



# VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

## FAKULTA ELEKTROTECHNIKY A KOMUNIKAČNÍCH TECHNOLOGIÍ

FACULTY OF ELECTRICAL ENGINEERING AND COMMUNICATION

## ÚSTAV AUTOMATIZACE A MĚŘICÍ TECHNIKY

DEPARTMENT OF CONTROL AND INSTRUMENTATION

## SIMULÁTOR PROUDOVÉHO VÝSTUPU 0-24MA S MIKROKONTROLÉREM

SIMULATOR OF CURRENT OUTPUT 0-24MA

### BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

BACHELOR'S THESIS

### AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Kateřina Chroustovská

### VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

doc. Ing. Zdeněk Bradáč, Ph.D.

BRNO 2019

# Bakalářská práce

bakalářský studijní obor **Automatizační a měřicí technika**

Ústav automatizace a měřicí techniky

**Studentka:** Kateřina Chroustovská

**ID:** 186094

**Ročník:** 3

**Akademický rok:** 2018/19

## NÁZEV TÉMATU:

### Simulátor proudového výstupu 0-24mA s mikrokontrolérem

#### POKYNY PRO VYPRACOVÁNÍ:

1. Proveďte literární rešerši přesných elektronických stejnosměrných zdrojů napětí pro laboratorní využití
2. Navrhněte přesný zdroj stejnosměrného proudu 0-24 mA. Analogový výstup navrhněte s rozlišením 0.001 mA. Navrhněte ochranu výstupů proti přepětí. Hodnoty pro simulátor zadávejte pomocí otočné přepínače se zobrazením na displeji. Systém navrhněte jako miniaturní systém vybavený mikrokontrolérem a nezbytnými vstupy/výstupy.
3. Realizujte elektroniku, realizujte DPS, osadte a oživte.
4. Navrhněte koncepci programového vybavení, koncepci uživatelsky přívětivého ovládání a vytvořte programové vybavení
5. Demonstrujte funkčnost, zhodnoťte dosažené kvalitativní výsledky zdroje a zhodnoťte Vaše řešení

#### DOPORUČENÁ LITERATURA:

Pavel Herout: Učebnice jazyka C, KOPP, 2004, IV. přepracované vydání, ISBN 80-7232-220-6

Dle pokynů vedoucího práce.

**Termín zadání:** 4.2.2019

**Termín odevzdání:** 20.5.2019

**Vedoucí práce:** doc. Ing. Zdeněk Bradáč, Ph.D.

**Konzultant:**

**doc. Ing. Václav Jirsík, CSc.**  
předseda oborové rady

#### UPOZORNĚNÍ:

Autor bakalářské práce nesmí při vytváření bakalářské práce porušit autorská práva třetích osob, zejména nesmí zasahovat nedovoleným způsobem do cizích autorských práv osobnostních a musí si být plně vědom následků porušení ustanovení § 11 a následujících autorského zákona č. 121/2000 Sb., včetně možných trestněprávních důsledků vyplývajících z ustanovení části druhé, hlavy VI. díl 4 Trestního zákoníku č.40/2009 Sb.

## **Abstrakt**

Tato bakalářská práce se věnuje návrhu velmi přesného simulátoru proudového výstupu 0-24 mA s mikrokontrolerem s rozlišením 0,001 mA. V práci se postupně zabývám průzkumem trhu s obdobnými zařízeními, teorií a dále pak návrhem koncepce celého systému, vytipováním použitých součástek a zhodnocením jejich vhodnosti. Navrhuji zde schéma zapojení a desku plošných spojů, kterou pak následně vyrobím a osadím. Pro výsledný přístroj navrhuji a vyrábím krabičku, která tak vhodně doplní a sjednotí celý systém. Celý přístroj oživím, naprogramuji a otestuji jeho funkčnost.

## **Klíčová slova**

Simulátor, proudový výstup, mikrokontroler, D/A převodník, VUT Brno

## **Abstract**

This bachelor thesis deals with design of very accurate current output simulator 0-24 mA with microcontroller with resolution 0.001 mA. In the thesis I deal with the market research with similar devices, theory and then with the conception of the whole system concept, with the identification of used components and with the evaluation of their suitability. I propose here a circuit diagram and a printed circuit board, which I then produce and install. For the resulting device I design and produce a box that will suitably complement and unify the entire system. I will revive the whole device, program it and test its functionality.

## **Keywords**

Simulator, current output, microcontroller, D/A converter, BUT

## **Bibliografická citace:**

*CHROUSTOVSKÁ, Kateřina. Simulátor proudového výstupu 0-24mA s mikrokontrolérem. Brno, 2019. Dostupné také z: <https://www.vutbr.cz/studenti/zav-prace/detail/119253>. Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, Ústav automatizace a měřicí techniky. Vedoucí práce doc. Ing Zdeněk Bradáč., Ph.D.*

## **Prohlášení**

Prohlašuji, že svoji bakalářskou práci na téma Simulátor proudového výstupu 0-24 mA s mikrokontrolerem jsem vypracovala samostatně pod vedením vedoucího semestrální práce a s použitím odborné literatury a dalších informačních zdrojů, které jsou všechny citovány v práci a uvedeny v seznamu literatury na konci práce.

Jako autorka uvedené semestrální práce dále prohlašuji, že v souvislosti s vytvořením této semestrální práce jsem neporušila autorská práva třetích osob, zejména jsem nezasáhla nedovoleným způsobem do cizích autorských práv osobnostních a/nebo majetkových a jsem si plně vědoma následků porušení ustanovení § 11 a následujících zákona č. 121/2000 Sb., o právu autorském, o právech souvisejících s právem autorským, ve znění pozdějších předpisů, včetně možných trestněprávních důsledků vyplývajících z ustanovení části druhé, hlavy VI. díl 4 Trestního zákoníku č. 40/2009 Sb.

V Brně dne: **20. května 2019**

.....  
podpis autora

## **Poděkování**

Děkuji tímto panu doc. Ing. Zdeňku Bradáčovi, Ph.D. za účinnou metodickou, pedagogickou a odbornou pomoc a další cenné rady při zpracování mé bakalářské práce.

V Brně dne: **20. května 2019**

.....  
podpis autora

# OBSAH

Seznam veličin a zkratek .....	9
Seznam obrázků.....	10
Seznam grafů .....	10
Seznam tabulek .....	10
1. Úvod.....	11
2. Komerčně dostupné simulátory .....	12
2.1 SIKA mAV.2 Ruční kalibrátor/simulátor pro proudový a napěťový výstup typ UC a EC.....	12
2.2 Simulátor/kalibrátor LUTRON CC 422 a CC 421.....	13
2.3 DA2RS: Dva analogové výstupy pro RS232/RS485 .....	14
2.4 Kalibrátor-simulátor 4-20 mA LUTRON CC-MA .....	15
2.5 Procesní kalibrátor EXTECH PRC30 .....	15
2.6 Shrnutí komerčních simulátorů .....	16
3. Použití simulátorů .....	17
3.1 Historie.....	17
3.2 Použití .....	17
3.3 Proudová smyčka .....	17
4. Základní koncepce systému .....	19
4.1 Stanovení cílů.....	19
4.2 Blokové schéma .....	19
5. Návrh systému a jeho součástí.....	20
5.1 Součástky použité pro procesorovou část .....	20
5.1.1 Převodník .....	20
5.1.2 Mikrokontroler.....	22
5.1.3 Displej.....	22
5.1.4 Modul UB232R.....	22
5.1.5 Ovládací tlačítko .....	23
5.2 Součástky použité pro napěťovou část.....	25
5.2.1 Návrh zdroje .....	25
5.3 Popis analogové části .....	26
6. Návrh schématu zapojení a DPS.....	28
6.1 Testování na nepájivém poli .....	28
6.2 Návrh DPS .....	28
6.2.1 Osazení DPS .....	28
7. Programové vybavení .....	30
7.1 Popis programu .....	30
7.2 Ovládání programu a celého zařízení.....	31
8. Návrh a výroba krabičky.....	33
8.1 Výběr materiálu.....	33
8.2 Návrh krabičky.....	33
8.3 Výroba krabičky.....	34

9.	Testování a kalibrace .....	35
9.1	Korekční křivka.....	35
9.2	Kalibrace výstupu.....	35
9.3	Testovací měření .....	36
9.4	Zhodnocení měření.....	37
10.	Závěr .....	38
11.	Literatura.....	39
12.	Seznam příloh .....	42



# SEZNAM VELIČIN A ZKRATEK

VUT .....	Vysoké učení technické v Brně
FEKT .....	Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií
USB.....	Universal Serial Bus
D/A.....	Digitálně -analogový
LCD .....	Liquid Crystal Display
DPS .....	Deska plošných spojů
PC.....	Personal Computer
GND.....	Ground
API.....	Application Programming Interface
ABS.....	Akrylonitrilbutadienstyren
SMD.....	Surface Mount Device
ASCII.....	American Standard Code for Information Interchange
OTG .....	On the Go
EEPROM.....	Electrically Erasable Programmable Read-Only Memory
EPROM.....	Erasable Programmable Read-Only Memory
CS.....	Chip Set
CLK .....	Clock
A/D.....	Analogově digitální
PLC .....	Programmable Logic Controller
mV .....	milivolt
% .....	procento
°C .....	stupeň Celsia
V.....	volt
A.....	ampér
mA .....	miliampér
F .....	farad
nF .....	nanofarad
µF.....	mikrofarad
W.....	watt
I.....	proud
U.....	napětí

## SEZNAM OBRÁZKŮ

Obr. 1 - Vizualizace výsledného zařízení [14] .....	11
Obr. 2 - Simulátory SIKA typ EC mAV.2 a UC mAV.2 [10].....	12
Obr. 3 - Simulátor LUTRON CC 421 a CC 422 [11].....	13
Obr. 4 - DA2RS – napěťový a proudový simulátor od firmy Papouch [12] .....	14
Obr. 5 - Simulátor proudové smyčky 4-20 mA LUTRON [13] .....	15
Obr. 6 - Simulátor a kalibrátor EXTECH PRC 30 [11].....	16
Obr. 7 - Princip funkce proudové smyčky [14] .....	18
Obr. 8 - Blokové schéma navrženého přístroje [14].....	19
Obr. 9 - Žebříčková odporová síť uvnitř D/A převodníku [9].....	20
Obr. 10 - Zjednodušené schéma převodníku DAC8811 [9].....	21
Obr. 11 - LCD displej 2x16 [21].....	22
Obr. 12 - UB232R [24] .....	23
Obr. 13 - Rotační spínač AN-P1S-1PS-Z [22] .....	23
Obr. 14 - Princip vyhodnocení rotačního ovladače [20].....	24
Obr. 15 - Detail umístění tlačítkových spínačů [14].....	24
Obr. 16 - Schéma zapojení zdroje [14] .....	25
Obr. 17 - Schéma analogové části [14].....	26
Obr. 18 - Detail připojení D/A převodníku k redukcí [14].....	28
Obr. 19 - Nastavení hodnoty na převodníku [14] .....	30
Obr. 20 - Výstup zařízení pro uvedený příklad [14].....	31
Obr. 21 - Detail displeje nastavovacích tlačítek .....	31
Obr. 22 - Ukázka některých částí krabičky [14].....	34

## SEZNAM GRAFŮ

Graf 1 - Korekční křivka po prvním měření [14] .....	36
Graf 2 - Absolutní chyba [14].....	36
Graf 3 - Relativní chyba [14].....	37

## SEZNAM TABULEK

Tabulka 1 - Hodnoty součástek .....	27
-------------------------------------	----

# 1. ÚVOD

Tématem mé bakalářské práce je simulátor proudového výstupu 0-24 mA s mikrokontrolerem s rozlišením 0,001 mA. Podobná zařízení se na trhu objevují v mnoha různých podobách a specifikacích. Jejich vlastnostmi a parametry se budu zabývat v druhé kapitole.

V následující kapitole se budu stručně věnovat teorii proudových smyček, použití podobných zařízení v průmyslových aplikacích a jejich historii.

V další kapitole navrhnu koncepci celého systému a metody, které hodlám využít pro jeho výrobu.

Plynule naváži kapitolou, která již bude řešit samotný návrh simulátoru proudového výstupu dle parametrů zadání práce, vytipuji zde součástky, které se pro svou práci chystám použít a budu zde analyzovat jejich vhodnost. Navrhnu zde napájecí část i část s mikrokontrolerem a převodníkem.

Tyto podklady v následující kapitole využiji pro návrh schématu zapojení a jeho popisu. Dané schéma zapojení budu simulovat a otestuji ho na nepájivém poli, následně navrhnu desku plošných spojů, kterou vyrobím a osadím dle schématu vybranými součástkami.

Nedílnou součástí práce je návrh programového vybavení, které by mělo být jednoduché, výstižné a zároveň uživatelsky co nejpřívětivější. Přístroj vybavím programem pro jeho ovládání.

Při návrhu celého systému budu počítat s výsledným schováním přístroje do krabičky, která celý přístroj sjednotí a umožní jeho jednoduché použití i lajkům, protože snižuje možnost poranění následkem zásahu elektrickým proudem při nesprávné manipulaci. Vizualizace možné výsledné podoby zařízení je na obrázku číslo 1.

Testování funkce a určení přesnosti daného přístroje bude obsahem poslední kapitoly této práce. Pokusím se zde zhodnotit jeho funkčnost. Pomocí měření budu moci přístroj ještě zkalibrovat a dosáhnout tak co nejvyšší přesnosti proudového výstupu.

Na závěr zhodnotím celou práci a popíšu další možná řešení a vylepšení pro případné pokračování v práci na tomto zařízení.

Tato bakalářská práce vychází z návrhu simulátoru proudového výstupu, který jsem udělala ve své semestrální práci. Ve své bakalářské práci jsem oproti semestrální práci udělala několik změn, které se zde pokusím obhájit a vysvětlit s odkazem na můj návrh v semestrální práci.



Obr. 1 - Vizualizace výsledného zařízení [14]

## 2. KOMERČNĚ DOSTUPNÉ SIMULÁTORY

Na trhu se již vyskytují přístroje, které respektují požadavky z mého zadání, některé jen zčásti a některé je zase dalece převyšují. Liší se nejen rozsahem, ale také rozlišením, přesností nebo cenou. Podobná zařízení běžně dostupná na trhu jsou ve většině případů multifunkční, to znamená, že pracují nejen jako simulátory proudového výstupu v různém rozsahu, ale také jako simulátory napěťového výstupu. Velká část těchto přístrojů dokáže rozsahy generovaných signálů měnit v závislosti na požadavcích uživatele. Většinou je to v standardně používaných hodnotách 0-20 mA, 4-20 mA, 4-24 mA nebo 0-24 mA pro proudový výstup a 0-10 V, 0-5 V nebo 0-11 V pro napěťový výstup. Většina z nabízených přístrojů dokáže proudové smyčky a napěťové signály také v určitém rozsahu měřit. Této oblasti se zde ale nevěnuji, neboť není součástí mého zadání.

Ve své práci se na některé z běžně sehnatelných přístrojů podívám, zhodnotím jejich parametry a provedu jejich srovnání.

### 2.1 SIKA mAV.2 Ruční kalibrátor/simulátor pro proudový a napěťový výstup typ UC a EC



Obr. 2 - Simulátory SIKA typ EC mAV.2 a UC mAV.2 [10]

První z nalezených přístrojů je ruční kalibrátor a simulátor od firmy SIKA. Tato firma vyrábí přístroj ve dvou typech – typ UC a EC, přičemž typ UC je již vyšší řada, používá se jak pro napěťový výstup, tak pro proudový výstup, což je jeho značná výhoda. Oba typy jsou vybaveny LCD displejem. Typ UC dokonce dokáže zobrazovat i grafické a tabulkové zpracování naměřených hodnot. Oba se ovládají pomocí kláves a navigátoru a jsou napájeny bateriově. Vedlejším kritériem je také cena. Za dražší typ UC zaplatíte více než 22 000 Kč. [10]

Proudový výstup typu UC je proudová smyčka v rozsahu 0-25 mA, čímž o 1 mA předčí můj přístroj, je zde možnost také rozsahu 4-25 mA. Přístroj dokáže i měřit proudovou smyčku, a to v rozsahu -6-25 mA. Rozlišení tohoto typu je 0,001 mA, což je stejná hodnota, kterou mám zadanou pro svou práci. Přesnost tohoto přístroje je  $\pm 0,015 \%$

z naměřené hodnoty. Naproti tomu typ EC pracuje pouze s přesností  $\pm 0,05\%$  z naměřené hodnoty a dokáže generovat proudovou smyčku pouze od 0 do 22 mA. Můj navrhovaný přístroj by ho tedy měl předčit, jelikož by měl generovat proudovou smyčku 0–24 mA. [10]

Typ UC také dokáže generovat napěťový signál v rozsahu 0-10 V nebo 0-15 V s přesností  $\pm 0,015\%$  a rozlišením 0,001 V. Napěťovému signálu se ale ve své práci nevěnuji, a proto zde přístroje z tohoto hlediska nebudu porovnávat. [10]

## 2.2 Simulátor/kalibrátor LUTRON CC 422 a CC 421

Dalším běžně dostupným proudovým simulátorem/kalibrátorem je od LUTRONu typ CC 422. Ten měří i generuje proudovou smyčku ve stejném rozsahu jako můj navrhovaný přístroj, tedy 0-24 mA, případně 0-19,99mA. Jeho rozlišení je ale pouze 0,01 mA, což je o jeden řád nižší rozlišení, než je navrženo pro mé zařízení. Tento fakt se také určitě projevil v ceně, která je mnohonásobně menší než v případě SIKA UC a dosahuje pouze něco málo přes 4000 Kč. Ze stejné řady pochází také typ CC 421, který umí pouze proudový výstup. [11]

CC 421 má pro proudový výstup stejné parametry jako CC 420, stejně jako CC 420 je osazen LCD displejem, má i stejné napájení 9 V. Pro napěťový výstup má nastavitelný zdroj od -199,9 mV do +199.9 mV s rozlišením 0,1 mV. [11]



Obr. 3 - Simulátor LUTRON CC 421 a CC 422 [11]

### 2.3 DA2RS: Dva analogové výstupy pro RS232/RS485

Univerzální převodník s analogovým výstupem od české firmy Papouch poskytuje dva na sobě nezávislé výstupy. Jak proudové, tak napěťové, a to v různých rozsazích. Jedním z proudových rozsahů je i 0-24 mA, který je požadován i v mém zařízení. [12]

Na rozdíl od mého zařízení je tento simulátor ovládán přes PC pomocí rozhraní. Na samotné „krabičce“ tedy nevidíte ani aktuální hodnoty, ani rotační spínač pro nastavení požadované hodnoty. Na krabičce jsou naopak signalizační LED diody – připojení napájecího napětí (ON), signalizující komunikaci (COM), přetížení některého z kanálů (OVR). [12]



**Obr. 4 - DA2RS – napěťový a proudový simulátor od firmy Papouch [12]**

Převodník obsažený v tomto zařízení je pouze 12-bitový, oproti mému 16-bitovému zařízení tedy poskytuje menší rozlišení. [12]

## 2.4 Kalibrátor-simulátor 4-20 mA LUTRON CC-MA

Kalibrátor-simulátor CC-MA s přesností 0,001 mA od firmy LUTRON kalibruje měřicí přístroje s proudovým analogovým výstupem v rozsahu 4-20 mA. Používá se v laboratořích, ale i běžných provozech. Napájen je 9 V baterií. Indikační LED diody signalizují přetížení při překročení zátěže 240 W, vybitou baterii, a právě zvolený rozsah kalibrace. [13]



Obr. 5 - Simulátor proudové smyčky 4-20 mA LUTRON [13]

## 2.5 Procesní kalibrátor EXTECH PRC30

Velmi přesný kalibrátor PRC 30 od firmy EXTECH s funkcí simulace a měření proudových smyček, i napěťových signálů. Používá se i jako kalibrátor termočlánků. Proudový výstup v rozsahu 0–24 mA koresponduje s mým zařízením. Napěťový výstup v rozsahu 0-20 V je ze všech uvedených přístrojů největší. Díky své přesnosti a příslušenství patří mezi ty lepší ve svém oboru. Což se samozřejmě projeví i na ceně okolo 20 000 Kč. [11]



Obr. 6 - Simulátor a kalibrátor EXTECH PRC 30 [11]

## 2.6 Shrnutí komerčních simulátorů

Simulátorů je na trhu celá řada. Cenově se pohybují od tisíců do desetitisíců korun v závislosti na jejich funkcích a přesnosti. Při výběru vždy záleží, na co daný přístroj chceme používat. Zda potřebujeme pouze proudový výstup, nebo proudový i napěťový. Zda chceme veličiny i měřit a jak přesně je potřebujeme měřit, případně generovat. Díky široké nabídce si snad každý vybere přesně to, co potřebuje.

Přístroj navrhovaný v mé práci by se rozlišením měl blížit dražším přístrojům, naopak ale není multifunkční, generuje pouze proudový výstup a nedokáže ho sám změřit a pomocí zpětné vazby korigovat.



## 3. POUŽITÍ SIMULÁTORŮ

### 3.1 Historie

S vývojem a modernizací snímačů procesů v oblasti měření vzrůstaly nároky na přesnost a kalibraci jednotlivých snímačů. Do té chvíle se používaly přístroje s analogovým signálem a třídou přesnosti cca 0,5 %. Výstupní signály byly buď proudové, nebo napěťové. Oba v různých velikostech. Jedním z nejpoužívanějších simulátorů byl univerzální kalibrátor, jenž umožňoval plynule nastavovat proudový i napěťový signál. V roce 1994 přišel na trh kalibrátor ZUS02 od firmy Dodávky automatizace Ostrava. Výhodou tohoto kalibrátoru byla schopnost generovat a zároveň měřit proudové (v rozsahu 0–24 mA) a napěťové (v rozsahu 0–12 V) signály s přesností 0,5 %. [15]

S nástupem digitálních technologií bylo potřeba zpřesnit generované signály a také začít využívat možnosti zobrazení skutečné generované hodnoty signálu. V roce 1998 se tedy objevil první kalibrátor s mikroprocesorem, který zajistil jednoduché a uživatelsky přívětivé ovládání. [15]

Špičkou mezi kalibrátory se stal přístroj ZUS03 od firmy Dodávky automatizace Ostrava, který v sobě dokázal zkombinovat výhody předchozího ZUS02 a dodat k tomu mnohé další parametry. Například dvouřádkový LCD displej s podsvícením, bateriové napájení, díky kterému je přístroj jednoduše přenositelný. Fóliovou klávesnicí pro snadné ovládání a čtyři naprogramované proudové rozsahy pro testování proudových smyček. [15]

Se vzrůstajícími nároky na přesnost průmyslových snímačů bylo nutno zvyšovat nároky na přesnost kalibrátorů a generátorů proudových/napěťových signálů.

### 3.2 Použití

Pravidelná kontrola a následné prověření správných hodnot přenášených ze snímačů do řídicích jednotek průmyslové automatizace je v průmyslových aplikacích automatizovaného řízení nezbytná. [16]

Čidla snímající jakoukoliv veličinu v sobě obsahují převodníky na proudovou smyčku, s jejíž pomocí přenáší data k řídicím jednotkám. [16]

Proudové a napěťové simulátory najdou široké uplatnění v průmyslové automatizaci a regulaci a při řízení jednotek s analogovým ovládním. [12] Pomocí simulátorů proudových a napěťových signálů kalibrujeme například výstupy snímačů připojených k PLC.

### 3.3 Proudová smyčka

Proudová smyčka je široce využívána například v průmyslové automatizační technice. Nejčastěji se používá rozsah 4-20 mA. Tento rozsah patří mezi nejrozšířenější techniku analogového procesního řízení již od roku 1980. Použití rozsahu 0-20 mA je o trochu méně časté. S touto proudovou smyčkou se setkáme spíše u digitálních proudových smyček. [1]

Proudová smyčka má zde stále i po mnoha letech své využití, také zásluhou její celkem dobré imunity proti elektromagnetickému rušení, které se v průmyslu často vyskytuje. Na zpracování i použití je jednoduchá. [1]

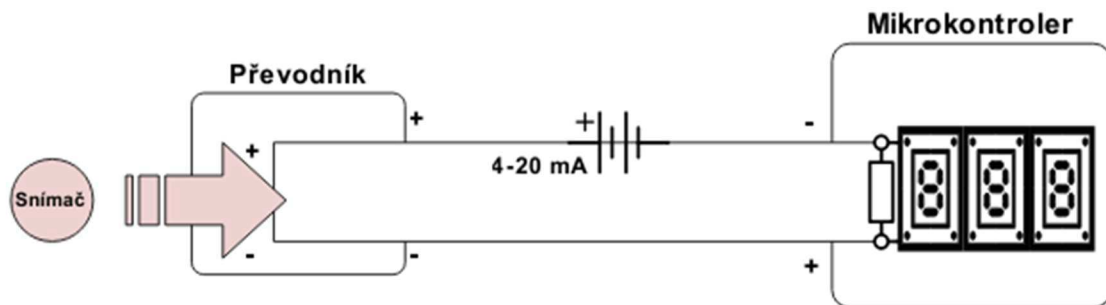
Používá se pro přenos hodnot naměřených veličin. Dovoluje přenos na velké vzdálenosti i například stovky metrů, a navíc umožňuje napájení komponent přímo ze smyčky. [1]

Hodnota 4 mA nejčastěji značí například u ventilu jeho vypnutí. Obecně vzato je snímaná veličina při této hodnotě nulová (0 %), při hodnotě 20 mA je naopak hodnota snímané veličiny maximální (100 %). Všechny hodnoty snímané mezi tím značí, že je veličina snímána v nějakém menším rozsahu. Pokud máme standardizovanou veličinu a víme, že 4 mA odpovídá nulová hodnota a 20 mA maximální hodnota (pro nás konkrétní číslo), dokážeme pak přesně určit hodnotu snímané veličiny v jakémkoliv okamžiku dle aktuální hodnoty proudu. [2]

V praxi existují dva druhy proudových smyček – analogové a digitální. Analogové proudové smyčky reprezentují hodnoty proudu v rozsahu nejčastěji 4-20 mA. Digitální smyčka pak využívá hodnot logické 0 a logické 1. Logickou nulu reprezentuje hodnota 4 mA a logickou jedničku hodnota 20 mA. [1]

Hodnota 4 mA jakožto spodní hranice proudové smyčky nebyla zvolena náhodně. Nižší hodnoty často nebývají voleny, protože jsou použity pro signalizování poruch obvodu, například u hodnoty 0 mA nebudeme schopni s určitostí tvrdit, že obvod neobsahuje nějakou poruchu, rozpojený nebo poškozený kabel. [2]

Princip proudové smyčky je na obrázku číslo 7.



Obr. 7 - Princip funkce proudové smyčky [14]

## 4. ZÁKLADNÍ KONCEPCE SYSTÉMU

### 4.1 Stanovení cílů

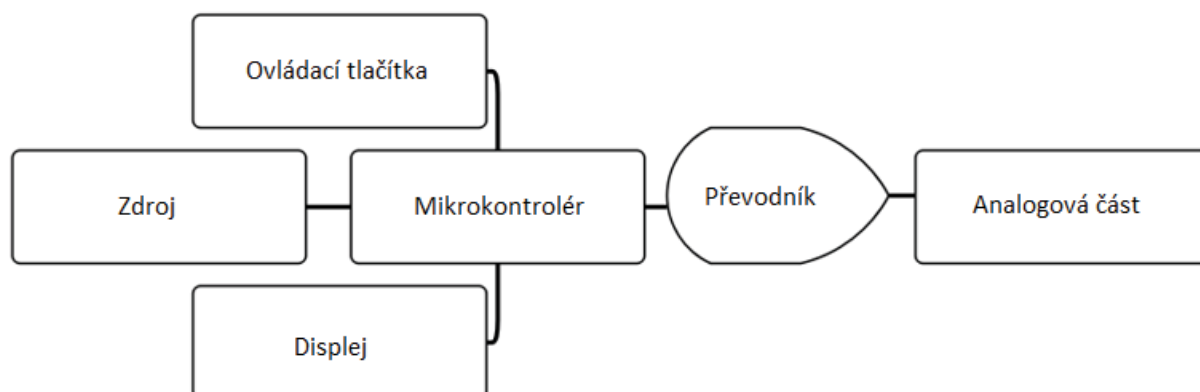
V práci jsem si stanovila několik bodů, kterých jsem chtěla dosáhnout.

- přístroj bude uživatelsky přívětivý a jednoduše ovladatelný,
- pro přístroj navrhnu a vyrobím krabičku,
- pro přístroj navrhnu zdroj,
- pokusím se minimalizovat šумы a rušivé vlivy pro zvýšení přesnosti,
- přístroj připravím pro přidání bateriového napájení,
- přístroj bude možno připojit přes USB k PC a programovat ho tak,
- pro přístroj změřím korekční křivku a pomocí ní ho zkalibruji,
- přístroj bude, pokud možno, modulární pro snadnou výměnu případných poškozených součástí.

V celé práci kladu nároky na velikost zařízení, které by mělo být co nejmenší, aby bylo lehce přenositelné. Na počátku všech návrhů jsem se snažila vytvořit jednu krabičku, do které vše naskládám. Nakonec jsem se rozhodla přístroj rozdělit do dvou krabiček – napájecí a procesorové. Díky tomuto rozhodnutí jsem zmenšila krabičku na poloviční velikost a zároveň jsem tímto řešením značně snížila šумы a rušení, které by přítomnost napájecí části u procesorové způsobovala.

### 4.2 Blokové schéma

Pomocí zdroje budu napájet mikroprocesor, displej, převodník, operační zesilovače a další součástky nezbytné pro funkčnost mého zařízení. K procesoru připojím tlačítka pro ovládání displeje a nastavování hodnoty a také samotný displej. Hodnotu nastavenou na displeji budu pomocí převodníku převádět na analogovou výstupní hodnotu.



Obr. 8 - Blokové schéma navrženého přístroje [14]

# 5. NÁVRH SYSTÉMU A JEHO SOUČÁSTÍ

## 5.1 Součástky použité pro procesorovou část

V této části stručně popíši součástky, které jsem vybrala pro osazení procesorové části. Nebudu se zde zabývat rezistory, kondenzátory a dalšími běžnými součástkami.

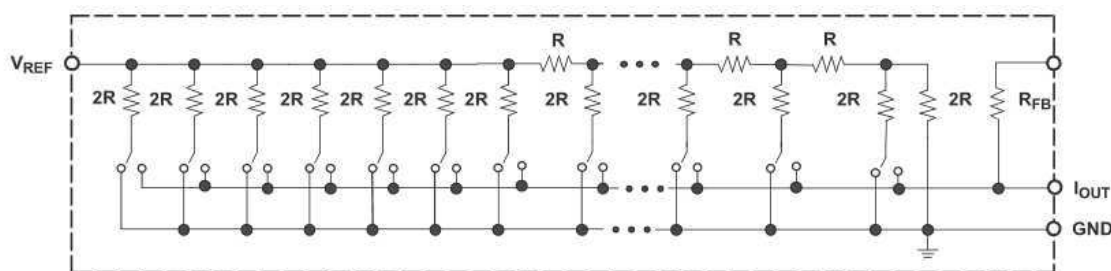
### 5.1.1 Převodník

Digitálně analogové převodníky mají v elektronice velmi široké využití. Jsou to elektronické součástky, které jsou určeny pro převod digitálního, tedy nespojitého signálu, na analogový signál, tedy signál spojitý. Velmi často se v přístrojích objevují spolu s analogově digitálním převodníkem, jehož funkce je přesně opačná. [8] Díky spojení těchto převodníků jsme schopni zpětně korigovat měřené hodnoty a dosahovat ještě větších přesností. V mé práci se ale zpětnou vazbou a korekcí hodnot pomocí A/D převodníku nezabývám.

#### 5.1.1.1 Princip převodníku

Princip funkce D/A převodníku demonstruji na obrázku č.9. D/A převodník je složen z bloku spínačů (switch) a R-2R odporové sítě. Tato odporová síť se pro svůj vzhled také někdy nazývá žebříčková.

Na spínače a rezistory odporové sítě přivedu referenční napětí  $U_{ref}$ . Hodnota tohoto napětí je maximální možná hodnota, kterou mi D/A převodník zobrazí. D/A převodník v odporové síti nastaví nožičky  $2R$  odporů buď na zem (GND), nebo na výstup ( $I_{OUT}$ ). GND je pro něj logická 0 a  $I_{OUT}$  pak logická 1. Výstupní veličinu pak zpracuje analogová část obvodu. [9]



Obr. 9 - Žebříčková odporová síť uvnitř D/A převodníku [9]

#### 5.1.1.2 Návrh převodníku

Součástí zadání mé bakalářské práce je i požadavek na rozlišení analogového výstupu, jenž má být 0,001mA. Při výběru převodníku jsem tedy toto kritérium musela zohlednit a pomocí následující rovnice (1) spočítat, jaký převodník mám použít.

$$N = \frac{I_{max}}{p} = \frac{24}{0,001} = 24000 \quad (5.1)$$

Kde

$N$ ..... počet hodnot, které musím umět zobrazit [-]

$I_{max}$ ..... maximální požadovaná hodnota proudu [mA]

$P$ ..... požadované rozlišení analogového výstupu [mA]

Z této rovnice tedy vyplývá, že potřebuji použít převodník, který dokáže zpracovat minimálně 24000 různých hodnot. Výpočtem si tedy určím, kolika bitový převodník budu potřebovat. Použiji-li 14 - bitový převodník, budu moci zobrazovat pouze 16 384 hodnot což, je pro mě málo. Použiji tedy dle rovnice (2) převodník 16 - bitový.

$$N = 2^B = 2^{16} = 65\,536 \quad (5.2)$$

Kde

$N$ ..... maximální počet zpracovaných hodnot [-]

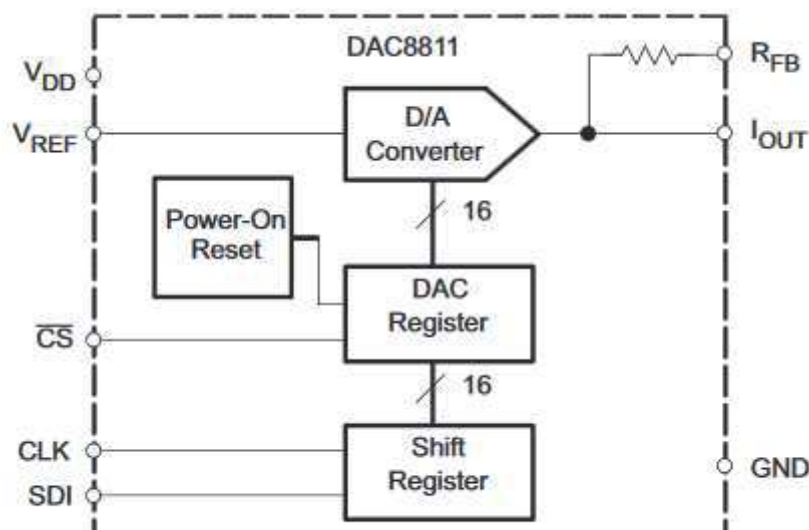
$B$ ..... počet bitů převodníku [-]

16-bitový převodník sice dokáže zpracovat o mnohem více hodnot, než pro svou práci potřebuji, ale je jediným vhodným. Zbývající nevyužité hodnoty tedy mohu brát jako rezervu.

Pro konstrukci svého simulátoru jsem po konzultaci s vedoucím práce vybrala 16 - bitový převodník DAC 8811 vyrobený firmou Texas Instruments. Tento převodník je pro moji potřebu díky svým parametrům vyhovující.

### 5.1.1.3 Převodník DAC 8811

Pracovní rozsah převodníku použitého v mé práci je 2,7 V -5,5 V.  $V_{REF}$  určuje maximální možné napětí, které se objeví na výstupu převodníku. V případě mé práce to bude 5 V. Převodník nabízí také 3 vstupy kompatibilní s mikrokontrolerem a těmi jsou clock (CLK), chip-select (CS) a data-in (SDI). Další piny jsou  $V_{DD}$  napájení, GND zem a  $I_{OUT}$



Obr. 10 - Zjednodušené schéma převodníku DAC8811 [9]

výstup. [9] Na obrázku číslo 10 je zjednodušené schéma převodníku obsažené v datasheetu.

### 5.1.2 Mikrokontroler

Pro svou práci jsem po konzultaci zvolila mikrokontroler ATMEGA 328P. Pochází z řady AVR od firmy ATMEL a je dobře známý především díky Arduino. Skládá se z 8bitového jádra a 23 vstupně/výstupních pinů. Disponuje programovatelnou pamětí FLASH – na rozdíl od předchozích řad, které měly pouze EPROM a datovou paměť EEPROM. [3] Pracuje při napětí 1,8-5,5 V. [4]

### 5.1.3 Displej

Na počátku celé práce jsem se rozhodla pro čtyřřádkový displej s řadičem HD44780. Je to jeden z nejběžnějších displejů a nacházející se na řadě běžných zařízení. Později jsem však své rozhodnutí přehodnotila a vyměnila ho za 2 řádkový displej se 16 znaky na řádek.

Pro mou práci jsou 2 řádky dostačující z hlediska programu i pohodlnosti používání, naopak čtyřřádkový displej by zbytečně zabíral místo na předním panelu, musela bych ho zvětšit a tím se vzdalovat od požadavku na miniaturní systém. Tento typ displeje se vyskytuje v několika verzích a liší se hlavně podporovanou znakovou sadou. Od běžné až po zákaznickou. Já si vystačím s běžnou sadou čísel a písmen, která vychází z ASCII kódování. [6]



Obr. 11 - LCD displej 2x16 [21]

### 5.1.4 Modul UB232R

Pro programování jsem použila modul UB232R od FTDI Chip. Výhodou je, že nepotřebuje externí napájení a je napájen přímo z USB. Navíc je plně kompatibilní s USB 2.0.

Tento modul se dá dále do budoucna využít pro komunikaci mého zařízení přes počítač i při nastavování hodnot. Součástí tohoto modulu je mini USB konektor. V poslední době z vlastní zkušenosti pozoruji ústup těchto konektorů, rozhodla jsem se tedy použít OTG kabel s koncovkami mini USB a USB A. Koncovku USB A jsem vyvedla na hranu krabičky a není tedy třeba speciální kabel ani redukce. [24]



Obr. 12 - UB232R [24]

## 5.1.5 Ovládací tlačítko

Ovládání displeje a vůbec celého zařízení bylo jednou z nejtěžších věcí na této práci, ne z hlediska provedení, ale z hlediska rozhodnutí. Na výběr jsem měla dvě možnosti. Rotační přepínač a obyčejná tlačítka. Obě metody mají své výhody i nevýhody. V práci jsem se snažila zohlednit všechna hlediska včetně uživatelské přívětivosti, programování, ceny, způsobu používání, přesnosti a jednoduchosti ovládání celého zařízení. Nakonec jsem se rozhodla pro použití obyčejných tlačítek.

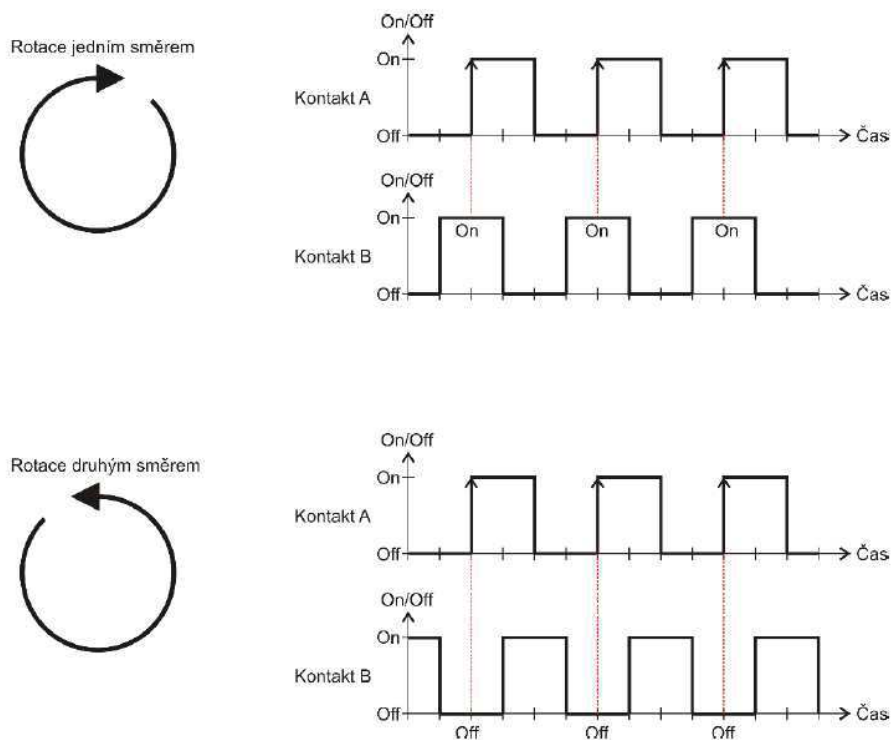
### 5.1.5.1 Rotační přepínač

Pro svou bakalářskou práci jsem zvažovala použití designového rotačního spínače AN-P1S-1PS-Z, který vyrábí firma ZIPPY. V prostřední části tohoto spínače je i potvrzovací tlačítko, a tak se jedná o vhodného kandidáta pro pohyb v menu a pro potvrzení nastavené hodnoty. Spínač je doplněn o šedočerný hmatník, který usnadňuje jeho ovládání.

Rotační snímač je obousměrný díky kontaktům A a B, které se spínají a rozepínají v závislosti na směru otáčení. [5] Princip funkce je vyobrazen na obrázku 14 a vzhled spínače na obrázku 13.



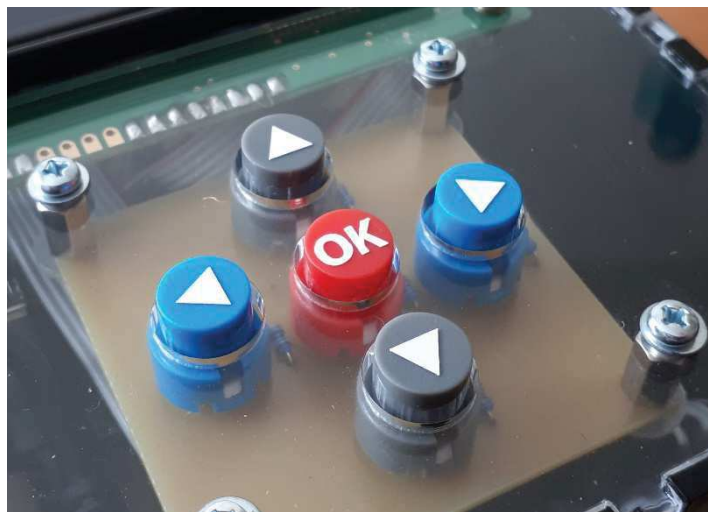
Obr. 13 - Rotační spínač AN-P1S-1PS-Z [22]



**Obr. 14 - Princip vyhodnocení rotačního ovladače [20]**

### 5.1.5.2 Tlačítkový spínač

Druhou volbou byly obyčejné tlačítkové spínače. Vybrala jsem 1-pólové spínače bez aretace od firmy HIGHLY s kruhovým hmatníkem. Jejich ovládání je jednodušší než u rotačního spínače, protože nehrozí, že by se při práci omylem posunuly do jiné polohy, při programování také odpadá nutnost určovat počáteční pozici a zadávání hodnot je s nimi velmi přesné. Vršky hmatníků jsem pro přesnost polepila samolepkami vyřezanými na řezacím plotteru. Pomocí čtyř pohybových a jednoho potvrzovacího tlačítka je pohyb po



**Obr. 15 - Detail umístění tlačítkových spínačů [14]**



displeji i nastavování hodnot jednoduché. Detail umístění tlačítek na mé přístroji je na obrázku 15. [23]

## 5.2 Součástky použité pro napěťovou část

V této části popíši součástky vybrané pro napěťovou část, včetně výpočtů odůvodňujících jejich výběr.

### 5.2.1 Návrh zdroje

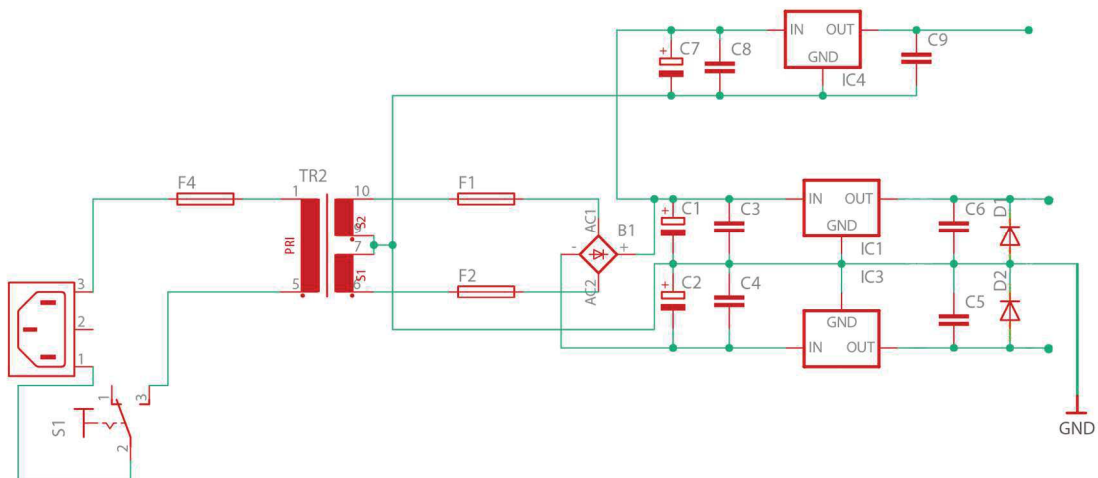
Na začátku práce jsem se rozhodla pro napájení pomocí dvou transformátorů, jeden měl napájet operační zesilovače se symetrickým napětím  $\pm 15$  V. A druhý měl napájet mikrokontroler s napětím 5 V. Po prostudování datasheetu operačních zesilovačů jsem zjistila, že by bylo zbytečné používat symetrické napájení  $\pm 15$  V, když zesilovačům stačí minimálně  $\pm 2$  V. Nemusím díky tomu řešit chlazení v takové míře, jako v předchozím návrhu ze semestrální práce.

Napájecí zdroj se skládá z transformátoru, usměrňovače tvořeného čtyřmi diodami zapojenými do můstku. Diodový můstek usměrní sinusovku z transformátoru tak, že invertuje zápornou část sinusového signálu na kladnou a kladnou ponechá. Takto usměrněný signál vyfiltrujeme pomocí elektrolytického kondenzátoru. Výstupní napětí z filtru stabilizujeme pomocí regulátoru na hodnotu vhodnou pro naše zapojení. Výsledný signál je pak stabilní a stejnosměrný.

#### 5.2.1.1 Transformátor

Před samotný transformátor jsem vložila pojistku, která má ochránit můj obvod proti přepětí a poruše na primárním vinutí.

V původním návrhu jsem zvažovala použití dvou transformátorů. Po přehodnocení hodnot potřebného napětí jsem se rozhodla změnit celé zapojení a použít na celý obvod pouze jeden transformátor s výstupem  $2 \times 9$  V. Tímto ušetřím na desce místo a zařízení tak zmenším. Schéma zapojení zdroje je uvedeno na obrázku číslo 16.



Obr. 16 - Schéma zapojení zdroje [14]

Výstupní napětí z tohoto obvodu je tedy 5 V a  $\pm 9$  V.

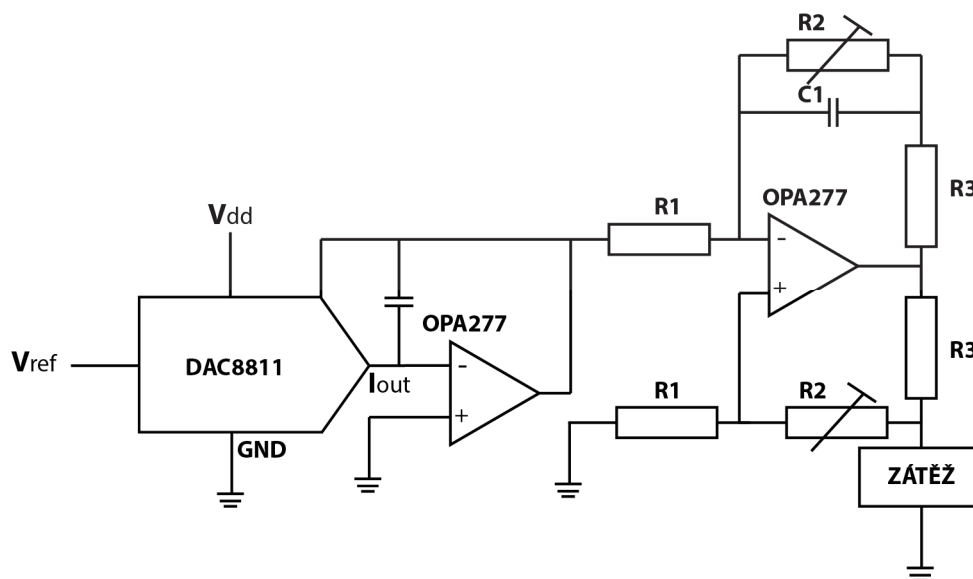
### 5.3 Popis analogové části

Na obrázku číslo 17 je uvedeno schéma analogové části, hodnoty součástek tohoto schématu jsou uvedeny v tabulce číslo 1. Převodník je napájen 5 V pomocí vstupu V<sub>dd</sub>, zároveň je na převodník přivedeno referenční napětí V<sub>ref</sub>, které je nastaveno pomocí stabilizátoru LM 317. Toto zapojení je uvedeno v příloze bakalářské práce. Pomocí převodníku OPA277, zapojeném v invertujícím zapojení, převedu výstupní proud z převodníku na záporné napětí. Pomocí druhého převodníku zapojeném ve stejném zapojení jej invertuji zpět na kladné. Pro nastavení správné hodnoty na výstupu jsem se rozhodla použít dva trimry R2, jejichž hodnota musí být vždy stejná. Hodnotu lze nastavit mezi 0-50 k $\Omega$ . Pomocí těchto trimrů jsem dále nastavovala výstupní hodnotu při programování, jak je popsáno v kapitole 7.1. Požadovaný výstupní proud pak protéká zátěží.

Rovnice 5.3 vyplývá ze zapojení na obrázku 17. [9]

$$I_{zátěž} = \frac{(R_2 + R_3)/R_1}{R_3} \cdot V_{ref} \cdot \frac{K}{65535} \quad (5.2)$$

Kde K je aktuálně nastavená hodnota na převodníku.



Obr. 17 - Schéma analogové části [14]

<b>Součástka</b>	<b>Hodnota</b>
Vref	Nastavitelné mezi 0-7 V
Vdd	5 V
C1	12 pF
R1	150 k $\Omega$
R2	50 k $\Omega$
R3	50 $\Omega$

**Tabulka 1 - Hodnoty součástek**

## 6. NÁVRH SCHÉMATU ZAPOJENÍ A DPS

Návrhy schématu i desek plošných spojů jsem zpracovala v programu Eagle. Příslušná schémata a návrhy DPS jsou umístěny v příloze této práce.

### 6.1 Testování na nepájivém poli

První návrhy jsem otestovala v programu Multisim. Po úspěšné simulaci jsem otestovala procesorovou část na nepájivém poli s napájením ze školního stabilizovaného zdroje AUL 310, čímž jsem si ověřila skutečnou správnost mého zapojení. Nezbývalo tedy nic jiného, než navrhnout DPS a vyrobit ji.

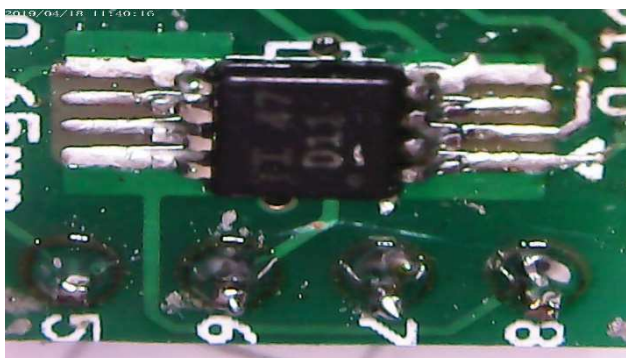
### 6.2 Návrh DPS

Desky plošných spojů jsem navrhovala stejně jako schéma zapojení v programu Eagle. Přístroj je rozdělen na 3 samostatné DPS, které jsou mezi sebou propojené zámkovým konektorem PSH02 a jeho protikusem PFH02. Tyto konektory jsem vybrala pro jejich jednoduché použití. Můj přístroj se skládá ze dvou krabiček, které potřebuji propojit. Pro jednoduchou manipulaci je potřeba mít dostatečně dlouhý propojovací kabel. Díky těmto konektorům jsem si mohla propojovací kabel vyrobit přesně na míru, jak pro propojení krabiček, tak pro displej a připojení tlačítek k procesoru.

#### 6.2.1 Osazení DPS

DPS je vyrobena z laminátu Nanya FR4 0/35 o tloušťce 1,5 mm a pro fotocestu je použit film Riston. Na domácí fríze jsou vyvrtané otvory pro zavedení součástek a montážní otvory pro uchycení distančních sloupků. Desky plošných spojů jsou vyrobeny celkem tři. Jedna pro napěťovou část, druhá pro procesorovou část a třetí pro připojení tlačítek.

Pro svou práci jsem se rozhodla použít součástky v normálních pouzdrech, protože je jednodušší zapájet je v domácím prostředí. Toto rozhodnutí se netýká pouze převodníku, který se nevyrábí v jiném než SMD pouzdře. Pro jeho připojení k desce jsem tedy použila redukci, na kterou je připájen a následně pomocí dutinek připojen do patice, která je pevně připájena k DPS.



Obr. 18 - Detail připojení D/A převodníku k redukcii [14]

Pro napájení převodníku jsem použila mikroskop s LCD displejem, který mi značně usnadnil jeho připojení k redukci. Detail připojení je vyobrazen na obrázku č. 18. Snížená kvalita fotografie je způsobena zvětšením mikroskopu a jeho reakcí na okolní vlivy.

Ostatní součástky jsem osadila za použití cínové pájecí pasty pro bezolovnaté pájení, která obsahuje příměsi stříbra a mědi. Vyznačuje se vysokou pevností letovaných spojů při namáhání a je méně náchylná k oxidaci.[17]

Všechny tři DPS jsou ke krabičce přichyceny prostřednictvím distančních sloupků.

## 7. PROGRAMOVÉ VYBAVENÍ

Abych vůbec mohla mikroprocesor programovat, musela jsem do něj nahrát bootloader. Následně jsem pro programování použila USB modul UB232R. Pro programování jsem zvolila vývojové prostředí Visual Studio Code, které je pro nekomerční účely přístupné zdarma. Celý program je napsán v jazyce C.

### 7.1 Popis programu

V programu jsem použila některé předprogramované funkce, například pro kurzor a displej.

Pro celou kalibraci a chod programu je důležité určit, jaká změna na převodníku zvětší hodnotu výstupu o jednu tisícinu miliampéru. Pokud bych nezvolila celé číslo, čelila bych problému, díky kterému by docházelo k „přetečení“ po součtu zbývajících desetinných čísel. Tomuto problému jsem se vyhnula tak, že jsem na převodníku nastavila hodnotu 56000. Poté jsem pomocí trimrů v mém obvodu nastavila výstup na 28 mA. Z tohoto je patrné, že v případě mého nastavení se hodnota na převodníku zvětší vždy o 2 při změně hodnoty na výstupu o 0,001 mA.

Takto zvolené celé číslo způsobuje při kalibraci nejméně problémů. Princip nastavování hodnot na displeji je vyobrazen na obrázku číslo 19.

```
68 void set_out_val() {
69     long number = value[0];
70     number = number * 10000*2;
71     number = number + value[1] * 1000*2;
72     number = number + value[2] * 100*2;
73     number = number + value[3] * 10*2;
74     number = number + value[4] * 1*2;
```

Obr. 19 - Nastavení hodnoty na převodníku [14]

V proměnné `value[0]` nastavuji desítky mA, ve `value[1]` jednotky mA a takhle to pokračuje dál až do `value[4]`, kde nastavuji tisíce mA. Z obrázku je patrná i konstanta 2, kterou násobím výsledek, abych dosáhla správného výstupu.

V následujícím příkladu nastavím hodnotu 18,474 mA  
69 dám do proměnné `number` hodnotu 1. Na řádce 70 spočítám následující:

$$\begin{aligned}1 \cdot 10000 \cdot 2 &= 20000 \\20000 + 8 \cdot 1000 \cdot 2 &= 36000 \\36000 + 4 \cdot 100 \cdot 2 &= 36800 \\36800 + 7 \cdot 10 \cdot 2 &= 36940 \\36940 + 4 \cdot 1 \cdot 2 &= 36948 \\36948/2 &= 18474 \text{ mA}\end{aligned}$$

Z výše uvedeného příkladu je patrný princip výpočtu hodnoty nastavené na převodníku pro správný výstup na zařízení. Na obrázku 20 je vidět výsledný naměřený výstup.



Obr. 20 - Výstup zařízení pro uvedený příklad [14]

## 7.2 Ovládání programu a celého zařízení

Po zapnutí zařízení se na displeji objeví text se jménem autora bakalářské práce, po časové prodlevě se displej dostane do režimu nastavování hodnot. Tento režim je vidět na



Obr. 21 - Detail displeje nastavovacích tlačítek

obrázku číslo 21. Výstup programu se nastavuje na prvním řádku, vždy bude

v jednotkách mA. Na druhém řádku je možnost buď nastavenou hodnotu přivést na výstup pomocí APPLY nebo se pomocí CANCEL vrátit k nastavování hodnot. Pohyb po displeji je vykonáván pomocí tlačítek se šipkami.

Nastavení hodnoty může probíhat dvěma způsoby.

První možností je nastavení kurzoru na daný řád, zmáčknutím OK potvrdíte, že chcete nastavit číslovku, která bude reprezentovat daný řád. Číslovku nastavíte pomocí šipek nahoru/dolu. Dostanete-li se až k nejvyšší číslovce, mohou nastat dvě možnosti. Buď se zvýší hodnota vyššího řádu o jedna, nebo zůstane nastavena nejvyšší číslovka, protože z principu nemůžete nastavit více, než je maximální hodnota 24 mA. Stisknutím OK potvrdíte nastavení hodnoty na daném řádu. Pohybem šipek vpravo/vlevo se posouváte v řádech.

Druhá možnost je tlačítko na daném řádu držet stisknuté, pak se zvyšuje nastavovaná hodnota vysokou rychlostí, přičemž se na vyšších řádech hodnota přičítá, nižší řády zůstávají beze změny.

V obou případech se pomocí šipky dolů přesuneme na tlačítko APPLY a stiskem potvrdíme hodnotu na výstup.

Do úvahy přichází i různá vylepšení, například přidání SLEEP módu pro případ, že by bylo zařízení napájeno bateriově. Po určitém času by se zařízení samo vypnulo a šetřilo by tak baterii. Vzhledem k absenci bateriového napájení v mé práci jsem ale tuto možnost neošetřila.



## 8. NÁVRH A VÝROBA KRABIČKY

Po návrhu a osazení DPS jsem měla v ruce výrobek, který je funkční, ale zároveň velmi křehký při manipulaci. A jakékoliv nešetrné zacházení by mohlo poškodit součástky, spoje a propojovací konektory. Také jsem chtěla zabránit tomu, aby se neznalá osoba dotkla spojů na nesprávných místech a způsobila si tak úraz elektrickým proudem. Všechny tyto problémy řeší uzavření přístroje do krabičky.

Na trhu se nachází velké množství krabiček, ale žádné mi z hlediska velikosti a umístění montážních děr pro uchycení DPS nevyhovovaly.

Měla jsem dvě možnosti, buď navrhnout nové DPS a zohlednit tak rozměry nabízených krabiček, nebo si vyrobit vlastní a přizpůsobit je na míru vyrobeným DPS. Vzhledem k mému přístupu do FabLabu<sup>1</sup> a provedeným školením na laserovou řezačku Speedy 300 jsem už od začátku návrhu počítala s možností výroby vlastní navržené krabičky.

### 8.1 Výběr materiálu

Nejprve bylo nutné rozhodnout se pro materiál. Potřebovala jsem něco, co se dá dobře řezat, lepit, je to teplotně odolné a elektricky nevodivé. Běžně prodávané krabičky jsou vyrobeny z ABS a polystyrénu. Tyto materiály však nelze na laserové řezačce řezat. Jmenovitě ABS může při řezání vylučovat kyanid, který je toxický. Při řezání také dochází k tavení materiálu a zanášení nosné voštiny. [18]

Jako ideální materiál, a navíc cenově dobře dostupný, se jeví extrudované plexisklo. Rozhodla jsem se pro jeho použití v černém a transparentním provedení.

### 8.2 Návrh krabičky

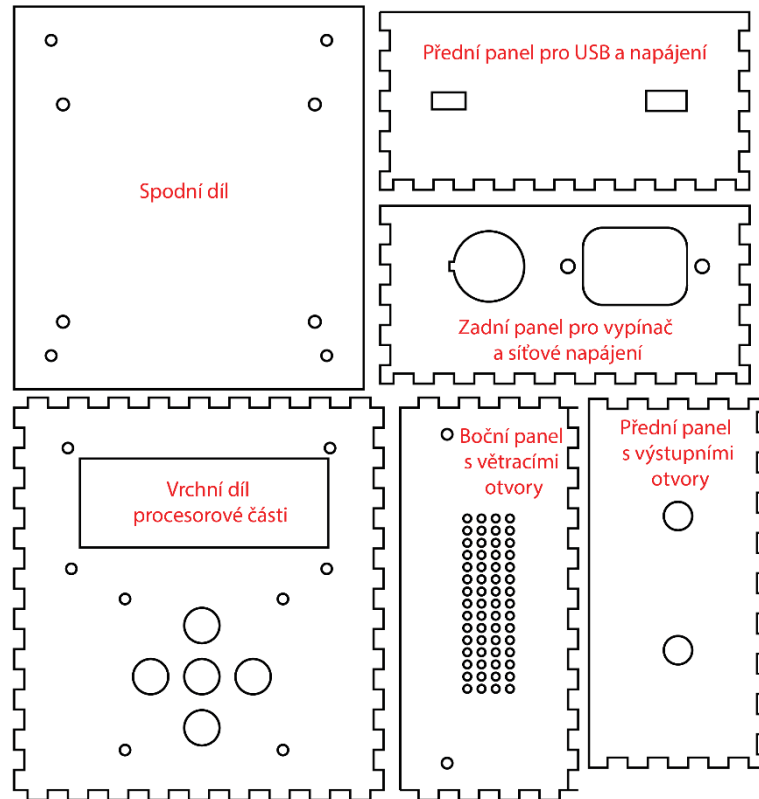
Krabičku jsem navrhovala v grafickém vektorovém programu Adobe Illustrator CC. Jistě by existoval jednodušší způsob – například kreslení v AutoCadu, Inkscapeu nebo v Corelu. Vzhledem ke svým zkušenostem s Illustratorem jsem ale zvolila tuto možnost.

Část návrhu krabičky vidíte na obrázku číslo 22. Všechny zbylé návrhy jsou součástí příloh této práce. Tento návrh je upravený pro potřeby tisku této práce, neboť skutečné šíře čáry musí být maximálně 0,001 mm, a to by zde znesnadnilo čitelnost. Krabička pro napájení i procesor je stejně velká. Jejich rozměry jsou 110x120 mm. V každé krabičce je počítáno s otvory pro příslušné komponenty, například displej, tlačítka, USB, napájení, kolébkový spínač, AC konektor a také výstupní zdířky. V napájecí krabičce jsou umístěny ventilační otvory pro dodatečné chlazení stabilizátorů a také chlazení transformátoru. Otvory jsou kruhové o maximálním průměru 2,3 mm, díky čemu by se krabička dala z hlediska stupně krytí před nebezpečným dotykem klasifikovat jako IP3x. Samozřejmě k tomu ale nemám provedené příslušné zkoušky, takže se pohybujeme pouze v rovině teoretické. Všechny díly jsou opatřeny montážními dírami pro šroubky M2,5, resp. M3 pro zavření krabičky.

---

<sup>1</sup> FabLab Brno je první otevřená digitální dílna v Brně, kde si po předchozím školení a zaplacení členského příspěvku můžete vyrábět prototypy svých navržených zařízení.

Pro jednodušší lepení krabičky jsem zvolila zámkový systém, který je patrný z obrázku číslo 22. Jednotlivé zuby do sebe díky správně nastavené kerf kompenzaci přesně zapadají a usnadňují tak lepení.



Obr. 22 - Ukázka některých částí krabičky [14]

### 8.3 Výroba krabičky

Pomocí softwaru Job Control jsem si připravila data pro řez laserem. Nakonec jsem se rozhodla ještě do vršku napěťové krabičky vygravírovat název práce, jméno a logo. Pro správné řezání je nutno nastavit si správně výkon laseru a rychlost hlavy. A také správně nastavit ohniskovou vzdálenost pro dokonalé zaostření laseru. Řezání i gravírování jsem prováděla při maximálním výkonu laseru, tedy 60 W. Měnila jsem pouze rychlost. Samotné řezání je díky rychlosti pojezdu hlavy, která dosahuje maximálně 3,55 m/s velmi rychlé.

Samotné spojení krabičky jsem prováděla dvousložkovým lepidlem Loctite Super Attak na plexiskla, které jsem nanesla na zámkové spoje. Aby byla krabička rozebratelná, spodní díl krabiček, na kterém jsou upevněny DPS, je ke krabičce připojen pomocí lišty se zalisovaným závitem M3. Krabičku díky tomuto řešení můžete tedy rozšroubovat.

## 9. TESTOVÁNÍ A KALIBRACE

První orientační měření v průběhu této práce jsem prováděla digitálním multimetrem a LCR metrem CEM DT-9931 s přesností  $\pm 0,8\%$  z rozsahu. [19] Který pro toto orientační měření dostačoval, ale bohužel nemá na celém měřeném rozsahu odpovídající rozlišení. Pro měření korekční křivky jsem tedy využila Multimetr Agilent 34410 A se sériovým číslem MY47003347. Měření jsem prováděla v laboratoři při teplotě  $23^{\circ}\text{C}$  – abych dosáhla přesností specifikovaných v datasheetu. Přístrojem jsem měřila hodinu a po hodině měření teprve začala zaznamenávat výsledky. Přístroj byl kalibrovaný před více než rokem, jeho přesnost na rozsahu 100 mA je tedy  $\pm (0,050\% + 0,005\%)$

### 9.1 Korekční křivka

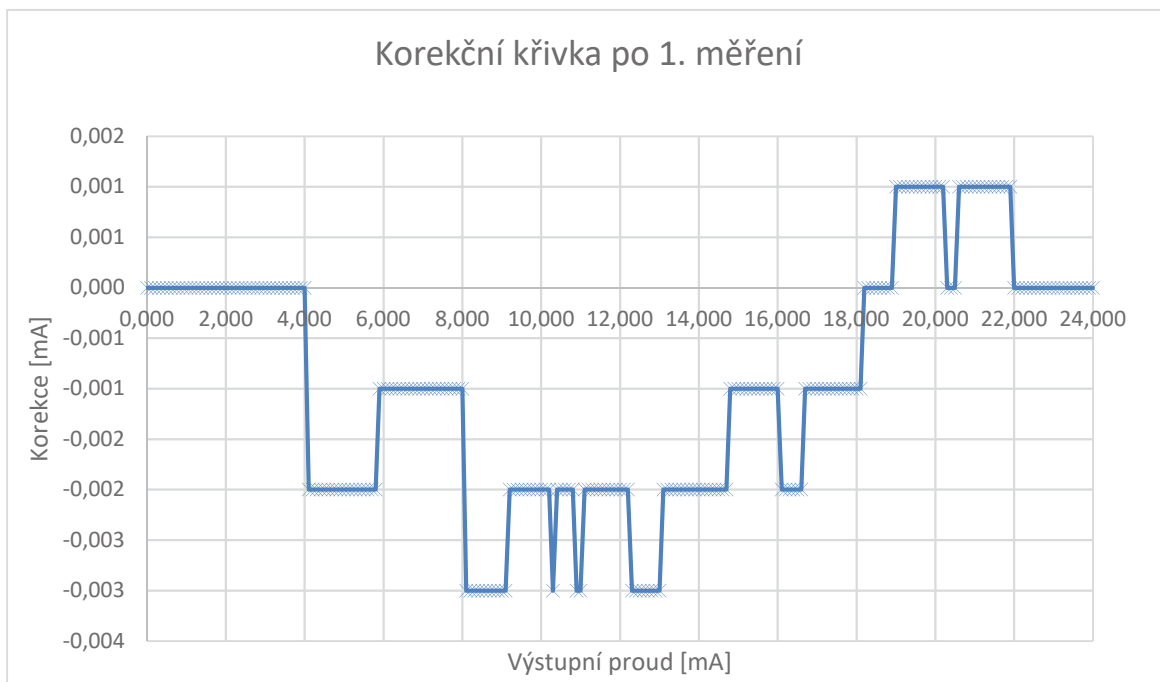
Korekční křivka by byla pro můj přístroj jistě vhodným doplňkem. Po jejím získání by se naměřená data nahrála zpět do zařízení. Následné výstupní hodnoty by již procházely korekcí a zvýšila by se tak jejich přesnost. Ještě před měřením korekční křivky jsem ale narazila na dva zásadní problémy.

Na mém rozsahu s daným rozlišením bych pro korekční křivku potřebovala změřit 24000 hodnot. Měření by bylo potřeba provést minimálně 10x, abych mohla eliminovat chyby na minimum a dosáhla tak vysoké přesnosti. Toto měření by bylo časově náročné, a to i za předpokladu, že bych jej provedla automatizovaně, například pomocí programu LabView. Do časové náročnosti musím zohlednit například dobu odezvy systému na změnu měřené hodnoty.

Druhým podstatným problémem by bylo použití korekční křivky v mém přístroji pro automatickou korekci hodnot. Ve svém návrhu jsem s tím vzhledem k absenci tohoto požadavku v zadání nepočítala od úplného začátku, ale po celou dobu jsem nad tím přemýšlela a práci se k tomu snažila dovést. 24000 výsledných hodnot by ale zabralo tolik paměti, že bych ve svém zařízení korekční křivku stejně nemohla využít. Po konzultaci s vedoucím práce jsem se rozhodla pro měření 240 hodnot na celém rozsahu, ze kterých jsem se pokusila stanovit alespoň pravděpodobný trend korekční křivky.

### 9.2 Kalibrace výstupu

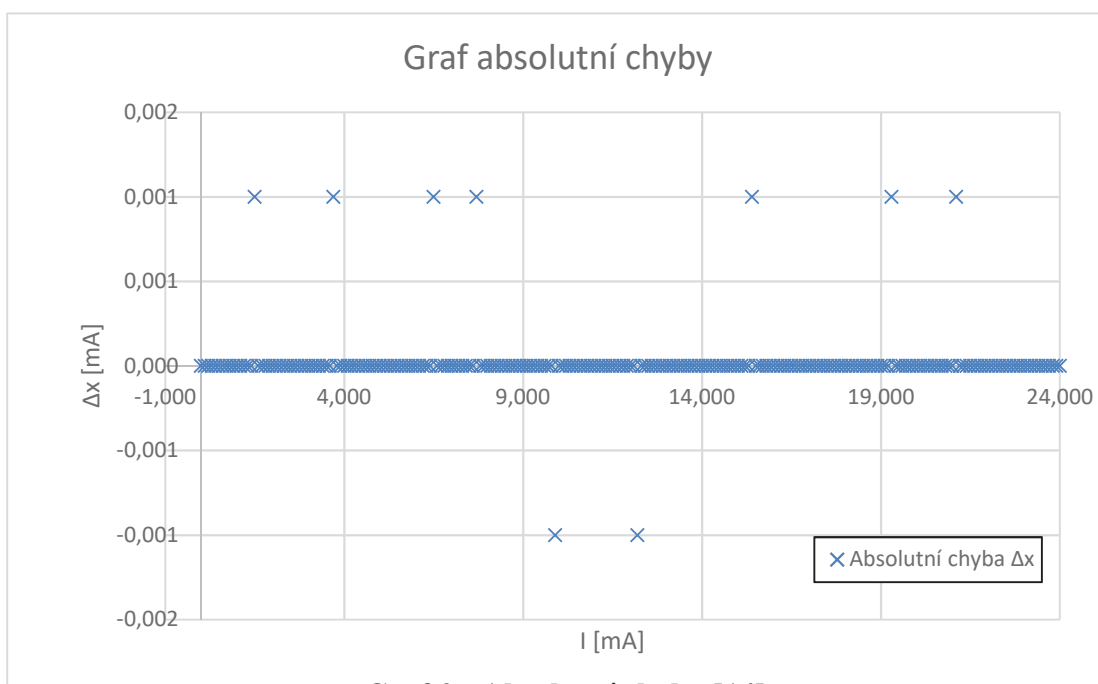
Po prvním měření 240 hodnot jsem získala graf korekční křivky znázorňující intervaly, ve kterých je potřeba provést korekci hodnoty. Z grafu číslo 1 je jasně patrné, že mám přesně vymezené intervaly, ve kterých musím přičíst nebo odečíst korekci k nastavované hodnotě, aby nastavená hodnota odpovídala výstupu. Maximální korekce po prvním měření byla 0,003 mA.



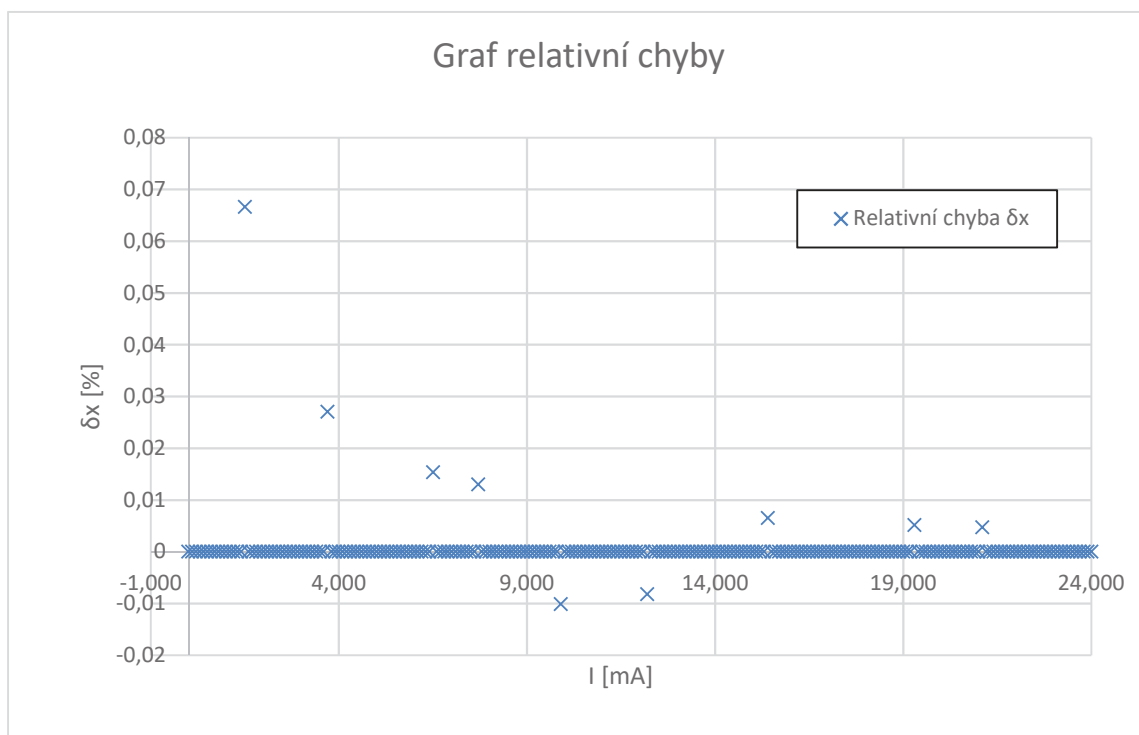
Graf 1 - Korekční křivka po prvním měření [14]

### 9.3 Testovací měření

Poté, co jsem povedla korekci a upravila dle ní program, jsem změřila těchto 240 hodnot znovu. Výsledky měření jsou uvedeny v příloze v tabulce číslo GGG. Z výsledku tohoto měření jsem spočítala absolutní a relativní chybu, které jsou na znázorněny v grafu číslo RRR a TTT.



Graf 2 - Absolutní chyba [14]



**Graf 3 - Relativní chyba [14]**

## 9.4 Zhodnocení měření

Kalibrace simulátoru dle naměřené korekce se podařila. Mnou navržený přístroj je velmi přesný, na rozsahu 0-24 mA a při rozlišení 0,001 mA je maximální odchylka nastavené hodnoty od naměřené hodnoty pouze 0,001 mA. Relativní chyba klesá se zvyšujícím se proudem. Maximální je v bodě 1,500 mA, kdy dosahuje hodnoty 0,066 %.

Každé měření je zatíženo chybami a nejistotami. V této práci se nejistotami nezapomínám, bylo by ale vhodné je pro tato měření vypočítat. Nejistota typu A je relativně lehce zjistitelná, počítá se z naměřených hodnot. Nejistota typu B už je na stanovení složitější. V tomto případě bychom museli zohlednit nejistotu jednotlivých součástí, rozlišení displeje, nejistotu měřicího přístroje, vliv prostředí a operátora při měření.

## 10. ZÁVĚR

V úvodu práce jsem uvedla, cíle, již chci v dané práci dosáhnout. Věnovala jsem se zařízením, které jsou na trhu dostupné a mají obdobné parametry jako moje zařízení. Teoreticky jsem rozebrala problematiku proudové smyčky a zdrojů standardizovaných signálů i jejich použití.

Navrhla jsem koncepci systému, vybrala jednotlivé součástky, stručně popsala jejich princip a důvod volby. Vytvořila jsem schéma, které jsem otestovala na nepájivém poli, chyby v návrhu jsem opravila ještě před vytvořením DPS, takže jsem aktualizovala schéma a vyrobila jsem dle něj DPS a tu následně osadila a oživila.

Pro celý přístroj jsem navrhla krabičky a vlastnoručně je vyrobila na laserové řezačce. Celý výrobek tím získal jednotný design.

Naprogramovala jsem jednoduchý program, který jsem nahrála do mikrokontroleru a pomocí kterého na displeji nastavuji hodnoty.

Po prvním měření jsem kalibrovala výstup a provedla další testovací měření, které potvrdilo správnost kalibrace. Maximální odchylka měřené hodnoty od nastavené hodnoty po kalibraci je 0,001 mA. Maximální relativní odchylka je 0,066 %. Takové přesnosti jsem dosáhla díky vybraným součástkám, již zmíněné kalibraci a také oddělením napájecí krabičky od procesorové, čímž jsem se pokusila eliminovat rušivé šумы a vlivy.

Přístroj splňuje všechny body zadání.

Při práci na tomto zařízení jsem se naučila a vyzkoušela mnoho věcí. V práci na tomto zařízení by se dalo pokračovat a dále ho vylepšovat. Na některá vylepšení je návrh připraven a stačilo by pouze dodatečná vylepšení připojit. Například bateriové napájení. Oddělením napájecí a procesorové krabičky jsem připravila půdu pro připojení bateriového napájení, stačí pouze vyvést stejný konektor. V procesorové krabičce je vývod na USB-A. Pomocí tohoto vývodu jsem přístroj pouze programovala, ale dalo by se navrhnout jednoduché API rozhraní, které by bylo uživatelsky přívětivé, pak by nebylo nutné zadávat hodnoty pomocí tlačítek a displeje, ale jednoduše je zadávat z aplikace na PC. Zařízení by také mohlo mít paměť naposledy zadaných hodnot nebo například přednastavené nejpoužívanější hodnoty. Rovněž bych k zařízení přidala LED diody, které by signalizovaly poruchu, komunikaci převodníku a mikroprocesoru a aktivní výstup. Ideální by bylo také přidání zpětné vazby a měření výstupního proudu, aby se dalo zařízení nastavit ještě přesněji.

## 11. LITERATURA

- [1] Proudová smyčka 4-20 mA: obecný popis. *Automatizace.hw.cz: rady a poslední novinky z oboru* [online]. Praha 4 - Kateřinky: Antonín Vojáček, 4.červen 2014 [cit. 2017-12-19]. Dostupné z: <https://automatizace.hw.cz/proudova-smycka-4-20-ma-obecny-popis>
- [2] Nové přístupy ke správě obvodů proudové smyčky 4 až 20 mA. *ELEKTRO: časopis pro elektroniku* [online]. Praha 8: Fluke Europe B. V., 2008, listopad 2008 [cit. 2017-12-18]. Dostupné z: <http://www.odbornecasopisy.cz/elektro/casopis/tema/nove-pristupy-ke-sprave-obvodu-proudove-smycky-4-az-20-ma--11520>
- [3] VÁŇA, Vladimír. *Mikrokontroléry ATMEL AVR: Popis procesoru a instrukční soubor*. Praha: BEN – technická literatura, 2003. ISBN 80-730-0083-0.
- [4] Mikrokontrolér ATMEL® AVR-RISC Atmel, ATMEGA328P-PU. *CONRAD* [online]. Praha 3: CONRAD, 2016 [cit. 2017-10-29]. Dostupné z: <https://www.conrad.cz/mikrokontroler-atmel-avr-risc-atmel-atmega328p-pu.k155197>
- [5] AN-P1S-1PS-Z Rotační spínač: Rotační spínač s potvrzovacím tlačítkem uprostřed. *Enika* [online]. Praha 9: Enika.cz, 2017 [cit. 2017-12-16]. Dostupné z: [https://www.enika.cz/an-p1s-1ps-z-rotacni-spinac\\_z9819/](https://www.enika.cz/an-p1s-1ps-z-rotacni-spinac_z9819/)
- [6] Ovládání znakových LCD s řadičem HD44780. *Elektronika kvalitně* [online]. Maslan, 2007, 11.3.2007 [cit. 2017-11-19]. Dostupné z: <http://www.elektronika.kvalitne.cz/ATMEL/necoteorie/LCDmatice.html>
- [7] HORÁČEK, Oldřich. 4x20 characters LCD Display with yellow/green backlight Více zde: <http://www.hwkitchen.com/products/lcd-display-4x20-characters/>. In: *HW kitchen* [online]. Šenov: HW kitchen, 2014 [cit. 2018-01-05]. Dostupné z: [http://files.hwkitchen.com/200000137-cf454cffdd/AMC2004A-B-Y6WFDY\\_arduino\\_10.JPG](http://files.hwkitchen.com/200000137-cf454cffdd/AMC2004A-B-Y6WFDY_arduino_10.JPG)
- [8] D/A převodník. In: *Wikipedia: the free encyclopedia* [online]. San Francisco (CA): Wikimedia Foundation, 2017 [cit. 2017-12-18]. Dostupné z: [https://cs.wikipedia.org/wiki/D/A\\_p%C5%99evodn%C3%ADk](https://cs.wikipedia.org/wiki/D/A_p%C5%99evodn%C3%ADk)
- [9] DAC8811 16-Bit, Serial Input Multiplying Digital-to-Analog Converter. *Texas Instruments* [online]. Dallas, Texas: Texas Instruments, 2016 [cit. 2017-10-03]. Dostupné z: <http://www.ti.com/lit/ds/symlink/dac8811.pdf>

- [10] Monofunction simulators and Multifunction simulators: Simulators. *SIKA: Quality by tradition* [online]. Kassel, Německo: Dr. Siebert & Kühn, 2016, 06/2016 [cit. 2017-12-05]. Dostupné z: <https://www.sika.net/en/services/downloads/send/11-catalogues-test-and-calibration-instruments/52-chapter-simulators.html>
- [11] Kalibrátor proudový CC 422. *Micronix* [online]. Praha 4: Micronix spol., 2013 [cit. 2017-11-25]. Dostupné z: <https://eshop.micronix.cz/data/cz/att/002/289-4440.pdf>
- [12] DA2RS: Dva analogové výstupy pro RS232/RS485. *Papouch.com* [online]. Praha - Zahradní město: Papouch, 2017 [cit. 2017-11-25]. Dostupné z: <https://www.papouch.com/cz/shop/product/da2rs-da-pro-rs232-rs485/>
- [13] Kalibrátor-simulátor 4-20 mA LUTRON CC-MA *Micronix* [online]. Praha 4: Micronix spol., 2013 [cit. 2017-11-25]. Dostupné z: <https://eshop.micronix.cz/data/cz/att/001/276-76.pdf>
- [14] Archiv Kateřina Chroustovské
- [15] SEDLÁŘ, Zdeněk. Procesní kalibrátory. *ELEKTRO: časopis pro elektrotechniku* [online]. 2000, únor 2000, (02), 1 [cit. 2019-05-16]. Dostupné z: <http://www.odbornecasopisy.cz/elektro/casopis/tema/procesni-kalibratory--15165>
- [16] HEJDUK, Přemysl, Ing. Průmyslové procesní kalibrátory: Měření a měřicí technika; Kontrolní, vyhodnocovací a signální technika. *ELEKTRO: časopis pro elektrotechniku* [online]. 2010, prosinec 2010, (12), str. 42 [cit. 2019-05-16]. Dostupné z: <http://www.odbornecasopisy.cz/res/pdf/42391.pdf>
- [17] Pasta pro bezolovnaté pájení Sn/Ag/Cu M705 500g. *HotAir.cz* [online]. Ostrava: Lukáš Urbanec [cit. 2019-05-16]. Dostupné z: <https://www.hotair.cz/detail/pasty-ciny-lepidla/cinove-pasty/pasta-pro-bezolovnate-pajeni-sn-ag-cu-m705-500g.html>
- [18] Technické specifikace laserů Trotec Speedy: Zakázané materiály. *FabLab Brno* [online]. Brno: Tomáš Mejzlík, 2019 [cit. 2019-05-16]. Dostupné z: <http://wiki.fablabbrno.cz/stroje/lasery>
- [19] Provozní manuál: Průmyslový multimetr. *GM ELECTRONIC* [online]. Praha: GM Electronic, [www.gme.cz](http://www.gme.cz) [cit. 2019-05-16]. Dostupné z: <https://www.gme.cz/data/attachments/czn.722-435.1.pdf>
- [20] Archiv doc. Ing. Zdeňka Bradáče, Ph.D.

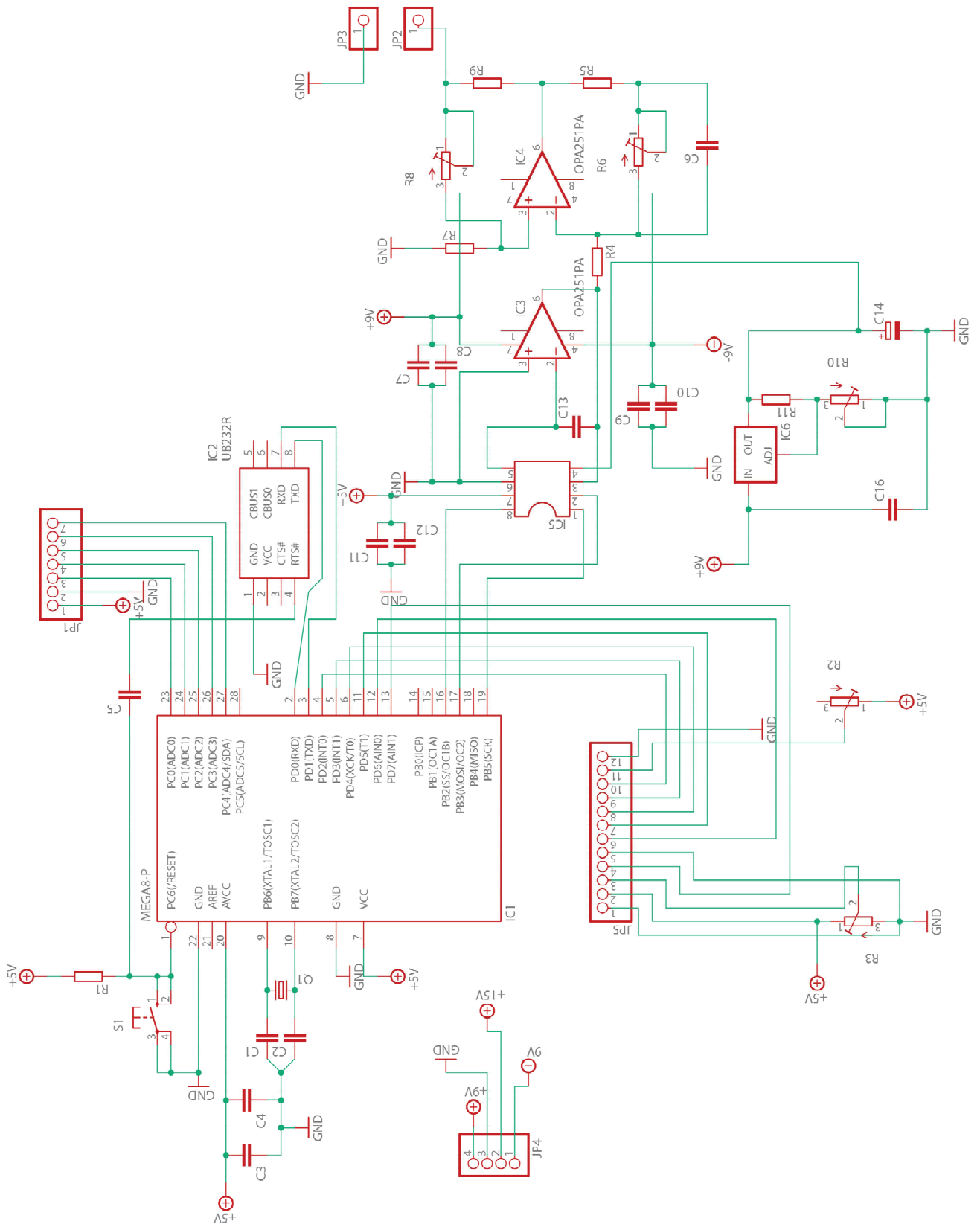


- [21] MIKROELEKTRONIKA LCD 2X16: Zobrazovač; Zobrazovač: LCD 2x16 znaků (modré podsvětlení. *TME: Electronic Components* [online]. Ostrava: TME Czech Republic [cit. 2019-05-18]. Dostupné z: <https://www.tme.eu/cz/details/mikroe-55/prislusenstvi-pro-vyvojove-kity/mikroelektronika/lcd-2x16/>
- [22] Hmatník pro AN spínač šedo-černý: Rotační spínač s potvrzovacím tlačítkem uprostřed. *Enika* [online]. Praha: Iva Horáčková [cit. 2019-05-18]. Dostupné z: [https://www.enika.cz/hmatnik-pro-an-spinac-sedo-cerny\\_z10019/](https://www.enika.cz/hmatnik-pro-an-spinac-sedo-cerny_z10019/)
- [23] Tlačítkový spínač P-DT6RT. *GM Electronics* [online]. Praha: GM electronic [cit. 2019-05-18]. Dostupné z: <https://www.gme.cz/tlacitkovy-spinac-p-dt6rt>
- [24] UB232R: USB Mini-B FT232R Evaluation Module Datasheet. *Farnell: An Avnet Company* [online]. 12.7.2010 [cit. 2019-05-19]. Dostupné z: <http://www.farnell.com/datasheets/1212631.pdf>

## 12. SEZNAM PŘÍLOH

Příloha 1 - Schéma procesorové části .....	43
Příloha 2 - DPS procesorové části .....	44
Příloha 3 - Seznam součástek procesorové části .....	45
Příloha 4 - Schéma napěťové části.....	46
Příloha 5 - DPS napěťové části .....	47
Příloha 6 - Seznam součástek napěťové části .....	48
Příloha 7 - Návrh napěťové krabičky.....	49
Příloha 8 - Návrh procesorové krabičky .....	50
Příloha 9 - Naměřené hodnoty .....	51
Příloha 10 - Naměřené hodnoty .....	57
Příloha 11 - Fotografie výsledného zařízení .....	58
Příloha 12 - Fotografie výsledného zařízení .....	59
Příloha 13 - Obsah přiloženého CD .....	60

# Příloha 1 - Schéma procesorové části

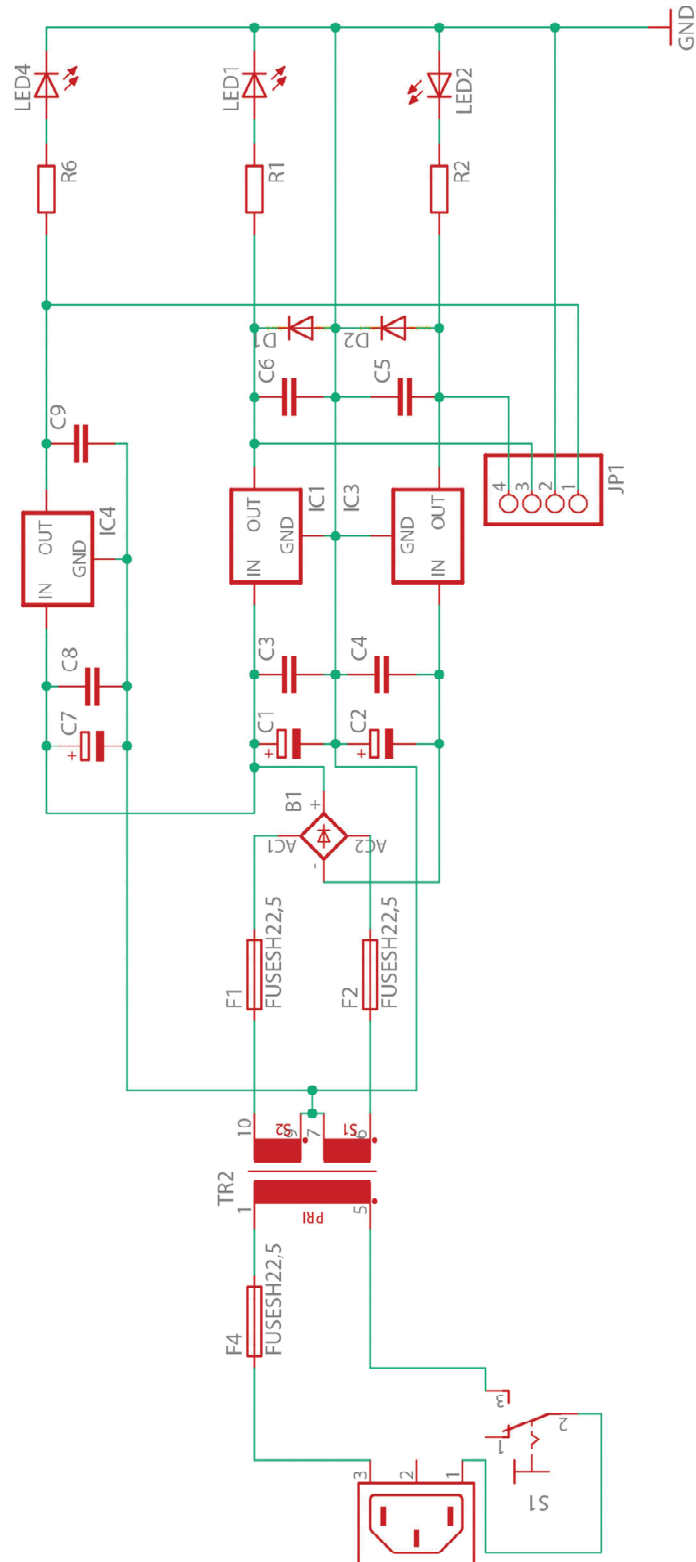




## Příloha 3 - Seznam součástek procesorové části

Part	Value	Device	Package	Library	Sheet
C1	10p	C-EU025-025X050	C025-025X050	rc1	1
C2	10p	C-EU025-025X050	C025-025X050	rc1	1
C3	1n	C-EU050-024X044	C050-024X044	rc1	1
C4	100n	C-EU050-024X044	C050-024X044	rc1	1
C5	100n	C-EU050-024X044	C050-024X044	rc1	1
C6	12p	C-EU050-024X044	C050-024X044	rc1	1
C7	100n	C-EU050-024X044	C050-024X044	rc1	1
C8	1n	C-EU050-024X044	C050-024X044	rc1	1
C9	1n	C-EU050-024X044	C050-024X044	rc1	1
C10	100n	C-EU050-024X044	C050-024X044	rc1	1
C11	100n	C-EU050-024X044	C050-024X044	rc1	1
C12	1n	C-EU050-024X044	C050-024X044	rc1	1
C13	12p	C-EU050-024X044	C050-024X044	rc1	1
C14	0.1u	CPOL-EUE5-6	E5-6	rc1	1
C16	100n	C-EU050-024X044	C050-024X044	resistor	1
IC1	MEGA8-P	MEGA8-P	DIL28-3	atmel	1
IC2	UB232R	UB232R	UB232R	UB232R	1
IC3	OPA251PA	OPA251PA	DIL08	linear	1
IC4	OPA251PA	OPA251PA	DIL08	linear	1
IC5	DAC 8811	DIL8	DIL08	ic-package	1
IC6	LM317	LM317TS	317TS	v-reg	1
JP1	Kon. pro tlačítka PINHD-1X7		1X07	pinhead	1
JP2	I_OUT	PINHD-1X1	1X01	pinhead	1
JP3	GND	PINHD-1X1	1X01	pinhead	1
JP4	Napájecí konektor PINHD-1X4		1X04	pinhead	1
JP5	Kon. displeje	PINHD-1X12	1X12	pinhead	1
Q1	16 MHz	CRYSTALHC49S	HC49/S	crystal	1
R1	10k	R-EU_0204/5	0204/5	rc1	1
R2	500	R-TRIMMT93YB	RTRIMT93YB	rc1	1
R3	5k	R-TRIMMT93YB	RTRIMT93YB	rc1	1
R4	150k	R-EU_0204/5	0204/5	rc1	1
R5	50	R-EU_0204/5	0204/5	rc1	1
R6	50k	R-TRIMMT93YB	RTRIMT93YB	rc1	1
R7	150k	R-EU_0204/5	0204/5	rc1	1
R8	50k	R-TRIMMT93YB	RTRIMT93YB	rc1	1
R9	50	R-EU_0204/5	0204/5	rc1	1
R10	5k	R-TRIMMT93YB	RTRIMT93YB	resistor	1
R11	270	R-EU_0204/5	0204/5	rc1	1
S1	Reset	10-XX	B3F-10XX	switch-omron	1

## Příloha 4 - Schéma napěťové části



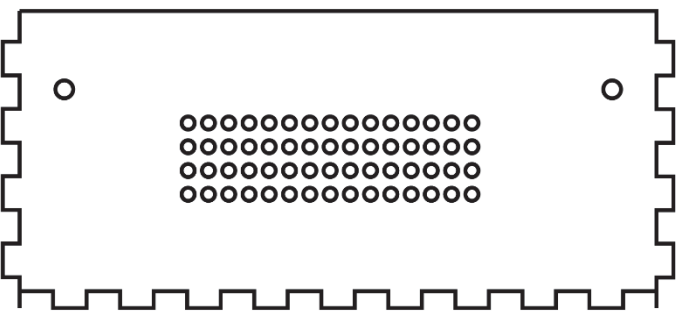
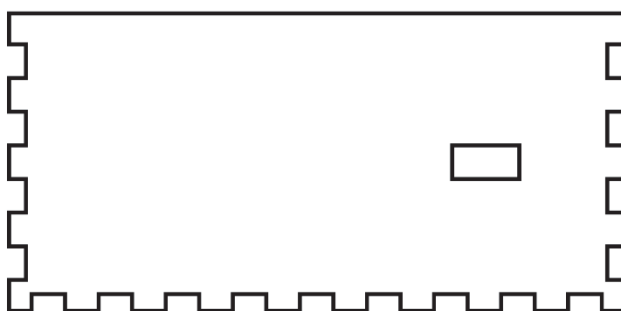
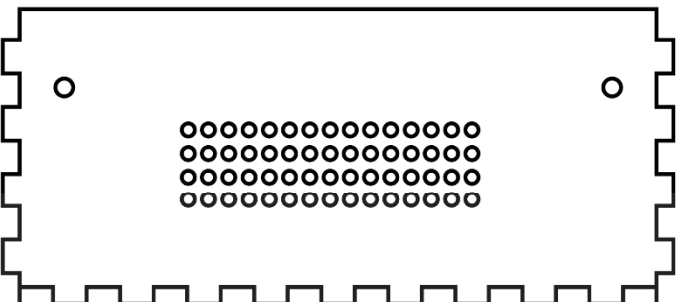
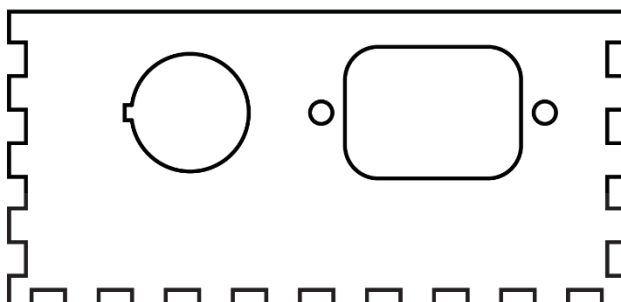
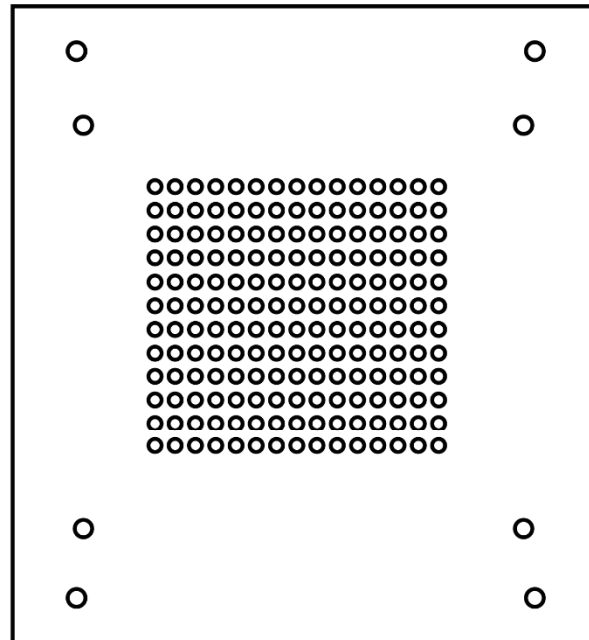


## Příloha 6 - Seznam součástek napěťové části

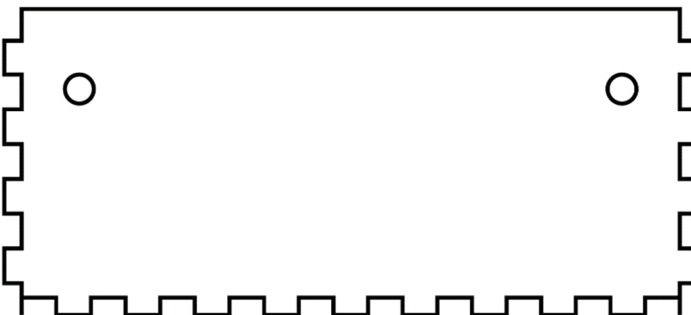
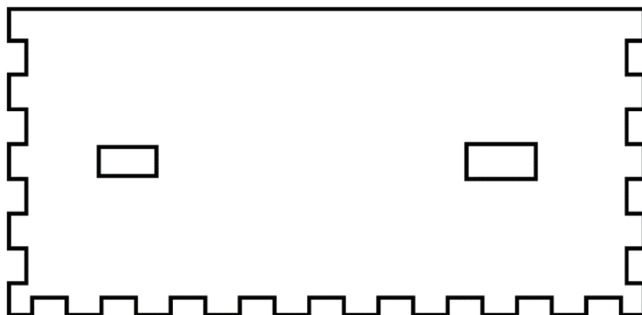
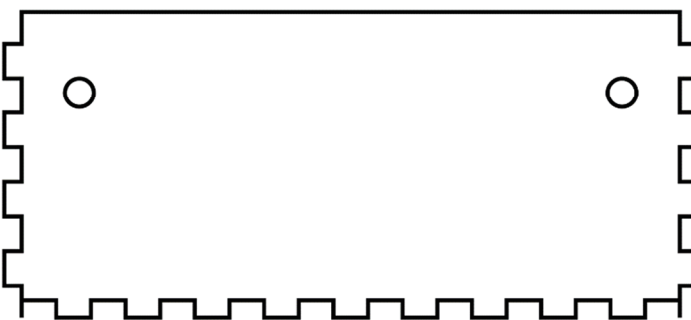
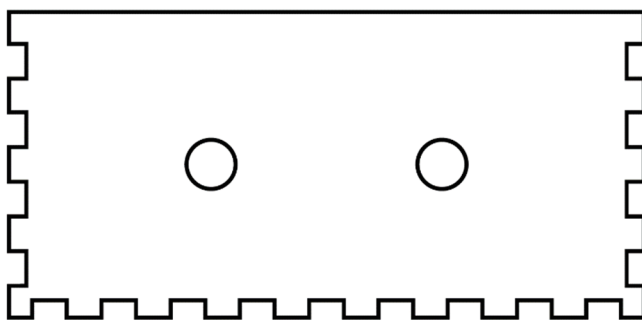
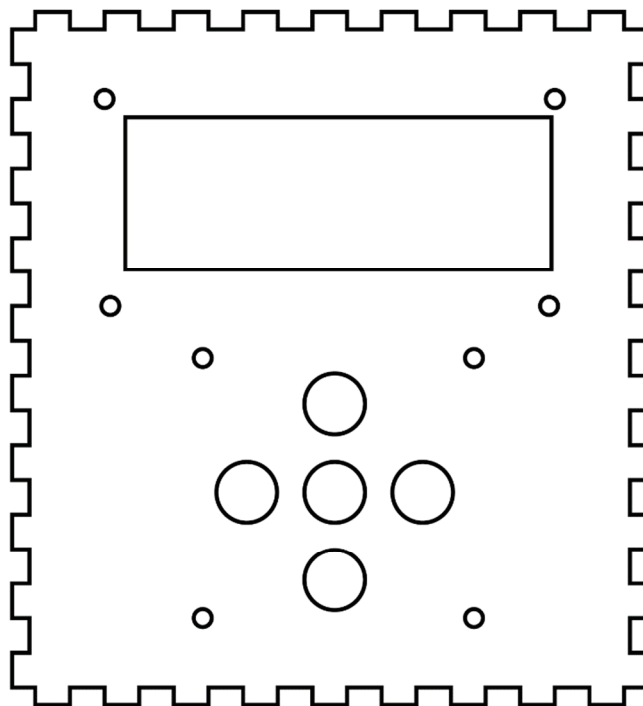
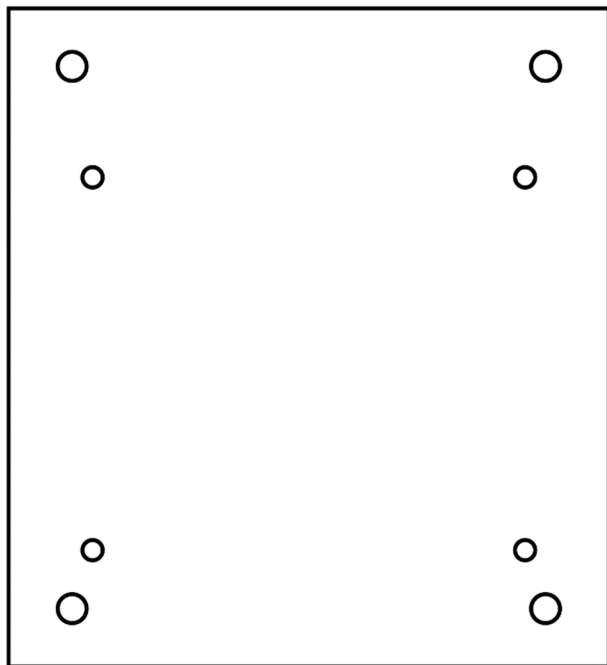
Part	Value	Device	Package	Library	Sheet
B1	Diodový most	1KAB	1KAB	rectifier	1
C1	210u	CPOL-EUE5-8.5	E5-8,5	rc1	1
C2	210u	CPOL-EUE5-8.5	E5-8,5	rc1	1
C3	100n	C-EU050-024X044	C050-024X044	rc1	1
C4	100n	C-EU050-024X044	C050-024X044	rc1	1
C5	1n	C-EU050-024X044	C050-024X044	rc1	1
C6	1n	C-EU050-024X044	C050-024X044	rc1	1
C7	210u	CPOL-EUE5-8.5	E5-8,5	rc1	1
C8	100n	C-EU050-024X044	C050-024X044	rc1	1
C9	1n	C-EU050-024X044	C050-024X044	rc1	1
D1	1N4004	1N4004	D041-10	diode	1
D2	1N4004	1N4004	D041-10	diode	1
F1	FUSESH22,5	FUSESH22,5	SH22,5	fuse	1
F2	FUSESH22,5	FUSESH22,5	SH22,5	fuse	1
F4	FUSESH22,5	FUSESH22,5	SH22,5	fuse	1
IC1	7809	78XXS	78XXS	v-reg	1
IC3	7909	79XXS	79XXS	v-reg	1
IC4	7805	78XXS	78XXS	v-reg	1
JP1	Napájecí konektor	PINHD-1X4	1X04	pinhead	1
LED1	3 mm LED	LED3MM	LED3MM	led	1
LED2	3 mm LED	LED3MM	LED3MM	led	1
LED4	3 mm LED	LED3MM	LED3MM	led	1
R1	10k	R-EU_0204/5	0204/5	rc1	1
R2	10k	R-EU_0204/5	0204/5	rc1	1
R6	10k	R-EU_0204/5	0204/5	rc1	1
S1	Vypínač	320-916	320-916	switch	1
TR2	2x9V	EI38-2	EI38-2	trafo	1
X1	6ESRM-P	6ESRM-P	6ESRM-P	con-tycoelectronics	1



# Příloha 7 - Návrh napěťové krabičky



## Příloha 8 - Návrh procesorové krabičky



## Příloha 9 - Naměřené hodnoty

Měření simulátoru proudového výstupu 0-24 mA s krokem 0,1 mA					
Skutečná hodnota	1. měření	Korekce	Měření po korekci	Absolutní chyba	Relativní chyba
I [mA]	I [mA]	k [mA]	I [mA]	$\Delta$ [mA]	$\delta$ [%]
24,000	24,000	0,000	24,000	0,000	0,000
23,900	23,900	0,000	23,900	0,000	0,000
23,800	23,800	0,000	23,800	0,000	0,000
23,700	23,700	0,000	23,700	0,000	0,000
23,600	23,600	0,000	23,600	0,000	0,000
23,500	23,500	0,000	23,500	0,000	0,000
23,400	23,400	0,000	23,400	0,000	0,000
23,300	23,300	0,000	23,300	0,000	0,000
23,200	23,200	0,000	23,200	0,000	0,000
23,100	23,100	0,000	23,100	0,000	0,000
23,000	23,000	0,000	23,000	0,000	0,000
22,900	22,900	0,000	22,900	0,000	0,000
22,800	22,800	0,000	22,800	0,000	0,000
22,700	22,700	0,000	22,700	0,000	0,000
22,600	22,600	0,000	22,600	0,000	0,000
22,500	22,500	0,000	22,500	0,000	0,000
22,400	22,400	0,000	22,400	0,000	0,000
22,300	22,300	0,000	22,300	0,000	0,000
22,200	22,200	0,000	22,200	0,000	0,000
22,100	22,100	0,000	22,100	0,000	0,000
22,000	22,000	0,000	22,000	0,000	0,000
21,900	21,899	0,001	21,900	0,000	0,000
21,800	21,799	0,001	21,800	0,000	0,000
21,700	21,699	0,001	21,700	0,000	0,000
21,600	21,599	0,001	21,600	0,000	0,000
21,500	21,499	0,001	21,500	0,000	0,000
21,400	21,399	0,001	21,400	0,000	0,000
21,300	21,299	0,001	21,300	0,000	0,000
21,200	21,199	0,001	21,200	0,000	0,000
21,100	21,099	0,001	21,101	0,001	0,005
21,000	20,999	0,001	21,000	0,000	0,000
20,900	20,899	0,001	20,900	0,000	0,000
20,800	20,799	0,001	20,800	0,000	0,000
20,700	20,699	0,001	20,700	0,000	0,000
20,600	20,599	0,001	20,600	0,000	0,000
20,500	20,500	0,000	20,500	0,000	0,000
20,400	20,400	0,000	20,400	0,000	0,000
20,300	20,300	0,000	20,300	0,000	0,000
20,200	20,199	0,001	20,200	0,000	0,000
20,100	20,099	0,001	20,100	0,000	0,000
20,000	19,999	0,001	20,000	0,000	0,000
19,900	19,899	0,001	19,900	0,000	0,000
19,800	19,799	0,001	19,800	0,000	0,000
19,700	19,699	0,001	19,700	0,000	0,000

### Měření simulátoru proudového výstupu 0-24 mA s krokem 0,1 mA

Skutečná hodnota	1. měření	Korekce	Měření po korekci	Absolutní chyba	Relativní chyba
I [mA]	I [mA]	k [mA]	I [mA]	$\Delta$ [mA]	$\delta$ [%]
19,600	19,599	0,001	19,600	0,000	0,000
19,500	19,499	0,001	19,500	0,000	0,000
19,400	19,399	0,001	19,400	0,000	0,000
19,300	19,299	0,001	19,301	0,001	0,005
19,200	19,199	0,001	19,200	0,000	0,000
19,100	19,099	0,001	19,100	0,000	0,000
19,000	18,999	0,001	19,000	0,000	0,000
18,900	18,900	0,000	18,900	0,000	0,000
18,800	18,800	0,000	18,800	0,000	0,000
18,700	18,700	0,000	18,700	0,000	0,000
18,600	18,600	0,000	18,600	0,000	0,000
18,500	18,500	0,000	18,500	0,000	0,000
18,400	18,400	0,000	18,400	0,000	0,000
18,300	18,300	0,000	18,300	0,000	0,000
18,200	18,200	0,000	18,200	0,000	0,000
18,100	18,101	-0,001	18,100	0,000	0,000
18,000	18,001	-0,001	18,000	0,000	0,000
17,900	17,901	-0,001	17,900	0,000	0,000
17,800	17,801	-0,001	17,800	0,000	0,000
17,700	17,701	-0,001	17,700	0,000	0,000
17,600	17,601	-0,001	17,600	0,000	0,000
17,500	17,501	-0,001	17,500	0,000	0,000
17,400	17,401	-0,001	17,400	0,000	0,000
17,300	17,301	-0,001	17,300	0,000	0,000
17,200	17,201	-0,001	17,200	0,000	0,000
17,100	17,101	-0,001	17,100	0,000	0,000
17,000	17,001	-0,001	17,000	0,000	0,000
16,900	16,901	-0,001	16,900	0,000	0,000
16,800	16,801	-0,001	16,800	0,000	0,000
16,700	16,701	-0,001	16,700	0,000	0,000
16,600	16,602	-0,002	16,600	0,000	0,000
16,500	16,502	-0,002	16,500	0,000	0,000
16,400	16,402	-0,002	16,400	0,000	0,000
16,300	16,302	-0,002	16,300	0,000	0,000
16,200	16,202	-0,002	16,200	0,000	0,000
16,100	16,102	-0,002	16,100	0,000	0,000
16,000	16,001	-0,001	16,000	0,000	0,000
15,900	15,901	-0,001	15,900	0,000	0,000
15,800	15,801	-0,001	15,800	0,000	0,000
15,700	15,701	-0,001	15,700	0,000	0,000
15,600	15,601	-0,001	15,600	0,000	0,000
15,500	15,501	-0,001	15,500	0,000	0,000
15,400	15,401	-0,001	15,401	0,001	0,006
15,300	15,301	-0,001	15,300	0,000	0,000
15,200	15,201	-0,001	15,200	0,000	0,000
15,100	15,101	-0,001	15,100	0,000	0,000

### Měření simulátoru proudového výstupu 0-24 mA s krokem 0,1 mA

Skutečná hodnota	1. měření	Korekce	Měření po korekci	Absolutní chyba	Relativní chyba
I [mA]	I [mA]	k [mA]	I [mA]	$\Delta$ [mA]	$\delta$ [%]
15,000	15,001	-0,001	15,000	0,000	0,000
14,900	14,901	-0,001	14,900	0,000	0,000
14,800	14,801	-0,001	14,800	0,000	0,000
14,700	14,702	-0,002	14,700	0,000	0,000
14,600	14,602	-0,002	14,600	0,000	0,000
14,500	14,502	-0,002	14,500	0,000	0,000
14,400	14,402	-0,002	14,400	0,000	0,000
14,300	14,302	-0,002	14,300	0,000	0,000
14,200	14,202	-0,002	14,200	0,000	0,000
14,100	14,102	-0,002	14,100	0,000	0,000
14,000	14,002	-0,002	14,000	0,000	0,000
13,900	13,902	-0,002	13,900	0,000	0,000
13,800	13,802	-0,002	13,800	0,000	0,000
13,700	13,702	-0,002	13,700	0,000	0,000
13,600	13,602	-0,002	13,600	0,000	0,000
13,500	13,502	-0,002	13,500	0,000	0,000
13,400	13,402	-0,002	13,400	0,000	0,000
13,300	13,302	-0,002	13,300	0,000	0,000
13,200	13,202	-0,002	13,200	0,000	0,000
13,100	13,102	-0,002	13,100	0,000	0,000
13,000	13,003	-0,003	13,000	0,000	0,000
12,900	12,903	-0,003	12,900	0,000	0,000
12,800	12,803	-0,003	12,800	0,000	0,000
12,700	12,703	-0,003	12,700	0,000	0,000
12,600	12,603	-0,003	12,600	0,000	0,000
12,500	12,503	-0,003	12,500	0,000	0,000
12,400	12,403	-0,003	12,400	0,000	0,000
12,300	12,303	-0,003	12,300	0,000	0,000
12,200	12,202	-0,002	12,199	-0,001	-0,008
12,100	12,102	-0,002	12,100	0,000	0,000
12,000	12,002	-0,002	12,000	0,000	0,000
11,900	11,902	-0,002	11,900	0,000	0,000
11,800	11,802	-0,002	11,800	0,000	0,000
11,700	11,702	-0,002	11,700	0,000	0,000
11,600	11,602	-0,002	11,600	0,000	0,000
11,500	11,502	-0,002	11,500	0,000	0,000
11,400	11,402	-0,002	11,400	0,000	0,000
11,300	11,302	-0,002	11,300	0,000	0,000
11,200	11,202	-0,002	11,200	0,000	0,000
11,100	11,102	-0,002	11,100	0,000	0,000
11,000	11,003	-0,003	11,000	0,000	0,000
10,900	10,903	-0,003	10,900	0,000	0,000
10,800	10,802	-0,002	10,800	0,000	0,000
10,700	10,702	-0,002	10,700	0,000	0,000
10,600	10,602	-0,002	10,600	0,000	0,000
10,500	10,502	-0,002	10,500	0,000	0,000

### Měření simulátoru proudového výstupu 0-24 mA s krokem 0,1 mA

Skutečná hodnota	1. měření	Korekce	Měření po korekci	Absolutní chyba	Relativní chyba
I [mA]	I [mA]	k [mA]	I [mA]	$\Delta$ [mA]	$\delta$ [%]
10,400	10,402	-0,002	10,400	0,000	0,000
10,300	10,303	-0,003	10,300	0,000	0,000
10,200	10,202	-0,002	10,200	0,000	0,000
10,100	10,102	-0,002	10,100	0,000	0,000
10,000	10,002	-0,002	10,000	0,000	0,000
9,900	9,902	-0,002	9,899	-0,001	-0,010
9,800	9,802	-0,002	9,800	0,000	0,000
9,700	9,702	-0,002	9,700	0,000	0,000
9,600	9,602	-0,002	9,600	0,000	0,000
9,500	9,502	-0,002	9,500	0,000	0,000
9,400	9,402	-0,002	9,400	0,000	0,000
9,300	9,302	-0,002	9,300	0,000	0,000
9,200	9,202	-0,002	9,200	0,000	0,000
9,100	9,103	-0,003	9,100	0,000	0,000
9,000	9,003	-0,003	9,000	0,000	0,000
8,900	8,903	-0,003	8,900	0,000	0,000
8,800	8,803	-0,003	8,800	0,000	0,000
8,700	8,703	-0,003	8,700	0,000	0,000
8,600	8,603	-0,003	8,600	0,000	0,000
8,500	8,503	-0,003	8,500	0,000	0,000
8,400	8,403	-0,003	8,400	0,000	0,000
8,300	8,303	-0,003	8,300	0,000	0,000
8,200	8,203	-0,003	8,200	0,000	0,000
8,100	8,103	-0,003	8,100	0,000	0,000
8,000	8,001	-0,001	8,000	0,000	0,000
7,900	7,901	-0,001	7,900	0,000	0,000
7,800	7,801	-0,001	7,800	0,000	0,000
7,700	7,701	-0,001	7,701	0,001	0,013
7,600	7,601	-0,001	7,600	0,000	0,000
7,500	7,501	-0,001	7,500	0,000	0,000
7,400	7,401	-0,001	7,400	0,000	0,000
7,300	7,301	-0,001	7,300	0,000	0,000
7,200	7,201	-0,001	7,200	0,000	0,000
7,100	7,101	-0,001	7,100	0,000	0,000
7,000	7,001	-0,001	7,000	0,000	0,000
6,900	6,901	-0,001	6,900	0,000	0,000
6,800	6,801	-0,001	6,800	0,000	0,000
6,700	6,701	-0,001	6,700	0,000	0,000
6,600	6,601	-0,001	6,600	0,000	0,000
6,500	6,501	-0,001	6,501	0,001	0,015
6,400	6,401	-0,001	6,400	0,000	0,000
6,300	6,301	-0,001	6,300	0,000	0,000
6,200	6,201	-0,001	6,200	0,000	0,000
6,100	6,101	-0,001	6,100	0,000	0,000
6,000	6,001	-0,001	6,000	0,000	0,000
5,900	5,901	-0,001	5,900	0,000	0,000

### Měření simulátoru proudového výstupu 0-24 mA s krokem 0,1 mA

Skutečná hodnota	1. měření	Korekce	Měření po korekci	Absolutní chyba	Relativní chyba
I [mA]	I [mA]	k [mA]	I [mA]	$\Delta$ [mA]	$\delta$ [%]
5,800	5,802	-0,002	5,800	0,000	0,000
5,700	5,702	-0,002	5,700	0,000	0,000
5,600	5,602	-0,002	5,600	0,000	0,000
5,500	5,502	-0,002	5,500	0,000	0,000
5,400	5,402	-0,002	5,400	0,000	0,000
5,300	5,302	-0,002	5,300	0,000	0,000
5,200	5,202	-0,002	5,200	0,000	0,000
5,100	5,102	-0,002	5,100	0,000	0,000
5,000	5,002	-0,002	5,000	0,000	0,000
4,900	4,902	-0,002	4,900	0,000	0,000
4,800	4,802	-0,002	4,800	0,000	0,000
4,700	4,702	-0,002	4,700	0,000	0,000
4,600	4,602	-0,002	4,600	0,000	0,000
4,500	4,502	-0,002	4,500	0,000	0,000
4,400	4,402	-0,002	4,400	0,000	0,000
4,300	4,302	-0,002	4,300	0,000	0,000
4,200	4,202	-0,002	4,200	0,000	0,000
4,100	4,102	-0,002	4,100	0,000	0,000
4,000	4,000	0,000	4,000	0,000	0,000
3,900	3,900	0,000	3,900	0,000	0,000
3,800	3,800	0,000	3,800	0,000	0,000
3,700	3,700	0,000	3,701	0,001	0,027
3,600	3,600	0,000	3,600	0,000	0,000
3,500	3,500	0,000	3,500	0,000	0,000
3,400	3,400	0,000	3,400	0,000	0,000
3,300	3,300	0,000	3,300	0,000	0,000
3,200	3,200	0,000	3,200	0,000	0,000
3,100	3,100	0,000	3,100	0,000	0,000
3,000	3,000	0,000	3,000	0,000	0,000
2,900	2,900	0,000	2,900	0,000	0,000
2,800	2,800	0,000	2,800	0,000	0,000
2,700	2,700	0,000	2,700	0,000	0,000
2,600	2,600	0,000	2,600	0,000	0,000
2,500	2,500	0,000	2,500	0,000	0,000
2,400	2,400	0,000	2,400	0,000	0,000
2,300	2,300	0,000	2,300	0,000	0,000
2,200	2,200	0,000	2,200	0,000	0,000
2,100	2,100	0,000	2,100	0,000	0,000
2,000	2,000	0,000	2,000	0,000	0,000
1,900	1,900	0,000	1,900	0,000	0,000
1,800	1,800	0,000	1,800	0,000	0,000
1,700	1,700	0,000	1,700	0,000	0,000
1,600	1,600	0,000	1,600	0,000	0,000
1,500	1,500	0,000	1,501	0,001	0,067
1,400	1,400	0,000	1,400	0,000	0,000
1,300	1,300	0,000	1,300	0,000	0,000

**Měření simulátoru proudového výstupu 0-24 mA s krokem 0,1 mA**

Skutečná hodnota	1. měření	Korekce	Měření po korekci	Absolutní chyba	Relativní chyba
I [mA]	I [mA]	k [mA]	I [mA]	$\Delta$ [mA]	$\delta$ [%]
1,200	1,200	0,000	1,200	0,000	0,000
1,100	1,100	0,000	1,100	0,000	0,000
1,000	1,000	0,000	1,000	0,000	0,000
0,900	0,900	0,000	0,900	0,000	0,000
0,800	0,800	0,000	0,800	0,000	0,000
0,700	0,700	0,000	0,700	0,000	0,000
0,600	0,600	0,000	0,600	0,000	0,000
0,500	0,500	0,000	0,500	0,000	0,000
0,400	0,400	0,000	0,400	0,000	0,000
0,300	0,300	0,000	0,300	0,000	0,000
0,200	0,200	0,000	0,200	0,000	0,000
0,100	0,100	0,000	0,100	0,000	0,000
0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000



## Příloha 10 - Naměřené hodnoty



## Příloha 11 - Fotografie výsledného zařízení



Obrázek 1 - Napájecí část

## Příloha 12 - Fotografie výsledného zařízení



Obrázek 2 - Procesorová část

## **Příloha 13 - Obsah přiloženého CD**

Přiložené CD obsahuje:

- Program
- Návrh napěťové krabičky
- Návrh procesorové krabičky
- Schéma napěťové krabičky
- Schéma procesorové krabičky
- Schéma zapojení tlačítek
- DPS napěťové krabičky
- DPS procesorové krabičky
- DPS tlačítek
- Bakalářskou práci v elektronické verzi
- Fotografie zařízení
- Tabulku naměřených hodnot
- Grafy
- Seznamy součástek pro napájení, procesor a tlačítka