



**VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ**

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

**FAKULTA ELEKTROTECHNIKY  
A KOMUNIKAČNÍCH TECHNOLOGIÍ**

FACULTY OF ELECTRICAL ENGINEERING AND COMMUNICATION

**ÚSTAV MIKROELEKTRONIKY**

DEPARTMENT OF MICROELECTRONICS

**VÝVOJ A VÝROBA MULTIMETRU**

DESIGN AND FABRICATION OF THE MULTIMETER

**DIPLOMOVÁ PRÁCE**

MASTER'S THESIS

**AUTOR PRÁCE**

AUTHOR

Bc. Martin Daněk

**VEDOUCÍ PRÁCE**

SUPERVISOR

doc. Ing. Jiří Háze, Ph.D.

BRNO 2022

# Diplomová práce

magisterský navazující studijní program **Mikroelektronika**

Ústav mikroelektroniky

**Student:** Bc. Martin Daněk

**ID:** 203401

**Ročník:** 2

**Akademický rok:** 2021/22

**NÁZEV TÉMATU:**

## Vývoj a výroba multimetru

### POKYNY PRO VYPRACOVÁNÍ:

Cílem práce je vyvinout plně použitelný multimetr s následujícími funkcemi:

- měření SS i ST napětí v rozsahu minimálně 60 mV až 500 V vč. měření hodnoty true RMS,
- měření SS i ST proudu v rozsahu minimálně 5 mA až 5 A vč. měření hodnoty true RMS,
- měření odporu, frekvence, kontinuity, kapacity,
- funkce HOLD, REL, automatické přepínání rozsahů.

Návrh bude zaměřen na návrh kompletního elektrického schématu, výrobu, oživení, ověření dosažených parametrů a po nezbytných úpravách výroba konečné verze multimetru.

### DOPORUČENÁ LITERATURA:

Podle pokynů vedoucího práce.

**Termín zadání:** 7.2.2022

**Termín odevzdání:** 24.5.2022

**Vedoucí práce:** doc. Ing. Jiří Háze, Ph.D.

**doc. Ing. Lukáš Fucík, Ph.D.**

předseda rady studijního programu

### UPOZORNĚNÍ:

Autor diplomové práce nesmí při vytváření diplomové 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**

Práce se zabývá návrhem a konstrukcí multimetru. Nejdříve jsou multimetry, jejich historie a základní parametry stručně představeny, následně je provedena analýza existujících projektů, zabývajících se podobnou či stejnou tematikou. Poté jsou teoreticky popsány metody měření různých elektrických veličin a navržena konstrukce prvního prototypu. Nakonec jsou parametry prvního prototypu ověřeny, provedeny nutné úpravy, navržen finální prototyp a zrealizováno jeho vyhodnocení.

## **Klíčová slova**

Multimetr, měření, laboratorní přístroj, převodník AD, mikrokontrolér, ARM

## **Abstract**

The goal of this thesis is to design and build a multimeter. Firstly, multimeters, their history and basic parameters are described, followed by an analysis of existing solutions with a similar topic. Next, theory of measurement of basic electrical quantities is described and the first prototype is proposed. Finally, the first prototype is evaluated, necessary adjustments applied, and the final prototype is proposed and evaluated.

## **Keywords**

Multimeter, measurement, laboratory instrument, AD converter, microcontroller, ARM

## **Bibliografická citace**

DANĚK, Martin. *Vývoj a výroba multimetru* [online]. Brno, 2022 [cit. 2022-05-23]. Dostupné z: <https://www.vutbr.cz/studenti/zav-prace/detail/142435>. Diplomová práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, Ústav mikroelektroniky. Vedoucí práce Jiří Háze.

# Prohlášení autora o původnosti díla

<b>Jméno a příjmení studenta:</b>	<i>Martin Daněk</i>
<b>VUT ID studenta:</b>	<i>203 401</i>
<b>Typ práce:</b>	<i>Diplomová práce</i>
<b>Akademický rok:</b>	<i>2021/22</i>
<b>Téma závěrečné práce:</b>	<i>Vývoj a výroba multimetru</i>

Prohlašuji, že svou závěrečnou práci jsem vypracoval samostatně pod vedením vedoucí/ho závěrečné 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 autor uvedené závěrečné práce dále prohlašuji, že v souvislosti s vytvořením této závěrečné práce jsem neporušil autorská práva třetích osob, zejména jsem nezasáhl nedovoleným způsobem do cizích autorských práv osobnostních a jsem si 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.

V Brně dne: 24. května 2022

-----  
podpis autora

## **Poděkování**

Děkuji vedoucímu mé diplomové práce doc. Ing. Jiřímu Házemu, Ph.D., za účinnou metodickou, pedagogickou a odbornou pomoc a další cenné rady při zpracování mé diplomové práce. Dále bych chtěl poděkovat mým rodičům za podporu po celou dobu studia.

V Brně dne: 24. května 2022

-----  
podpis autora

# Obsah

SEZNAM OBRÁZKŮ.....	10
SEZNAM TABULEK.....	11
ÚVOD.....	12
<b>1. MULTIMETRY.....</b>	<b>13</b>
1.1 HISTORIE.....	13
1.2 POPIS FUNKCÍ.....	13
1.2.1 Měření napětí a proudu.....	14
1.2.2 Měření odporu.....	14
1.2.3 Další funkce.....	14
1.3 ZÁKLADNÍ PARAMETRY.....	15
1.3.1 Přesnost.....	15
1.3.2 Vstupní impedance.....	16
1.3.3 Úbytek napětí na měřicím rezistoru.....	16
<b>2. ANALÝZA EXISTUJÍCÍCH ŘEŠENÍ.....</b>	<b>17</b>
2.1 REFERENČNÍ DESIGN TIDA-00879.....	17
2.2 REFERENČNÍ DESIGN TIDA-01012.....	18
2.3 ROZŠÍŘUJÍCÍ MODUL EEZ MIO168 AFE1.....	19
2.4 ZAŘÍZENÍ HPM7177.....	20
2.5 PŘEDCHOZÍ PROJEKT AUTORA PRÁCE.....	22
<b>3. PŘEVODNÍKY AD.....</b>	<b>24</b>
3.1 PARAMETRY PŘEVODNÍKŮ AD.....	24
3.1.1 Rozlišení.....	24
3.1.2 Vzorkovací frekvence.....	24
3.1.3 Integrální nelinearita.....	25
3.1.4 Diferenciální nelinearita.....	25
3.1.5 Chyba nastavení nuly.....	25
3.1.6 Chyba zesílení.....	25
3.1.7 Efektivní počet bitů.....	25
3.1.8 Parametry vstupu.....	26
3.1.9 Referenční napětí.....	26
3.1.10 Typ výstupu.....	26
3.2 TYPY PŘEVODNÍKŮ AD.....	26
3.2.1 Paralelní převodníky.....	26
3.2.2 Převodníky s postupnou aproximací.....	27
3.2.3 Integrační převodníky.....	27
3.2.4 Převodníky sigma-delta.....	27
<b>4. MĚŘENÍ ELEKTRICKÝCH VELIČIN.....</b>	<b>30</b>
4.1 MĚŘENÍ NAPĚTÍ.....	30
4.1.1 Změna vstupního rozsahu.....	30
4.1.2 Zdroje nepřesnosti.....	31
4.2 MĚŘENÍ PROUDU.....	32

4.2.1	<i>Změna vstupního rozsahu</i>	32
4.2.2	<i>Zdroje nepřesnosti</i>	33
4.3	MĚŘENÍ ODPORU	33
4.3.1	<i>Zdroje nepřesnosti</i>	34
4.4	MĚŘENÍ TEPLOTY	34
4.4.1	<i>Termistor</i>	34
4.4.2	<i>Polovodičový senzor</i>	34
4.4.3	<i>Termočlánek</i>	34
4.5	ŠUM	35
4.5.1	<i>Tepelný šum</i>	35
4.5.2	<i>Výstřelový šum</i>	35
4.5.3	<i>Blikavý šum</i>	36
<b>5.</b>	<b>NÁVRH PRVNÍHO PROTOTYPU</b>	<b>37</b>
5.1	VSTUPNÍ ANALOGOVÁ ČÁST	37
5.1.1	<i>Měření napětí</i>	38
5.1.2	<i>Výběr operačního zesilovače</i>	40
5.1.3	<i>Ochrana obvodu pro měření napětí</i>	42
5.1.4	<i>Měření proudu</i>	43
5.1.5	<i>Měření odporu</i>	44
5.1.6	<i>Měření teploty</i>	44
5.2	PŘEVODNÍK AD	45
5.3	MIKROKONTROLÉR	46
5.4	NAPÁJENÍ	46
5.5	UŽIVATELSKÉ ROZHRAŇÍ	47
5.6	KOMUNIKAČNÍ ROZHRAŇÍ	47
5.7	ROZŠÍŘUJÍCÍ PORTY	48
<b>6.</b>	<b>VÝVOJ FIRMWARE</b>	<b>50</b>
6.1	OBSLUHA PŘEVODNÍKU	50
6.1.1	<i>Asynchronní přenos dat</i>	50
6.1.2	<i>Změna nastavení převodníku</i>	51
6.2	ZPRACOVÁNÍ MĚŘENÝCH VELIČIN	51
6.2.1	<i>Výpočet SS, ST a RMS hodnoty</i>	52
6.2.2	<i>Výpočet výkonu</i>	53
6.2.3	<i>Měření odporu</i>	54
6.2.4	<i>Měření kapacity</i>	54
6.2.5	<i>Měření frekvence</i>	54
6.2.6	<i>Měření teploty pomocí termočlánu</i>	55
6.3	UŽIVATELSKÉ ROZHRAŇÍ	55
6.3.1	<i>Displej</i>	55
6.3.2	<i>Vykreslování uživatelského rozhraní</i>	57
6.3.3	<i>Tlačítka</i>	57
<b>7.</b>	<b>ÚPRAVY PRVNÍHO PROTOTYPU</b>	<b>58</b>
7.1.1	<i>Oscilace regulátoru napětí</i>	58
7.1.2	<i>Změna napěťového děliče</i>	58
7.1.3	<i>Změna obvodu pro měření proudu</i>	59
7.1.4	<i>Úpravy zesilovačů</i>	59



7.1.5	<i>Úpravy desky s uživatelským rozhraním .....</i>	<i>60</i>
7.1.6	<i>3D krabice .....</i>	<i>61</i>
7.1.7	<i>Přechod do bootovacího režimu .....</i>	<i>61</i>
<b>8.</b>	<b>VYHODNOCENÍ DRUHÉ VERZE .....</b>	<b>63</b>
8.1	PŘESNOST MĚŘENÍ NAPĚTÍ .....	64
8.2	PŘESNOST MĚŘENÍ PROUDU .....	67
8.3	PŘESNOST OSTATNÍCH PARAMETRŮ .....	69
8.4	SHRNUTÍ OSTATNÍCH PARAMETRŮ .....	70
<b>9.</b>	<b>ZÁVĚR.....</b>	<b>71</b>
	<b>SEZNAM PŘÍLOH.....</b>	<b>76</b>

# SEZNAM OBRÁZKŮ

2.1	Referenční design TIDA-00879, převzato z [9] .....	17
2.2	Referenční design TIDA-01012, převzato z [11] .....	19
2.3	Rozšiřující modul AFE1 verze r1B3, převzato z [14] .....	20
2.4	Deska s převodníkem AD s odstraněnou teplotní komorou, převzato a oříznuto z [16] .....	21
2.5	Předchozí projekt autora práce, převzato z [18] .....	22
3.1	Modulátor převodníku sigma-delta, převzato a přeloženo z [19] .....	28
4.1	Vstupní dělič s volbou dělicího poměru .....	30
4.2	Vstupní dělič s volbou dělicího poměru – alternativní uspořádání .....	31
4.3	Zapojení pro snímání proudu s elektronickou volbou rozsahu .....	33
5.1	Zapojení sledovače reference a obvodu pro tvorbu virtuální země .....	38
5.2	Vstupní dělič pro měření napětí .....	40
5.3	Zapojení zesilovače se ziskem 37,4 pro měření napětí .....	41
5.4	Graf vstupní napěťové nesymetrie vůči napětí vstupů u OPAx376, převzato a přeloženo z [32] ....	42
5.5	Vstupní část pro měření proudu .....	43
5.6	Vstupní část pro měření odporu .....	44
5.7	Vstupní filtr pro převodník AD .....	46
5.8	Komunikační rozhraní multimetru .....	48
5.9	Rozšiřující port multimetru .....	48
6.1	Časový diagram přenosu dat z převodníku AD .....	51
6.2	Diagram výpočtu SS, ST a RMS hodnot .....	53
6.3	Diagram dědičnosti tříd grafické knihovny .....	56
7.1	Vstupní napěťový dělič druhé verze .....	59
7.2	Upravená verze zesilovače .....	60
7.3	3D model krabice .....	61
7.4	Obvod pro přechod do bootovacího režimu .....	62
8.1	Fotografie finálního výrobku .....	63
8.2	Přesnost pro rozsah $\pm 60$ mV .....	64
8.3	Přesnost pro rozsah $\pm 600$ mV .....	64
8.4	Přesnost pro rozsah $\pm 6$ V .....	65
8.5	Přesnost pro rozsah $\pm 60$ V .....	65
8.6	Histogram pro rozsah $\pm 600$ V .....	66
8.7	Histogram pro rozsah $\pm 60$ mV .....	66
8.8	Přesnost pro rozsah $\pm 6$ mA .....	67
8.9	Přesnost pro rozsah $\pm 60$ mA .....	68
8.10	Přesnost pro rozsah $\pm 600$ mA .....	68
8.11	Přesnost pro rozsah $\pm 6$ A .....	69

## SEZNAM TABULEK

2.1	Shrnutí parametrů referenčního designu TIDA-00879, převzato z [10].....	18
2.2	Shrnutí parametrů submodulu AFE1, převzato z [14].....	20
2.3	Shrnutí parametrů zařízení HPM7177, převzato z [16].....	21
2.4	Shrnutí parametrů předchozího projektu těsně po kalibraci, převzato z [18] .....	23
4.1	Úbytky napětí při různých rozsazích měřeného proudu multimetru Brymen 868 [24].....	32
5.1	Požadované funkce prvního prototypu multimetru .....	37
5.2	Vybrané parametry analogového přepínače TS5A3359, převzato z [30].....	39
5.3	Vybrané parametry OZ OPAx376, převzato z [32].....	41
5.4	Vybrané parametry převodníku AD typu ADS131A04, převzato z [21] .....	45
5.5	Vybrané parametry mikrokontroléru STM32G473VC, převzato z [34] .....	46
6.1	Formát rámce pro přenos dat z/do převodníku AD .....	50
8.1	Přesnost měření teploty pomocí termočlánku .....	69
8.2	Přesnost měření teploty pomocí termočlánku .....	69
8.3	Přesnost měření kapacity .....	70
8.4	Shrnutí parametrů druhého prototypu.....	70

# ÚVOD

Jedním z nejzákladnějších a nejrozšířenějších elektrotechnických přístrojů je zajisté multimetr, v dnešní době v naprosté většině případů digitální. Spektrum multimetrů, dostupných na trhu, je značně široké – od nejlevnějších za několik stokorun po nejdražší za několik set tisíc korun. Stejně tak se liší i jejich parametry a funkce.

Cílem této práce je navrhnout a prakticky zkonstruovat funkční prototyp multimetru. Multimetr by měl být prakticky použitelný a měl by obsahovat všechny základní funkce běžně dostupných komerčních multimetrů, tedy měření stejnosměrného i střídavého napětí a proudu včetně měření hodnoty true RMS a dále měření odporu, frekvence, kontinuity a kapacity. Multimetr by také měl disponovat vhodným displejem s podsvícením, funkcí pro zmrazení displeje (tzv. funkce HOLD) či rozhraním pro odesílání dat do počítače.

Diplomová práce je členěna do 8 kapitol. V první kapitole jsou popsány funkce a historie multimetrů, ve druhé kapitole je provedena analýza již existujících řešení. Ve třetí kapitole jsou popsány metody měření základních elektrických veličin, převodníky AD jsou pak popsány v kapitole čtvrté. V páté kapitole je popsán návrh a konstrukce prvního prototypu multimetru a vysvětlena volba jednotlivých komponent. V šesté kapitole je popsána funkce firmwaru a princip některých funkcí, v sedmé kapitole je vyhodnocen první prototyp a navrženy drobné změny a vylepšení. V poslední, osmé kapitole, je provedeno vyhodnocení finálního výrobku.

# 1. MULTIMETRY

Multimetry je možné v základu rozdělit do dvou kategorií – stolních (*benchtop*) a přenosných (*handheld*). Stolní multimetry jsou obvykle rozměrné, určené pro statické instalace, ale disponují vyšším rozlišením a funkcemi navíc – například čtyřvodičovým měřením odporu či připojením do Ethernetu. Naopak přenosné multimetry jsou napájeny bateriemi a jejich největší výhodou je malá velikost a snadnost použití. Za speciální podkategorii přenosných multimetrů je pak možné považovat klešťové (*clamp*) multimetry, které jsou speciálně určeny k neinvazivnímu měření proudu.

## 1.1 Historie

Za historicky první pokus o zařízení schopné měření elektrických veličin lze považovat tzv. galvanometry, které se začaly objevovat kolem roku 1820 [1]. V začátcích se jednalo pouze o cívku, vedle které byl umístěn běžný kompas a průchod proudu způsobil vychýlení stříelky.

První sériově vyráběný multimetr byl výrobek britského inženýra D. Macandieho z roku 1920, nazývaný *AVOmeter*, jelikož umožňoval měřit nejenom proud, ale i napětí a odpor. Tento multimetr sice umožňoval měřit v 13 různých rozsazích, ale stále byl limitován na měření pouze stejnosměrného napětí či proudu, jelikož mechanické měřiče zobrazují střední hodnotu měřené veličiny, která je např. u harmonických signálů nulová. To se změnilo o deset let později s příchodem Univerzálního měřiče (*Universal meter*) firmy Westinghouse, který používal k usměrnění střídavých veličin jednoduchou diodu na bázi oxidu mědi [2].

Už v průběhu 50. let se začaly objevovat první digitální multimetry, nicméně jejich velkou nevýhodou byla zpočátku malá výdrž na baterii a relativně nízká spolehlivost oproti mechanickým měřičům. První komerčně úspěšný digitální multimetr se tak objevil až v 70. letech, konkrétně jej uvedla na trh v roce 1977 firma Fluke pod typovým označením Fluke 8020A.

Vývoj digitálních multimetrů pak postupně pokračoval, v dnešní době se až na pár výjimek používají již pouze digitální multimetry. Novinkami u multimetrů v poslední době je např. připojení přes Bluetooth (OWON OW18B [3]) či využití OLED displejů (VoltCraft VC890 [4]).

## 1.2 Popis funkcí

Naprostá většina multimetrů dokáže v základu měřit tři veličiny – napětí, proud a odpor. Pro zvýšení dynamického rozsahu je pro každou veličinu k dispozici vícero rozsahů, mezi nimiž se přepíná manuálně, či v případě dražších multimetrů elektronicky. K manuální změně rozsahu obvykle slouží mechanický otočný přepínač.

### 1.2.1 Měření napětí a proudu

Napětí a proud je možné měřit buďto v stejnosměrném (SS či DC, *direct current*), či ve střídavém (ST či AC, *alternating current*) režimu, někdy též označovaném jako režim střídavé vazby. V ST režimu se před převodník AD předřadí kondenzátor, čímž se vytvoří filtr typu horní propust s mezní frekvencí okolo 10–20 Hz a multimetr pak neměří stejnosměrnou složku napětí. Tento režim je výhodný např. pro měření malého signálu, superponovaného na velké stejnosměrné složce.

Problém nastává při měření napětí, které není konstantní. Před převodníkem AD se sice v multimetru nachází filtr, nicméně jeho výsledkem je průměrná, tj. střední hodnota. Symetrický signál (např. sinusového průběhu) by tak indikoval nulové napětí, což by bylo extrémně zavádějící.

U levnějších multimetrů se proto před samotným filtrem používá usměrňovač, který převede vstupní průběh na tzv. ARV (*Average Rectified Value*, v české literatuře obvykle označováno jako aritmetická střední hodnota [5]). Převodník AD pak změří hodnotu na výstupu usměrňovače a pomocí tvarovacího činitele přepočte tuto hodnotu na hodnotu ekvivalentního efektivního napětí sinusového průběhu. To prakticky znamená, že měření jiných průběhů než sinusových s sebou ponese značnou chybu, např. v případě měření obdélníkové průběhu bude zobrazená hodnota o 10 % vyšší [6].

Pro přesné měření nesinusových průběhů je nutné použít multimetry, označované jako true RMS (*true root mean square*, skutečná efektivní hodnota). Tyto (obvykle dražší) multimetry již měří a zobrazují přímo efektivní hodnotu, buďto pomocí dedikovaného čipu nebo výpočtem z digitalizovaných vzorků [7].

Lepší multimetry umožňují i přepnutí zobrazených jednotek např. na dBm, zobrazení minimální/maximální hodnoty či současné měření a zobrazení ST + RMS hodnoty.

### 1.2.2 Měření odporu

Měření odporu je také možné ve vícero rozsazích. Přenosné multimetry obvykle měří dvouvodičovou metodou, která ale není příliš přesná u menších odporů. Stolní multimetry často umožňují i měření čtyřvodičovou (Kelvinovou) metodou.

S měřením odporu je spojená funkce měření kontinuity, která spustí akustickou či optickou signalizaci v případě odporu nižšího než 50  $\Omega$  (u stolních multimetrů je tato hodnota obvykle nastavitelná). Podobnou funkcí je měření polovodičů, kdy se měří úbytek napětí při určitém proudu a je tak možné změřit prahové napětí diod a tranzistorů.

### 1.2.3 Další funkce

Pro zobrazení měřených údajů obvykle slouží digitální displej, někdy též vybavený tzv. bargrafem, což je část displeje, obnovující se s mnohem vyšší frekvencí. Jedná se de facto o simulaci analogového měřiče, resp. obdélník, jehož délka se zvětšuje s měřeným napětím. Jeho smyslem je umožnit uživateli rychlé a přibližné vyčtení hodnoty aktuálně měřeného napětí.

Pro práci s displejem může multimetr disponovat více tlačítky s funkcemi např. HOLD (zmražení aktuálně zobrazené hodnoty), DELTA (zobrazování měřené hodnoty vůči referenci) či funkcí pro zapnutí podsvitu displeje.

Některé multimetry umožňují i základní měření kapacity, byť pro přesnější měření je vhodné použít specializovaný RLC měřič. Stejně tak se lze setkat s multimetry, umožňujícími měření teploty termočlánku či měření frekvence a střídý.

Některé přenosné a téměř všechny stolní multimetry je možné připojit k počítači, ať už pomocí proprietárních kabelů s infračerveným přenosem či standardních sběrnic jako např. USB, Ethernet či GPIB.

## 1.3 Základní parametry

Z hlediska základních technických parametrů je důležitý počet vstupních rozsahů, jejich hodnoty a přesnost měření v daném rozsahu. U měření napětí je pak důležitá vstupní impedance, u měření proudu naopak úbytek napětí na měřicím rezistoru. Z netechnických parametrů je také důležitá cena a uživatelská přívětivost zařízení.

### 1.3.1 Přesnost

Základním parametrem každého měřicího přístroje je přesnost, v případě multimetru pak přesnost měření jednotlivých veličin v jednotlivých rozsazích. Rozsahů mohou být i desítky, proto se v praxi z důvodu zjednodušení často udává počet číslic měřicího zařízení. Např. multimetry s počtem číslic  $3\frac{1}{2}$  mohou zobrazit maximální hodnotu 1999 s libovolnou pozicí desetinné čárky, multimetry s označením 5% pak mohou zobrazit hodnotu až 599999.

Základní chyba měření se udává dvěma způsoby (mezi výrobci neexistuje shoda), buďto jako

$$\delta_Z = \pm(\delta_M + \delta_R), \quad (1.1)$$

kde  $\delta_Z$  je základní chyba,  $\delta_M$  je chyba měření a  $\delta_R$  je chyba z rozsahu [8]. Alternativou je zápis

$$\delta_Z = \pm\delta_M + |d|, \quad (1.2)$$

kde  $d$  je počet chybných LSD (*Least Significant Digits*, velikost nejmenší zobrazované číslice). Pro vzájemný přepočítání pak lze použít vztah

$$\delta_R = \frac{d}{D} \cdot 100 \%, \quad (1.3)$$

kde  $D$  je celkový počet číslic měřiče. Celková chyba zobrazovaného údaje se pak vypočítá jako

$$|\Delta| = \frac{|\delta_M \cdot X_M| + |\delta_R \cdot X_R|}{100}, \quad (1.4)$$

kde  $\Delta$  je celková chyba zobrazovaného údaje,  $X_M$  je měřená hodnota a  $X_R$  je velikost měřicího rozsahu.

U dražších multimetrů se přesnost udává nejenom vůči rozsahu, ale také vůči času po kalibraci, např. přesnost 3 měsíce po kalibraci. U měření ST či RMS hodnoty napětí či proudu je také často udávána přesnost vůči maximální frekvenci měřeného signálu.

### **1.3.2 Vstupní impedance**

Ideální voltmetr má nekonečnou vstupní impedanci, prakticky má většina multimetrů vstupní impedanci 10 M $\Omega$ . Vstupní impedanci je potřeba brát v potaz v případě měření obvodů, které mají srovnatelnou výstupní impedanci jako multimetr.

Některé multimetry disponují režimem nízké vstupní impedance, který má za cíl snížit vliv rušení na měření. Při měření střídavých signálů je také potřeba brát v potaz nenulovou vstupní kapacitu multimetru.

### **1.3.3 Úbytek napětí na měřicím rezistoru**

Ideální ampérmetr má nulový odpor, tedy při měření proudu je na něm nulový úbytek napětí. Byť existují bezkontaktní proudové sondy (jak pro střídavé proudy, založené na magnetické indukci, tak pro stejnosměrné proudy, založené na Hallově jevu), z hlediska přesnosti je stále nejpoužívanější metodou měření úbytku na rezistoru. Důležitým parametrem multimetru je tedy úbytek napětí při měření proudu v různých rozsazích, neboť příliš velký úbytek by např. mohl způsobovat restarty mikrokontroléru při měření jeho spotřeby.



## 2. ANALÝZA EXISTUJÍCÍCH ŘEŠENÍ

Byť jsou multimetry pravděpodobně nejrozšířenějším elektrotechnickým nástrojem, množství zveřejněných řešení na úrovni komerčních produktů je minimální. V této kapitole je tedy popsáno pět projektů, které mají alespoň část funkcí multimetru.

### 2.1 Referenční design TIDA-00879

Tento referenční design firmy Texas Instruments popisuje 4½digitový multimetr, který disponuje firmwarovým měřením hodnoty true RMS, současným měřením napětí a proudu a výpočtem činného výkonu [9]. Jádrem celé konstrukce je mikrokontrolér MSP430F6736, což je 16bitový mikrokontrolér s třemi integrovanými  $\Sigma\Delta$  převodníky a periferií pro řízení LCD displejů.



Obrázek 2.1 Referenční design TIDA-00879, převzato z [9]

Jedná se o vysoce integrované řešení, které vyjma mikrokontroléru obsahuje pouze 7 dalších integrovaných obvodů s tím, že celá analogová vstupní část je zrealizovaná pomocí 3 OZ a dvou analogových přepínačů. Převodníky  $\Sigma\Delta$  používají integrovanou

referenci mikrokontroléru a vzorkují s frekvencí 32 kHz a efektivním rozlišením 19 bitů. Parametry designu shrnuje tabulka 2.1.

Tabulka 2.1 Shrnutí parametrů referenčního designu TIDA-00879, převzato z [10]

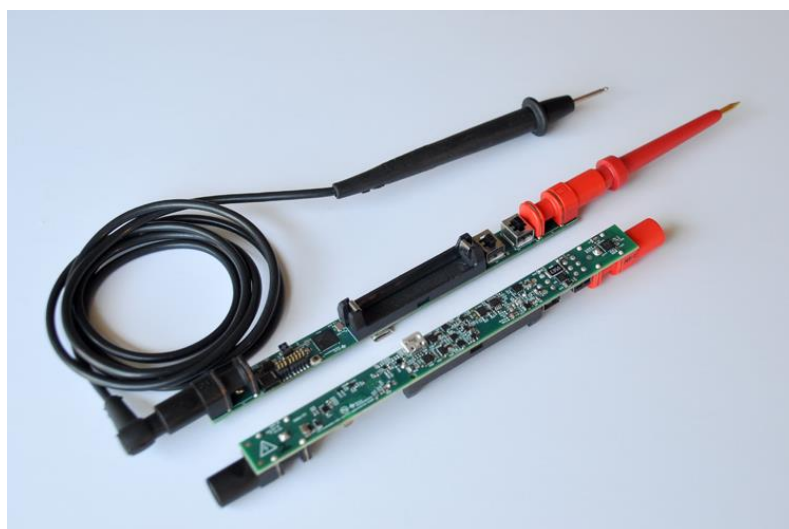
Parametr	Hodnota
Rozsahy měření napětí	60 mV, 600 mV, 6 V, 60 V
Přesnost měření SS napětí	$\pm 0,03 \% \pm 5 \text{ LSD}$
Přesnost měření ST napětí	$\pm 1 \% \pm 10 \text{ LSD}$
Vstupní impedance	10 M $\Omega$ , 100 pF
Rozsahy měření proudu	600 $\mu\text{A}$ , 60 mA
Přesnost měření SS proudu	$\pm 0,1 \% \pm 5 \text{ LSD}$
Přesnost měření ST proudu	$\pm 1 \% \pm 10 \text{ LSD}$
Výdrž na baterii	>600 h

Největší nevýhodou tohoto designu je fakt, že dokáže měřit pouze napětí a proud s tím, že pro měření proudu jsou k dispozici pouze dva rozsahy, a to sice  $\pm 600 \mu\text{A}$  a  $\pm 60 \text{ mA}$ .

Napájení je realizováno pomocí tří AA alkalických baterií, jejichž napětí je sníženo spínaným snižovačem na 2,4 V, což je pracovní napětí celého systému. Bipolární měření je realizováno pomocí virtuální země, odsazené do poloviny pracovního rozsahu převodníku AD.

## 2.2 Referenční design TIDA-01012

Tento referenční design firmy Texas Instruments je parametrově velmi podobný designu z předešlé kapitoly, nicméně konstrukce je drasticky odlišná. Jedná se o miniaturní multimetr velikosti sondy k osciloskopu, který místo displeje používá Bluetooth pro přenos měřených dat do mobilního telefonu či stolního počítače [11]. Celé zařízení má rozměr pouze 13,2 x 152,4 mm, což je umožněno použitím šestivrstvé DPS a komponent velikosti 0402.



Obrázek 2.2 Referenční design TIDA-01012, převzato z [11]

Analogová část je založená na 18bitovém převodníku AD s postupnou aproximací a externí referencí s napětím 2,5 V. Vstupní děliče, virtuální zem a analogové přepínače pro měření napětí a proudu jsou stejné jako v předchozím případě [12]. Na rozdíl od předchozího designu nelze v tomto případě měřit výkon, jelikož je k dispozici pouze jeden jednokanálový převodník AD, byť s mnohem vyšší vzorkovací frekvencí (cca 210 kHz).

Data z převodníku AD zpracovává mikrokontrolér typu CC2640, což je mikrokontrolér s integrovaným Bluetooth modulem. Mikrokontrolér měřená data pouze sčítá a poté odesílá do připojeného zařízení, které provádí samotný výpočet RMS či střední hodnoty a filtrování.

Na samotné desce zařízení se dále nachází další mikrokontrolér, určený pro kapacitní detekci dotyku. Tento mikrokontrolér s extrémně nízkou spotřebou slouží k zapínání a vypínání zařízení po určité době neaktivity. Dále se na desce nachází čip pro párování Bluetooth přes NFC (*Near Field Communication*, rozhraní pro komunikaci na velmi krátkou vzdálenost). Napájení je řešeno jedním Li-Ion akumulátorem, dvojicí spínaných měničů a dvojicí lineárních regulátorů.

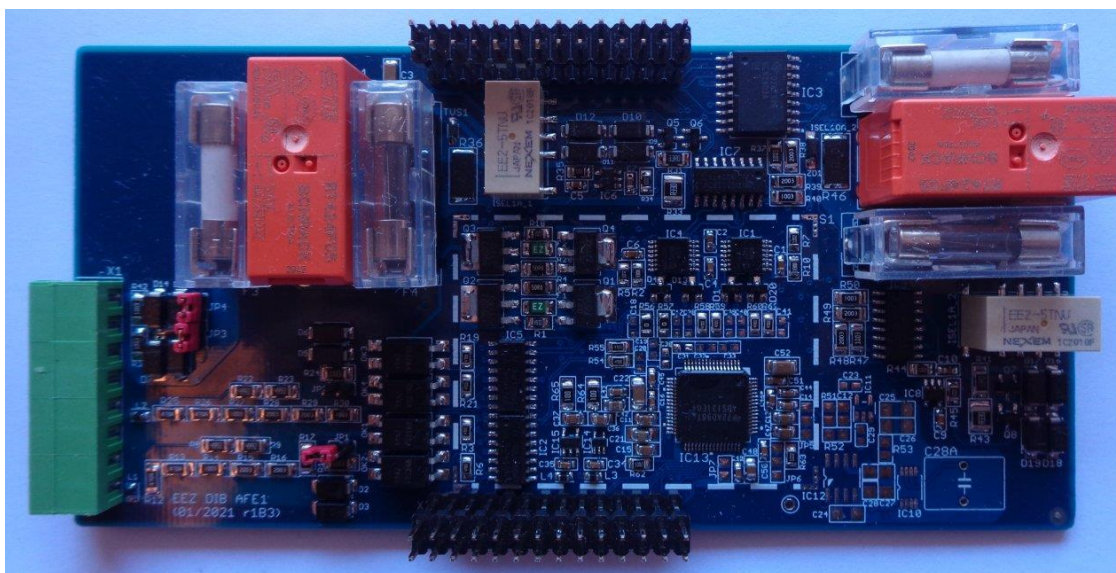
## 2.3 Rozšiřující modul EEZ MIO168 AFE1

Pro zařízení EEZ BB3 (což je modulární zařízení pro testování a měření) existuje rozšiřující modul MIO168 [13]. Tento modul disponuje 16 digitálními výstupy, 8 digitálními vstupy a vícero analogovými výstupy, nicméně je možné jej rozšířit o submodul AFE1, který poskytuje celkem 4 analogové vstupy pro měření napětí a proudu [14]. Celý projekt BB3 včetně submodulu AFE1 je tzv. *open source*, tedy všechny zdrojové soubory jsou volně dostupné na internetu. Nicméně samotný submodul AFE1 je podle informací výrobce stále ve vývoji. Parametry jeho verze r1B2 shrnuje tabulka 2.2.

Tabulka 2.2 Shrnutí parametrů submodulu AFE1, převzato z [14]

Parametr	Hodnota
Rozsahy kanálů 1 a 2	2,4 V, 12 V, 240 V, 240 mA
Rozsahy kanálů 3 a 4	24 mA, 1 A, 10 A, 2,4 V, 15 V
Efektivní rozlišení	5½ číslice

Jádrem celého systému je 24bitový převodník AD typu ADS131E04 firmy Texas Instruments. Převodník je napájený symetrickým napětím  $\pm 2,5$  V, všechny děliče a vstupy jsou tak vztaženy ke skutečné zemi, na rozdíl od země virtuální jako v předchozích případech. Elektronická změna rozsahu je řešena kombinací bistabilních a polovodičových relé a analogových spínačů DG212, které jsou napájeny  $\pm 15$  V (které má systém k dispozici ze základní desky) a umožňují tak spínání napětí až  $\pm 15$  V [15].



Obrázek 2.3 Rozšiřující modul AFE1 verze r1B3, převzato z [14]

Samotný submodul AFE1 neobsahuje mikrokontrolér, sběrnice SPI (*Serial Peripheral Interface*, sériová sběrnice pro připojení periférií) z převodníku AD je vyvedena na základní desku modulu MIO168, která obsahuje mikrokontrolér STM32F446ZCT6.

Základní desku MIO168 lze alternativně osadit submodulem AFE3, který má dva galvanicky izolované a dva neizolované kanály a umožňuje vzorkování frekvencí až 32 kHz. Mikrokontrolér STM32F446 pak firmwarově počítá RMS hodnotu napětí a proudu a taktéž zdánlivý a činný výkon.

## 2.4 Zařízení HPM7177

Toto zařízení, navržené a publikované CERN (Evropská organizace pro jaderný výzkum), je určené pro extrémně přesné měření proudu budícího elektromagnety LHC (*Large*



*Hadron Collider*, velký hadronový urychlovač). Jedná se tedy o extrémně přesný voltmetr s efektivním rozlišením  $8\frac{1}{2}$  číslice, byť má pouze jeden vstupní rozsah  $\pm 10$  V a vzorkovací frekvenci maximálně 10 kHz [16].



Obrázek 2.4 Deska s převodníkem AD s odstraněnou teplotní komorou, převzato a oříznuto z [16]

Zařízení je vybavené 32bitovým převodníkem AD typu AD7177-2, extrémně přesnou napěťovou referencí LTZ1000A a zakázkově vyráběnými rezistory s přesností 0,01 % [17]. Ze samotné reference se vytváří série velmi přesných napětí (5 V, 7 V, 10 V) a vstupní analogová část disponuje multiplexorem, který umožňuje přivedení těchto referenčních napětí na vstup, a tedy kalibraci celého zařízení za provozu. Vybrané parametry zařízení shrnuje tabulka 2.3.

Tabulka 2.3 Shrnutí parametrů zařízení HPM7177, převzato z [16]

Parametr	Hodnota
Efektivní rozlišení	>23 bitů
Krátkodobá stabilita	<20 ppb ( <i>parts per billion</i> )
Teplotní stabilita	<100 ppb
Poměr signál/šum	>120 dB

Analogová část obvodu, včetně reference a převodníku, je ukrytá uvnitř speciální komory, vyfrézované z hliníku. Teplotní senzor měří teplotu uvnitř komory a pomocí Peltiérového modulu ji udržuje na co nejvíce konstantní teplotě. Celý systém je řízen FPGA (*Field Programmable Gate Array*, programovatelné hradlové pole) a změřená data jsou odesílána po optickém kabelu.

## 2.5 Předchozí projekt autora práce

Tento multimetr je projektem autora tohoto semestrálního projektu. Základem jeho konstrukce je mikrokontrolér řady STM32F373, který obsahuje tři integrované  $\Sigma\Delta$  převodníky AD s rozlišením 16 bitů. Cílem projektu bylo zkonstruovat co nejjednodušší multimetr s co nejvyšším stupněm integrace, podobný zařízení popsanému v kap. 2.1.



Obrázek 2.5 Předchozí projekt autora práce, převzato z [18]

Napájení je realizované pomocí jednoho Li-Ion akumulátoru a lineárního regulátoru, vstupní analogová část je odsazená vůči skutečné zemi o polovinu napětí reference MCP1501-18, tj. o 0,9 V. Převodníky AD vzorkují s frekvencí 50 kHz a firmwarově se dopočítává hodnota RMS. Multimetr umožňuje současné měření napětí a proudu a zobrazení jejich součinnu, tj. výkonu. Dosažené parametry shrnuje tabulka 2.4.

Tabulka 2.4 Shrnutí parametrů předchozího projektu těsně po kalibraci, převzato z [18]

Parametr	Hodnota
Rozsahy měření napětí	60 mV, 600 mV, 6 V, 60 V
Přesnost měření napětí (nejhorší)	$\pm 0,1 \text{ \% } \pm 7 \text{ LSD}$
Rozsahy měření proudu	250 mA, 2,5 A
Přesnost měření proudu (nejhorší)	$\pm 0,3 \text{ \% } \pm 30 \text{ LSD}$
Další funkce	Měření odporu, kontinuity, kapacity.

Na rozdíl od předchozích projektů ale toto zařízení dokáže měřit i jiné veličiny než jenom napětí a proud, konkrétně i odpor, kontinuitu a kapacitu. Tento projekt má však řadu nevýhod, jmenovitě

- integrované převodníky AD mikrokontroléru STM32F373 mají velký časový drift, která je nemožné odstranit počáteční kalibrací,
- chybějící ochrany na vstupech pro napěťové a proudové měření,
- nevhodná konstrukce analogové vstupní části, např. přímé připojení terminálu COM k virtuální zemi či nevhodný způsob volby vstupního napěťového rozsahu,
- nevhodně zvolené uživatelské rozhraní, kdy použitý displej s rozlišením pouze 84x48 pixelů a nízkou spolehlivostí neumožňuje zobrazení dostatečného počtu informací a čtyři tlačítka neumožňují dostatek možných funkcí,
- nedokončený firmware, který plně nevyužívá potenciálu hardwaru, např. zařízení má elektronickou volbu vstupního rozsahu, ale automatická volba vstupního rozsahu není naprogramována.

## 3. PŘEVODNÍKY AD

Převodníky AD slouží k převodu analogového (spojitého) signálu na digitální (diskrétní). Tento proces je možno rozdělit na tři základní fáze, a to sice

- vzorkování, kdy dochází k periodickému odebrání vzorku,
- kvantizace, kdy dochází k převodu do digitální formy,
- enkódování, kdy dochází k zakódování výsledku do cílové podoby (např. dvojkového doplňku).

### 3.1 Parametry převodníků AD

K nejzákladnějším parametrům převodníků patří rozlišení a vzorkovací frekvence, dále pak chyba nastavení nuly, chyba zesílení a integrální a diferenciální nelinearity.

Všechny převodníky už z principu vykazují tzv. kvantizační šum, způsobený konečným rozlišením převodníku. Rozlišení převodníku AD je vždy 1 LSB (*Least Significant Bit*, nejméně podstatný bit, resp. bit s nejmenší velikostí), což prakticky znamená, že měřená hodnota může být až  $\pm \frac{1}{2} LSB$  od změřené digitální hodnoty (za předpokladu ideálního převodníku). To omezuje maximální dynamický rozsah na

$$DR = 6n \text{ dB}, \quad (3.1)$$

kde  $n$  je počet bitů.

#### 3.1.1 Rozlišení

Rozlišení udává, na kolik kvantizačních úrovní je schopen převodník převést signál. Rozlišení se obvykle udává v počtu bitů s tím, že počet kvantizačních úrovní je pak roven  $2^n - 1$ . U parametrů převodníků AD se také často vyskytuje pojem *LSB*, který označuje velikost nejmenší kvantizační úrovně a lze jej vypočítat podle

$$LSB = \frac{U_{REF}}{2^n}, \quad (3.2)$$

kde  $n$  označuje počet bitů a  $U_{REF}$  označuje referenční napětí [19]. Rozlišení běžných převodníků se pohybuje od 8 do 24 bitů.

#### 3.1.2 Vzorkovací frekvence

Vzorkovací frekvence je frekvence, s jakou dochází ke vzorkování. Prakticky pak udává maximální frekvenci signálu, který je možno zaznamenávat při dodržení Nyquistovy podmínky

$$f_{VZ} \geq 2 \cdot f_{SIG}. \quad (3.3)$$

Tedy, že vzorkovací frekvence  $f_{VZ}$  musí být minimálně dvojnásobná než nejvyšší frekvence  $f_{SIG}$ , obsažená v měřeném signálu. V opačném případě by došlo k tzv. aliasingu.



Vzorkovací frekvence se obvykle udává v SPS (*Samples Per Second*, počet vzorků za sekundu) či v Hz. Běžně se pohybuje od jednotek SPS po stovky MSPS.

Se vzorkovací frekvencí také částečně souvisí latence (zpoždění) převodníku, což je čas, za který se projeví změna vstupu na výstupu. Tento parametr je důležitý např. při využití převodníku AD v rámci řídicí digitální smyčky.

### 3.1.3 Integrální nelinearita

Integrální nelinearita (*INL, Integral Non Linearity*) je definovaná jako největší odchylka skutečné přenosové křivky převodníku AD od ideální [20].

### 3.1.4 Diferenciální nelinearita

Diferenciální nelinearita (*DNL, Differential Non Linearity*) je definovaná jako největší odchylka velikosti jedné kvantizační úrovně (která by v ideálním případě měla být rovna 1 LSB) [19]. V případě, kdy je DNL větší či rovno 1 LSB, může dojít k tzv. chybějícím kódům, kdy nelze žádným vstupním signálem dosáhnout určitého binárního výstupu.

### 3.1.5 Chyba nastavení nuly

Chyba nastavení nuly (tzv. *offset*) je definovaná jako rozdíl mezi *prvním* ideálním a reálným přechodem výstupního kódu z log0 na log1. Například u převodníku (10 bitů,  $U_{REF} = 5\text{ V}$ , tedy  $LSB = 4,88\text{ mV}$ ) by měl přechod z log0 na log1 nastat při hodnotě 2,44 mV. Pokud přechod nastane až při hodnotě 7 mV, pak je vstupní offset

$$E_O = \frac{U_E - \frac{1}{2}LSB}{LSB} = \frac{7 - 2,44}{4,88} \sim 1\text{ LSB}. \quad (3.4)$$

### 3.1.6 Chyba zesílení

Chyba zesílení (tzv. *gain error*) je definovaná jako rozdíl mezi *posledním* ideálním a reálným přechodem výstupního kódu z log0 na log1. Například u převodníku (10 bitů,  $U_{REF} = 5\text{ V}$ , tedy  $LSB = 4,88\text{ mV}$ ) by měl poslední přechod z log0 na log1 nastat (resp. výstupní kód se změnit z 0x3FE na 0x3FF) při hodnotě

$$U_P = U_{REF} - LSB = 5 - 4,88\text{ mV} = 4,997\text{ V}. \quad (3.5)$$

Pokud ale nastane už při hodnotě 4,980 V, pak je chyba nelinearity

$$E_G = \frac{U_T - U_P}{LSB} = \frac{4,997 - 4,980}{4,88\text{ mV}} \sim 3,5\text{ LSB}. \quad (3.6)$$

### 3.1.7 Efektivní počet bitů

Pro zjednodušení někteří výrobci udávají tzv. *ENOB (Effective Number Of Bits, efektivní počet bitů)*, což je prakticky dosažitelné rozlišení se zahrnutím všech výše zmíněných chyb. Například  $\Sigma\Delta$  převodník ADS131A0x firmy Texas Instruments má nominální rozlišení 24 bitů, ale efektivní počet bitů je 21,35 při vzorkovací frekvenci 1 kHz a

zesílení  $\times 1$ . Při vzorkovací frekvenci 8 kHz a stejném zesílení pak klesá efektivní počet bitů na 19,89 [21].

### 3.1.8 Parametry vstupu

Obvykle je na převodník možné přivést napětí od 0 V do referenčního napětí  $U_{REF}$ , v případě diferenčního vstupu se zesílením je použitelný rozsah  $U_{REF}/zisk$ . I v případě diferenčního vstupu je však potřeba brát v potaz minimální a maximální napětí na vstupech převodníku vůči zemi.

Dalším důležitým parametrem je impedance vstupu – většina převodníků obsahuje tzv. *Sample and Hold* obvod (obvod k navzorkování a udržení analogového napětí), což je fakticky kapacitor, který se periodicky připojuje ke vstupu. Tedy do vstupu převodníku teče proud, který může vytvořit úbytek napětí na předcházející části obvodu (např. rezistorovém děliči) a tím drasticky zkreslit měření. Ze základních elektrotechnických rovnic je možné impedanci vstupu vyjádřit jako

$$Z_{IN} = \frac{1}{f \cdot C}, \quad (3.7)$$

kde  $f$  je vzorkovací frekvence a  $C$  je kapacita kondenzátoru pro udržení vzorku.

### 3.1.9 Referenční napětí

Převodník může mít integrovanou napěťovou referenci či vyžadovat externí v určitém rozsahu napětí. Přesnost, drift vůči času a teplotě a šum velmi ovlivní přesnost převodníku, jelikož se veškerá měření provádějí právě vůči referenci.

### 3.1.10 Typ výstupu

Výstupem převodníku může být jednoduchá paralelní sběrnice, která má výhodu ve velké propustnosti a relativní jednoduchosti, nevýhodou je pak potřeba velkého množství vodičů. Obvykle se tak používá sběrnice SPI či u pomalejších převodníků I<sup>2</sup>C (*Inter-Integrated Circuit*, sběrnice pro komunikaci mezi integrovanými obvody).

## 3.2 Typy převodníků AD

Mezi základní typy převodníků AD patří převodníky paralelní, s postupnou aproximací, integrační převodníky a převodníky  $\Sigma\Delta$ . Dále je možné se setkat např. s V-F převodníky, které převádějí přivedené napětí na výstupní frekvenci.

### 3.2.1 Paralelní převodníky

U aplikací, vyžadujících primárně co nejvyšší vzorkovací frekvenci, se využívá tzv. paralelních (*flash*) převodníků. Ty jsou založené na paralelní kombinaci vícero komparátorů, na jejichž neinvertující vstup se přivede měřené napětí a na invertující vstup se přivádí referenční napětí, které je jiné pro každý komparátor a obvykle se generuje pomocí jednoho vícenásobného rezistorového děliče.

### 3.2.2 Převodníky s postupnou aproximací

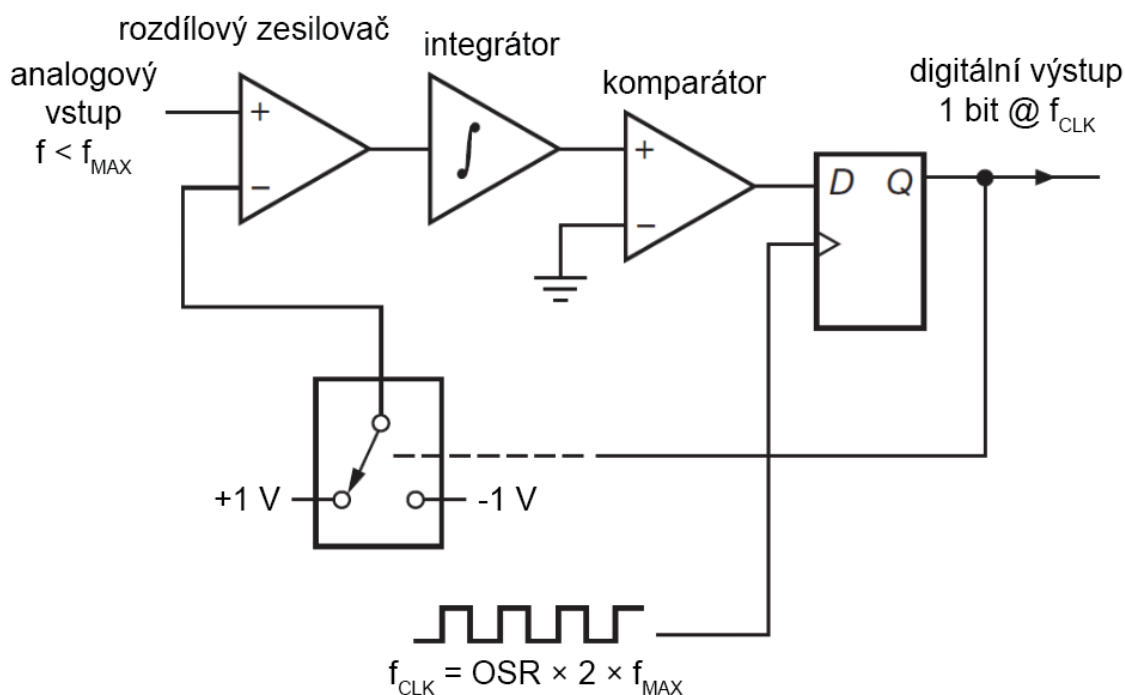
Pravděpodobně nejrozšířenějším typem jsou tzv. SAR převodníky (*Successive Approximation Register*, převodník s postupným převodem), které jsou založené opět na komparátoru. V tomto případě se ale referenční napětí negeneruje rezistorovým děličem, ale převodníkem DA na základě přechodného výsledku. Převodník tak postupně generuje různá napětí, porovnává je se vstupem a na základě výsledku komparace vytvoří výstupní kód. Výhodou je velká flexibilita a malá plocha na čipu, proto se tyto převodníky často nacházejí integrované v mikrokontrolerech.

### 3.2.3 Integrační převodníky

Integrační převodníky jsou založené na kondenzátoru, který se nabíjí zdrojem referenčního proudu a napětí kondenzátoru se porovnává se vstupem. Doba, než napětí na kondenzátoru dosáhne napětí na vstupu, se měří časovačem, a je přímo úměrná měřenému napětí. Doba nabíjení nicméně také závisí na kapacitě kondenzátoru, což je parametr, který má obvykle toleranci jednotek až desítek procent. Proto se častěji využívají tzv. *dual-slope* převodníky (převodníky s dvojsklonnou integrací), které nejdříve po konstantní čas nabíjí kapacitor proudem, který je přímo úměrný vstupnímu napětí. Následně se ten samý kapacitor vybíjí zdrojem konstantního proudu a měří se čas, jak dlouho vybíjení trvá. Jakákoliv nepřesnost kapacitoru či komparátoru se tak vzájemně vykompenzuje.

### 3.2.4 Převodníky sigma-delta

Modulace sigma delta ( $\Sigma\Delta$ , někdy také  $\Delta\Sigma$ ) se využívá jak pro konstrukci převodníků AD, tak pro převodníky DA (například převodníky DA pro audio aplikace). Oba typy převodníků se v základu skládají z modulátoru a filtru typu dolní propust s tím, že u převodníku AD je modulátor analogový a filtr digitální. Základní schéma modulátoru je na obrázku 3.1.



Obrázek 3.1 Modulátor převodníku sigma-delta, převzato a přeloženo z [19]

Princip funkce je následující: na vstupní zesilovač je přiváděn analogový signál v rozsahu  $\pm 1\text{ V}$ . Jeho rozdíl vůči předešlému výsledku se odečte na rozdílovém zesilovači a je přiveden na vstup integrátoru, který je nastaven tak, aby maximální hodnota vstupu (tj.  $\pm 1\text{ V}$ ) za jednu periodu  $f_{CLK}$  vytvořila na výstupu opět maximální hodnotu  $\pm 1\text{ V}$ . Výstup integrátoru je přiváděn na vstup komparátoru a v pravidelných intervalech se pak načte na digitální výstup, kde generuje sérii logických úrovní (často označovanou jako tzv. *bitstream*), jejichž průměrná (analogová) hodnota je rovna vstupnímu signálu.

Parametr *OSR* (*Over Sampling Ratio*, doslova převzorkovací poměr) určuje počet  $\log_0/\log_1$  na jednu periodu. Čím vyšší počet binárních hodnot, tím vyšší přesnosti lze dosáhnout. Např. u modulátoru podle obrázku 3.1 při  $OSR = 64$  a vstupu  $0,5\text{ V}$  bude na výstupu 48  $\log_1$  a 16  $\log_0$ , rovnoměrně rozprostřených po celé délce periody (na rozdíl od např. signálu, modulovaného šířkou pulzu, který by měl nejdříve 48  $\log_1$  a poté 16  $\log_0$ ).

V omezených případech je výstupem  $\Sigma\Delta$  převodníku přímo bitstream (např. některé mikrokontroléry firmy ST Microelectronics mají periférii přímo pro čtení  $\Sigma\Delta$  modulovaných dat), častěji se ale na výstupu nachází digitální filtr. V nejjednodušším případě by se mohlo jednat o prostý čítač, prakticky se spíše používají filtry typu *FIR* (*Finite Impulse Response*, filtr s konečnou odezvou na vstup).

Výstup filtru je aktualizován s frekvencí  $f_{CLK}$ , obvykle ale prochází decimací, která na výstup propustí pouze jeden vzorek za jednu periodu.

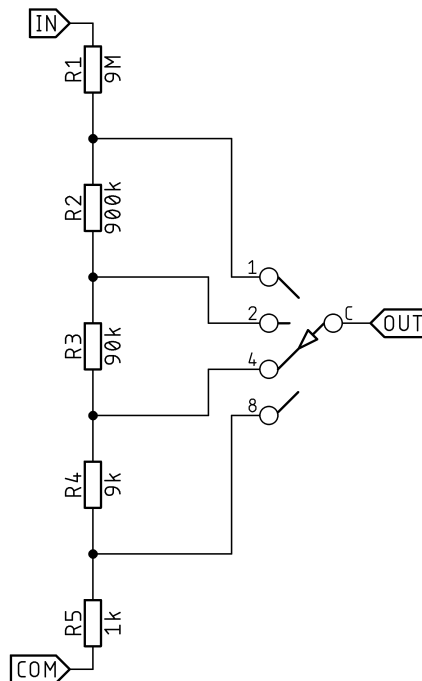
Moderní převodníky  $\Sigma\Delta$  zpravidla využívají modulátory vyššího řádu k dosažení vyšší přesnosti při zmenšení OSR (a tedy snížení  $f_{CLK}$ ). Obecně je výhodou  $\Sigma\Delta$  převodníků vysoká flexibilita, přirozené potlačení šumu a frekvencí nad  $f_{MAX}$  a nízké konstrukční nároky na čípech. Spolu s integračními převodníky jsou často jádrem multimetrů.

## 4. MĚŘENÍ ELEKTRICKÝCH VELIČIN

Multimetr slouží primárně k měření elektrických veličin – v základu napětí, proudu a odporu. Dražší multimetry umí měřit také frekvenci, kapacitu či teplotu termočlánku, specializované RLC metry pak i indukčnost cívek.

### 4.1 Měření napětí

Vstupní napětí na svorkách multimetru je nejprve potřeba převést na úroveň, akceptovatelné pro převodník AD, k čemuž se u multimetrů obvykle používá rezistorový dělič s impedancí  $10\text{ M}\Omega$ . Z důvodu maximalizace dynamického rozsahu je však možné měnit dělicí poměr, např. podle obrázku 4.1:



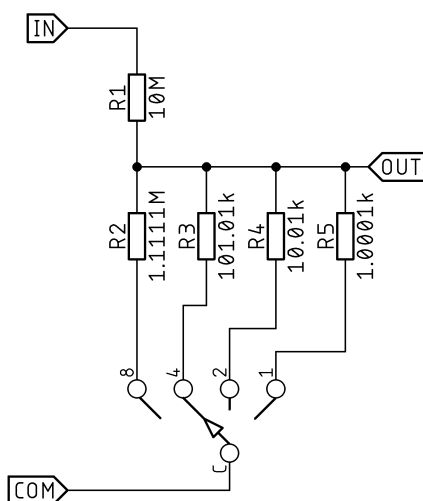
Obrázek 4.1 Vstupní dělič s volbou dělicí poměru

#### 4.1.1 Změna vstupního rozsahu

V případě multimetru s manuální změnou vstupního rozsahu se využívá mechanický spínač, kterým pohybuje uživatel. V případě elektronické volby vstupního rozsahu je situace složitější, neboť elektronický spínač musí vydržet na vstupu napětí několik stovek voltů. První možností by bylo využít bistabilní elektromechanické relé, nicméně jeho nevýhodou je velká velikost, hluk při přepínání a konečný počet přepínacích cyklů. Toto řešení je podle [22] využito např. ve stolním multimetru Keysight EDU34450A.

Další možností je využití *SSR* (*Solid State Relay*, polovodičové relé), která jsou obvykle založená na fotoluminiscenční diodě, která osvětluje fotodiodu, což způsobuje generaci nosičů náboje a otevření unipolárních tranzistorů či tyristorů. Nevýhodou těchto relé je ale nízká napěťová tolerance a nízký poměr odporů v sepnutém nebo rozepnutém stavu – např. relé Panasonic AQY216 má napěťovou toleranci 600 V, typický odpor v sepnutém stavu 52  $\Omega$  a maximální proud v rozepnutém stavu 1  $\mu\text{A}$ , což by na děliči s odporem 10 M $\Omega$  vytvořilo značný úbytek [23].

Využití nízkonapěťových elektronických spínačů je tak možné pouze v případě změny topologie děliče podle obrázku 4.2:



Obrázek 4.2 Vstupní dělič s volbou dělicího poměru – alternativní uspořádání

V tomto zapojení můžeme využít elektronický spínač, jelikož napětí na jeho terminálech zůstává téměř nulové, resp. na úrovni terminálu COM. Nevýhodou tohoto řešení je nicméně fakt, že při změně vstupního rozsahu dojde ke změně vstupní impedance multimetru a dále také potřeba použití rezistorů s nestandardními hodnotami pro dosažení standartních dělicích poměru 1:10, 1:100 atd.

#### 4.1.2 Zdroje nepřesnosti

Z hlediska přesnosti není kritická důležitá výrobní tolerance jednotlivých rezistorů, jelikož jejich nepřesnost se odstraní počáteční kalibrací. Mnohem důležitější je časová a teplotní stabilita odporu. Teplotní koeficient odporu nebude nikdy nulový, nicméně budou-li mít všechny odpory v děliči stejnou teplotu a stejný teplotní koeficient odporu, dělicí poměr se nezmění.

Na trhu je možné najít rezistorové sítě přímo navrhované pro použití v multimetrech, např. série Caddock 1776. Tato rezistorová síť je trimovaná „pouze“ na přesnost 0,1 %, ale vzájemný poměr *TCR* (*Temperature Coefficient of Resistance*, teplotní koeficient odporu) je trimovaný na 10 ppm/ $^{\circ}\text{C}$ . Navíc rezistory sdílí stejný substrát, takže by jejich

teplota měla být velmi podobná. Rezistorové sítě v sérii 1776 jsou dostupné již přímo v hodnotách pro děliče podle obrázku 4.1 či podle obrázku 4.2.

Dalším zdrojem nepřesnosti děliče může být proud, odebíraný následující částí obvodu. Proto za děličem obvykle následuje operační zesilovač, nicméně reálný OZ má nenulový vstupní proud – v případě OZ se vstupní částí na bázi bipolárních tranzistorů se může jednat až o desítky nA [19], což by na impedanci 10 MΩ mohlo vytvořit rozdíl až stovky mV.

## 4.2 Měření proudu

Pro měření proudu se obvykle využívá rezistoru s tím, že se na něm měří úbytek napětí a díky znalosti jeho rezistivity se pak dopočítává proud. Tento úbytek napětí by ale mohl negativně ovlivnit měřený obvod, proto se volí rezistor s co nejmenší hodnotou a následně se úbytek napětí před vstupem do převodníku AD zesiluje.

Např. komerční multimetr Brymen 868 udává ve svém katalogovém listu [24] úbytek napětí na rezistoru při daném proudu podle tab. 4.1 **Chyba! Nenalezen zdroj odkazů..** Je tedy možné snadno dopočítat hodnotu vnitřního měřicího rezistoru.

Tabulka 4.1 Úbytky napětí při různých rozsazích měřeného proudu multimetru Brymen 868 [24]

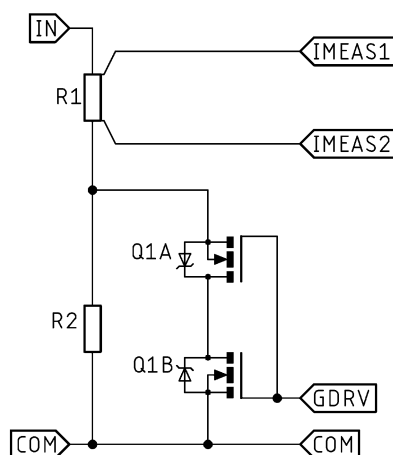
Rozsah	Úbytek napětí	Dopočítaná hodnota rezistoru
500 $\mu\text{A}$	0,15 mV/ $\mu\text{A}$	150 $\Omega$
5000 $\mu\text{A}$	0,15 mV/ $\mu\text{A}$	150 $\Omega$
50 mA	3,3 mV/mA	3,3 $\Omega$
500 mA	3,3 mV/mA	3,3 $\Omega$
5 A	45 mV/A	45 m $\Omega$
10 A	45 mV/A	45 m $\Omega$

### 4.2.1 Změna vstupního rozsahu

Ke změně vstupního rozsahu lze opět využít mechanický spínač či elektromechanické relé, nicméně je potřeba brát v potaz maximální proudové zatížení kontaktů. Nejvyšší rozsah pro měření proudu může být i více než 10 A, což už vyžaduje speciální spínače či relé. Navíc odpor jejich kontaktů by způsoboval další úbytek napětí, což je nežádoucí.

Pro elektronickou volbu vstupního rozsahu se proto obvykle využívají unipolární tranzistory s kanálem typu N. Jejich terminál source je sice odsazen vůči zemi napětím měřicího rezistoru, ale to je obvykle v řádu stovek milivoltů, tedy není problém budit terminál gate neplovoucím napětím běžných logických úrovní (za předpokladu volby vhodného tranzistoru). Z důvodu obousměrného průchodu proudu je potřeba použít dva tranzistory v tzv. antisériovém zapojení, aby se zamezilo průchodu proudu parazitními diodami tranzistorů, viz obrázek 4.3.





Obrázek 4.3 Zapojení pro snímání proudu s elektronickou volbou rozsahu

#### 4.2.2 Zdroje nepřesnosti

U měřicího rezistoru je třeba brát v potaz vyjma samotné hodnoty rezistivity a její přesnosti hlavně teplotní koeficient odporu, neboť rezistor se bude průchodem proudu zahřívat a měnit tak svůj odpor.

Dále je třeba brát v potaz pouzdro odporu – jednak kvůli maximálnímu ztrátovému výkonu, druhak by měření mohl zkreslit úbytek napětí na přívodních pájených spojích. Proto se využívají rezistory v tzv. Kelvinově zapojení, což je zapojení, kdy proud protéká jedním párem vodičů a úbytek napětí se měří druhým párem vodičů s tím, že tyto páry se setkávají co nejbližše samotnému odporovému článku.

Úbytek na rezistoru v Kelvinově zapojení je ale potřeba měřit tak, aby nedocházelo ke zkreslení odporem spínačů rozsahu (který, vzhledem k malým hodnotám snímacích rezistorů, není zanedbatelný a je velmi proměnlivý).

### 4.3 Měření odporu

Nejjednodušší metodou měření odporu je použití děliče, který je napojený na známé referenční napětí a jeden z odporů je známý. Pak stačí pouze změřit napětí uprostřed děliče a přes Ohmův zákon dopočítat hodnotu neznámého rezistoru. Výhodou je relativně jednoduchá implementace a snadná změna vstupního rozsahu změnou použitého referenčního rezistoru (resp. jeho přepnutí pomocí mechanického či elektronického přepínače). Nevýhodou této metody je závislost na dvou přesných veličinách – referenčním odporu a referenčním napětí. Pomocí převodníku AD lze nicméně snímat jak napětí uprostřed děliče, tak referenční napětí, a celý výpočet provádět poměrově bez závislosti na jakémkoliv přesném napětí.

Alternativou je injektování známého referenčního proudu do neznámého rezistoru a měření úbytku napětí, což má u multimetru výhodu ve faktu, že lze využít již existující obvod pro měření napětí a hardwarově tedy stačí přidat generátor přesného proudu.

#### 4.3.1 Zdroje nepřesnosti

Základním zdrojem nepřesnosti bude tolerance referenčního rezistoru – nejlepší běžně dostupné precizní rezistory mají obvykle toleranci 0,1 %. Dále je potřeba brát v potaz parazitní odpor spínače pro změnu rozsahu, odpor konektorů a měřicích vodičů, přesnost referenčního napětí a případný odběr proudu ze středu děliče za účelem měření napětí.

### 4.4 Měření teploty

Pro měření teploty v elektrotechnice je možno využít termistory, aktivní polovodičové součástky nebo termočlánky. U dražších multimetrů je obvyklá podpora termočlánků.

#### 4.4.1 Termistor

Termistory jsou rezistory, jejichž odpor se mění v závislosti na teplotě – u tzv. *PTC* (*Positive Temperature Coefficient*, pozitivní teplotní koeficient rezistivity) odpor vzrůstá s teplotou, *NTC* (*Negative Temperature Coefficient*, negativní TKR) odpor klesá. Z hlediska měření se pak termistory obvykle zapojují jako jedna část děliče a pomocí převodníku AD se měří poměr odporů. Jejich nevýhodou je nicméně velmi malá přesnost a omezený teplotní rozsah.

#### 4.4.2 Polovodičový senzor

Polovodičové senzory jsou obvykle postavené na principu *IPTAT* (*I Proportional To Absolute Temperature*, proud úměrný absolutní teplotě). Tyto senzory mají buď napěťový výstup s lineární charakteristikou (např. MCP9700 firmy Microchip – 10 mV/°C) nebo rovnou obsahují převodník AD a výstup je tak v podobě digitální sběrnice (např. DS18B20 – sběrnice OneWire, TMP75 – sběrnice I<sup>2</sup>C). Jejich nevýhodou je ale omezená maximální provozní teplota, obvykle okolo 150 °C.

#### 4.4.3 Termočlánek

Termočlánky využívají Seebeckova jevu, tj. se jedná o dva drátky z různých kovů, které jsou na jednom konci svařeny. Díky rozdílu teplot mezi spojeným a nespojeným koncem vzniká na drátcích tzv. termoelektrické napětí, které je úměrné rozdílu teplot. Výhodou termočlánků je velký teplotní rozsah a vysoká přesnost. Nevýhodou je malá citlivost (obvykle v řádu jednotek až desítek mikrovoltů na °C), mírná nelineárnost převodu napětí na teplotu a také fakt, že výsledná teplota je relativní vůči teplotě rozpojeného konce (který se často označuje jako tzv. *cold junction*). Další nevýhodou je fakt, že konektor, kterým se termočlánek připojuje do systému, vytvoří v cestě proudu dva další přechody, a tedy zkreslí měření.

Termočlánky se podle použitých kovů dělí do kategorií, označených písmeny – např. termočlánek typu K se skládá z chromelu a alumelu a jeho citlivost je přibližně 41 µV/°C [25].

Pro přesný převod termoelektrického napětí na teplotu je možné použít dedikované čipy, např. MAX31856 firmy Maxim [26]. Tento čip interně obsahuje mj. zesilovač, převodník AD, senzor pro měření teploty a převodní tabulku pro linearizaci vícero typů termočlánků. Alternativně je podle [27] možné použít přesný 24bitový převodník AD s externím senzorem teploty.

## 4.5 Šum

Každé měření je v přesnosti ve výsledku omezeno šumem, kterého existuje vícero druhů (základní druhy jsou tepelný, výstřelový a blikavý). Jak moc šum ovlivňuje měřený signál vyjadřuje *SNR* (*Signal to Noise Ratio*, poměr signálu vůči šumu) podle rovnice

$$SNR = 20 \log_{10} \frac{v_s}{v_n}, \quad (4.1)$$

kde  $v_s$  je RMS hodnota signálu a  $v_n$  je RMS hodnota šumu. Tato hodnota by však vždy měla být vztažena k určené šířce pásma, ve kterém se měří.

### 4.5.1 Tepelný šum

Tepelný (někdy také Johnsonův) šum je zdrojem šumového napětí na každém rezistoru a je způsoben tepelným pohybem nabitých částic. Jedná se o tzv. bílý šum, tedy jeho spektrum je rovnoměrné. Šumové napětí na rezistoru se dá vypočítat jako

$$v_{\text{noise}}(rms) = \sqrt{4kTRB}, \quad (4.2)$$

kde  $k$  je Boltzmannova konstanta,  $T$  je absolutní teplota,  $R$  je odpor rezistoru a  $B$  je šířka pásma, ve kterém je šum měřen. Hustota tepelného šumu pak je

$$e_n = \sqrt{4kTR}. \quad (4.3)$$

Z výše uvedených rovnic plyne, že z hlediska návrhu je výhodné používat co nejnižší hodnoty rezistorů, aby došlo k omezení vlivu tepelného šumu.

### 4.5.2 Výstřelový šum

Výstřelový (někdy také Schottkyho) šum je způsoben faktem, že tok proudu je způsoben konečným počtem diskretních částic. Opět se jedná o bílý šum a šumový proud se dá vypočítat jako

$$i_{\text{noise}}(rms) = \sqrt{2qI_{DC}B}, \quad (4.4)$$

kde  $q$  je elementární náboj elektronu,  $I_{DC}$  je stejnosměrný proud a  $B$  je šířka měřeného pásma. Jeho hustota je pak

$$i_n = \sqrt{2qI_{DC}}. \quad (4.5)$$

Z výše uvedeného plyne, že u vyšších proudů je poměrný vliv šumu menší – např. proud 1 A má šum 57 nA<sub>RMS</sub>, což je 0,06 ppm. Ale proud 1 μA už má šumovou složku 57 pA<sub>RMS</sub>, což je 60 ppm, tedy vliv šumu je 1000x větší.

#### **4.5.3 Blikavý šum**

Blikavý (někdy také označovaný jako  $1/f$ ) šum je způsoben např. poruchami krystalové mřížky u polovodičů či fluktuacemi rezistivity u rezistorů. Jedná se o tzv. „růžový šum“, tedy jeho amplituda klesá s frekvencí podle  $1/\sqrt{f}$ .

## 5. NÁVRH PRVNÍHO PROTOTYPU

Požadavky na první prototyp multimetru jsou shrnuty v tab. 5.1.

Tabulka 5.1 Požadované funkce prvního prototypu multimetru

Oblast	Požadavky
Měření napětí	5 různých rozsahů s automatickou volbou vstupního rozsahu
	Bipolární vstup
	Vstupní impedance 10 MΩ
	Měření RMS hodnoty napětí
Měření proudu	6 různých rozsahů s automatickou volbou vstupního rozsahu
	Bipolární vstup
	Max. úbytek napětí 500 mV
	Měření RMS hodnoty proudu
Měření výkonu	Současné měření napětí a proudu
Měření odporu	5 různých rozsahů s automatickou volbou rozsahu
	Rozsah pro měření kontinuity
Ostatní funkce	Měření frekvence
	Měření teploty termočlánku
	Rozhraní pro komunikaci s PC
	Napájení z nabíjecí baterie

Deska prvního prototypu byla navržena v programu Eagle verze 9.6.1. Jedná se o dvě oddělené desky, hlavní deska je čtyřvrstvá s rozměrem 80x100 mm, deska s uživatelským rozhraním je dvouvrstvá s velikostí 80x87 mm. Celkový počet komponent na hlavní desce je 245, pasivní komponenty jsou až na výjimky v pouzdře 0805.

### 5.1 Vstupní analogová část

Na základě parametrů výše byla zvolena koncepce, kdy multimetr disponuje 4 vstupními terminály, kde

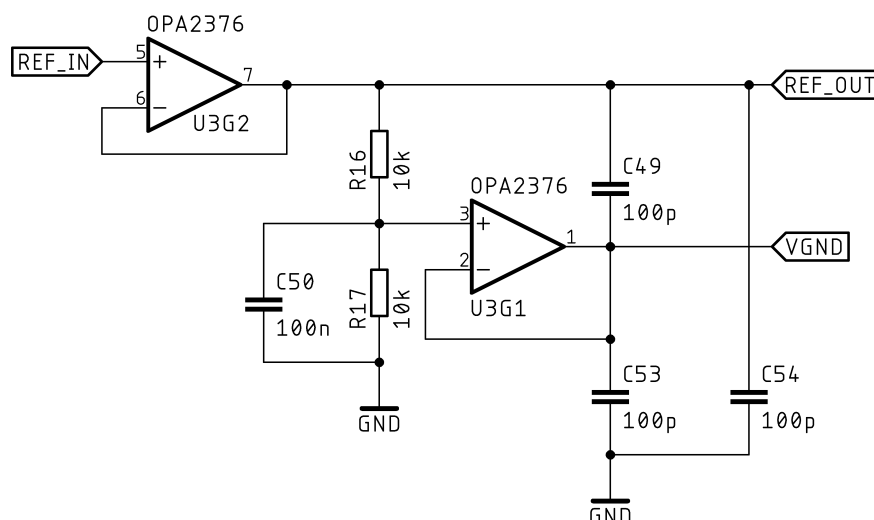
- první terminál slouží k měření napětí,
- druhý terminál slouží k měření proudu,
- třetí terminál slouží jako společná zem a
- poslední terminál slouží pro všechny ostatní funkce (měření odporu, frekvence).

Multimetr by měl být schopen měřit elektrické veličiny jak kladné, tak i záporné polarity. Nejjednodušší řešení by bylo napájet celou vstupní analogovou část symetrickým napětím, čehož se u některých komerčních multimetrů dosahuje použitím 4

baterií velikosti AA či AAA, kdy se dvě použijí pro kladné napájecí napětí a dvě pro záporné. Specifikací ale bylo použití nabíjecích baterií, teoreticky bylo možné použít 4 články NiMH v sérii, nicméně jak z hlediska ceny, tak i množství uložené energie na objem je výhodnější použití lithium iontových (dále jen Li-Ion) baterií [28]. Bylo by možné použít dvě Li-Ion baterie s nominálním napětím 3,7 V v sérii pro vytváření  $\pm 3$  V, ale nevýhodou tohoto řešení je složité nabíjení, kdy je potřeba balancovat napětí na jednotlivých člancích.

Zvažovanou variantou tedy bylo využití jediné Li-Ion baterie a použití nábojové pumpy v zapojení invertoru, např. ve formě integrovaného obvodu MAX865, který z napájecího napětí  $U_{IN}$  vytváří  $\pm 2U_{IN}$  [29].

Nakonec ale byla zvolena varianta napájení OZ pouze kladným napětím s tím, že zem měřeného obvodu je odsazena do poloviny pracovního rozsahu multimetru pomocí tzv. virtuální země. V případě prvního prototypu je virtuální zem odsazena na polovinu napětí reference převodníku AD, tedy 1,22 V.



Obrázek 5.1 Zapojení sledovače reference a obvodu pro tvorbu virtuální země

Všechny části obvodu byly před samotným návrhem DPS simulovány v programu Microcap verze 12.

### 5.1.1 Měření napětí

Multimetr by měl mít vstupní rozsahy 600 V, 60 V, 6 V, 600 mV a 60 mV. První tři rozsahy je nutné nejdříve dělit pomocí děliče, k čemuž byla zvolena topologie podle obrázku 4.2, primárně díky jednodušší konstrukci. Jako analogový spínač byl zvolen TS5A3359 od firmy Texas Instruments, primárně na základě vysokého poměru mezi odporem v sepnutém stavu a proudem v rozepnutém stavu. Jeho základní parametry jsou shrnuté v tabulce 5.2.

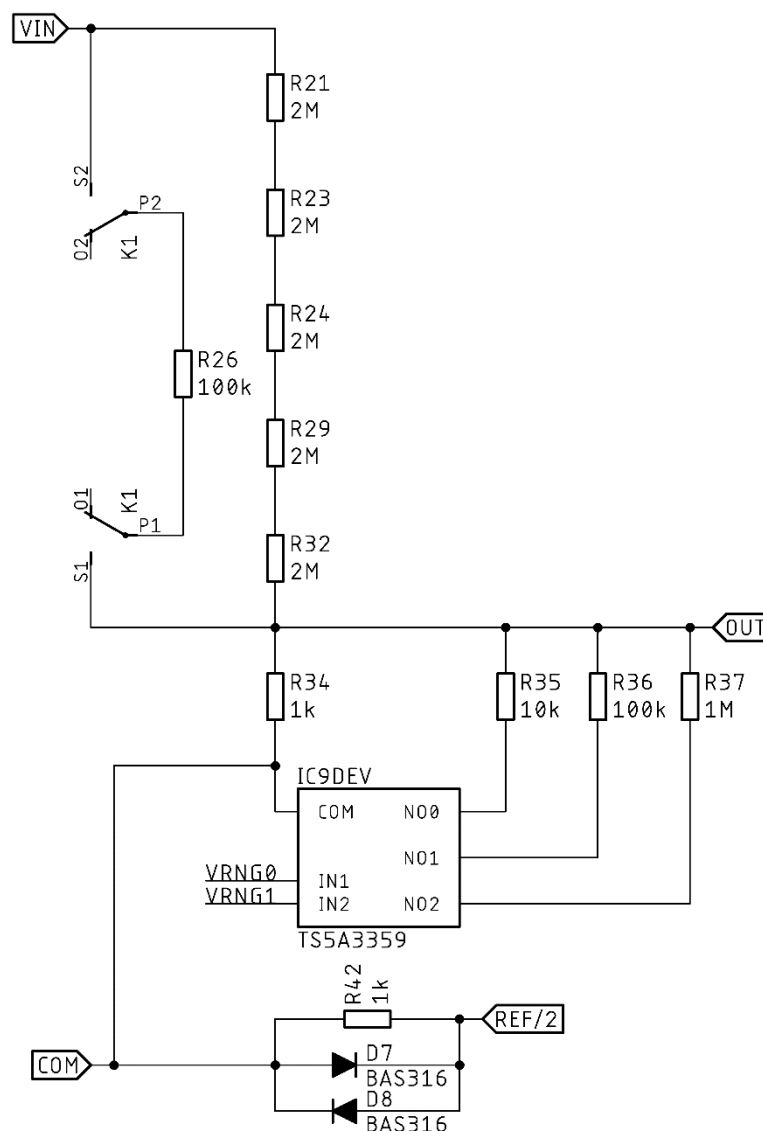
Tabulka 5.2 Vybrané parametry analogového přepínače TS5A3359, převzato z [30]

Parametr	Pozn.	Min	Typ	Max	Jednotka
Napájecí napětí		1,65		5,5	V
Odpor sepnutého kontaktu	$U_{CC} = 5 \text{ V}$		0,8	1,1	$\Omega$
Proud rozepnutého kontaktu	$U_{CC} = 5,5 \text{ V}$	-20	5	20	nA
Šířka pásma	$R_L = 50 \Omega$		75		MHz

Analogový spínač TS5A3359 je typu *SP3T* (*Single Pole Triple Throw*, tedy jednopólový spínač se třemi polohami), nicméně logická kombinace 00 na vstupech uvede spínač do vypnutého stavu, kdy není výstup připojen ani na jeden vstup.

Dále byla implementována možnost zapnutí nízké vstupní impedance děliče, což umožňuje omezit vliv šumu či parazitických napětí při měření [31]. Elektromechanické bistabilní relé připne odpor  $100 \text{ k}\Omega$  přes základní vstupní odpor  $10 \text{ M}\Omega$ . V režimu nízké vstupní impedance jsou k dispozici pouze rozsahy 6 V, 600 mV a 60 mV.

Zjednodušené schéma výsledného děliče je zobrazeno na obrázku 5.2. Z důvodu přehlednosti nejsou zobrazeny součástky pro ochranu proti přepětí.



Obrázek 5.2 Vstupní dělič pro měření napětí

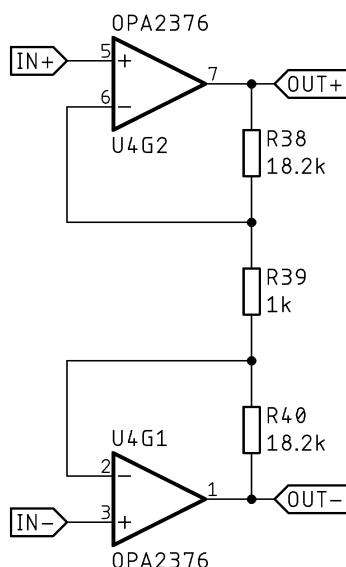
### 5.1.2 Výběr operačního zesilovače

Na výstup děliče je nutné zařadit operační zesilovač. Ten musí mít jednak co nejnížší vstupní proud tak, aby nezatěžoval dělič a také musí být schopen zesilovat signál při vstupních rozsazích 600 mV a 60 mV. V neposlední řadě je třeba brát v potaz fakt, že vstup je pseudodiferenční (jedná se o rozdíl napětí na děliči a napětí virtuální země) a výstup by měl být ideálně plně diferenční tak, aby byl maximalizován dynamický rozsah převodníku AD.

Z hlediska přesnosti, zesílení a diferenčního vstupu by se nabízel OZ v konfiguraci tzv. přístrojového zesilovače (*instrumentation amplifier*), např. INA828. Nevýhodou je ale hlavně vysoký vstupní proud, velká vstupní napěťová nesymetrie a pseudodiferenční



výstup. Nakonec byla zvolena realizace s využitím dvou diskretních OZ, odvozená od první části přístrojového zesilovače, viz obrázek 5.3.



Obrázek 5.3 Zapojení zesilovače se ziskem 37,4 pro měření napětí

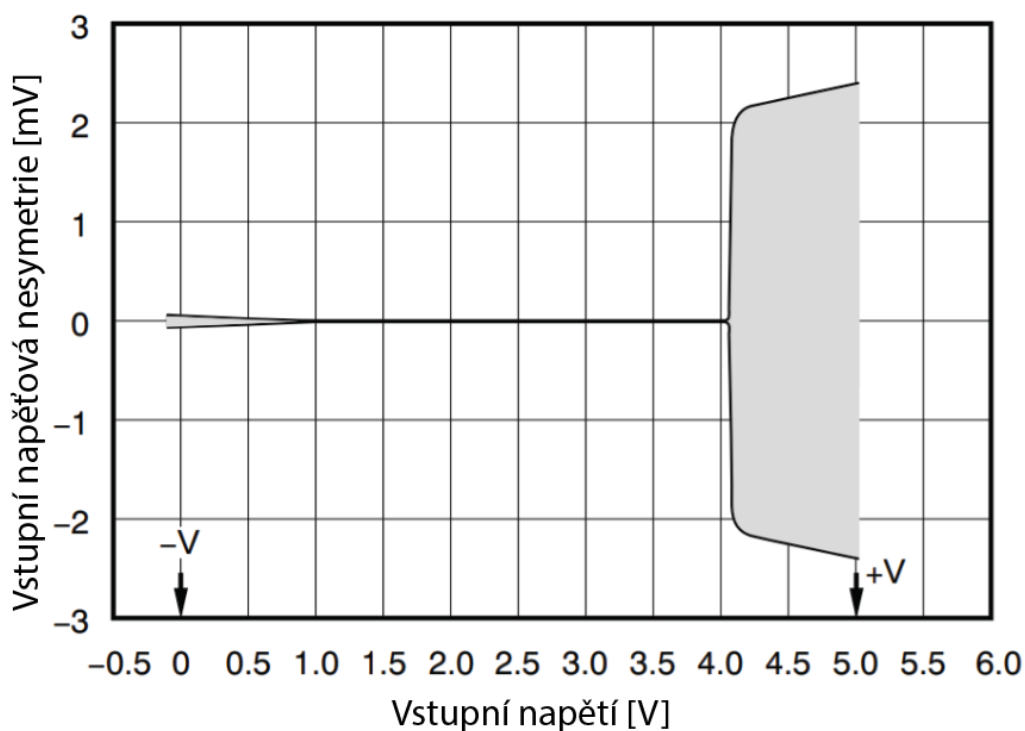
Základní požadavky na samotný OZ jsou primárně co nejnižší vstupní proud tak, aby nedocházelo k zatížení děliče. Velmi důležitým požadavkem je ale také vstupní napěťová nesymetrie. Z dostupných OZ byl vybrán OPA2376, což je OZ z řady *e-trim* firmy Texas Instruments. Jedná se o OZ s unipolární vstupní částí, který je trimován při výrobě na co nejnižší vstupní napěťovou nesymetrii. Parametry OPA2376 jsou následující:

Tabulka 5.3 Vybrané parametry OZ OPAx376, převzato z [32]

Parametr	Pozn.	Min	Typ	Max	Jednotka
Napájecí napětí		2,2		5,5	V
Vstupní napěťová nesymetrie			5	25	$\mu\text{V}$
Vstupní proud	$T_A = 25\text{ }^\circ\text{C}$		0,2	10	pA
Šířka pásma			5,5		MHz
Rychlost přeběhu			2		V/ $\mu\text{s}$
Odstup výstupu od napájecích větví	$R_L = 10\text{ k}\Omega$		10	20	mV

Je ovšem potřeba brát v potaz, že výrobce sice na první straně katalogového listu deklaruje vstupní napěťovou nesymetrii  $\pm 5\text{ }\mu\text{V}$  (typ.), ale při podrobném pročtení katalogového listu je možno najít obrázek 5.4, ze kterého jasně vyplývá, že při napětí vstupů méně než 1 V od horní napájecí větve je typická vstupní napěťová nesymetrie více jak  $\pm 2\text{ mV}$ , tedy 400krát více. Tento jev je zřejmě způsoben tím, že *rail-to-rail* OZ (tedy OZ, jejichž vstupní a výstupní rozsah je roven rozsahu napájecího napětí) mají hned dva

vstupní diferenční zesilovače, jeden v polaritě N a druhý P. V určitém místě dojde k přepnutí použitého vstupu a u tohoto OZ je zřejmě kalibrován pouze vstup v polaritě P.



Obrázek 5.4 Graf vstupní napěťové nesymetrie vůči napětí vstupů u OPAx376, převzato a přeloženo z [32]

U prvního prototypu byla tato limitace obejitá tím, že OZ je napájen 5 V i přesto, že rozsah vstupního signálu je pouze 0–2,5 V, teoreticky by tedy stačilo jej napájet např. z 3 V.

### 5.1.3 Ochrana obvodu pro měření napětí

Vstupní napěťovou část je třeba chránit před přepětím – buďto v případě volby špatného vstupního rozsahu vzhledem k vstupními napětí či při zapojení vyššího napětí, než je maximální hodnota vstupu. Pro případ špatného vstupního rozsahu poskytuje ochranu vstupní odpor s hodnotou 10 MΩ/100 kΩ v kombinaci s diodami na vstupu OZ. Maximální proud této diody je 10 mA, což i při nižším vstupním odporu (tj. 100 kΩ) znamená napěťovou toleranci až 1000 V.

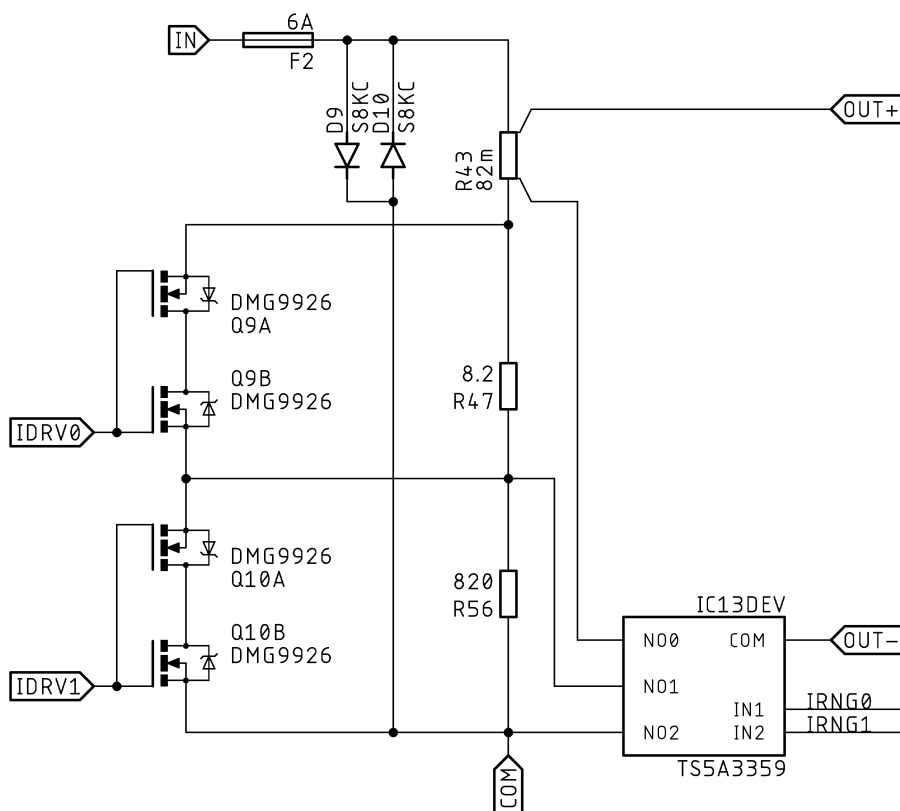
Pro případ přepětí na vstupu pak slouží kombinace MOV (*Metal Oxide Varistor*, varistor z metalického oxidu) a PTC rezistoru. Objeví-li se na vstupu napětí vyšší napětí, než je nominální napětí varistoru, dojde k prudkému snížení jeho odporu. To bude znamenat zvýšení proudu (který je v základu limitován dvěma rezistory 470 Ω 1,5 W v sérii), což způsobí nárůst odporu PTC rezistoru. Zvýšený odpor PTC rezistoru pak sníží proud, který teče obvodem a ochrání jej tak před poškozením.

### 5.1.4 Měření proudu

Multimetr by měl být schopen měřit proud v 6 různých rozsazích, teoreticky by bylo možné použít 6 odlišných měřicích rezistorů, nicméně vzhledem k cenovým a technickým důvodům byly použity pouze 3 s tím, že následný zesilovač má elektronicky přepínatelné zesílení, čímž je dosaženo 6 různých rozsahů.

Pro přepínání zesílení byl použit stejný obvod jako na obrázku 5.3 s tím, že prostřední rezistor byl nahrazen dvěma rezistory v sérii a jeden z nich je přemostitelný analogovým SPST spínačem TS5A23166. Zesílení je tak možné digitálně přepínat mezi 40,2x a 4,27x.

K přepínání samotných rezistorů pro měření proudu jsou využity dvě dvojice unipolárních tranzistorů. Požadavkem bylo, aby tranzistor zvládal průtok proudu 6 A při napětí na terminálu gate pouze 6,6 V. Byly vybrány tranzistory DMG9926 v pouzdře SOP-8 s tím, že v jednom pouzdře se nachází dva tranzistory. Jelikož ale tyto tranzistory nemají ani v sepnutém stavu nulový úbytek napětí, byl použit další SP3T spínač TS5A3359 k výběru přesného místa, na kterém se úbytek napětí bude měřit.

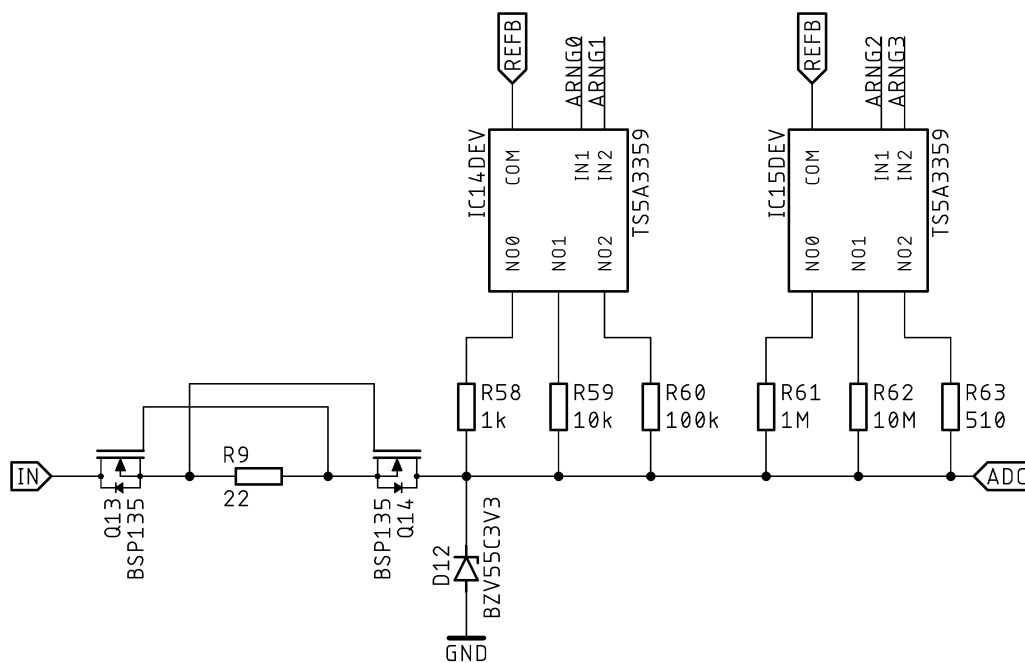


Obrázek 5.5 Vstupní část pro měření proudu

Ochranu obvodu zajišťuje vyměnitelná rychlá pojistka v pouzdře 5x20 mm. Dále jsou všechny měřicí rezistory přemostěny dvěma antisériovými diodami S8KC, které se otevrou v případě příliš vysokého proudu (resp. napětí na měřicích rezistorech více jak 800 mV) a umožní tak přetavení pojistky.

### 5.1.5 Měření odporu

Měření odporu je k dispozici na terminálu AUX. Byla zvolena varianta, kdy se pomocí dvou přepínačů TS5A3359 k terminálu AUX připojují různé precizní rezistory a třetím kanálem převodníku AD se měří napětí uprostřed děliče pomocí stejného zesilovače jako na obrázku 5.3.



Obrázek 5.6 Vstupní část pro měření odporu

Bylo vybráno 6 různých rezistorů s tím, že 5 z nich pokrývá rozsah 1 k $\Omega$  až 10 M $\Omega$  a šestý, s hodnotou 510  $\Omega$ , slouží pro měření kontinuity (resp. spuštění piezobzučáku v případě, že odpor je nižší jak 50  $\Omega$ ).

Pro ochranu terminálu AUX slouží zapojení Q13, R9 a Q14 a D12. Q13 a Q14 jsou unipolární depletiční tranzistory s kanálem typu N. Pokud přes rezistor R9 prochází pouze malý proud, je na něm nízký úbytek napětí a tranzistory jsou plně otevřené. Se zvyšujícím se proudem se úbytek zvyšuje, čímž se tranzistory zavírají a celý obvod tak de facto funguje jako omezovač proudu s tolerancí vstupního napětí až 600 V.

### 5.1.6 Měření teploty

Pro měření teploty byl využit čtvrtý kanál převodníku AD a zesilovač podobný obrázku 5.3. Problematické bylo získání konektoru pro zapojení termočlánku, nakonec byly v prvním prototypu použity dvě svorky na 5mm pojistky, umístěné na desce se správnou roztečí.

Samotný převod napětí na teplotu je tedy řešen plně firmwarově. Ke kompenzaci teploty studeného konce byl využit teplotní senzor TMP75 se sběrnici I2C, umístěný co nejbližší vstupním svorkám pro termočlánek.

## 5.2 Převodník AD

Byl zvolen čtyřkanálový, 24bitový převodník ADS131A04 od firmy Texas Instruments. Jeho základní parametry jsou shrnuty v tab. 5.4.

Tabulka 5.4 Vybrané parametry převodníku AD typu ADS131A04, převzato z [21]

Parametr	Pozn.	Min	Typ	Max	Jednotka
Rozlišení			24		bitů
Vzorkovací frekvence		1		128	kSPS
Zesílení vstupu		1, 2, 4, 8, 16			
Integrální nelinearita			8	20	ppm
Chyba nastavení nuly			500		μV
Drift chyby nastavení nuly			2,5	4	μV/°C
Chyba zesílení			±0,03		% rozsahu
Napětí integrované reference			2,442		V
Přesnost integrované reference			±0,1		%
Drift integrované reference			6	20	ppm
ENOB při $G = 1$	$f_{VZ} = 1 \text{ kHz}$		21,35		bitů
	$f_{VZ} = 8 \text{ kHz}$		19,89		bitů
	$f_{VZ} = 128 \text{ kHz}$		15,62		bitů
Frekvence sběrnice SPI				25	MHz

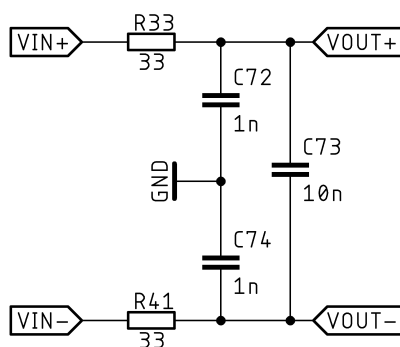
Z tabulky výše plyne, že převodník má např. velmi špatnou chybu nastavení nuly, nicméně díky relativně malému driftu by neměl být problém tuto chybu odstranit kalibrací.

Hodnotu RMS měřeného signálu by bylo možné měřit dedikovanými čipy, např. LTC1966, což je převodník RMS napětí na DC napětí. U prvního prototypu byla ale zvolena alternativní metoda, kdy se signál vzorkuje s dostatečnou frekvencí a výsledná RMS hodnota se pak dopočítává firmwarově jako

$$U_{\text{RMS}} = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=0}^{i=n} U_n^2}, \quad (5.1)$$

kde  $n$  je počet vzorků a  $U_n$  je okamžitá hodnota napětí daného vzorku [5].

Před vstup převodníku byl podle [33] předřazen obvod podle obrázku 5.7. Hlavním cílem obvodu je poskytnout vnitřnímu vzorkovacímu kapacitoru převodníku AD rezervoár, ze kterého se může nabít. Cílem rezistorů je omezit šanci oscilací (přímé zapojení kapacitoru většího než 250 pF na výstup OZ OPA2376 není doporučeno výrobcem [32]). Obvod také plní funkci jednoduchého filtru typu dolní propusti.



Obrázek 5.7 Vstupní filtr pro převodník AD

### 5.3 Mikrokontrolér

Hlavním požadavkem na mikrokontrolér je dostatečný výpočetní výkon tak, aby zvládal zpracovávat data z převodníku AD s frekvencí až 128 kSPS. Dále je z důvodu co nejmenší velikosti obvodu požadován integrovaný převodník DA a komparátory. Z portfolia firmy ST Microelectronics se tak nabízí řada STM32G4, speciálně určená k práci s kombinovanými (tj. analogovými i digitálními) signály. Konkrétně byl vybrán mikrokontrolér STM32G473VC.

Tabulka 5.5 Vybrané parametry mikrokontroléru STM32G473VC, převzato z [34]

Parametr	Hodnota	Jednotka
Jádro	Cortex-M4F	
Max. frekvence	170	MHz
Pouzdro	LQFP100	
Velikost paměti flash	512	kB
Velikost paměti RAM	128	kB
Počet čítačů	14	
Počet kanálů převodníku DA	7	
Rozlišení převodníku DA	12	bitů
Počet integrovaných komparátorů	7	
Spotřeba při frekvenci 170 MHz	29,50	mA

### 5.4 Napájení

Celé zařízení je napájeno jedním Li-Ion článkem velikosti 18650. Baterie je připojená pomocí konektoru JST-PH a je chráněna proti zkratu, přetížení, podbití a příliš vysokému napětí obvodem PT8201, který je určen přímo pro tyto účely.

Baterie přímo napájí lineární regulátor s nízkým úbytkem typu AP2210-3V3 s výstupním napětím 3,3 V. Tímto napětím se napájí záložní část mikrokontroléru, což umožňuje udržení hodin reálného času i při vypnutém napájení do zbytku systému. Zbytek systému je připojen přes unipolární tranzistor typu P, jehož terminál gate může přitáhnout k zemi (a tím zapnout napájení celého systému) buďto jeden z pinů v záložní části mikrokontroléru nebo uživatelské tlačítko. Mikrokontrolér tím může periodicky zařízení probouzet.

Napětí baterie je dále přivedeno na spínaný zvyšovač napětí MT3608, který generuje napětí cca 6,6 V. Toto napětí je jednak využito pro řízení tranzistorů, spínajících jednotlivé rezistory vstupní proudové části a druhá je přivedeno přes  $\pi$ -filtr na vstup regulátoru AP2210-5V0, který vytváří napětí 5 V pro napájení OZ a spínání relé. Spínaný regulátor je taktéž možné digitálně vypnout. Pro tento účel by bylo možné využít nábojovou pumpu, nicméně spínání relé vyžaduje vyšší pulzní proudy.

## 5.5 Uživatelské rozhraní

Základním komunikačním rozhraním multimetru je displej, který je u valné většiny multimetrů typu LCD (*Liquid Crystal Display*, displej z tekutých krystalů), pouze např. firma Fluke u svých dražších multimetrů používá displeje typu OLED (*Organic Light Emitting Diode*, organická elektroluminiscenční dioda). Výhodou displejů typu LCD či OLED je jejich vysoká čitelnost ze všech úhlů i v přímém světle, na rozdíl od levnějších a všeobecně rozšířenějších panelů typu TFT (*Thin Film Transistor*, volně přeloženo jako displej obsahující spínací tranzistory v samotné folii displeje) [35].

Pro první prototyp byl zvolen 2,4“ monochromatický LCD displej s rozlišením 240x120, ovládaný radičem UC1608. Radič samotný je k mikrokontroléru připojený pomocí sběrnice SPI. Výhodou tohoto displeje je velmi dobrá čitelnost a také fakt, že díky vyjádření 1 pixelu 1 bitem je možné displej rychle aktualizovat.

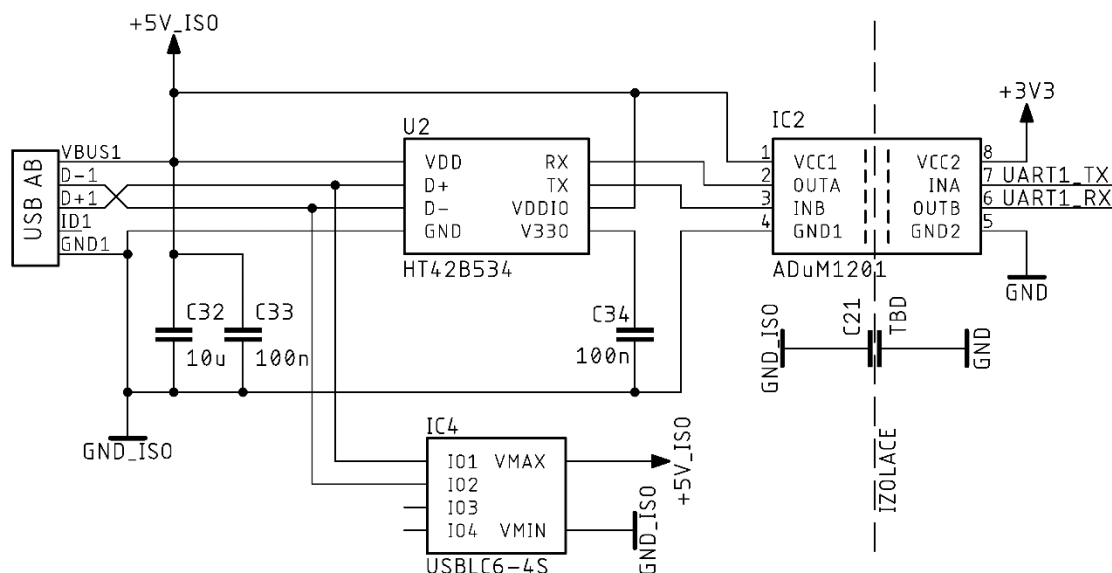
Uživateli je dále k dispozici celkem 6 tlačítek. Dvě mají pevně danou funkci (tlačítko pro zapínání/vypínání a tlačítko podsvícení), funkce zbylých 4 se vždy zobrazuje na displeji vzhledem k aktuálně vybranému režimu multimetru. K dispozici je také rotační enkodér s tlačítkem, RGB LED dioda a piezoelektrický bzučák.

Z konstrukčních důvodů jsou všechny prvky uživatelského rozhraní umístěny na vlastní DPS. Propojení k hlavní desce je realizováno pomocí dvou 8pinových konektorů s tím, že z důvodu minimalizace velikosti konektoru se čtení tlačítek realizuje pomocí I2C IO expandéru PCF8574.

## 5.6 Komunikační rozhraní

Dražší multimetry obvykle umožňují připojení k PC a provádění automatizovaného měření či automatizovaného vyhodnocování a vykreslování dat. Obvykle se využívá adaptér na bázi infračerveného světla, který umožňuje zajistit dokonalou galvanickou

izolaci. U prvního prototypu byl nicméně využit obvod na bázi optoizolátoru ADuM1201. Ten nedokáže izolovat obousměrné signály standardu USB, proto izoluje pouze jednosměrné signály standardu UART a na galvanicky oddělené straně obvodu se pak nachází převodník z USB na UART typu HT42B534 [36]. Galvanicky oddělená strana obsahuje také obvod USBLC6, určený k ochraně datových a napájecích linek proti ESD a transientním pulzům.

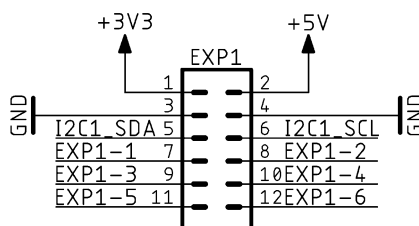


Obrázek 5.8 Komunikační rozhraní multimetru

U prvního prototypu byl přidán slot na SD kartu, který umožňuje periodicky zaznamenávat měřená data a ukládat je k dalšímu vyhodnocení. Jelikož je multimetr vybaven hodinami reálného času a je schopen sám sebe zapnout či vypnout, je možné jej používat jako datalogger a periodicky po dlouhou dobu provádět měření.

## 5.7 Rozšiřující porty

Z důvodu maximální univerzálnosti byl multimetr vybaven dvěma rozšiřujícími porty. Každý port je realizován pomocí 12pinového IDC konektoru a jeho zapojení je na obrázku 5.9.



Obrázek 5.9 Rozšiřující port multimetru



Každý port poskytuje napájení ve formě 5 V a 3,3 V, sběrnici I2C a šest vstupně-výstupních pinů, z nichž dva je alternativně možné použít jako vstupy do převodníku AD mikrokontroléru. Zbylé čtyři piny je možné použít jako vstupy sběrnice USART (*Universal Synchronous Asynchronous Receiver-Transmitter*, univerzální synchronní/asynchronní přijímač-vysílač) buďto v režimu UART nebo SPI. Pin 4 slouží jako identifikační, u prvního rozšiřujícího portu je připojen na 0 V a u druhého na 3,3 V.

Tyto porty tak teoreticky umožňují zapojení např. desky s relé pro měření vícero kanálů, čipu pro připojení k Ethernetu či více méně libovolného senzoru, používajícího některou se sběrnice I2C, SPI či UART.

## 6. VÝVOJ FIRMWAREU

Firmware pro multimetr byl napsán v jazyce C++ standartu GNU++17 v prostředí STM32CubeIDE. Velikost kompilovaného firmware bez zapnuté optimalizace je 122/8 kB (flash/RAM), při optimalizaci -O2 pak 94/8 kB. Pro obsluhu hardwarové vrstvy byly využity knihovny HAL (*Hardware Abstraction Layer*, hardwarová abstrakční vrstva) firmy ST Microelectronics spolu s generátorem STM32CubeMX. Knihovny pro obsluhu ostatních čipů (paměť EEPROM, převodník AD, displej atd.) byly napsány autorem s využitím objektově orientovaného programování. Všechny knihovny jsou plně zdokumentovány komentáři kompatibilními se systémem Doxygen.

Pro verzování firmwaru v průběhu vývoje byl využit systém Git. Vložení aktuální verze (commit či tag ze systému Git) bylo realizováno pomocí skriptu v prostředí PowerShell, který se automaticky spustí při každé kompilaci firmwaru a do souboru `version.h` vloží výše zmíněné parametry jako pole znaků.

### 6.1 Obsluha převodníku

Komunikace s převodníkem ADS131A04 probíhá po sběrnici SPI v tzv. rámcích, kdy každý rámec má 1–6 slov a každé slovo má 16, 24 nebo 32 bitů. Velikost slova závisí na stavu vývodu M1 při spuštění převodníku, v této práci byl vývod M1 uzemněn pro velikost slova 24 bitů. Rámec vždy obsahuje 1 slovo s příkazem, resp. odpovědí převodníku, až 4 datová slova s naměřenými hodnotami (podle počtu zapnutých převodníků) a až 1 slovo s CRC (*Cyclic Redundancy Check*, cyklický redundantní součet, tj. funkce sloužící pro ověření integrity dat). Formát rámce, tak jak je použitý v práci shrnuje tabulka 6.1 s tím, že ADC1 až ADC4 jsou hodnoty stejnojmenných registrů převodníku, které obsahují naměřená data. Podstatnou komplikací je fakt, že odpověď v rámci rámce je odpovědí na příkaz předchozího rámce.

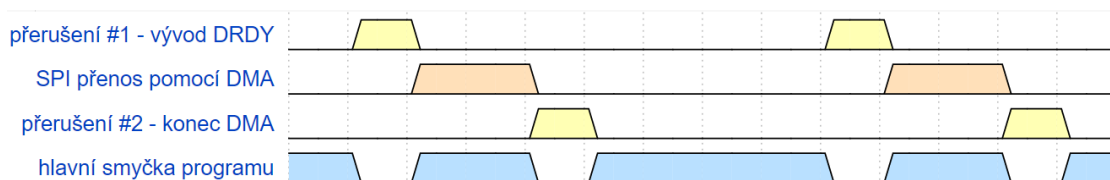
Tabulka 6.1 Formát rámce pro přenos dat z/do převodníku AD

Slovo	1			2			3			4			5		
Byte	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
MOSI	Příkaz		0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
MISO	Odpověď		0	ADC1			ADC2			ADC3			ADC4		

#### 6.1.1 Asynchronní přenos dat

Privedením napájecího napětí na vývod M0 se čip spustí v tzv. *asynchronous interrupt mode*, což je režim, kde se mikrokontrolér chová jako *master* (tj. generuje hodinový signál a adresuje převodník pomocí vývodu CS, *chip select*). Převodník AD pak signalizuje mikrokontroléru přítomnost nových dat pomocí sestupné hrany na vývodu DRDY.

Tato sestupná hrana spustí v mikrokontroléru asynchronní přerušení, které zahájí přenos 15 B po sběrnici SPI pomocí DMA (*Direct Memory Access*, přímý přístup do paměti, tj. periferie, umožňující přímý zápis dat do/z paměti bez zásahu firmwaru). Po přenesení 15 B se spustí druhé asynchronní přerušení, v němž jsou zpracována přenesená data.



Obrázek 6.1 Časový diagram přenosu dat z převodníku AD

Při maximální vzorkovací frekvenci převodníku 128 kSps je nutné spustit přerušení 256 000krát za vteřinu. Na architektuře Cortex-M4 trvá spuštění a ukončení přerušení standardně 12 cyklů [37], v rámci kterých je na stack uložen stav osmi základních pracovních registrů [38]. V praxi je ale spuštění přerušení prodlouženo načítáním dat z relativně pomalé paměti Flash (v mikrokontroléru STM32G4 při frekvenci 150 MHz je zpoždění 5 cyklů [34]), ukládáním dalších pracovních registrů pro zpracování přerušení a v případě mikrokontroléru s jednotkou FPU ukládáním dalších 16 pracovních registrů.

Z důvodu eliminace načítání 16 registrů FPU byl využit tzv. *lazy stacking*, což je metoda, kdy mikrokontrolér používá FPU pouze v hlavním vlákně programu. Výhodou je značné zrychlení přerušení, nevýhodou je nemožnost používat FPU v kódu přerušení.

### 6.1.2 Změna nastavení převodníku

Po prvotní inicializaci pomocí sběrnice SPI začne převodník odesílat data s nastavenou frekvencí, ze strany mikrokontroléru je zpracování dat plně asynchronní. Jakékoliv další úpravy či čtení pracovních registrů převodníku (např. vzorkovací frekvence či zesílení jednotlivých kanálů) z hlavní smyčky programu by tak byly problematické, jelikož by mohlo dojít ke kolizi naměřených a konfiguračních dat (při maximální vzorkovací frekvenci 128 kSps je potřeba přenést 15,36 Mbps, což i při maximální frekvenci sběrnice SPI 25 MHz znamená vytížení 62 % času s tím, že praktická frekvence bude nižší z důvodu omezených možností děličky mikrokontroléru STM32).

Proto byly do firmwaru implementovány funkce `readRegisterAsync` a `writeRegisterAsync`, které, po zavolání z hlavní smyčky programu, předají pomocí proměnné informace do obou přerušení a v případě čtení registru čekají na odpověď. Takto je možné zároveň periodicky vyčítat data a měnit nastavení převodníku.

## 6.2 Zpracování měřených veličin

Systém standardně měří a ukládá všechny čtyři kanály pomocí asynchronních přerušení, nicméně výpočetně náročné operace (násobení desetinných čísel apod.) se provádějí

v hlavní smyčce pouze pro kanály relevantní vzhledem k aktuálnímu režimu multimetru (např. měření napětí, proudu, apod.).

### 6.2.1 Výpočet SS, ST a RMS hodnoty

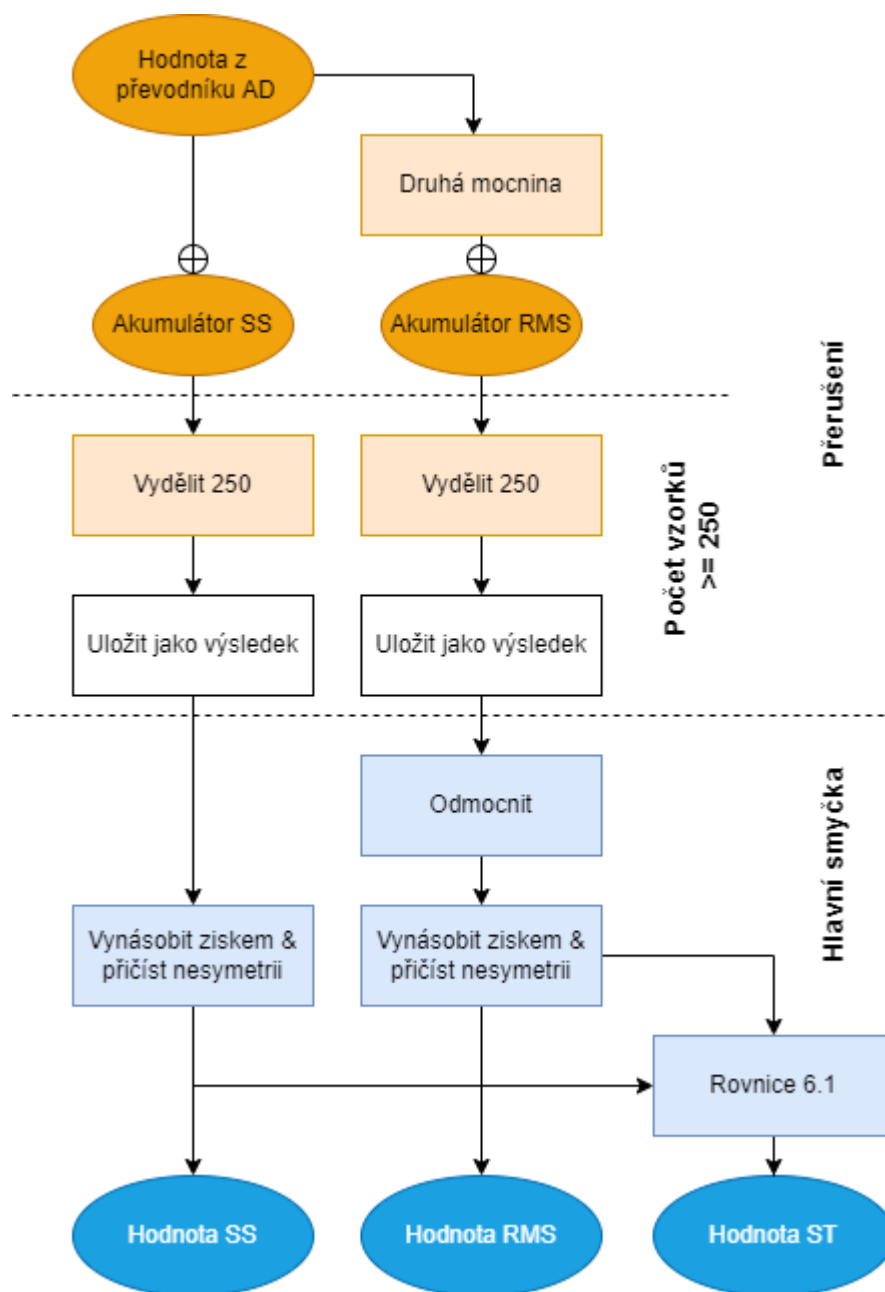
V rámci přerušení po ukončení přenosu DMA jsou získaná data přičtena ke dvěma akumulátorům – k prvnímu (pro výpočet průměrné hodnoty) se přičítá přímo vyčtená hodnota, k druhému (pro výpočet RMS hodnoty) její druhá mocnina. Dále se inkrementuje počítadlo vzorků a každých 250 vzorků dojde k vyhodnocení, kdy se oba akumulátory vydělí počtem vzorků, tj. 250, viz rovnice 5.1 a obrázek 6.2. Akumulátor RMS se inkrementuje pouze pro první dva kanály převodníku (tj. napětí a proud).

Při zavolání funkce pro návrat SS/ST/RMS hodnoty z hlavní smyčky dojde v případě RMS hodnoty k odmocnění a poté k vynásobení dané hodnoty ziskem a přičtení napěťové nesymetrie pro daný kanál a vstupní rozsah. Zisk a napěťová nesymetrie jsou uloženy v paměti EEPROM a načteny do paměti SRAM při startu systému.

Hodnota střídavého signálu je získána na základě rovnice

$$U_{ST} = \sqrt{U_{RMS}^2 - U_{SS}^2}. \quad (6.1)$$

Celý průběh výpočtu SS, ST a RMS hodnot shrnuje obrázek 6.2 s tím, že oranžovou barvou jsou zvýrazněny operace s přirozenými čísly a modrou barvou operace s desetinnými čísly.



Obrázek 6.2 Diagram výpočtu SS, ST a RMS hodnot

### 6.2.2 Výpočet výkonu

Jelikož analogová vstupní část pro měření proudu i napětí jsou plně nezávislé, je možné měřit zároveň napětí i proud a firmwarově dopočítávat výkon. Zdánlivý výkon je dopočítáván jako součin RMS hodnot napětí a proudu, činný výkon pak jako součin SS hodnot napětí a proudu [5]. Teoreticky by také bylo možné dopočítávat jalový výkon a účinník.

### 6.2.3 Měření odporu

Při měření odporu firmware uzemní konektor COM a na konektor AUX pomocí analogového přepínače přivede přes jeden ze 6 odporů napětí REFB, viz obrázek 5.6. Jelikož převodník AD používá stejnou referenci (tj. REFB), je možné hodnotu neznámého rezistoru vypočítat jako

$$R = \frac{R_{REF}}{\frac{ADC_{MAX}}{ADC_{MEAS}} - 1}, \quad (6.2)$$

kde  $R_{REF}$  je hodnota referenčního rezistoru,  $ADC_{MAX}$  je maximální binární kód převodníku AD a  $ADC_{MEAS}$  je změřený binární kód převodníku. Měření je tedy nezávislé na případném kolísání REFB.

### 6.2.4 Měření kapacity

Měření kapacity funguje na základě měření konstanty  $\tau$  podle rovnice

$$\tau = RC, \quad (6.3)$$

kde  $R$  je hodnota referenčního rezistoru a  $C$  je hodnota neznámé kapacity [19].

Stejnými rezistory, které slouží i k měření odporu, se začne nabíjet kondenzátor mezi konektorem AUX a uzemněným konektorem COM. Hodnota napětí na kondenzátoru je přivedena na neinvertující vstup komparátoru COMP3, na invertujícím vstupu je pak pomocí integrovaného 12bitového DAC3 přivedeno napětí rovné 63,2 % rozsahu. Překlopení komparátoru spustí přerušení, v rámci kterého se vyčte hodnota 10MHz čítače TIM5 a dopočtena kapacita.

### 6.2.5 Měření frekvence

Frekvence je měřena firmwarově pomocí detekce přechodu nulou, resp. konstantní hodnotou. Při každém zpracování dat z převodníku se aktuální vzorek porovná s předchozím a je-li aktuální vzorek menší než hodnota SS a předchozí vzorek větší či roven hodně SS, je detekován záporný přechod. Při každém záporném přechodu se inkrementuje čítač a při každém zavolání funkce pro vrácení aktuální frekvence se počet přechodů vydělí uplynulým časem, měřeným pomocí 10MHz časovače TIM2. Frekvence je počítána pouze pro první dva kanály převodníku.

Nevýhodou této metody je přesnost, která závisí hlavně na poměru vzorkovací frekvence a frekvence zájmového signálu. Např. při vzorkovací frekvenci 128 kHz a frekvenci měřeného frekvenci 1,28 kHz může být chyba až 1 %. Výhodou je naopak možnost měřit frekvenci téměř libovolné amplitudy a SS hodnoty.

Dále byla implementována možnost měřit digitální frekvenci mezi vstupy COM a AUX. Signál je jednoduše přiveden do mikrokontroléru, kde slouží jako vstup jednoho z vnitřních časovačů. Druhý časovač slouží jako zdroj známé frekvence, a pomocí jejich vzájemného poměru je možné určit vstupní frekvenci. Nevýhodou tohoto řešení je fakt,

že měřený signál musí mít obdélníkový průběh s amplitudou 1,9–5,5 V. Přesnost tohoto měření závisí hlavně na přesnosti časovacího krystalu (která je v řádu desítek ppm), maximální měřená frekvence je omezena jednak samotným časovačem (85 MHz) a druhá parazitickou kapacitou.

#### 6.2.6 Měření teploty pomocí termočlánku

Velkou nevýhodou termočlánků je vyjma velmi malého termoelektrického napětí také silná nelinearita. Z hlediska přepočtu změřeného termoelektrického napětí na teplotu ve firmwaru existují v základu tři přístupy, a to sice

1. linearizovat krátké úseky charakteristiky termočlánku, což je výpočetně relativně nenáročné, ale výsledek bude nepřesný,
2. použít vyhledávací tabulku, což je rychlé z hlediska výpočetního času a přesné, nevýhodou jsou větší nároky na paměť,
3. vyřešit polynomickou rovnici, což je nejpřesnější, ale výpočetně nejnáročnější.

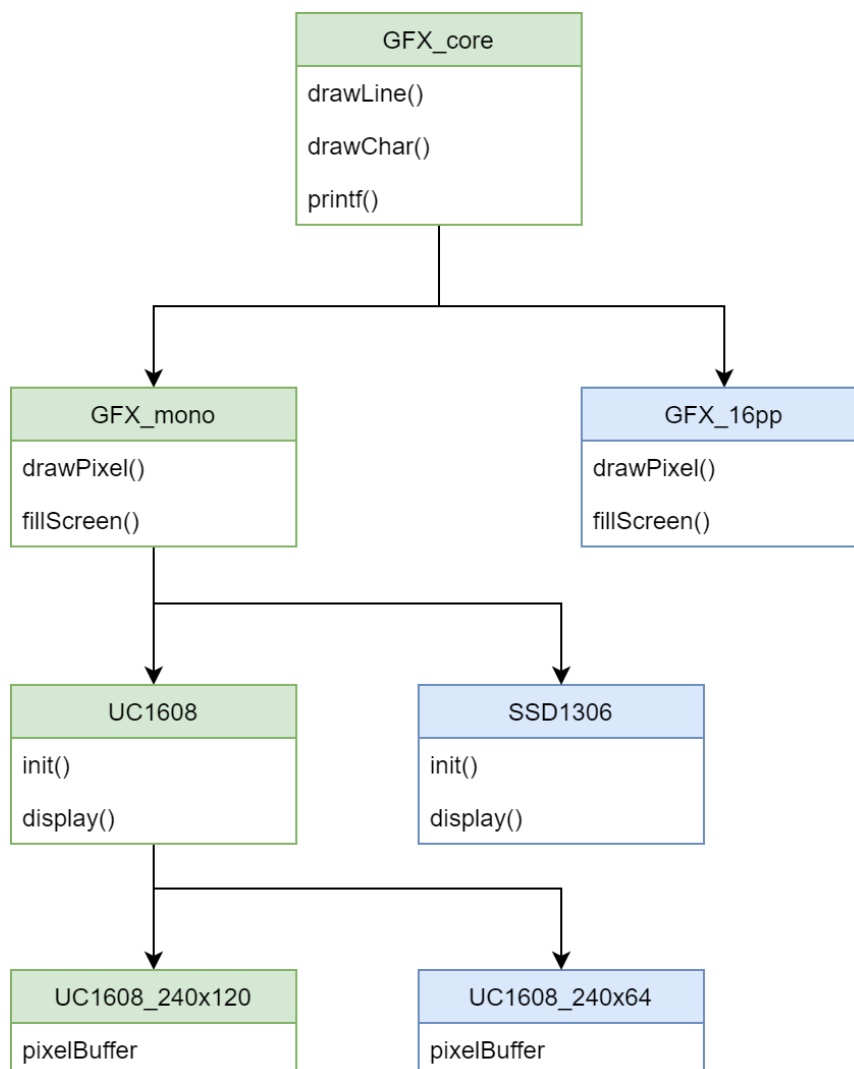
V této práci byla zvolena varianta č. 3. Samotná rovnice a koeficienty byly převzaty ze stránek amerického Národního institutu standardů a technologie [39].

### 6.3 Uživatelské rozhraní

U prvního prototypu byl uživatelský vstup tvořen 7 tlačítky a jedním enkodérem, u finálního prototypu pak byl enkodér nahrazen dalším tlačítkem, viz kapitola **Chyba! Nenašel jsem zdroj odkazů.** Obě verze disponují monochromatickým displejem 240x120 pixelů.

#### 6.3.1 Displej

Použitý LCD panel využívá kontrolér UC1608. Samotná grafická knihovna byla napsána pomocí dědičnosti tak, aby jednotlivé grafické funkce byly sdíleny pro všechny případné kontroléry displejů, viz obrázek 6.3 (modře zvýrazněné položky ukazují možnosti dalšího rozšíření, nicméně nebyly v rámci práce implementovány).



Obrázek 6.3 Diagram dědičnosti tříd grafické knihovny

Základní třída `GFX_core` definuje všechny potřebné grafické funkce, vyjma čistě virtuálních funkcí `drawPixel` a `fillScreen`. Tyto funkce definuje vydeděná třída `GFX_mono` (popř. `GFX_16bpp` atd.), ze které je dále vydeděná třída `UC1608`, která definuje všechny funkce pro manipulaci s hardwarem (např. inicializaci celého kontroléru, odesílání bufferu apod.). Poslední vydeděná třída `UC1608_240x120` už obsahuje pouze buffer o přesné velikosti pro dané rozlišení. Pointer na tento buffer se pomocí konstruktorů předá v průběhu inicializace třídě `GFX_core`.

Samotné funkce pro vykreslování jednotlivých prvků jsou založeny na knihovně *Adafruit GFX library* [40]. Tato knihovna byla zvolena jako inspirace primárně kvůli propracovanému a úspornému systému vykreslování různých fontů.



### 6.3.2 Vykreslování uživatelského rozhraní

Z důvodu snadné rozšiřitelnosti byla nad samotnou grafickou knihovnou napsána další vrstva pro samotné vykreslování uživatelského rozhraní. Základem této vrstvy je struktura **Screen**:

```
struct Screen
{
    void (*const onUpdate) ();

    void (*const onEntry) ();
    void (*const onExit) ();

    void (*const onAction) (const ScreenAction screenAction);
};
```

Každá obrazovka, kterou firmware obsahuje (např. úvodní obrazovka, obrazovka pro zobrazení měřeného napětí atd.) je popsána až 4 funkcemi, a právě strukturou **Screen**, která obsahuje pointery na tyto funkce. Jádrem celého systému je pak pointer **currentScreen**, který ukazuje na strukturu s obrazovkou, která je právě aktuální. Funkce **onUpdate** je zavolána pokaždé, když je potřeba aktualizovat obrazovku, **onEntry** se volá vždy před prvním zobrazením dané obrazovky apod. Výhodou tohoto systému je přehlednost, snadná rozšiřitelnost a malý nárok na výkon, oproti např. obří rozhodovací struktuře na bázi **switch-case**.

### 6.3.3 Tlačítka

Tlačítka jsou u obou verzí připojena přes IO expandér, který disponuje vývodem INT, na kterém se vygeneruje sestupná hrana při každé změně logické úrovně jakéhokoliv vstupu. Sestupná hrana spustí v mikrokontroléru přerušení, které vyčte novou hodnotu na vstupech expandéru, porovná ji s předchozí hodnotou pro zjištění rozdílu a pomocí proměnné předá informaci do hlavní smyčky.

## 7. ÚPRAVY PRVNÍHO PROTOTYPU

Deska prvního prototypu byla osazena součástkami a byla vyhodnocena funkčnost jednotlivých bloků. Tato kapitola popisuje objevené problémy a navržené změny před výrobou druhého (finálního) prototypu.

### 7.1.1 Oscilace regulátoru napětí

Prvním problémem prototypu byl cca 28kHz sinusový průběh superponovaný na 5V napájecí větví. Jako nejpravděpodobnější zdroj se jevil spínaný měnič MT3608, který sice spíná s relativně vysokou frekvencí 1,2 MHz [41], ale může operovat v režimu snížené spotřeby, kde se používá modulace frekvencí pulzů.

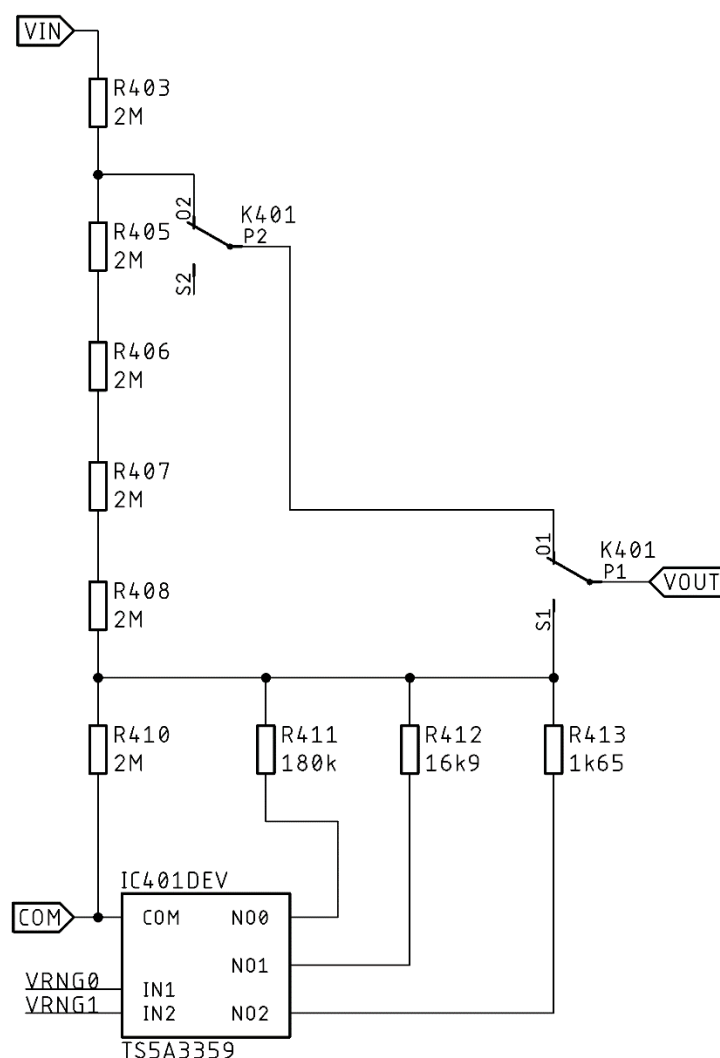
Nakonec se však ukázalo, že zdrojem oscilace je samotný LDO regulátor (*Low DropOut*, tj. regulátor s nízkým úbytkem napětí), resp. ji způsobilo zapojení 100 pF kapacitoru na vývod 4 (nazývaný *bypass*) regulátoru. V katalogovém listu [42] je sice na doporučeném schématu tento kapacitor zakreslen, ale po podrobném pročtení se také na straně 23 píše, že zapojení tohoto kapacitoru sníží rozsah ESR výstupních kapacitorů, kdy je regulátor stabilní. Řešením bylo tento kapacitor odstranit, což katalogový list také dovoluje.

### 7.1.2 Změna napěťového děliče

V první verzi byla horní část napěťového děliče tvořena 10M $\Omega$  rezistorem (resp. sériovým zapojením 5 2M $\Omega$  rezistorů, z důvodu maximálního napětí pouzdra 0805) a pomocí analogového spínače se vybírala dolní část děliče, viz obrázek 5.2. Nevýhodou tohoto řešení bylo, že i v případě nízkých vstupních rozsahů se signál dělil a poté jej bylo nutné opět násobit pomocí OZ, což způsobovalo zbytečnou chybu.

V druhé verzi bylo proto využito elektromagnetické bistabilní relé, které v případě nízkých vstupních rozsahů přepne zdroj signálu pod horní 2M $\Omega$  rezistor, tedy signál není tolik dělen. Horní 2M $\Omega$  byl v signálové cestě zachován z důvodu ochrany vstupu OZ.

Dále byla také přepočítána hodnota všech rezistorů v děliči tak, aby ve všech rozsazích (vyjma rozsahu  $\pm 60$  mV) bylo výstupní napětí v rozsahu  $\pm 100$  mV. V rozsahu  $\pm 60$  mV je výstupní napětí děliče  $\pm 50$  mV, z tohoto důvodu se v tomto rozsahu na vstupu převodníku AD zapíná zesílení x2 a tak je opět dosažen pracovní rozsah  $\pm 100$  mV.



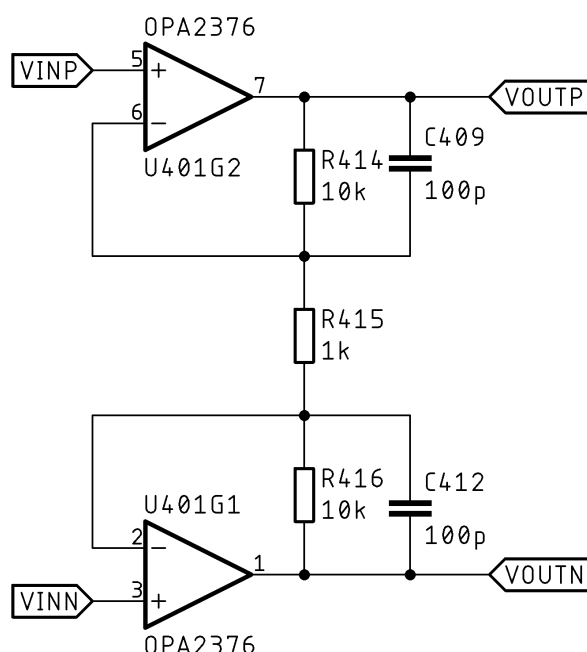
Obrázek 7.1 Vstupní napěťový dělič druhé verze

### 7.1.3 Změna obvodu pro měření proudu

Původní obvod pro měření proudu z obrázku 5.5, který využíval 3 bočníky a zesilovač s přepínatelným zesílením pro rozsah 6 mA, byl nahrazen obvodem se 4 bočníky, kdy každý bočník slouží pro jeden rozsah. Důvodem změny byla primárně nestabilita OZ s přepínatelným zesílením.

### 7.1.4 Úpravy zesilovačů

Zesilovače podle obrázku 5.3 se ukázaly jako funkční, nicméně z důvodu nestability byly přidány dva 100pF kapacitory podle obrázku 7.2. Tato hodnota byla zvolena tak, aby se se zvyšující frekvencí signálu snižoval zisk OZ díky klesající impedanci kapacitoru, ale aby frekvence zájmových signálů byly co nejméně ovlivněny.



Obrázek 7.2 Upravená verze zesilovače

### 7.1.5 Úpravy desky s uživatelským rozhraním

První prototyp obsahoval rotační enkodér, který měl sloužit ke změně pracovního režimu. Nakonec byl ale enkodér odstraněn, jelikož příliš vystupoval z desky vůči okolním tlačítkům a nízkoprofilový enkodér se nepodařilo získat. Místo enkodéru byla přidána další dvě tlačítka s tím, že funkcionalita tlačítek byla určena následovně:

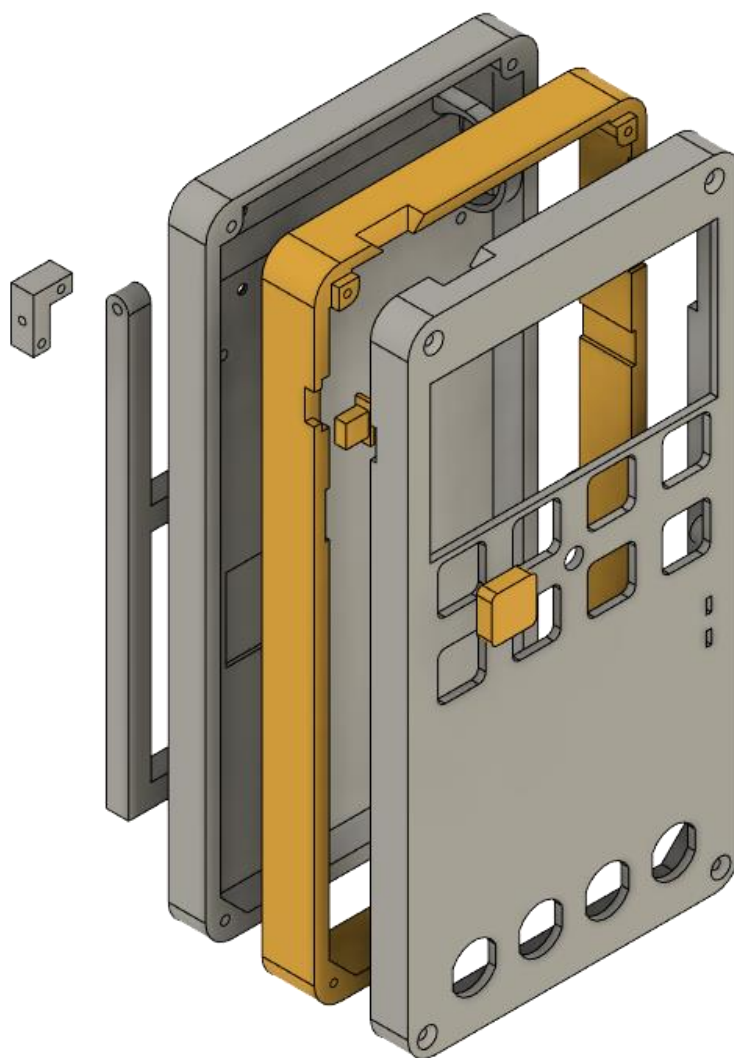
- první tlačítko („MODE“) slouží ke změně pracovního režimu (např. měření napětí, proudu, frekvence),
- druhé tlačítko („VIEW“) slouží ke změně zobrazení (např. zobrazení RMS napětí, SS napětí),
- třetí tlačítko slouží („RANGE“) slouží k přepínání vstupního rozsahu, resp. zapnutí automatické volby vstupního rozsahu,
- čtvrté tlačítko („SAMPLE“) slouží k přepínání vzorkovací frekvence mezi 1, 8 a 64 kHz,
- páté tlačítko („ON OFF“) slouží k zapnutí a vypnutí celého zařízení,
- šesté tlačítko („HOLD“) slouží k zmražení displeje,
- sedmé tlačítko („REL“) slouží k zapnutí režimu relativního měření,
- osmé tlačítko slouží („LIGHT“) slouží k zapnutí/vypnutí podsvícení displeje.

Dále byl původní IO expandér PCF8574 nahrazen novým expandérem PCA9554. Hlavním důvodem bylo, že nový expandér podporuje vyšší rychlost I2C sběrnice (400 kHz oproti 100 kHz), tedy celá sběrnice může běžet na vyšší frekvenci. Dále byl na

desku s uživatelským rozhraním přesunut celý blok pro komunikaci, izolaci a nabíjení přes USB (viz obrázek 5.8), primárně z důvodu nedostatku místa na hlavní desce.

#### 7.1.6 3D krabice

Pro druhý prototyp byla navržena krabice pomocí programu Fusion 360. Krabice se skládá z 8 základních částí, z čehož některé se tisknou vícekrát. Popisky na tlačítka byly vytištěny laserovou tiskárnou na průhlednou samolepící folii a nalepeny na vytištěné části. Jako materiál pro krabici bylo zvoleno PLA (*PolyLactic Acid*, kyselina polymléčná), primárně z důvodu pevnosti a snadnosti tisku.

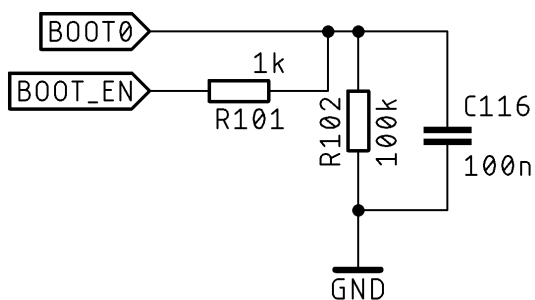


Obrázek 7.3 3D model krabčky

#### 7.1.7 Přechod do bootovacího režimu

V bootovacím režimu je u mikrokontrolerů STM32 možné aktualizovat firmware i bez programátoru, pouze pomocí sběrnice UART, která je v tomto zařízení vyvedena přes

izolátor a převodník USB-UART. Zatímco první verze používala pro přechod do bootovacího režimu fyzický spínač, který na vývod BOOT0 přivedl napětí země nebo napájecí napětí, u druhé verze bylo použito řešení podle obrázku 7.4:



Obrázek 7.4 Obvod pro přechod do bootovacího režimu

Toto řešení umožňuje, aby mikrokontroler sám sebe uvedl do bootovacího režimu přivedením logické 1 na vývod BOOT\_EN a následně se zavoláním funkce `NVIC_SystemReset()` resetoval, resp. spustil v bootovacím režimu. Hlavní výhodou tohoto řešení je primárně fakt, že uživatel nemůže omylem přepnout bootovací přepínač do špatné polohy.

## 8. VYHODNOCENÍ DRUHÉ VERZE

Deska druhé verze byla osazena, uložena do krabičky a byly provedeny nutné změny ve firmwaru. Následně byla provedena kalibrace pomocí stolního multimetru a minimálně 24 hodin poté byla ověřena přesnost. Relativní chyba byla určena jako

$$\delta_X = \frac{X_M - X_P}{X_M}, \quad (8.1)$$

kde  $X_M$  je hodnota změřená a  $X_P$  je hodnota konvenčně pravá [7].

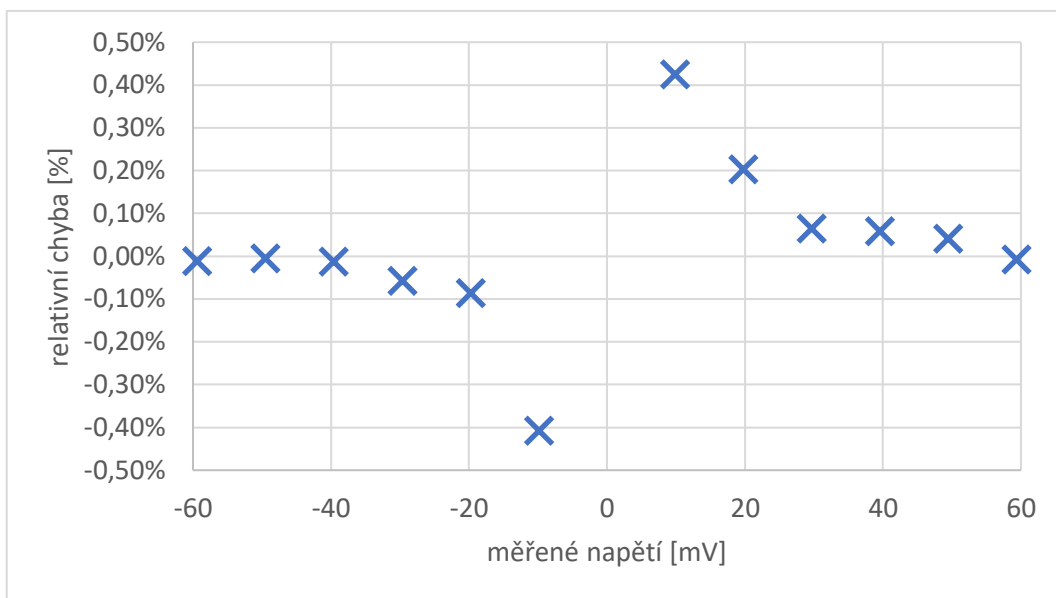
Kalibrace se prováděla s použitím tzv. dvoubodové metody, kdy se zaznamenalo převedené číslo převodníku AD při  $\pm 90\%$  rozsahu a poté byl vypočítán zisk a vstupní napěťová nesymetrie. Tato metoda je výpočetně a paměťově výhodnější oproti např. trojbodové metodě (kdy se navíc měří vstupní napěťová nesymetrie při zkratovaných svorkách), ale je méně přesná okolo nuly. Nicméně u multimetru se předpokládá, že při vstupu blízko nule se přepne do nižšího vstupního rozsahu.



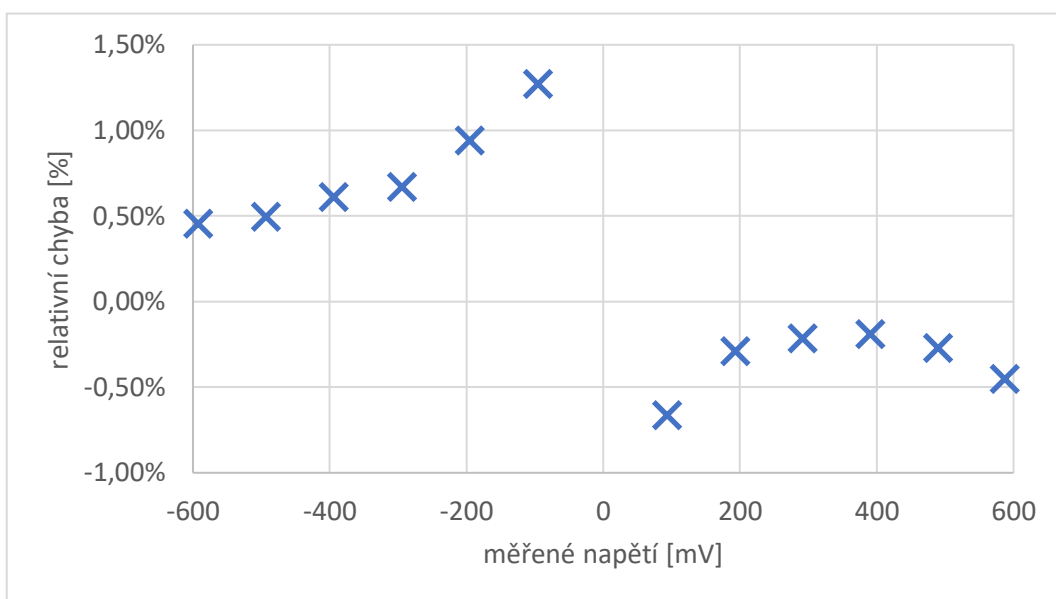
Obrázek 8.1 Fotografie finálního výrobku

## 8.1 Přesnost měření napětí

Přesnost napětí byla ověřena ve všech rozsazích vyjma  $\pm 600$  V. Jako zdroj měřeného napětí byl použit modul EEZ DCP405 a pro měření konvenčně pravé hodnoty byl použit multimetr Agilent 34401A. V rozsahu  $\pm 60$  mV byl na výstup zdroje měřeného napětí připojen rezistivní dělič 1:100, jelikož použitý zdroj měl problém generovat stabilní napětí pod 100 mV.

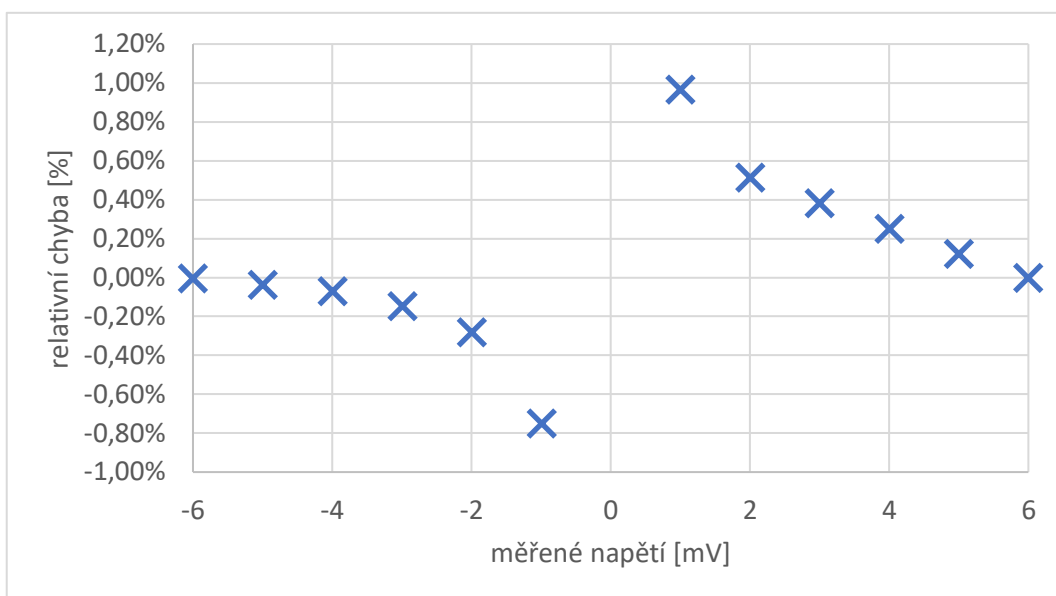


Obrázek 8.2 Přesnost pro rozsah  $\pm 60$  mV

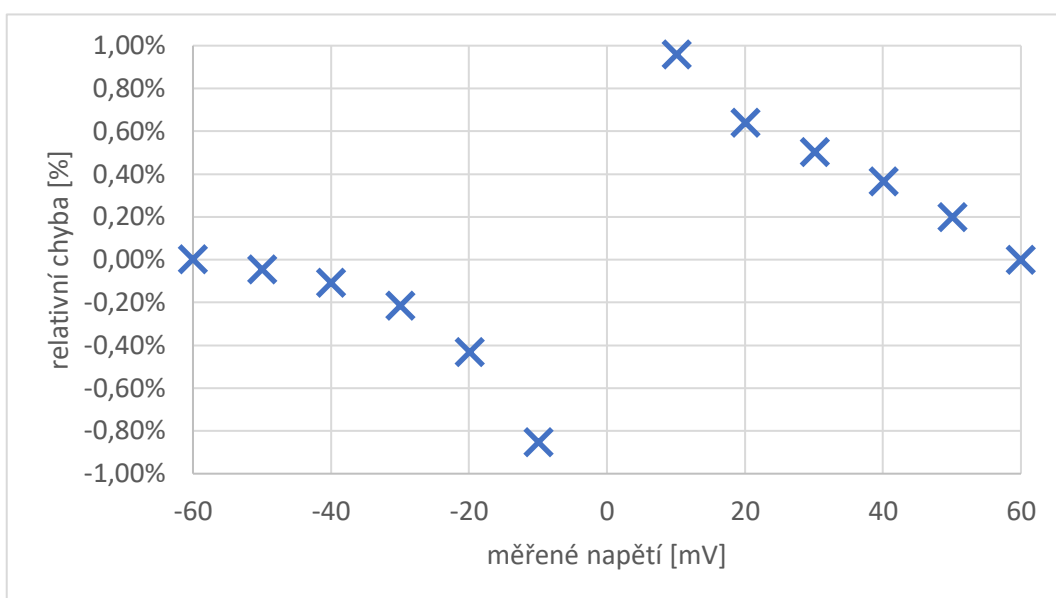


Obrázek 8.3 Přesnost pro rozsah  $\pm 600$  mV



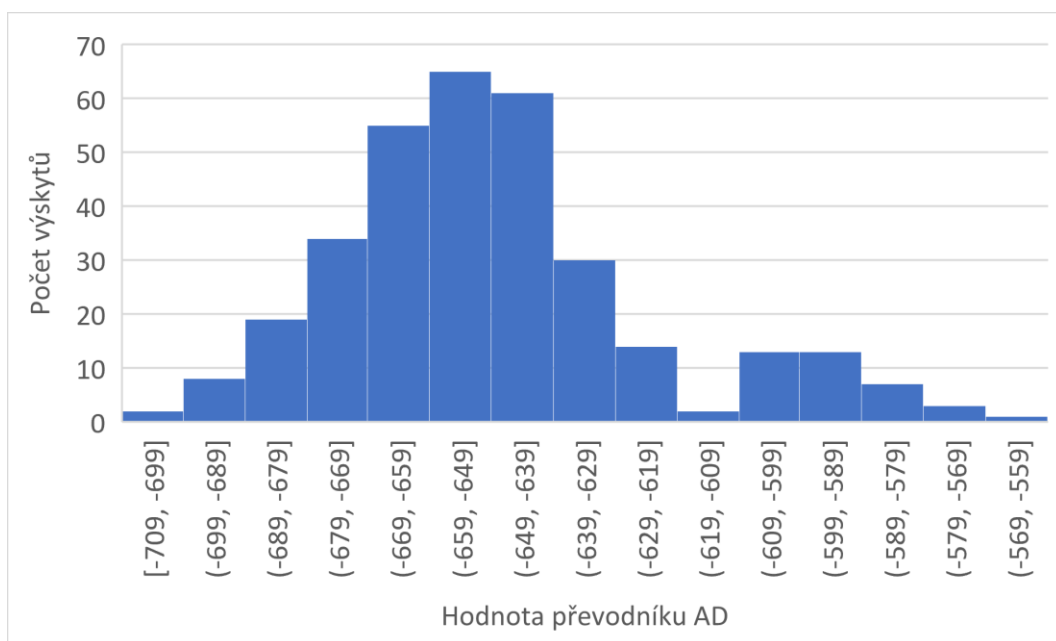


Obrázek 8.4 Přesnost pro rozsah  $\pm 6$  V

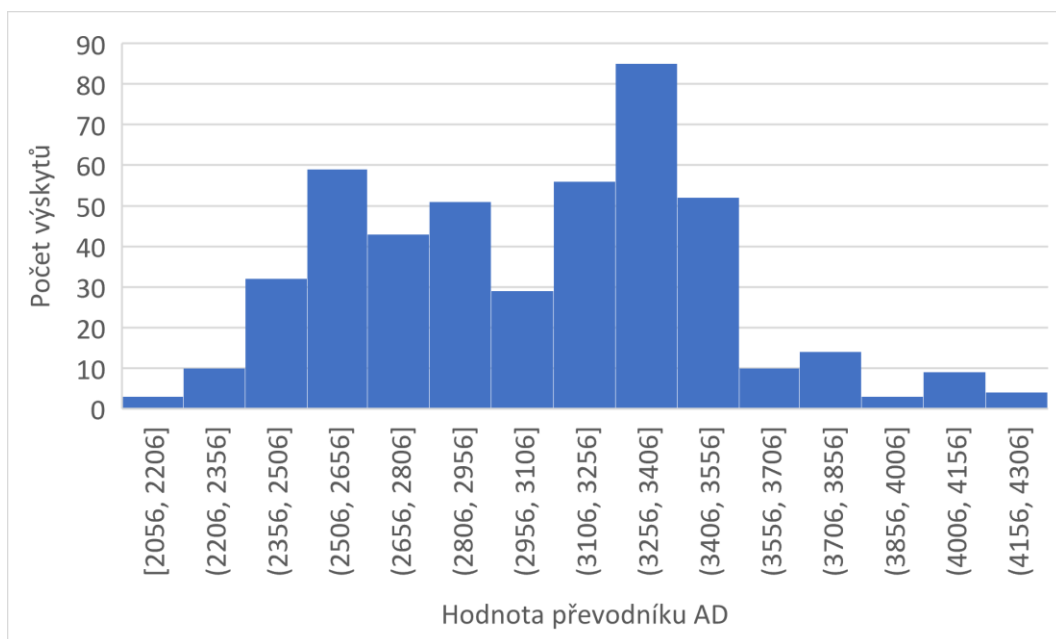


Obrázek 8.5 Přesnost pro rozsah  $\pm 60$  V

Následně byl pro zjištění šumu na výstupu vytvořen histogram pro nejvyšší a nejnižší vstupní rozsah. Vstupní svorky byly zkratovány a pomocí galvanicky odděleného sériového portu bylo vyčteno minimálně 300 hodnot, ze kterých byl vytvořen samotný histogram.



Obrázek 8.6 Histogram pro rozsah  $\pm 600$  V

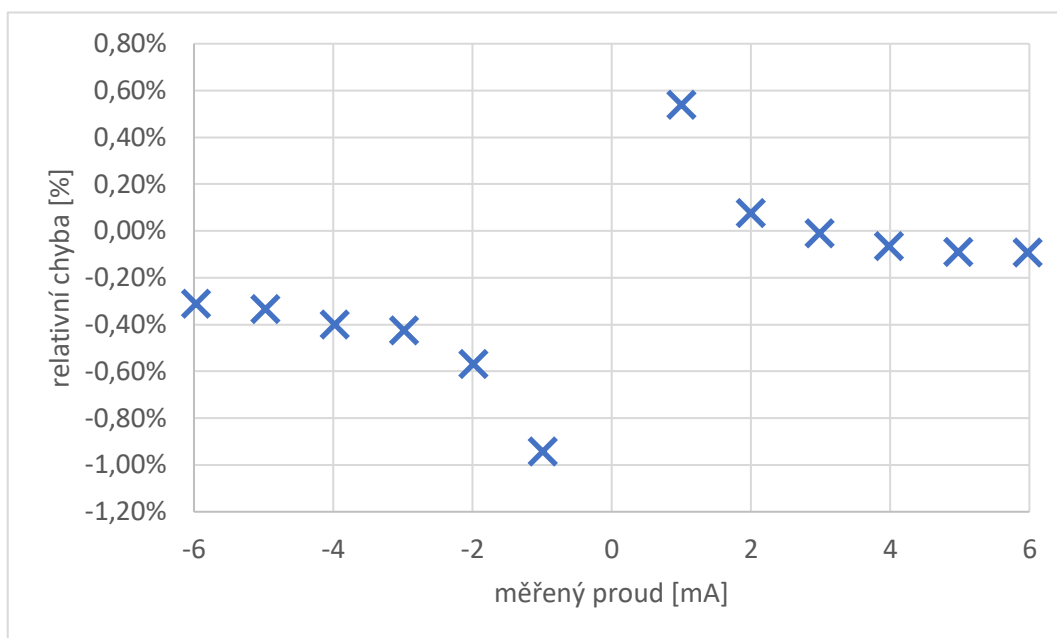


Obrázek 8.7 Histogram pro rozsah  $\pm 60$  mV

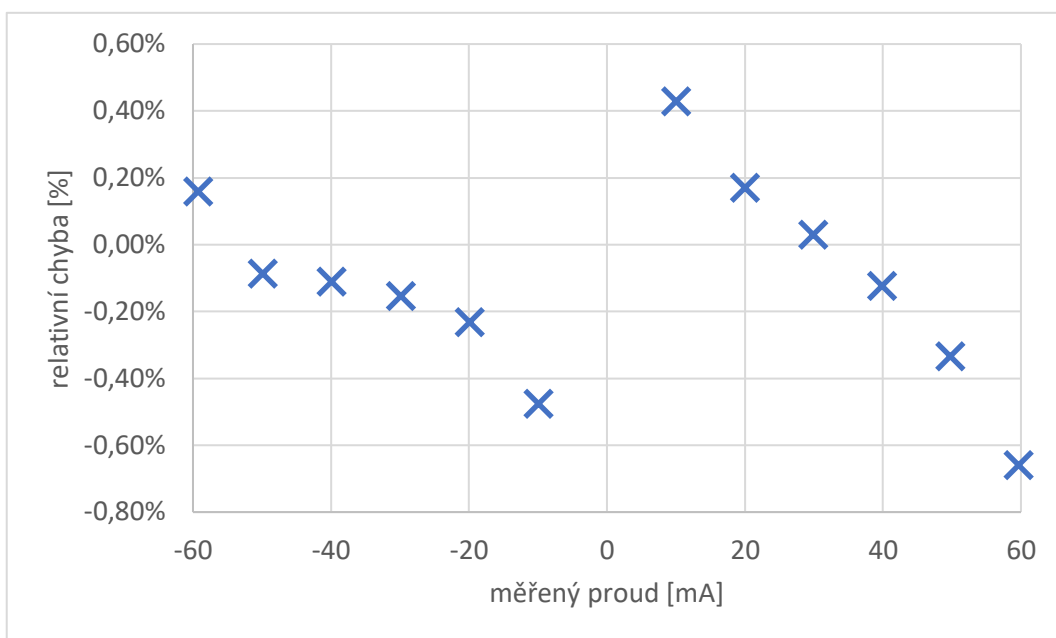
Dále bylo pomocí programu MS Excel vyčteno, že u rozsahu  $\pm 600$  V odpovídá směrodatná odchylka 26 LSB, což u 24bitového převodníku znamená  $7,5 \mu\text{V}$  na vstupu. U rozsahu  $\pm 60$  mV je směrodatná odchylka 428 LSB, resp.  $125 \mu\text{V}$  na vstupu.

## 8.2 Přesnost měření proudu

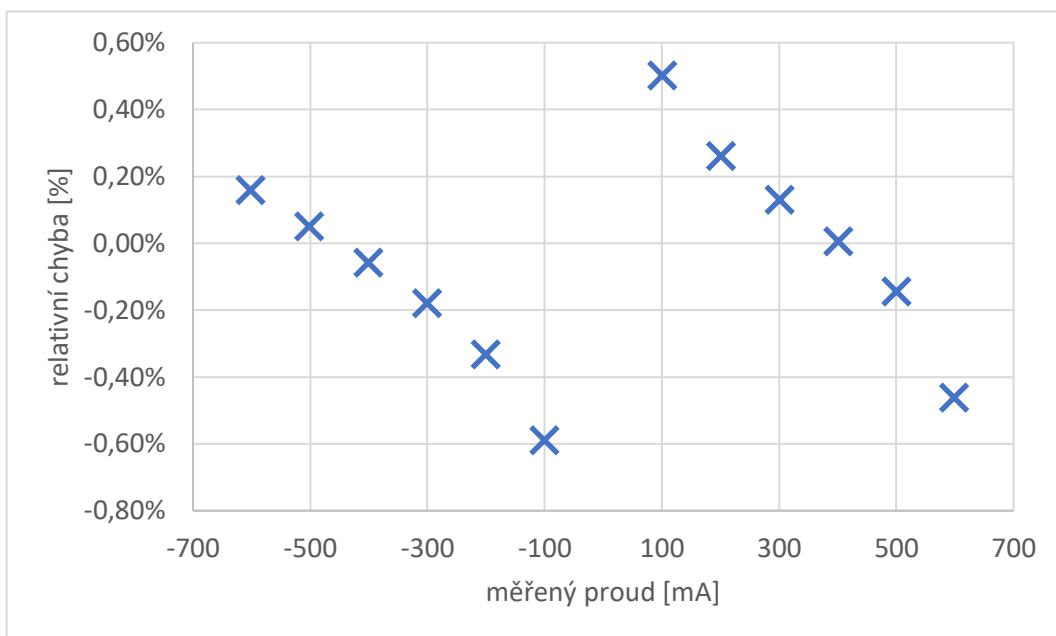
Přesnost proudu byla ověřena ve všech rozsazích s tím, že u rozsahu  $\pm 6$  A byly ověřeny pouze hodnoty  $\pm 5$  A z důvodu limitace laboratorního zdroje. Jako zdroj měřeného proudu byl použit modul EEZ DCP405 a pro měření konvenčně pravé hodnoty byl použit multimetr Agilent 34401A vyjma rozsahu  $\pm 6$  A, kde byl použit multimetr Brymen BM867s.



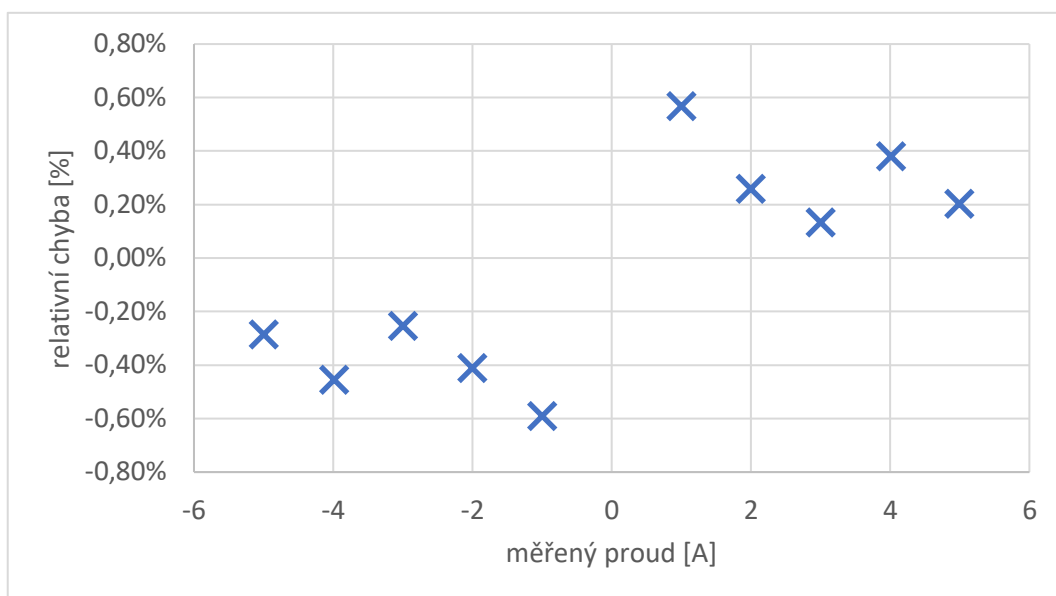
Obrázek 8.8 Přesnost pro rozsah  $\pm 6$  mA



Obrázek 8.9 Přesnost pro rozsah  $\pm 60$  mA



Obrázek 8.10 Přesnost pro rozsah  $\pm 600$  mA



Obrázek 8.11 Přesnost pro rozsah  $\pm 6$  A

### 8.3 Přesnost ostatních parametrů

Přesnost měření odporu byla ověřena porovnáním měřené hodnoty vůči hodnotě indikované stolním multimetrem 34401A na 3 různých rezistorech.

Tabulka 8.1 Přesnost měření teploty pomocí termočlánku

Měřená hodnota [ $\Omega$ ]	Správná hodnota [ $\Omega$ ]	Absolutní chyba [ $\Omega$ ]
987,294	996,99	9,696
99 503	99 778	275
1 000 776	1 001 650	875

Měření teploty termočlánku bylo ověřeno porovnáním měřené hodnoty vůči teplotě indikované komerčním multimetrem UNI-T UT55 na 3 různých objektech (voda s ledem, lidská ruka, hrot mikropáječky). Měření teploty nebylo nijak kalibrováno.

Tabulka 8.2 Přesnost měření teploty pomocí termočlánku

Měřená hodnota [ $^{\circ}\text{C}$ ]	Správná hodnota [ $^{\circ}\text{C}$ ]	Absolutní chyba [ $^{\circ}\text{C}$ ]
2,4	1	1,4
34,7	34	0,7
107,2	107	0,2

Měření kapacity bylo ověřeno porovnáním měřené hodnoty vůči kapacitě indikované komerčním multimetrem UNI-T UT55 na 3 různých kapacitorech.

Tabulka 8.3 Přesnost měření kapacity

Měřená hodnota [nF]	Správná hodnota [nF]	Absolutní chyba [nF]
93 248	96 300	3 052
1041	1016	25
11,009	10,450	0,559

## 8.4 Shrnutí ostatních parametrů

Ostatní parametry zařízení shrnuje tabulka 8.4.

Tabulka 8.4 Shrnutí parametrů druhého prototypu

Parametr	Poznámka	Hodnota	Veličina
Hmotnost		280	g
Rozměry	Výška x šířka x hloubka	171x89x40	mm
Spotřeba	V zapnutém stavu	140	mA
	Ve vypnutém stavu	150	μA
Kapacita baterie		3000	mAh
Měřená kapacita	Minimální	10	nF
	Maximální	100	μF
Max. teplota termočlánku	Typ K, relativní vůči tělu multimetru	720	°C
Počet součástek	Celkový	165	-
	Unikátních	41	-
Odhadovaná cena součástek		800	Kč

## 9. ZÁVĚR

Na základě popsané teorie a analýzy existujících řešení byl v páté kapitole navržen první prototyp, založený na mikrokontroléru STM32G473 a 24bitovém  $\Sigma\Delta$  převodníku AD typu ADS131A04. Po vyrobení a zběžném otestování byly provedeny nutné změny na druhém prototypu, který byl následně vyroben a otestován. Výsledky testování druhého prototypu jsou shrnuty v osmé kapitole.

Výsledné zařízení je schopné měřit napětí v 5 rozsazích a proud ve 4. Firmware umožňuje přepínat rozsahy manuálně či automaticky. Firmware je také počítána hodnota RMS a ST napětí a frekvence měřeného signálu. Dále je možné zároveň měřit napětí i proud a zobrazovat výkon, měřit odpor v 6 rozsazích, kapacitu v 5 rozsazích a teplotu termočlánku typu K až do 720 °C vůči tělu multimetru. Kalibrace pro měření napětí a proudu je uložena v paměti EEPROM, spolu s datem a teplotou při kalibraci. V rámci práce byla také navržena a vytištěna krabička na 3D tiskárně.

Hlavní přínos práce spočívá v návrhu elektronicky ovladatelné analogové vstupní části, schopné měřit přes 5, resp. 4 dekády a dále v návrhu firmwaru, schopného z rychlé série dat z převodníku vypočítat vícero parametrů signálu. Jednotlivé body zadání jsou tedy považovány za splněné.

Uživatel zařízení ovládá pomocí 8 tlačítek, data se zobrazují na LCD panelu s rozlišením 240x120. Uživatel může přepínat měřenou veličinu, rozsah, způsob zobrazení, vzorkovací frekvenci, zmrazit displej či zapnout režim relativního měření. Alternativně je možné získat měřené údaje pomocí galvanicky izolovaného rozhraní USB či je ukládat na SD kartu.

Změřená přesnost napětí a proudu se až na jedinou výjimku pohybuje v rozsahu  $\pm 1\%$ , což je na měřicí přístroj poměrně slabé, nicméně vzhledem k velmi podobnému tvaru křivek přesnosti a relativně malému šumu na vstupu by se tato nepřesnost pravděpodobně dala odstranit lepší kalibrací, např. tříbodovou.

Předmětem dalšího vývoje by mohlo být nahrazení aktuálně použitého mikrokontroléru výkonnějším, například z řady STM32F7, což by umožnilo lépe zpracovávat data při vzorkovací frekvenci 128 kHz. Dále by bylo vhodné vylepšit způsob kalibrace či odstranit nelinearity ze vstupní analogové části. Firmware by pak bylo možné implementovat měření např. minima, maxima a standardní odchylky signálu, měření signálu v dB, počítat účinník při měření výkonu či implementovat režim záznamníku dat, kdy by se zařízení samo probudilo z režimu spánku, provedlo určité měření, uložilo výsledek a opět se uvedlo do režimu spánku.

## Citovaná literatura

- [1] Fluke Corporation. The history of the multimeter: Galvanometer to Digital Multimeter. *fluke.com*. [Online] 30. 09 2021. [Citace: 03. 12 2021.] <https://www.fluke.com/en/learn/blog/digital-multimeters/multimeter-history>.
- [2] A Century of Innovation - The History of the Multimeter. *hausoftools.com*. [Online] 11. 02 2021. [Citace: 03. 12 2021.] <https://hausoftools.com/blogs/news/a-century-of-innovation-the-history-of-the-multimeter>.
- [3] OWON technologies CO.,LTD. OWON OW18B 3 5/6 Smart Digital Multimeter. *owontechnology.eu*. [Online] neznámý. [Citace: 10. 12 2021.] <https://www.owontechnology.eu/product/1361022/owon-ow18b-3-5-6-smart-digital-multimeter>.
- [4] Conrad Electronic Česká republika, s.r.o. Digitální OLED multimetr VC-890. *voltcraft.cz*. [Online] neznámý. [Citace: 10. 12 2021.] <http://www.voltcraft.cz/digitalni-oled-multimetr-vc-890.k124600>.
- [5] Doc. Ing. Lubomír Brančík, CSc. Elektrotechnika 1 - přednášky. *Vysoké učení technické v Brně*. [Online] neznámý. [Citace: 27. 11 2021.] [https://www.vut.cz/www\\_base/priloha\\_fs.php?dpid=19318&skupina=dokument\\_priloha](https://www.vut.cz/www_base/priloha_fs.php?dpid=19318&skupina=dokument_priloha).
- [6] Fluke Corporation. What is true-RMS? *fluke.com*. [Online] 29. 10 2021. [Citace: 04. 12 2021.] <https://www.fluke.com/en/learn/blog/electrical/what-is-true-rms>.
- [7] Šedivá, Soňa. *Měření v elektrotechnice - prezentace z přednášek*. [online] Brno : VUT v Brně, 2021.
- [8] —. Laboratorní cvičení č. 2 – Měření napětí - stejnosměrné a střídavé voltmetry. *Detail předmětu - Měření v elektrotechnice*. [Online] VUT v Brně, 2021. [Citace: 04. 12 2021.] [https://www.vut.cz/www\\_base/priloha\\_fs.php?dpid=209386&skupina=dokument\\_priloha](https://www.vut.cz/www_base/priloha_fs.php?dpid=209386&skupina=dokument_priloha).
- [9] Texas Instruments Incorporated. TIDA-00879 reference design. *ti.com*. [Online] neznámý. [Citace: 09. 12 2021.] <https://www.ti.com/tool/TIDA-00879>.
- [10] —. Highly Integrated, 4½ Digit, Low-Power Handheld Digital Multimeter (DMM) Platform Reference Design. *ti.com*. [Online] neznámý. 01 2017. [Citace: 09. 12 2021.] <https://www.ti.com/lit/ug/tidubm4a/tidubm4a.pdf>.
- [11] —. TIDA-01012 reference design. *ti.com*. [Online] neznámý. [Citace: 09. 12 2021.] <https://www.ti.com/tool/TIDA-01012>.
- [12] —. Wireless IoT, Bluetooth® Low Energy, 4½ Digit, 100-kHz True RMS Digital Multimeter Reference Design. *ti.com*. [Online] 06 2017. [Citace: 09. 12 2021.] <https://www.ti.com/lit/ug/tidubv5b/tidubv5b.pdf>.
- [13] Kotlar, Denis. BB3 base chassis. *Envox Experimental Zone*. [Online] neznámý. [Citace: 12. 09 2021.] <https://www.envox.eu/eez-bb3/>.



- [14] —. DIB MIO168 AFE1. *Envox Experimental Zone*. [Online] neznámý. [Citace: 12. 09 2021.] <https://www.envox.eu/eez-bench-box-3/dib-mio168-afe1/>.
- [15] VISHAY INTERTECHNOLOGY. DG211B, DG212B Improved Quad CMOS Analog Switches. *vishay.com*. [Online] 08. 02 2017. [Citace: 09. 12 2021.] <https://www.vishay.com/docs/70040/70040.pdf>.
- [16] Beev, Nikolai. OPT ADC 10k 32b 1cha (HPM7177). *ohwr.org*. [Online] 08. 12 2021. [Citace: 11. 12 2021.] <https://ohwr.org/project/opt-adc-10k-32b-1cha/wikis/home>.
- [17] —. HPM7177 ADC Mezzanine. *edms.cern.ch*. [Online] 17. 11 2021. [Citace: 11. 12 2021.] [https://edms.cern.ch/ui/file/2663359/1/EDA-04061-V4-0\\_sch.pdf](https://edms.cern.ch/ui/file/2663359/1/EDA-04061-V4-0_sch.pdf). EDA-04061-V4-0.
- [18] Daněk, Martin. MY OPEN SOURCE MULTIMETER – FINAL REVISION. *embedblog.eu*. [Online] 30. 09 2019. [Citace: 11. 12 2021.] <http://embedblog.eu/?p=438>.
- [19] Horowitz, Paul a Winfield, Hill. *The Art of Electronics, 3rd Edition*. New York : Cambridge University Press, 2016. 978-0-521-80926-9.
- [20] Microcontroller Division Applications. UNDERSTANDING AND MINIMISING ADC CONVERSION. *st.com*. [Online] 2003. [Citace: 09. 11 2021.] [https://www.st.com/resource/en/application\\_note/cd00004444-understanding-and-minimising-adc-conversion-errors-stmicroelectronics.pdf](https://www.st.com/resource/en/application_note/cd00004444-understanding-and-minimising-adc-conversion-errors-stmicroelectronics.pdf). AN1636/0603.
- [21] Texas Instruments Incorporated. ADS131A0x 2- or 4-Channel, 24-Bit, 128-kSPS, Simultaneous-Sampling, Delta-Sigma ADC datasheet. *ti.com*. [Online] 6 2020. [Citace: 09. 11 2021.] [https://www.ti.com/lit/ds/symlink/ads131a04.pdf?ts=1636417928272&ref\\_url=https%253A%252F%252Fwww.ti.com%252Fproduct%252FADS131A04](https://www.ti.com/lit/ds/symlink/ads131a04.pdf?ts=1636417928272&ref_url=https%253A%252F%252Fwww.ti.com%252Fproduct%252FADS131A04).
- [22] Jones, Dave. *EEVblog 1382 - Keysight EDU34450A 5.5 digit Bench Multimeter TEARDOWN*. [YouTube] Sydney : EEVblog, 2021.
- [23] Panasonic Corporation. Panasonic. *PhotoMOS GE 1 Form A*. [Online] 2019. [Citace: 31. 10 2021.] [https://www3.panasonic.biz/ac/e\\_download/control/relay/photomos/catalog/semi\\_eng\\_ge1a\\_aqy21\\_e.pdf](https://www3.panasonic.biz/ac/e_download/control/relay/photomos/catalog/semi_eng_ge1a_aqy21_e.pdf). ASCTB65E.
- [24] BIALL Sp. z o.o. BM869s. *Brymen*. [Online] [Citace: 31. 10 2021.] [https://brymen.eu/wp-content/uploads/biall/102092/102092.KARTA\\_EN..2015-07-09.1.pdf](https://brymen.eu/wp-content/uploads/biall/102092/102092.KARTA_EN..2015-07-09.1.pdf).
- [25] Mosaic Industries, Inc. Measuring Temperature. *Mosaic Documentation Web*. [Online] Mosaic Industries, Inc., neznámý. [Citace: 04. 11 2021.] <http://www.mosaic-industries.com/embedded-systems/microcontroller-projects/temperature-measurement/microcontroller>.
- [26] Maxim Integrated Products, Inc. MAX31856. *Maxim Integrated*. [Online] 02 2015. [Citace: 04. 11 2021.] <https://datasheets.maximintegrated.com/en/ds/MAX31856.pdf>.

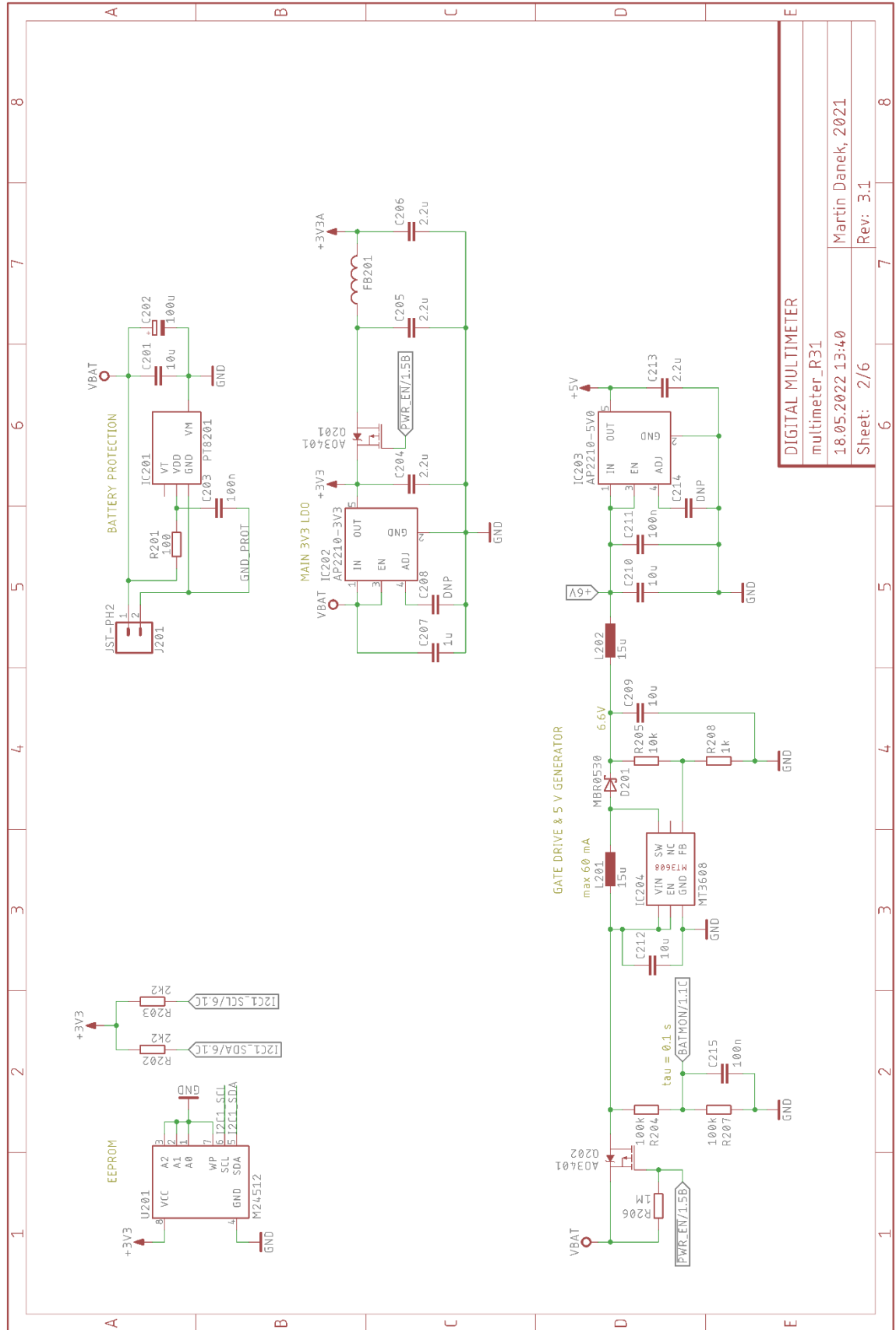
- [27] Analog Devices, Inc. CN-0384 (Rev. A). *analog.com*. [Online] 07 2017. [Citace: 04. 11 2021.] <https://www.analog.com/media/en/reference-design-documentation/reference-designs/CN0384.pdf>.
- [28] Epec, LLC. Battery Comparison of Energy Density . *epectec.com*. [Online] [Citace: 26. 11 2021.] <https://www.epectec.com/batteries/cell-comparison.html>.
- [29] Maxim Integrated Products. MAX865 Compact, Dual-Output Charge Pump. *Maxim Integrated*. [Online] 1997. [Citace: 17. 11 2021.] <https://datasheets.maximintegrated.com/en/ds/MAX865.pdf>.
- [30] Texas Instruments Incorporated. TS5A3359 1- $\Omega$  SP3T Bidirectional Analog Switch 5-V/3.3-V Single-Channel 3:1 Multiplexer and Demultiplexer. *ti.com*. [Online] 01 2016. [Citace: 22. 11 2021.] <https://www.ti.com/lit/ds/symlink/ts5a3359.pdf>.
- [31] Fluke Corporation. Dual impedance digital multimeters. *Fluke*. [Online] 09. 05 2021. [Citace: 22. 11 2021.] <https://www.fluke.com/en-us/learn/blog/digital-multimeters/dual-impedance-digital-multimeters>.
- [32] Texas Instruments Incorporated. OPAx376 Low-Noise, Low Quiescent Current, Precision Operational Amplifier. *ti.com*. [Online] 2021. [Citace: 17. 11 2021.] <https://www.ti.com/lit/ds/symlink/opa376.pdf>.
- [33] Josefsson, Oli. Using Sigma-Delta Converters, Part 1. *Analog Devices*. [Online] 1994. [Citace: 27. 11 2021.] <https://www.analog.com/en/analog-dialogue/articles/using-sigma-delta-converters-1.html>.
- [34] STMicroelectronics. Datasheet - STM32G473xB STM32G473xC STM32G473xE . *st.com*. [Online] 11 2021. [Citace: 20. 11 2021.] <https://www.st.com/resource/en/datasheet/stm32g473vc.pdf>. DS12712.
- [35] IDSUK. 10 Common LCD, OLED and TFT Display Questions. *rs-online.com*. [Online] 20. 4 2021. [Citace: 20. 11 2021.] <https://www.rs-online.com/designspark/10-common-lcd-oled-and-tft-display-questions>.
- [36] Daněk, Martin. *Návrh a realizace USB osciloskopu*. Brno : Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, 2020.
- [37] Yiu, Joseph. A Beginner's Guide on Interrupt Latency - and Interrupt Latency of the Arm Cortex-M processors. *Am Community*. [Online] 1. 4 2016. [Citace: 20. 04 2022.] <https://community.arm.com/arm-community-blogs/b/architectures-and-processors-blog/posts/beginner-guide-on-interrupt-latency-and-interrupt-latency-of-the-arm-cortex-m-processors>.
- [38] ARM Limited. Cortex-M4(F) Lazy Stacking and Context Switching - Application Note 298. *Arm Developer*. [Online] 16. 3 2012. [Citace: 20. 4 2022.] <https://developer.arm.com/documentation/dai0298/a/>.
- [39] National Institute of Standards and Technology. ITS-90 Table for Thermocouples. *srdata.nist.gov*. [Online] 7. 4 2008. [Citace: 24. 4 2022.] [https://srdata.nist.gov/its90/type\\_k/kcoefficients\\_inverse.html](https://srdata.nist.gov/its90/type_k/kcoefficients_inverse.html).

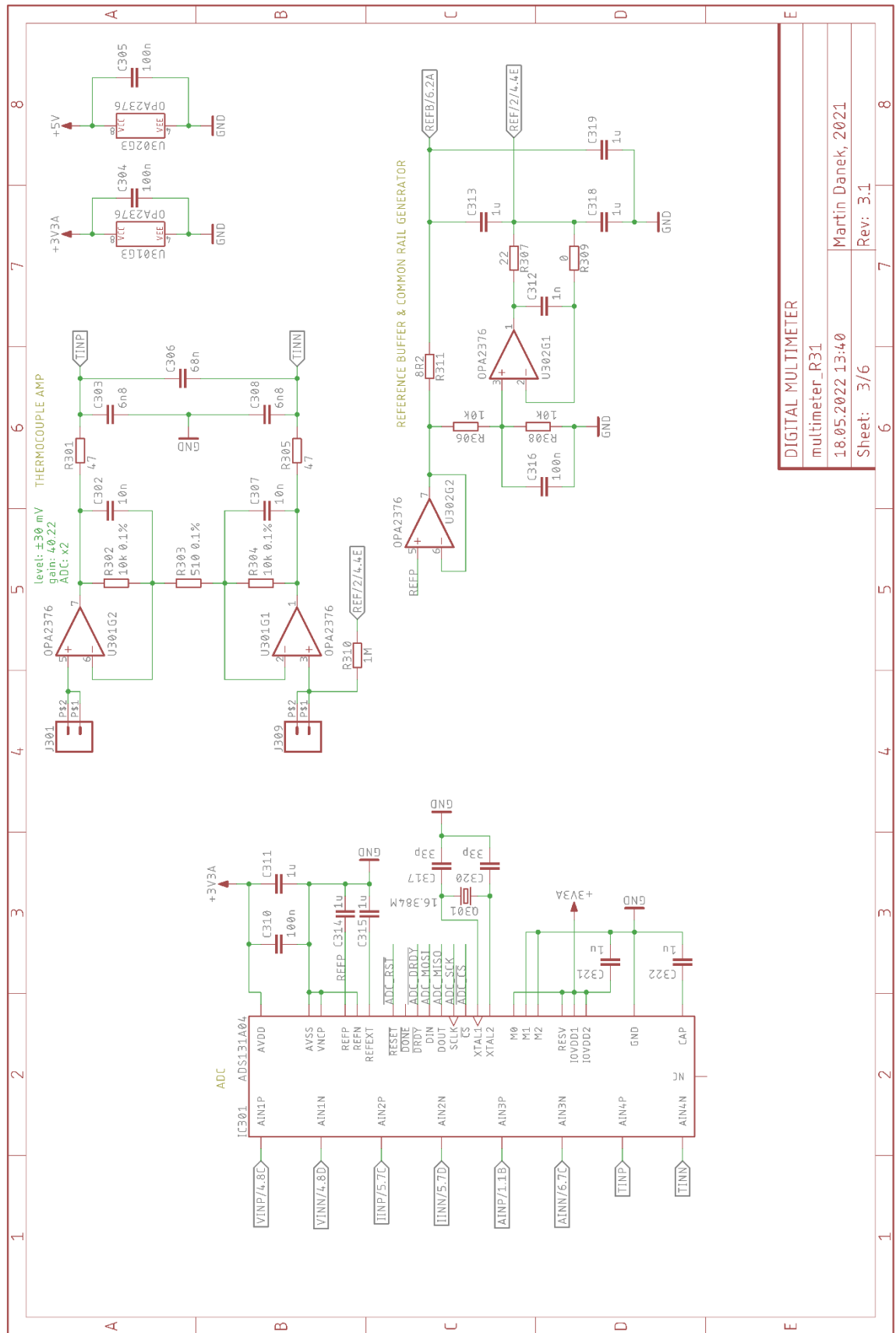
- [40] Fried, Limor. Adafruit GFX Library. *github.com*. [Online] 2012. [Citace: 22. 4 2022.] <https://github.com/adafruit/Adafruit-GFX-Library>.
- [41] Aerosemi Technology Co., Ltd. MT3608. *olimex.com*. [Online] neznámý. [Citace: 6. 5 2022.] <https://www.olimex.com/Products/Breadboarding/BB-PWR-3608/resources/MT3608.pdf>.
- [42] Diodes Incorporated. AP2210. *diodes.com*. [Online] 3 2021. [Citace: 10. 5 2022.] <https://www.diodes.com/assets/Datasheets/AP2210.pdf>.

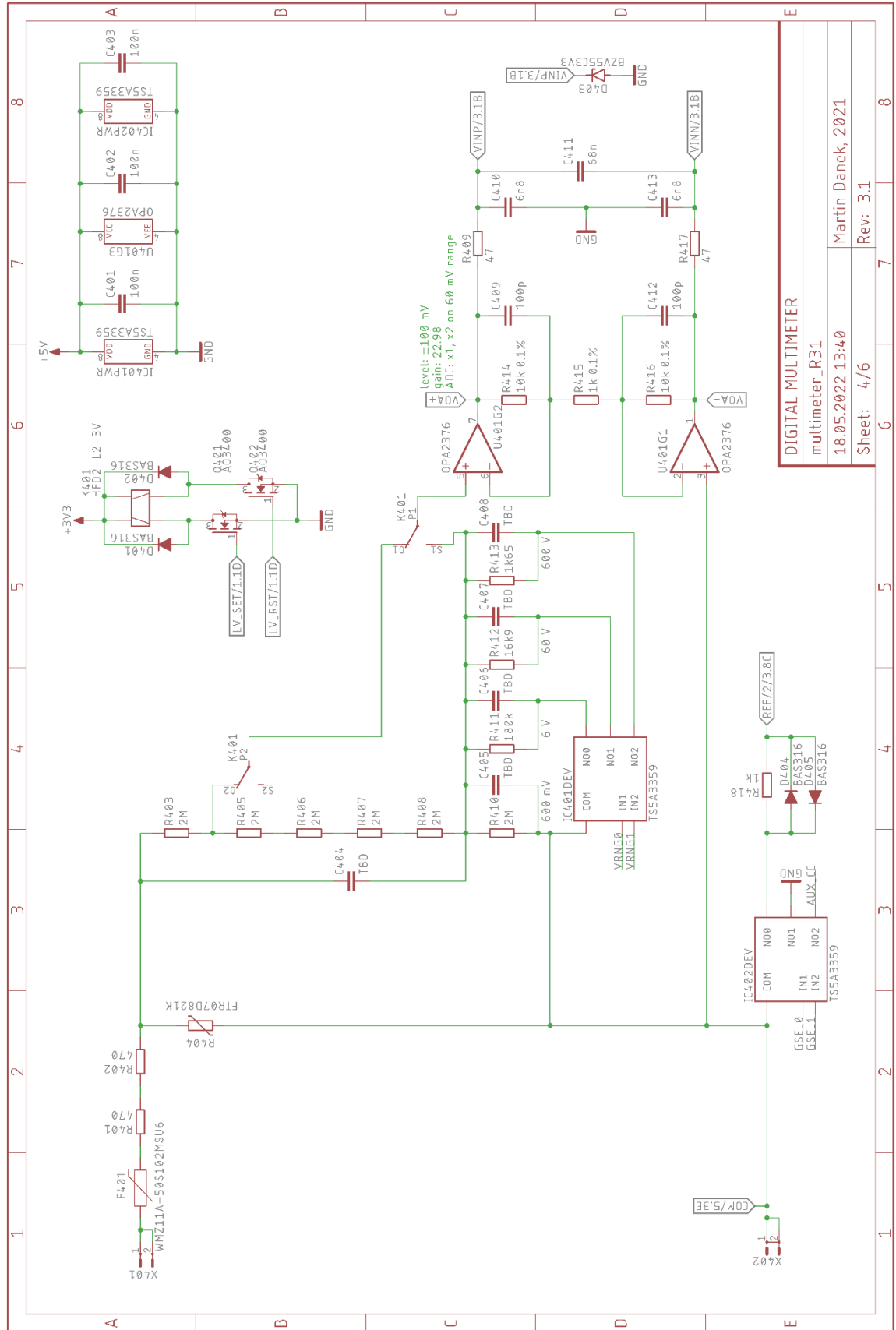
## SEZNAM PŘÍLOH

PŘÍLOHA A - SCHÉMA HLAVNÍ DESKY .....	77
PŘÍLOHA B - DPS HLAVNÍ DESKY .....	83
PŘÍLOHA C - SCHÉMA DESKY S DISPLEJEM .....	87
PŘÍLOHA D - DPS DESKY S DISPLEJEM.....	88

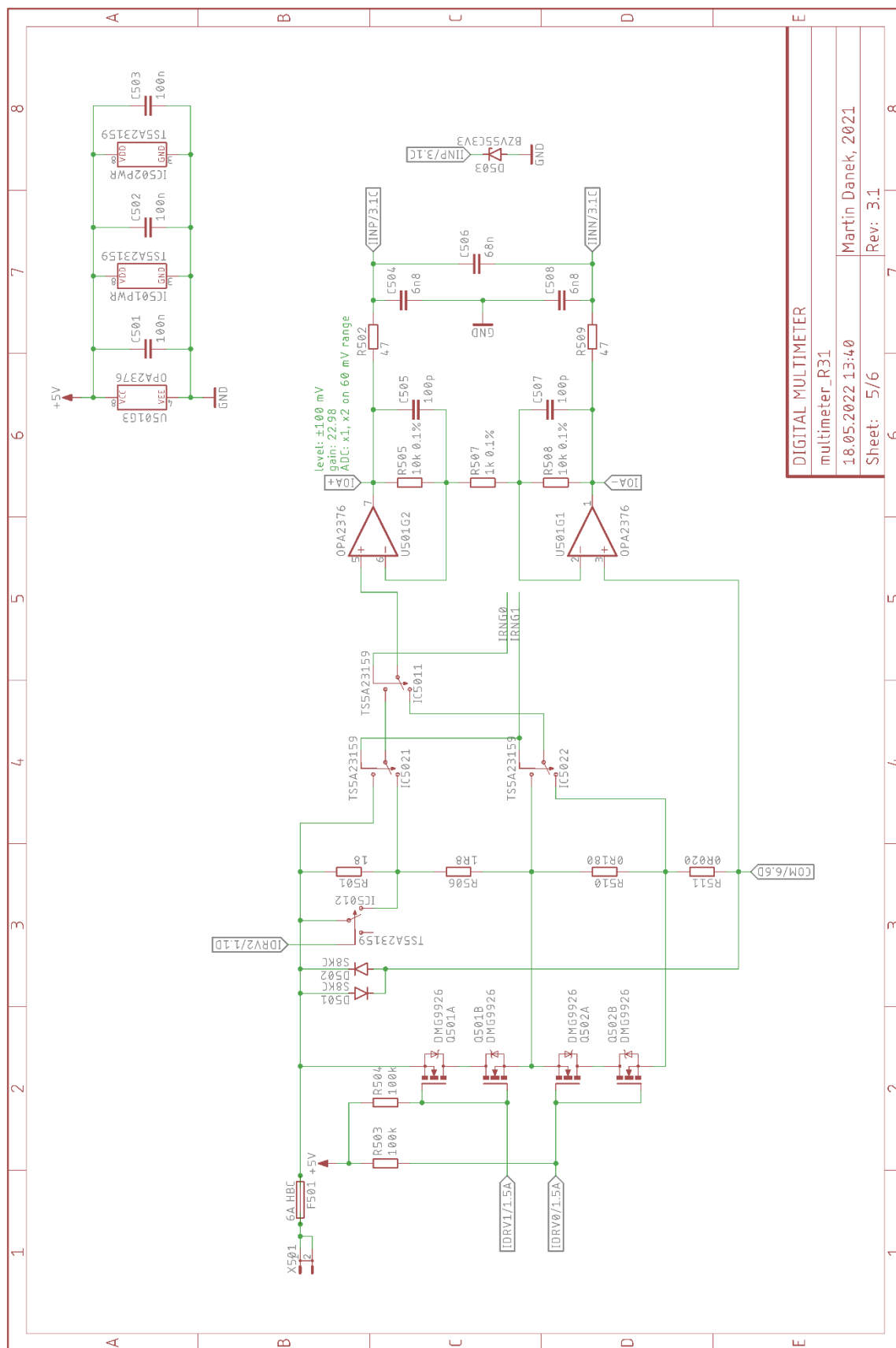
[illegible]





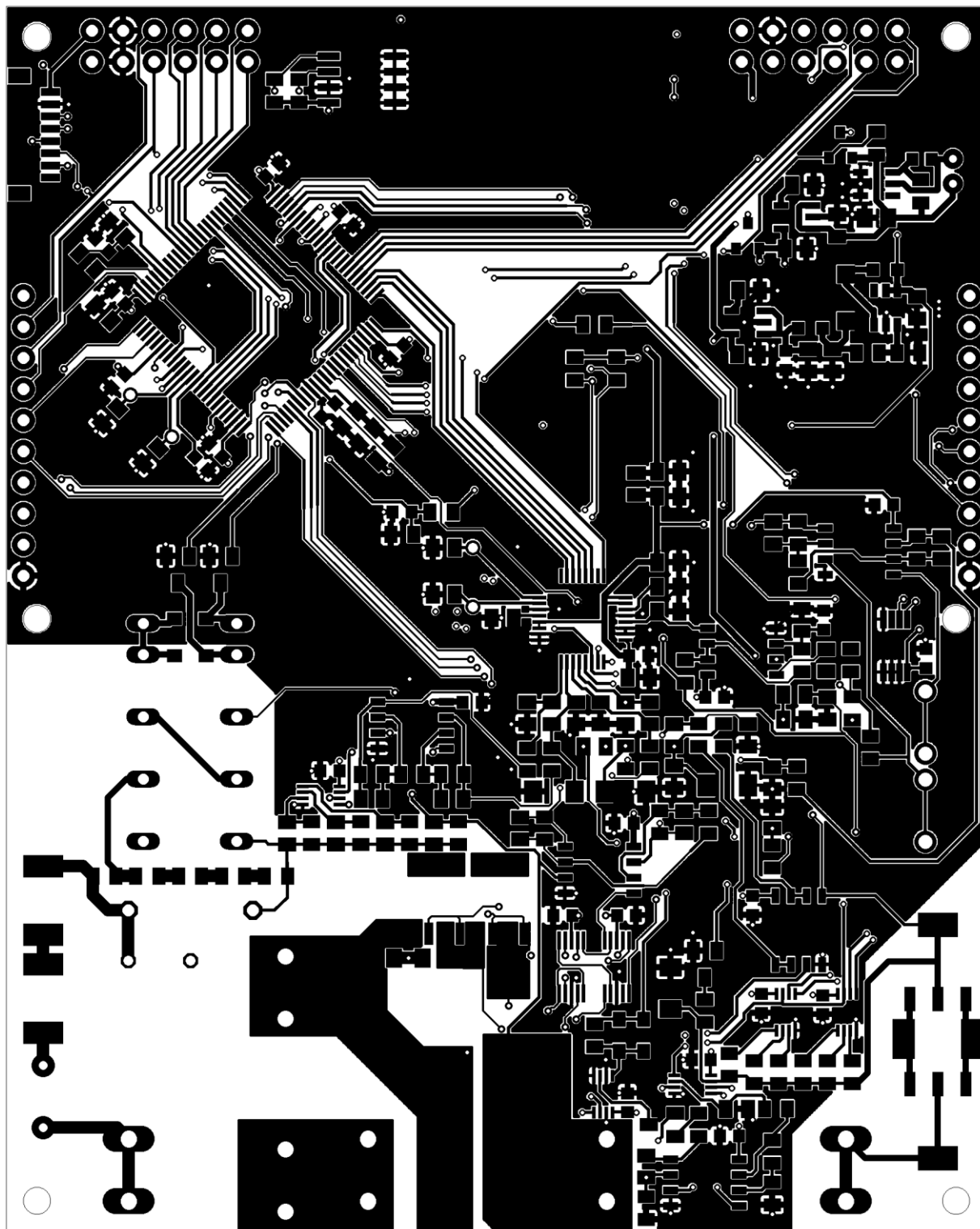




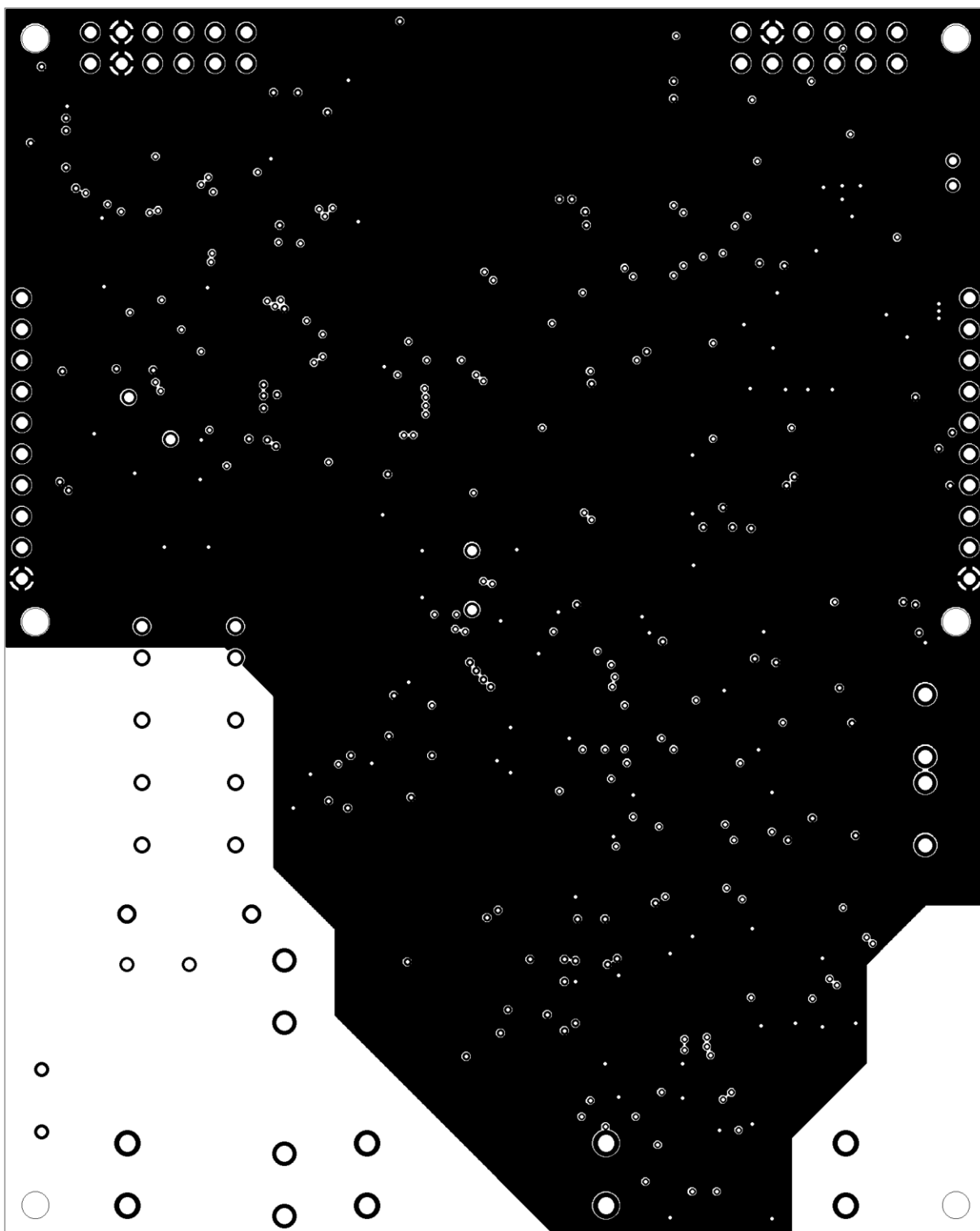




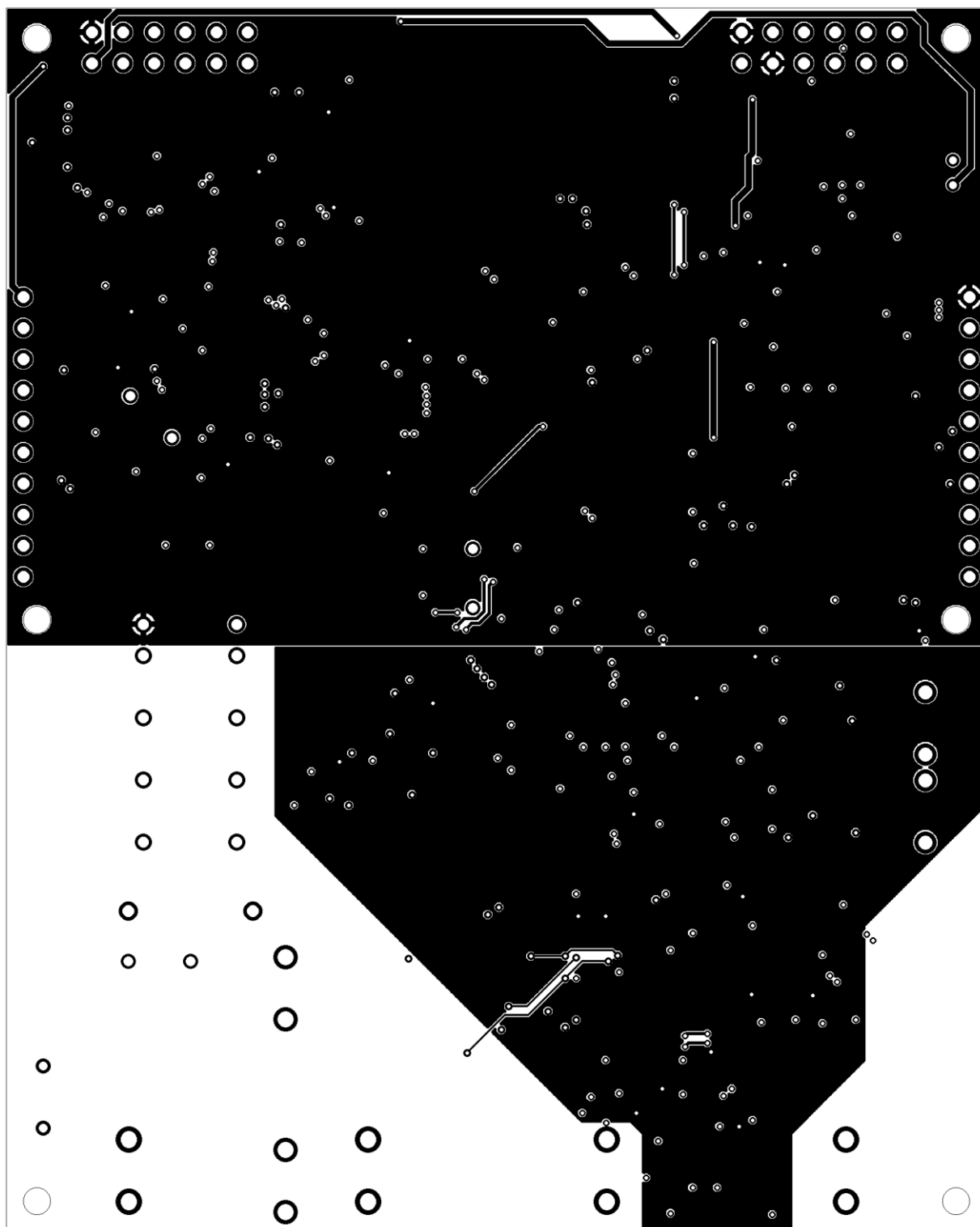
## Příloha B - DPS hlavní desky



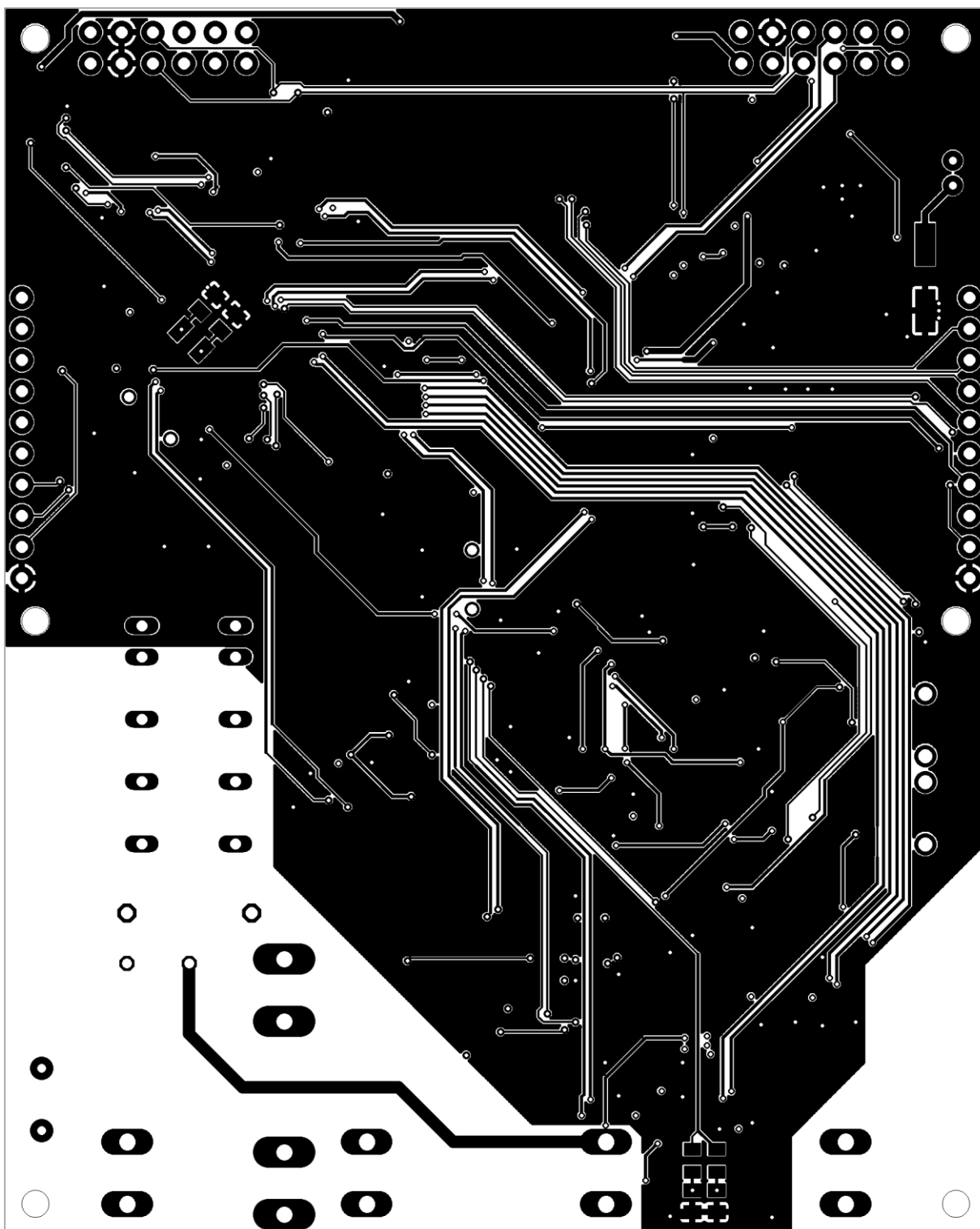
Vrstva top, rozměr desky 80 x 100 mm, měřítko M2:1.



Vrstva cu1, rozměr desky 80 x 100 mm, měřítko M2:1.



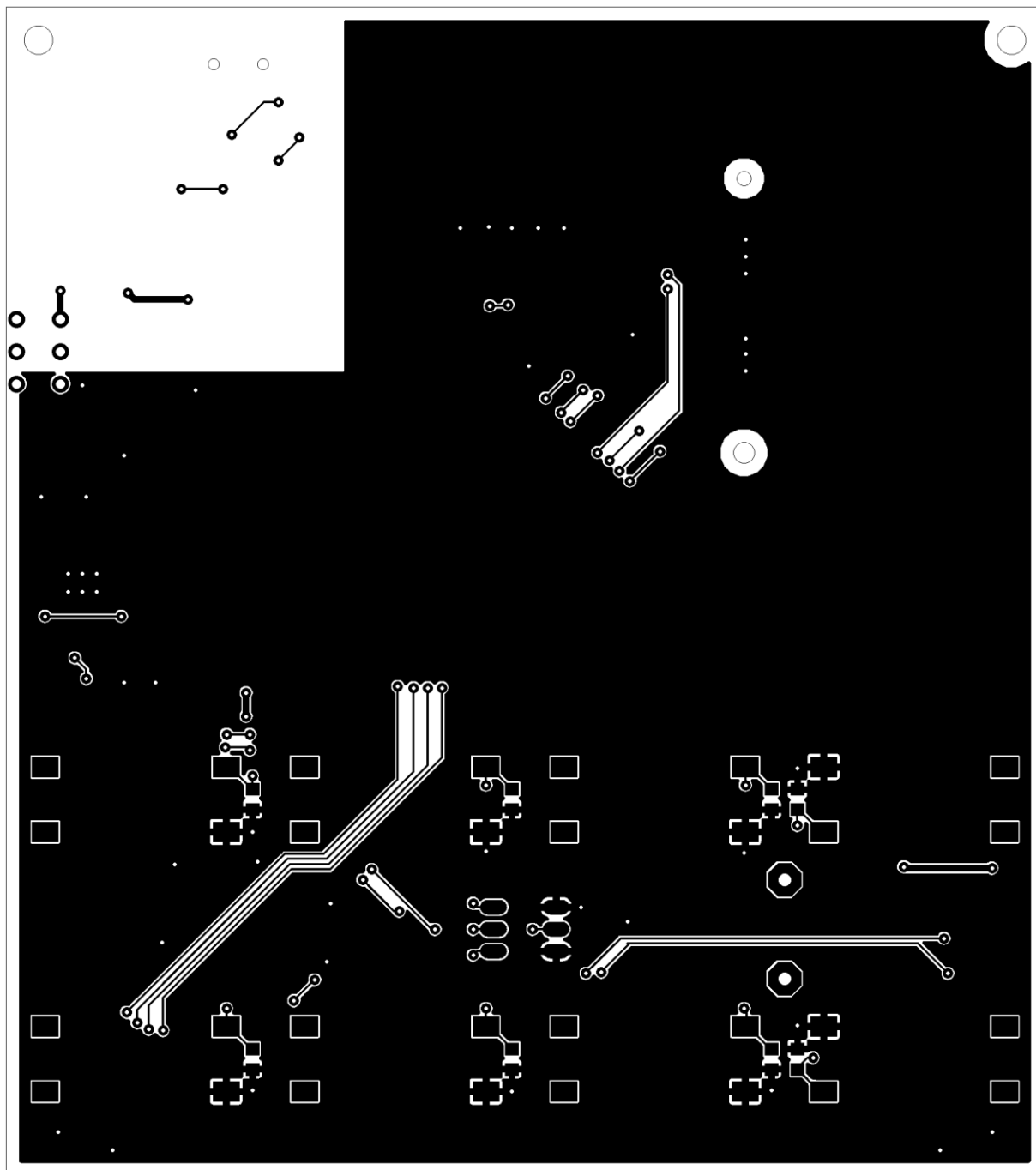
Vrstva cu2, rozměr desky 80 x 100 mm, měřítko M2:1.



Vrstva bottom, rozměr desky 80 x 100 mm, měřítko M2:1.

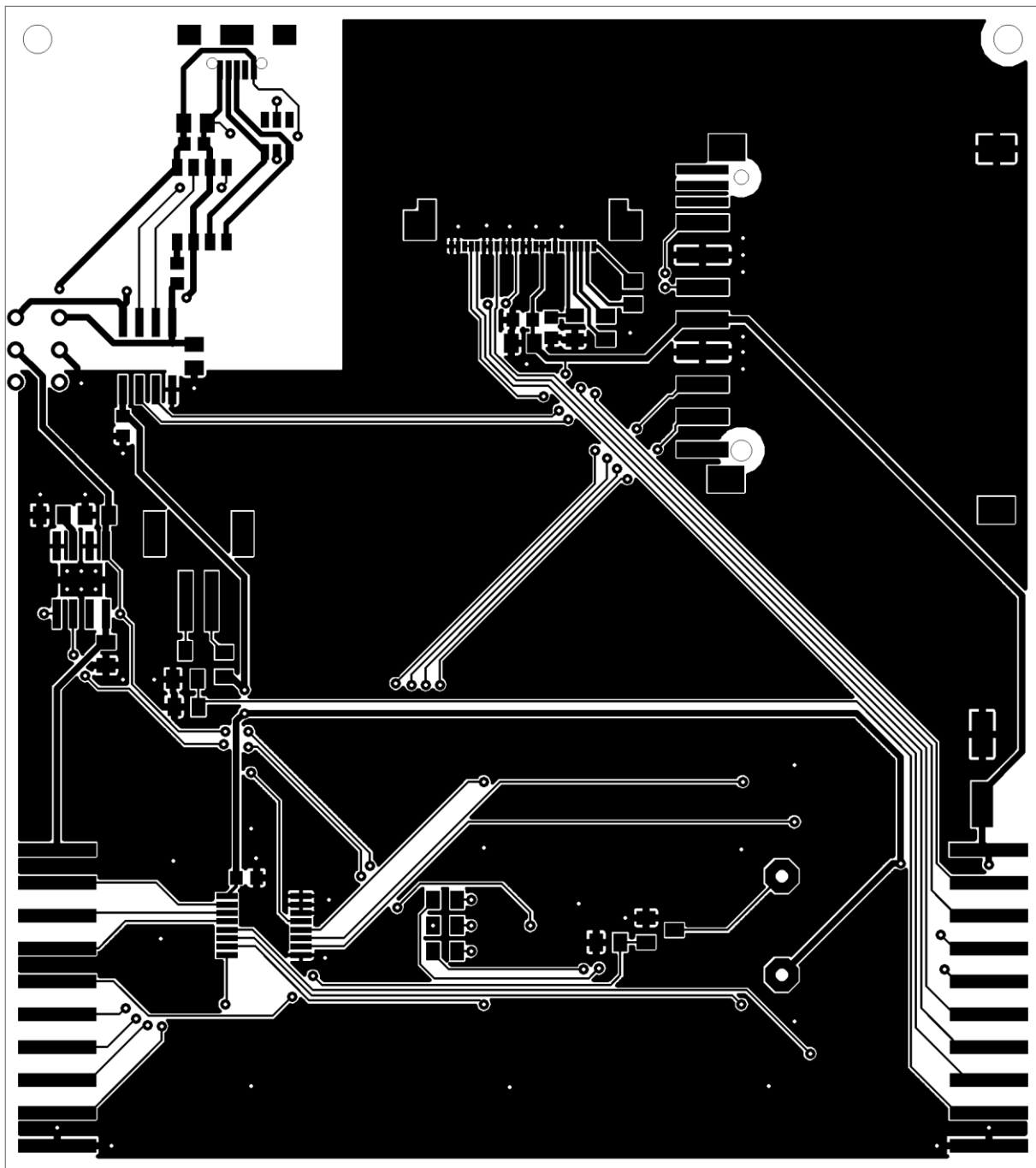


## Příloha D - DPS desky s displejem



Vrstva top, rozměr desky 80 x 90 mm, měřítko M2:1.





Vrstva bottom, rozměr desky 80 x 90 mm, měřítko M2:1.