. Převod začíná pomocí náběžné hrany SS a následně sestupné hrany po dokončení konverze. Poté jsou data dostupná na výstupním pinu A/D převodníku SDO. Pro příjem dat mikrokontrolerem je potřebné nejprve nějaká data z něj vyslat. Pomocí registru SPDR je vyslán falešný bit, který nemá příjemce. Poté je možné na tomto samém registru vyčítat data z převodníku. Jelikož se jedná o 12bitové číslo, je třeba uložit hodnotu do proměnné `int16`. Po prvním příjmu dat je nutné tato data v proměnné pomocí bitového posuvu posunout a znovu vyslat falešný bit pro možnost příjmu zbylých dat. Poté je hodnota převedena do správného tvaru, který se dále zpracovává pro zobrazení výsledné hodnoty.

```
int16_t SPI_ADC(int a)           //int a udava, jaký prevodnik je aktivni
{
    int16_t x = 0;
    PORTB &= ~(1<<a);
    _delay_ms(1);
    PORTB |= (1 << a);           //nabezna hrana SS
    _delay_ms(1);
    PORTB &= ~(1 << a);         //sestupna hrana SS
    SPDR = 0x00;                //MOSI vysilani
    while (!(SPSR & (1 << SPIF))); //cekani na prijem dat MISO
    x = SPDR;
    SPDR = 0x00;
    while (!(SPSR & (1 << SPIF)));
    x = (x << 8) | SPDR;         //bitovy posuv
    x = x >> 4;                 //bitovy posuv
    PORTB |= (1 << a);         //nabezna hrana SS
    if(x & 0x0800)
    x = x | 0xf000;
    return x;
}
```


3.7 Naměřené hodnoty

Měření přesnosti multimetru jsem provedl důkladně na každém z rozsahu. Jednotlivé hodnoty byly porovnávány s dříve zmíněným multimetrem UNI-T UT 804. U měření napětí celková odchylka na všech rozsazích průměrně nepřesáhla 2 %. Nejpřesněji multimetr měří na rozsahu 2 V a 20 V. U rozsahu 200 mV a 200 V je odchylka nepatrně vyšší.

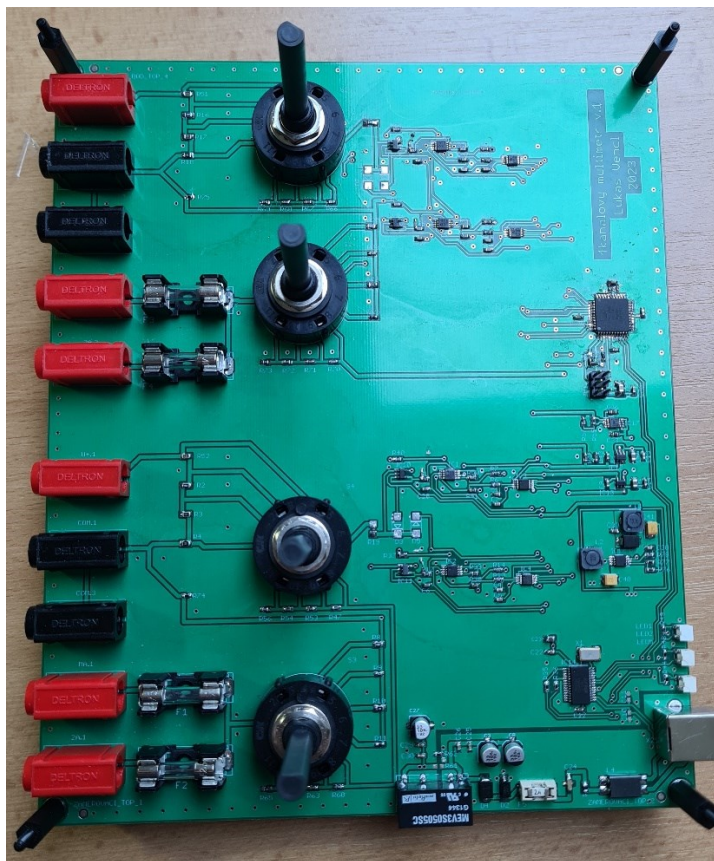
V případě měření proudu zařízení vykazuje nejlepší přesnost na rozsahu 2 mA a 200 mA. U zbývajících rozsahů vykazuje odchylku nepatrně vyšší.

Z mého pohledu se jedná o zařízení, které vykazuje relativně dobrou přesnost, která je dostatečná k měření mnoha aplikací. Kompletní výsledky měření jsou uvedeny v příloze.

3.8 Další možnosti modifikace

Pro vylepšení a možnou modifikaci zařízení by bylo možné celou desku plošného spoje zmenšit a vytvořit kompaktní verzi, která by byla vhodná i pro použití mimo pracovní stůl laboratoře, protože momentální rozměry to neumožňují. Další možnosti, jak toto zařízení modifikovat, je vytvořit obvody pro měření dalších elektrických i neelektrických veličin a tím vytvořit velmi univerzální zařízení pro použití měření různých obvodů.

3.9 Výsledný vzhled



Obrázek 20: kompletní osazený výrobek

Závěr

Psaná část bakalářské práce je rozdělena do třech kapitol. První část je zaměřena na teoretické znalosti, které jsou potřebné pro pochopení tohoto zadání. Ve druhé a třetí kapitole se zaměřuji na samotný výběr součástek, návrhu obvodu a samotnou výrobu a realizaci zadání.

Cílem bakalářské práce bylo sestavení 4kanálového multimetru s napětovými rozsahy od 200mV do 200 V a proudové rozsahy od 2 mA do 2 A. Zařízení dokáže měřit na všech kanálech současně a lze měřit obě polarity. Pro dodržení podmínky ze zadání je úbytek na bočníku pro měření proudu max 200 mV. Jednotlivé rozsahy jsou přepínány pomocí čtyř mechanických přepínačů. V měřícím obvodu je realizovaný filtr, který je použitý k potlačení rušivých signálů nad 20 Hz. Pro převod byl použitý A/D převodník, který splňuje parametry INL <2 LSB, DNL <2 LSB, GE <5 LSB, OE <5 LSB.

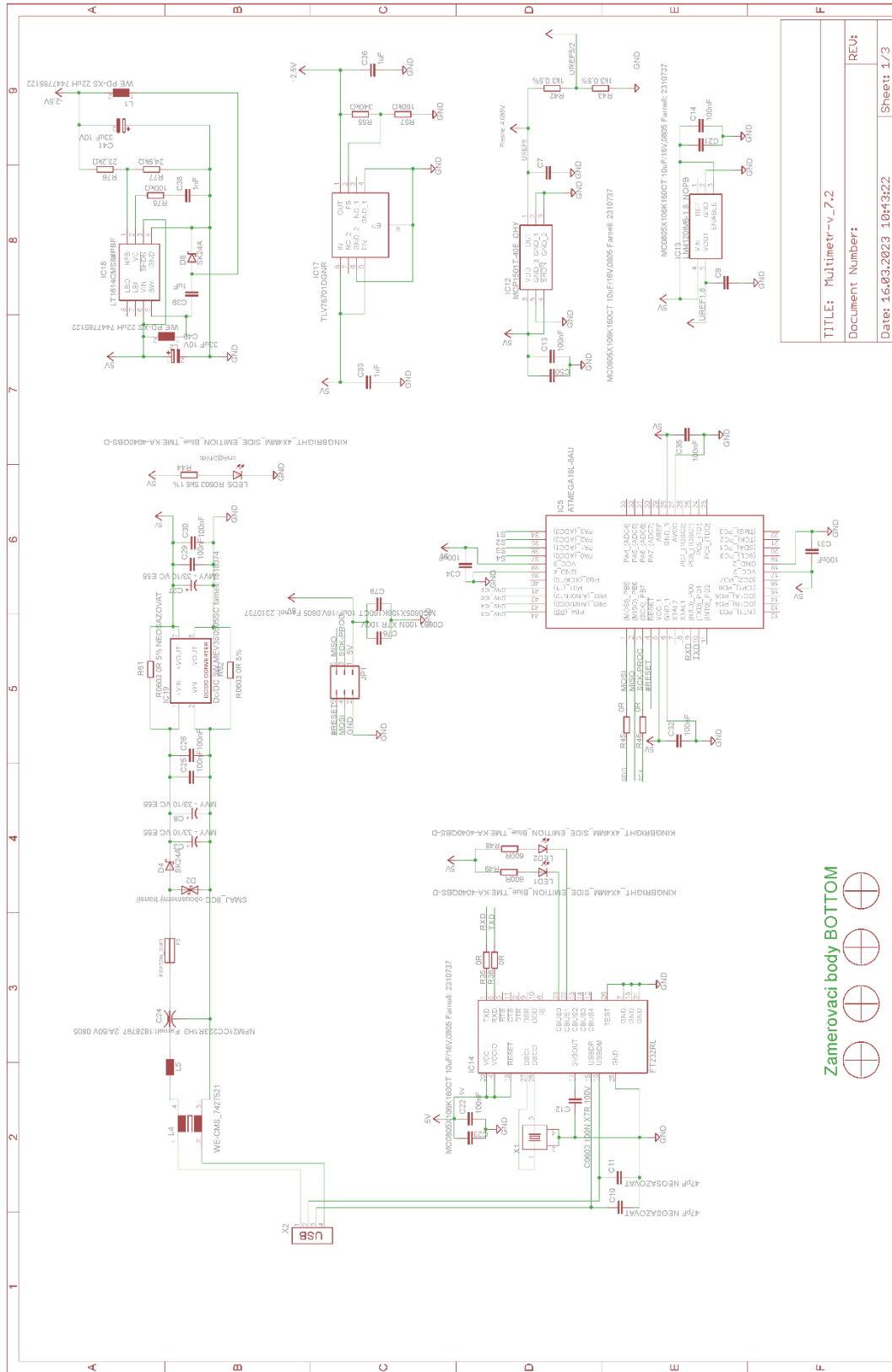
Napájení celého multimetru je realizované pomocí USB, ze kterého jsou zároveň vyčítána data z měření. Data jsou odesílána v textové podobě 1x za sekundu. Komunikace je vytvořena na rychlosti 9600, 8, N, 1. Aby byl počítač chráněn proti přepětí ze strany multimetru, je napájení odděleno od USB pomocí DC/DC měniče, pro úplnou ochranu je použitý i oboustranný transil, který chrání proti přepětí. Z důvodu potlačení možného rušení je zde zapojen 3terminálový kondenzátor společně s frekvenčním filtrem.

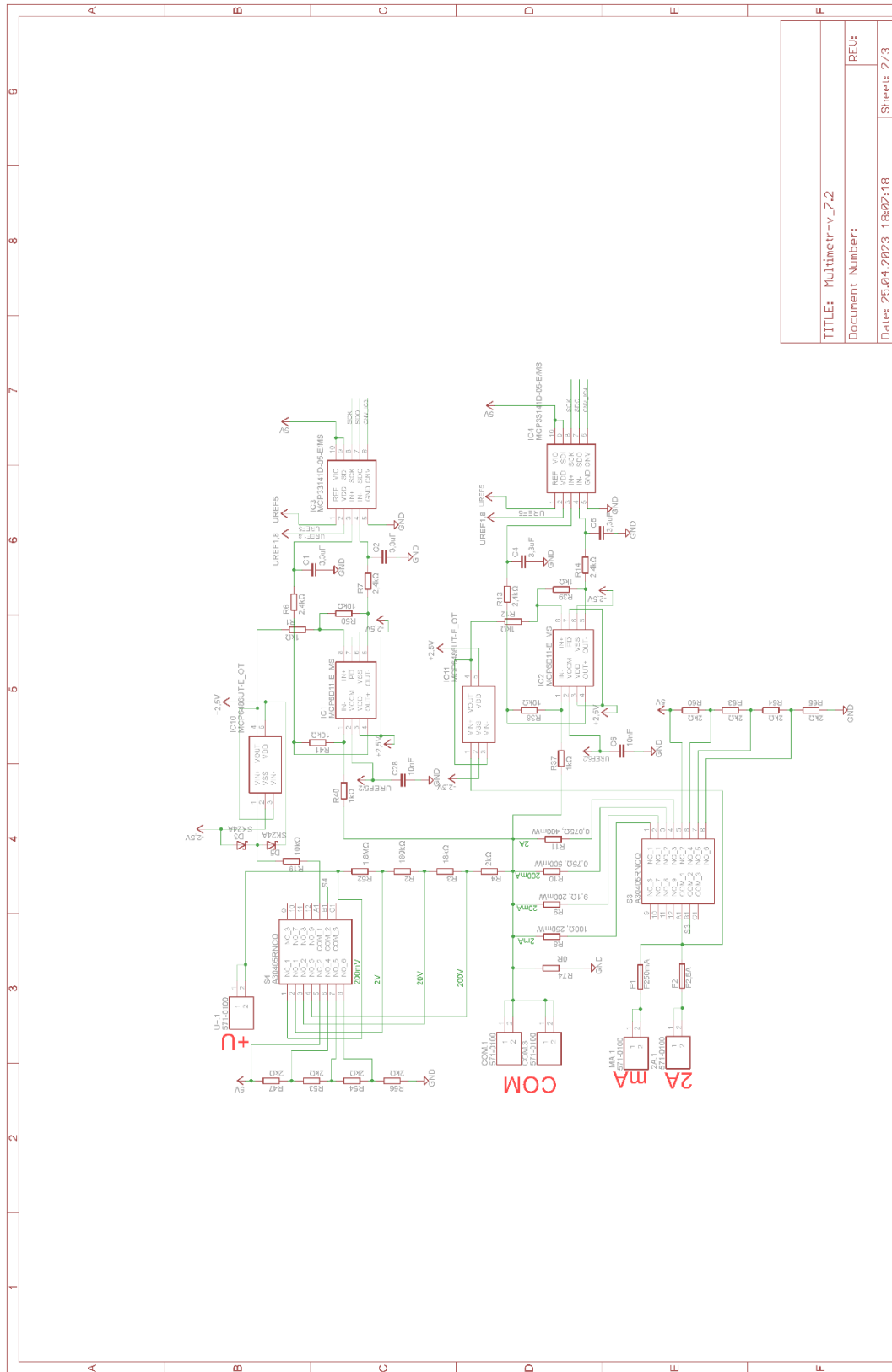
Průměrná odchylka 4kanálového multimetru při měření napětí nepřesáhla více než 2 %, u měření proudu je tato odchylka přibližně stejná. Pro možné zlepšení přesnosti by bylo možné použít vícebitový A/D převodník a součástky s menšími tolerancemi, ale myslím si, že pro většinu měřících aplikací je tato přesnost měření dostačující.

Literatura

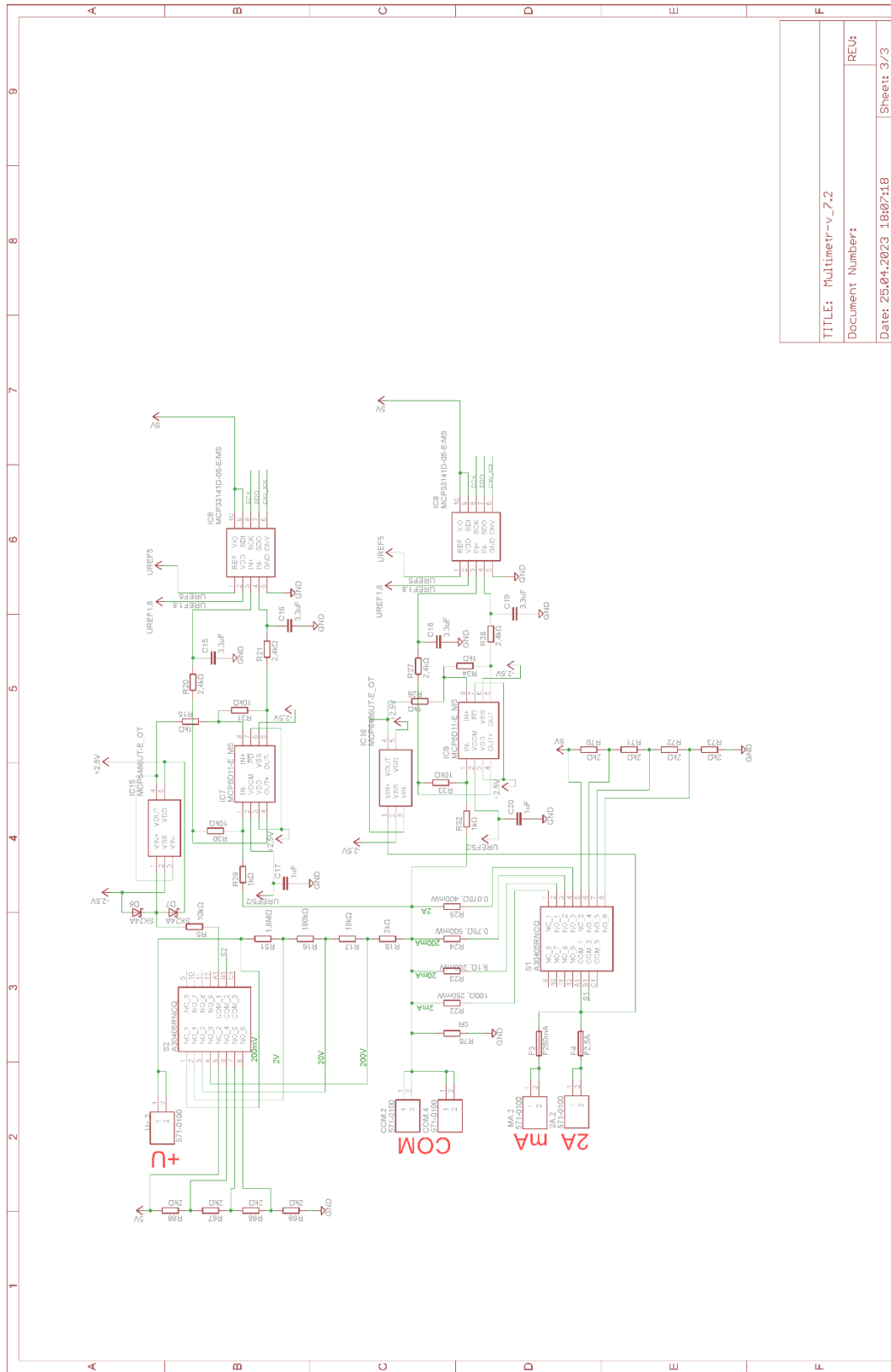
- [1] SAINI, Manish KumarSaini. Analog & Digital Multimeter. In: *Tutorialspoint* [online]. [cit. 2023-03-04]. Dostupné z: <https://www.tutorialspoint.com/analog-and-digital-multimeter>
- [2] *ATmega16* [online]. In: . s. 357 [cit. 2023-03-04]. Dostupné z: <https://ww1.microchip.com/downloads/en/devicedoc/doc2466.pdf>
- [3] DOSTÁL, Jiří. *Operační zesilovače*. 1. Praha: BEN - technická Literatura, 2005. ISBN 80-7300-049-0.
- [4] *Eletronics Tutorials: The Differential Amplifier* [online]. 2019 [cit. 2023-04-22]. Dostupné z: https://www.electronics-tutorials.ws/opamp/opamp_5.html
- [5] VEDRAL, Josef a Jakub SVATOŠ. *Zpracování a digitalizace: Analogových signálů v měřící technice*. 1. Praha: Česká technika - nakladatelství ČVUT, 2018. ISBN 978-80-01-06424-5.
- [6] ADC Gain Error. In: *Microchip Developer Help* [online]. 2021 [cit. 2023-04-06]. Dostupné z: <https://microchipdeveloper.com/adc:adc-gain-error>
- [7] ADC Offset Error. In: *Microchip Developer Help* [online]. 2021 [cit. 2023-04-06]. Dostupné z: <https://microchipdeveloper.com/adc:adc-offset-error>
- [8] *MCP33151D/41D-XX* [online]. In: . s. 69 [cit. 2023-04-19]. Dostupné z: <https://ww1.microchip.com/downloads/en/DeviceDoc/20006219A.pdf>
- [9] MURPHY, Eva a Pdraig FITZGERALD. Switching in USB Consumer Applications. In: *Analog Dialogue* [online]. 1995 [cit. 2023-04-30]. Dostupné z: <https://www.analog.com/en/analog-dialogue/articles/switching-in-usb-consumer-applications.html>
- [10] PEŇA, Eric a Mary Grace LEGASPI. UART: A Hardware Communication Protocol Understanding Universal Asynchronous Receiver/Transmitter. In: *Analog Dialogue* [online]. 1995 [cit. 2023-04-08]. Dostupné z: <https://www.analog.com/en/analog-dialogue/articles/uart-a-hardware-communication-protocol.html>
- [11] DHAKER, Piyu. Introduction to SPI Interface. In: *Analog Dialogue* [online]. [cit. 2023-04-30]. Dostupné z: <https://www.analog.com/en/analog-dialogue/articles/introduction-to-spi-interface.html>

PŘÍLOHA A – Schéma obvodu



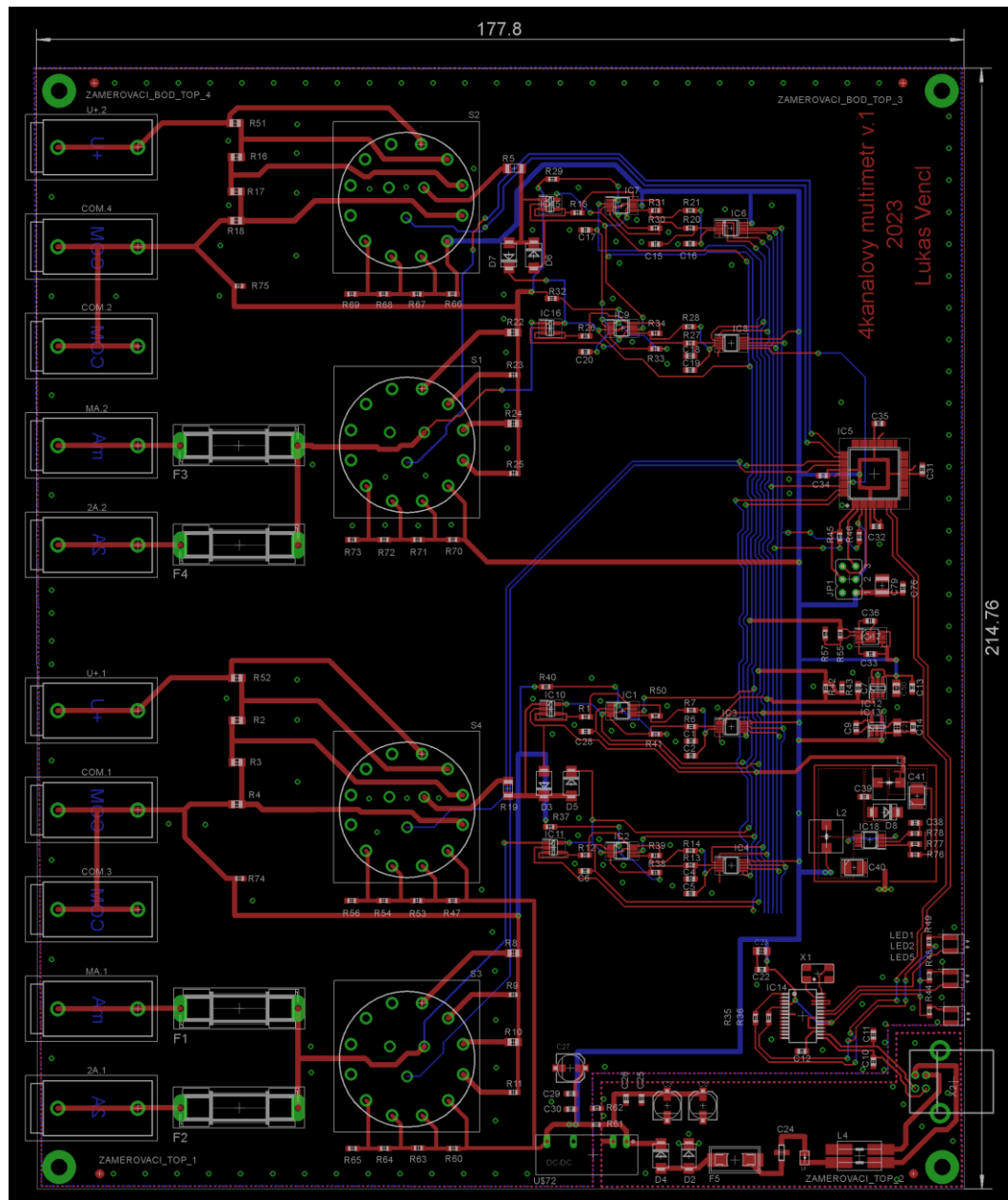


TITLE: Multimeter-v_7.2
Document Number:
Date: 25.04.2023 18:07:18
Sheet: 2 / 3



TITLE: Multimeter-v_7.2	
Document Number:	
Date: 25.04.2023	1802718
Sheet: 3/3	

PŘÍLOHA B – DPS



PŘÍLOHA C – Kód programu

```
//Bakalářská práce kód - Lukáš Venc1

#define F_CPU 8000000UL
#include <stdio.h>
#include <util/delay.h>
#include <avr/io.h>
#include <stdlib.h>
#include <string.h>

char textout[64];

int16_t V1,V2,A1,A2; //pro externi A/D
int V1_rozsah, V2_rozsah, A1_rozsah, A2_rozsah; //pro urceni rozsahu

void UART_TX(char a);
void UART_RxChar(char b);
void uart_inicializace();
void UartPosliString(char *text);
void ADC_interni_inicializace();
int ADC_interni_cteni(char channel);
void spi_inicializace();
int16_t SPI_ADC(int a);

int main(void)
{
    uart_inicializace();
    ADC_interni_inicializace();
    spi_inicializace();
    _delay_ms(3000);

    while(1)
    {
        V1 = 0;
        A1 = 0;
        V2 = 0;
        A2 = 0;

        //Cteni SPi a zpracovani dat
        V1 = SPI_ADC(2); //externi ADC cteni dat
        A1 = SPI_ADC(1); //externi ADC cteni dat
        V2 = SPI_ADC(4); //externi ADC cteni dat
        A2 = SPI_ADC(3); //externi ADC cteni dat

        V2_rozsah =ADC_interni_cteni(0); //cteni rozsahu pomoci interniho ADC na vstupu
        ADC0
        A2_rozsah =ADC_interni_cteni(1); //cteni rozsahu pomoci interniho ADC na vstupu
        ADC1
        V1_rozsah =ADC_interni_cteni(2); //cteni rozsahu pomoci interniho ADC na vstupu
        ADC2
        A1_rozsah =ADC_interni_cteni(3); //cteni rozsahu pomoci interniho ADC na vstupu
        ADC3
    }
}
```

```

//vypis hodnot V1
if(V1_rozsah <= 450)
{
    float V1_float = (float)V1;
    V1_float = ((V1_float*4.0)+10) / 10.0+0.4;
    sprintf(textout, "\n\rV1: %.2f V, rozsah: 200V", V1_float);
    UartPosliString(textout);
}
else if (V1_rozsah > 450 && V1_rozsah <= 750)
{
    V1 = V1*4+10;
    float V1_float = (float)V1;
    V1_float = V1_float / 100.0;
    sprintf(textout, "\n\rV1: %.2f V, rozsah: 20V", V1_float);
    UartPosliString(textout);
}
else if (V1_rozsah > 750 && V1_rozsah <= 950)
{
    V1 = (V1*4)+12;
    sprintf(textout, "\n\rV1: %d mV, rozsah: 2V", V1);
    UartPosliString(textout);
}
else if (V1_rozsah > 950 && V1_rozsah <= 1023)
{
    V1 = (V1*4);
    float V1_float = (float)V1;
    V1_float = V1_float / 10.0+1.6;
    sprintf(textout, "\n\rV1: %.2f mV, rozsah: 200mV", V1_float);
    UartPosliString(textout);
}

//vypis hodnot A1
float A1_float = (float)A1;
A1_float = (A1_float *4)/10.0;

if(A1_rozsah <= 450)
{
    A1_float = (A1_float /0.12)/1000.0+0.03;
    sprintf(textout, "\n\rA1: %.2f A, rozsah: 2A", A1_float);
    UartPosliString(textout);
}
else if (A1_rozsah > 450 && A1_rozsah <= 750)
{
    A1_float = A1_float /0.79+3.0;
    sprintf(textout, "\n\rA1: %.2f mA, rozsah: 200mA", A1_float);
    UartPosliString(textout);
}
else if (A1_rozsah > 750 && A1_rozsah <= 950)
{
    A1_float = A1_float /9.1+0.27;
    sprintf(textout, "\n\rA1: %.2f mA, rozsah: 20mA", A1_float);
    UartPosliString(textout);
}
else if (A1_rozsah > 950 && A1_rozsah <= 1023)
{
    A1_float = A1_float *11.05+26.0;
    sprintf(textout, "\n\rA1: %.2f uA, rozsah: 2mA", A1_float);
    UartPosliString(textout);
}

```



```

//vypis hodnot V2
if(V2_rozsah <= 450)
{
    float V2_float = (float)V2;
    V2_float = ((V2_float*4.0) / 10.0);
    sprintf(textout, "\n\rV2: %.2f V, rozsah: 200V", V2_float);
    UartPosliString(textout);
}
else if (V2_rozsah > 450 && V2_rozsah <= 750)
{
    V2 = V2*4;
    float V2_float = (float)V2;
    V2_float = V2_float / 100.0;
    sprintf(textout, "\n\rV2: %.2f V, rozsah: 20V", V2_float);
    UartPosliString(textout);
}
else if (V2_rozsah > 750 && V2_rozsah <= 950)
{
    V2 = (V2*4);
    sprintf(textout, "\n\rV2: %d mV, rozsah: 2V", V2);
    UartPosliString(textout);
}
else if (V2_rozsah > 950 && V2_rozsah <= 1023)
{
    V2 = (V2*4);
    float V2_float = (float)V2;
    V2_float = V2_float / 10.0;
    sprintf(textout, "\n\rV2: %.2f mV, rozsah: 200mV", V2_float);
    UartPosliString(textout);
}

//vypis hodnot A2
float A2_float = (float)A2;
A2_float = (A2_float *4)/10.0;
if(A2_rozsah <= 450)
{
    A2_float = (A2_float /0.125)/1000.0;
    sprintf(textout, "\n\rA2: %.2f A, rozsah: 2A", A2_float);
    UartPosliString(textout);
}
else if (A2_rozsah > 450 && A2_rozsah <= 750)
{
    A2_float = A2_float /0.78-1.02;
    sprintf(textout, "\n\rA2: %.2f mA, rozsah: 200mA", A2_float);
    UartPosliString(textout);
}
else if (A2_rozsah > 750 && A2_rozsah <= 950)
{
    A2_float = A2_float /9.2-0.08;
    sprintf(textout, "\n\rA2: %.2f mA, rozsah: 20mA", A2_float);
    UartPosliString(textout);
}
else if (A2_rozsah > 950 && A2_rozsah <= 1023)
{
    A2_float = A2_float *11.05-8.83;
    sprintf(textout, "\n\rA2: %.2f uA, rozsah: 2mA", A2_float);
    UartPosliString(textout);
}
sprintf(textout, "\n\r-----");
UartPosliString(textout);
_delay_ms(1000);
}

```

```

return(0);
}

//UART
void uart_inicializace()
{
    UBRRL = 51;
    UCSRC |= (1<<URSEL)|(1<<UCSZ1)|(1<<UCSZ0);
    UCSRB = (1<<RXEN)|(1<<TXEN);
}
void UART_TX(char a)
{
    while(!(UCSRA & (1<<UDRE)));
    UDR = a;
}

void UartPosliString(char *text)
{
    int i=0;
    while(text[i])
    {
        UART_TX(text[i]);
        i++;
    }
}

//ADC inicializace
void ADC_interni_inicializace()
{
    DDRA=0x0; //nastaveni PA jako vstupy
    ADCSRA = 0x87; //povoleni A/D
    ADMUX = 0x40; //registr multiplexeru MUX4
}

int ADC_interni_cteni(char channel)
{
    int Ain,AinLow;
    Ain = 0;
    AinLow=0;

    ADMUX &= (0xF0);
    ADMUX |= (channel & 0x0F); //nastaveni vstupniho kanalu

    ADCSRA |= (1<<ADSC); //start prevodu
    while((ADCSRA&(1<<ADIF))==0); //hlidani konce prenosu
    _delay_us(10);
    AinLow = (int)ADCL; //cteni nejnizsiho bitu
    Ain = (int)ADCH*256; //precteni nejvyssich dvou bitu
    Ain = Ain + AinLow;
    return(Ain);
}

//SPI komunikace
void spi_inicializace()
{
    DDRB |= (1<<1)|(1<<2)|(1<<3)|(1<<4)|(1<<7)|(1<<5);
    PORTB = (1<<1)|(1<<2)|(1<<3)|(1<<4);
    DDRB &= ~(1<<6);
    SPCR |= (1<<SPE)|(1<<MSTR); // Zapnuti SPI a nastaveni jako Master
}

```

```

int16_t SPI_ADC(int a) //int a udava, jaký převodník je aktivní
{
    int16_t x = 0;
    PORTB &= ~(1<<a);
    _delay_ms(1);
    PORTB |= (1 << a); //nabezna hrana SS
    _delay_ms(1);
    PORTB &= ~(1 << a); //sestupna hrana SS
    SPDR = 0x00; //MOSI vysilani
    while (!(SPSR & (1 << SPIF))); //cekani na prijem dat MISO
    x = SPDR;
    SPDR = 0x00;
    while (!(SPSR & (1 << SPIF)));
    x = (x << 8) | SPDR; //bitovy posuv
    x = x >> 4;
    PORTB |= (1 << a); //nabezna hrana SS
    if(x & 0x0800)
    x = x | 0xf000;
    return x;
}

```

PŘÍLOHA D – Naměřené hodnoty

Tabulky zobrazují měření, které bylo provedeno na každém rozsahu multimetru.

Rozsah 200mV:

Napětí [mV]	UNI-T UT804 [mV]	V1 [mV]	V2 [mV]	Napětí [mV]	UNI-T UT804 [mV]	V1 [mV]	V2 [mV]
10	10,3	10,00	10,8	-10	-10,4	-12,0	-10,8
20	21,7	21,4	22,4	-20	-21,8	-22,00	-22,00
30	29,9	29,2	30,4	-30	-30,0	-31,2	-30,4
40	39,3	38,8	40,0	-40	-39,3	-41,2	-39,6
50	51,3	50,8	52,0	-50	-51,4	-52,8	-52
60	62,5	62,00	63,2	-60	-62,6	-64,00	-63,2
70	68,7	68,4	69,6	-70	-67,8	-70,2	-69,2
80	80,1	79,2	80,8	-80	-80,1	-82,00	-80,8
90	91,8	91,2	92,8	-90	-91,9	-94,00	-92,4
100	103,5	103,6	104,4	-100	-103,6	-105,6	-104,4
110	109,3	109,2	110,4	-110	-109,4	-111,2	-110,4
120	119,8	119,2	120,8	-120	-119,8	-121,6	-120,4
130	132,9	132,4	134,0	-130	-133	-134,8	-134
140	139,5	139,2	140,8	-140	-139,5	-141,2	-140,4
150	150,3	150,0	151,6	-150	-150,4	-152,4	-151,2
160	158,4	158,0	159,6	-160	-158,4	-160,1	-159,2
170	172,5	172,4	174,0	-170	-172,6	-174,4	-173,6
180	178,8	178,8	180,0	-180	-178,9	-180,8	-180
190	190	189,8	191,6	-190	-190,0	-192,4	-191,2
200	201,2	200,8	203,2	-200	-201,6	-203,6	-202,8
Odchyłka:		0,70%	1,33%			2,64%	0,97%

Rozsah 2V

Napětí [mV]	UNI-T UT804 [mV]	V1 [mV]	V2 [mV]	Napětí [mV]	UNI-T UT804 [mV]	V1 [mV]	V2 [mV]
100	103,6	100	104	-100	-103,6	-104	-104
200	202,7	200	204	-200	202,8	-204	-204
300	307,7	305	308	-300	307,8	-308	-308
400	400,4	398	400	-400	-400,5	-400	-400
500	498,9	499	500	-500	-498,8	-500	-500
600	599,5	600	600	-600	-599,6	-600	-600
700	697,7	695	700	-700	-697,9	-697	-696
800	798,5	796	800	-800	-798,5	-800	-796
900	897	892	896	-900	-897,2	-896	-896
1000	995,6	992	996	-1000	-995,5	-996	-996
1100	1095,5	1088	1096	-1100	-1095,6	-1096	-1096
1200	1197	1192	1200	-1200	-1197	-1196	-1196
1300	1297,3	1292	1300	-1300	-1297,4	-1296	-1296
1400	1395,8	1388	1396	-1400	-1396	-1396	-1396
1500	1496,5	1488	1496	-1500	-1496,7	-1494	-1496
1600	1597,1	1588	1596	-1600	-1597,1	-1596	-1596
1700	1695,5	1683	1696	-1700	-1695,7	-1696	-1696
1800	1796,3	1783	1796	-1800	-1796,4	-1792	-1796
1900	1896,7	1883	1896	-1900	1896,5	-1896	-1896
2000	1997,5	1988	1996	-2000	-1997,5	-1996	-1996
Odchylka:		0,69%	0,14%			0,14%	0,14%

Napětí 20V

Napětí [V]	UNI-T UT804 [V]	V1 [V]	V2 [V]	Napětí [V]	UNI-T UT804 [V]	V1 [V]	V2 [V]
1	0,997	0,98	1,00	-1	0,997	-0,98	-1,00
2	1,997	2,02	2,00	-2	-1,997	-2,02	-2,00
3	2,997	2,98	3,00	-3	-2,997	-2,98	-2,96
4	3,995	3,98	4,00	-4	-3,995	-4,02	-3,96
5	4,986	4,98	5,00	-5	-4,987	-5,02	-4,96
6	5,998	5,98	6,00	-6	-5,995	-6,02	-5,96
7	6,987	6,98	7,00	-7	-6,988	-7,02	-6,96
8	7,986	7,98	7,96	-8	7,987	-8,02	-7,96
9	8,985	8,98	8,96	-9	-8,986	-8,98	-8,96
10	9,984	9,98	9,96	-10	-9,985	-9,98	-9,96
11	10,982	10,98	10,96	-11	-10,983	-11,02	-10,96
12	11,981	12,02	11,96	-12	-11,983	-12,02	-11,96
13	12,98	12,98	12,96	-13	-12,983	-12,98	-12,92
14	13,978	13,98	13,96	-14	13,981	-13,98	-13,92
15	14,978	14,94	14,96	-15	-14,979	-14,98	-14,92
16	15,985	15,98	15,96	-16	-15,98	-16,02	-15,92
17	16,978	16,98	16,96	-17	16,981	-16,98	-16,92
18	17,973	17,94	17,98	-18	-17,978	-17,98	-17,92
19	18,975	18,94	18,92	-19	18,977	-18,98	-18,92
20	19,976	19,94	19,92	-20	19,976	-19,98	-19,92

Odchylka: **0,28%** **0,18%** **0,35%** **0,42%**

Rozsah 200V

Napětí [V]	UNI-T UT804	V1	V2	Napětí [V]	UNI-T UT804	V1	V2
5	4,985	5,0	5,0	-5	-4,99	-5,0	-4,8
10	9,983	9,8	9,8	-10	-9,985	-10,2	-10,2
15	14,976	15,4	14,6	-15	-14,979	-15,0	-15,4
20	19,974	20,2	19,8	-20	-19,977	-19,8	-20,2
25	24,968	25,4	24,6	-25	-24,972	-24,6	-25,4
30	29,963	30,2	29,8	-30	-29,963	-29,8	-30,2
35	34,934	35,0	34,6	-35	-34,958	-34,6	-35,0
40	39,95	40,2	39,8	-40	-39,953	-39,4	-40,2
45	44,94	45,0	44,6	-45	-44,96	-43,8	-45,0
50	49,95	50,2	49,4	-50	-49,96	-49,4	-50,2
55	54,94	55,4	54,6	-55	-54,95	-54,2	-55,0

Odchylka: **0,99%** **1,03%** **1,17%** **1,25%**

Rozsah 2mA

Proud [uA]	UNI-T UT804 [uA]	A1 [uA]	A2 [uA]	Proud [uA]	UNI-T UT804 [uA]	A1 [uA]	A2 [uA]
200	197	202	199	-200	-195	-199,0	-203
400	396	401	402	-400	-396	-398	-406
600	596	605	601	-600	-595	-601	-605
800	794	803	804	-800	-797	-800	-808
1000	996	1002	1003	-1000	-993	-999	-1007
1200	1192	1206	1202	-1200	-1195	-1198	-1206
1400	1395	1400	1405	-1400	-1397	-1397	-1409
1600	1594	1603	1608	-1600	-1599	-1600	-1613
1800	1796	1802	1807	-1800	-1795	-1799	-1812
2000	1994	2006	2011	-2000	-1997	-1998	-2015

Odchylka: 1% 0,92% 0,50% 1,54%

Rozsah 20mA

Proud [mA]	UNI-T UT804 [mA]	A1 [mA]	A2 [mA]	Proud [mA]	UNI-T UT804 [mA]	A1 [mA]	A2 [mA]
6	5,89	6,29	6,14	-6	-6,71	-6,24	-5,99
8	7,93	8,36	8,18	-8	-8,63	-8,48	-8,6
10	10,53	10,56	10,79	-10	-10,94	-10,68	-10,99
12	12,27	12,49	12,66	-12	-12,68	-12,61	-12,56
14	14,54	14,6	14,53	-14	-14,81	-14,89	-14,3
16	16,51	17,15	16,31	-16	-16,69	-16,93	-16,91
18	18,26	18,69	18,49	-18	-19,13	-18,98	-18,47
20	20,32	20,97	20,66	-20	-21,37	-21,22	-21,04

Odchylka: 3,01% 1,83% 2,05% 3,01%

Rozsah 200mA

Proud [mA]	UNI-T UT804 [mA]	A1 [mA]	A2 [mA]	Proud [mA]	UNI-T UT804 [mA]	A1 [mA]	A2 [mA]
10	11,52	11,58	10,77	-10	-11,49	-10,67	-11,79
20	20,54	21,23	20,53	-20	-21,53	-20,8	-21,53
30	31,45	30,95	30,77	-30	-31,06	-30,92	-31,79
40	41,19	41,48	41,54	-40	-41,36	-41,05	-42,05
50	50,49	50,59	50,77	-50	-51,12	-50,67	-52,3
60	61,03	62,63	61,54	-60	-60,98	-60,8	-62,05
70	70,91	70,85	71,8	-70	-70,66	-70,42	-72,3
80	81,68	80,97	81,54	-80	-81,48	-80,54	-83,07
90	91,34	91,1	92,83	-90	-92,13	-90,67	-92,81
100	101,67	100,72	102,06	-100	-101,65	-100,8	-103,07
110	112,05	110,85	112,83	-110	-112,09	-110,42	-133,33
120	121,69	120,47	122,57	-120	-121,43	-120,04	-123,58
130	131,54	130,59	132,31	-130	-131,94	-130,16	-133,82
140	141,95	139,71	143,08	-140	-141,95	-139,78	-143,58
150	151,92	149,84	153,34	-150	-151,57	-149,91	-153,84
160	161,83	159,96	163,08	-160	-161,76	-160,04	-163,58
170	171,69	170,09	173,34	-170	-171,57	-169,15	-174,35
180	181,58	179,91	183,4	-180	-181,32	-179,28	-183,58
190	192,14	189,33	193,34	-190	-191,54	-189,41	-194,35
200	202,18	199,46	203,6	-200	-201,66	-198,52	-204,1
Odchylka:		1,13%	1,11%			1,49%	2,42%

Rozsah 2A

Proud [mA]	UNI-T UT804 [mA]	A1 [mA]	A2 [mA]	Proud [mA]	UNI-T UT804 [mA]	A1 [mA]	A2 [mA]
200	0,19	0,21	0,2	-200	-0,19	-0,19	-0,19
400	0,39	0,4	0,4	-400	-0,39	-0,38	-0,39
600	0,59	0,6	0,59	-600	-0,59	-0,58	-0,58
800	0,797	0,8	0,79	-800	-0,69	-0,78	-0,78
1000	0,999	0,99	0,98	-1000	-0,99	-0,97	-0,98
1200	1,2	1,19	1,18	-1200	-1,19	-1,17	-1,17
1400	1,4	1,39	1,38	-1400	-1,4	-1,37	-1,37
1600	1,6	1,59	1,58	-1600	-1,6	-1,57	-1,57
Odchylka:		2,27%	1,86%			2,90%	2,45%