

Bakalářská práce



České  
vysoké  
učení technické  
v Praze

**F3**

Fakulta elektrotechnická

## Řízená elektronická zátěž s mikrokontrolerem

Vojtěch Tecl

Školitel: Ing. Jan Novák, Ph.D.  
Obor: Kybernetika a robotika  
Květen 2023



## I. OSOBNÍ A STUDIJNÍ ÚDAJE

Příjmení: **Tecl** Jméno: **Vojtěch** Osobní číslo: **495662**  
Fakulta/ústav: **Fakulta elektrotechnická**  
Zadávací katedra/ústav: **Katedra měření**  
Studijní program: **Kybernetika a robotika**

## II. ÚDAJE K BAKALÁŘSKÉ PRÁCI

Název bakalářské práce:

**Řízená elektronická zátěž s mikrokontrolerem**

Název bakalářské práce anglicky:

**Microcontroller Based Electronic Load**

Pokyny pro vypracování:

- 1) Seznamte se s metodami řešení stejnosměrné elektronické zátěže.
- 2) Prostudujte možnost řízení zátěže v režimech konstantního proudu (CC), konstantního napětí (CV) a konstantního odporu (CR).
- 3) Navrhněte zapojení elektronické zátěže s následujícími parametry: maximální proud 3 A, rozsah napětí 1 V - 30 V, maximální výkon 80 W. Zařízení doplňte o zobrazovací jednotku, kde budou zobrazovány nastavené parametry a aktuální naměřené hodnoty.
- 4) Zapojení realizujte ve formě funkčního vzorku.
- 5) Proveďte ověřovací měření.
- 6) Zhodnoťte dosažené výsledky a navrhněte případná rozšíření.

Seznam doporučené literatury:

- [1] HAASZ, V., SEDLÁČEK, M., Elektronická měření Přístroje a metody. 2. vydání. Praha: Nakladatelství ČVUT, 2005, s. 337, ISBN 80-01-02731-7.
- [2] KREJČÍŘÍK, A., Napájecí zdroje I. Nakladatelství BEN, 2010, ISBN 978-80-7300-294-7.
- [3] STRAŠIL, I., Přesná elektronická zátěž. [online] <https://www.egmenergo.cz/pub/files/zatez-dokumentace.pdf>.

Jméno a pracoviště vedoucí(ho) bakalářské práce:

**Ing. Jan Novák, Ph.D. katedra mikroelektroniky FEL**

Jméno a pracoviště druhé(ho) vedoucí(ho) nebo konzultanta(ky) bakalářské práce:

Datum zadání bakalářské práce: **07.02.2023**

Termín odevzdání bakalářské práce: **26.05.2023**

Platnost zadání bakalářské práce:

**do konce letního semestru 2023/2024**

Ing. Jan Novák, Ph.D.  
podpis vedoucí(ho) práce

podpis vedoucí(ho) ústavu/katedry

prof. Mgr. Petr Páta, Ph.D.  
podpis děkana(ky)

## III. PŘEVZETÍ ZADÁNÍ

Student bere na vědomí, že je povinen vypracovat bakalářskou práci samostatně, bez cizí pomoci, s výjimkou poskytnutých konzultací. Seznam použité literatury, jiných pramenů a jmen konzultantů je třeba uvést v bakalářské práci.

\_\_\_\_\_ Datum převzetí zadání

\_\_\_\_\_ Podpis studenta



## Poděkování

Děkuji vedoucímu bakalářské práce Ing. Janu Novákovi, Ph.D. za pomoc, cenné rady a ochotu během návrhu a vypracování této bakalářské práce. Dále děkuji všem svým blízkým, kteří mě při práci podporovali a pomáhali, zejména svým rodičům a Barboře Havránkové, která mi poskytla zpětnou vazbu k této práci.

## Prohlášení

Prohlašuji, že jsem předloženou práci vypracoval samostatně a že jsem uvedl veškeré použité informační zdroje v souladu s Metodickým pokynem o dodržování etických principů při přípravě vysokoškolských závěrečných prací.

V Praze dne .....

.....  
Vojtěch Tecl

## Abstrakt

Tato bakalářská práce se zabývá návrhem a realizací stejnosměrné elektronické zátěže s mikrokontrolérem. Rozebírá princip a režimy elektronické zátěže. Popisuje a vysvětluje výběr konstrukčních prvků použitých při realizaci zátěže. Na konci práce je ověřena funkčnost zařízení kontrolním měřením.

**Klíčová slova:** Elektronická zátěž, mikrokontrolér, tranzistor, operační zesilovač, AD převodník, DA převodník, bočník

**Školitel:** Ing. Jan Novák, Ph.D.  
FEL  
Praha 6, Technická 2

## Abstract

This bachelor's thesis deals with the design and implementation of a DC electronic load with a microcontroller. It discusses the principle and modes of the electronic load. It describes and explains the selection of design elements used in the implementation of the load. At the end of the work, the device's functionality is verified by check measurements.

**Keywords:** Electronic load, microcontroller, transistor, operational amplifier, AD converter, DA converter, shunt

**Title translation:** Microcontroller Based Electronic Load

## Obsah

<b>1 Úvod</b>	<b>1</b>	<b>6 Závěr</b>	<b>49</b>
<b>2 Rozdělení elektronických zátěží</b>	<b>3</b>	<b>Literatura</b>	<b>51</b>
<b>3 Princip stejnosměrné elektronické zátěže</b>	<b>5</b>	<b>A Schéma elektronické zátěže</b>	<b>53</b>
3.1 Tranzistor	6	<b>B Osazení DPS elektronické zátěže</b>	<b>59</b>
3.1.1 Bipolární tranzistor	6	<b>C Rozvržení DPS elektronické zátěže</b>	<b>63</b>
3.1.2 Tranzistor typu MOSFET	6	<b>D Seznam elektronických příloh</b>	<b>67</b>
3.1.3 Tranzistor typu IGBT	7		
3.2 Režimy elektronické zátěže	7		
3.2.1 Konstantní proud (CC)	7		
3.2.2 Konstantní napětí (CV)	7		
3.2.3 Konstantní odpor (CR)	8		
3.2.4 Konstantní výkon (CP)	8		
<b>4 Návrh elektronické zátěže</b>	<b>9</b>		
4.1 Analogová část	10		
4.1.1 Napájecí obvod	10		
4.1.2 Zesilovač odchylky MCP609	10		
4.1.3 Tranzistor IPP12CN10L G	12		
4.1.4 Napěťová reference TL431	13		
4.1.5 DA převodník MCP4922	13		
4.1.6 AD převodník	13		
4.1.7 Měření napětí	14		
4.1.8 Měření proudu	15		
4.1.9 Ochranný obvod	17		
4.1.10 Chlazení	19		
4.2 Digitální část	20		
4.2.1 Mikrokontrolér SAM21E17A-A	20		
4.2.2 Tlačítka	21		
4.2.3 Rotační enkodér	21		
4.2.4 Displej	22		
4.3 Simulace	23		
4.3.1 Režim CC	23		
4.3.2 Režim CV	26		
<b>5 Realizace elektronické zátěže</b>	<b>29</b>		
5.1 Mechanická konstrukce	29		
5.1.1 Deska plošných spojů	29		
5.2 Firmware	30		
5.3 Kalibrace	36		
5.4 Testování	36		
5.5 Kontrolní měření	36		
5.5.1 Režim CC	37		
5.5.2 Režim CV	39		
5.5.3 Režim CR	42		
5.5.4 Shrnutí kontrolního měření	45		

## Seznam symbolů

U	Elektrické napětí
I	Elektrický proud
P	Výkon
DAC	Kódové slovo DA převodníku
ADC	Kódové slovo AD převodníku
FS	Plný rozsah
N	Rozlišení
$T_J$	Teplota polovodičového přechodu
$R_{JC}$	Tepelný odpor mezi přechodem tranzistoru a jeho pouzdem
$R_{CH}$	Tepelný odpor mezi pouzdem tranzistoru a chladičem
$R_{HA}$	Tepelný odpor mezi chladičem a okolím
$T_A$	Teplota okolí
$ADC_{calib}$	Kódové slovo AD převodníku po kalibraci
$ADC_{meas}$	Změřené kódové slovo AD převodníku

## Seznam zkratk

CV	Režim konstantního napětí
CC	Režim konstantního proudu
CR	Režim konstantního odporu
CP	Režim konstantního výkonu
AD	Analogově-digitální
DA	Digitálně-analogový
LSB	Nejméně významný bit
NTC	Negistor
I2C	Inter-integrated circuit
SPI	Serial peripheral interface
DPS	Deska plošných spojů
SMD	Součástka pro povrchovou montáž plošných spojů
USB	Univerzální sériová sběrnice
Wi-Fi	Skupina bezdrátových síťových protokolů





# Kapitola 1

## Úvod

Elektronická zátěž patří mezi základní laboratorní přístroje. Používá se především k testování napájecích zdrojů, které dokáže zatížit podle nastavených parametrů a charakteru zátěže. Snadná nastavitelnost je hlavní důvod používání elektronických zátěží oproti reostatům, jež se rovněž využívají k zatěžování a testování napájecích zdrojů. Reostaty mají ovšem vždy odporový charakter, což značně omezuje jejich použití.

Řízená elektronická zátěž může disponovat několika režimy, mezi něž patří režim konstantního proudu (CC), konstantního napětí (CV), konstantního odporu (CR) a konstantního výkonu (CP). Jejich podrobné vysvětlení je uvedeno v sekci 3.2. Jako další běžná funkce bývá měření kapacity bateriových článků, při kterém lze nastavit vybíjecí proud a konečné napětí baterie. V neposlední řadě lze mnoho moderních elektronických zátěží připojit k osobnímu počítači a z něj ji ovládat, kontrolovat či zaznamenávat hodnoty.

Tato práce se zabývá návrhem a realizací stejnosměrné řízené elektronické zátěže s mikrokontrolérem s režimy CV, CC a CR. V módu CV lze napětí nastavit od 1 V do 30 V. Maximální proud zátěží jsou 3 A a maximální výkon je 80 W.





## Kapitola 2

### Rozdělení elektronických zátěží

Jedno z mnoha možných rozdělení elektronických zátěží je podle průběhu výstupního napětí testovaného zdroje. To může být buď stejnosměrné nebo střídavé.

Jiné dělení bere v potaz typ zatěžovaného prvku. V dnešní době je to nejčastěji polovodičový prvek, a to tranzistor, jehož výhoda spočívá ve velké flexibilitě. Tranzistor je použit jako akční člen regulované soustavy, která zajistí jeho správné otevírání či zavírání. Druhý typ zatěžovaného prvku je rezistor. Zpravidla jich je více zapojeno do tzv. odporové dekády, v níž je velikost výsledného odporu v případě elektronické zátěže přepínána elektronicky.



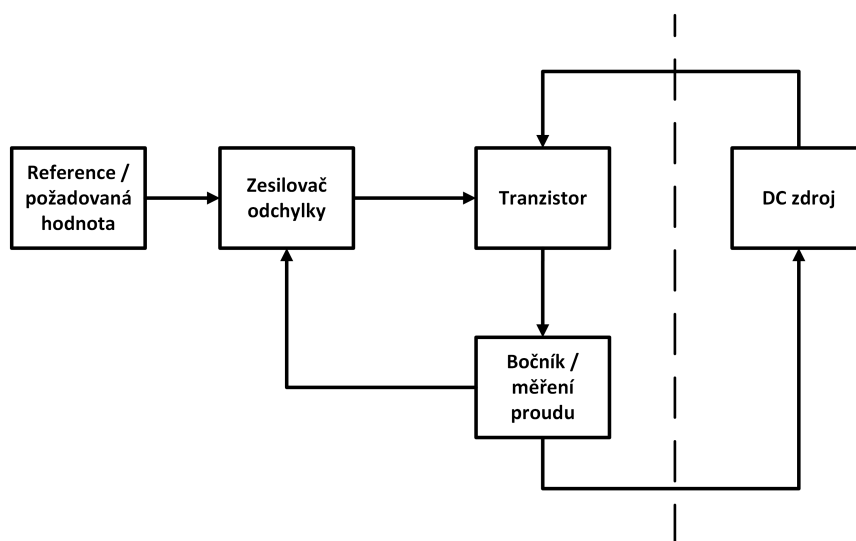
## Kapitola 3

### Princip stejnosměrné elektronické zátěže

Stejnosemřná elektronická zátěž s tranzistorem jako zatěžovaným prvkem řídí jeho otevírání či zavírání podle nastaveného režimu a požadované hodnoty. Regulovat lze vícero způsoby.

Jedním ze způsobů je regulace pouze pomocí softwaru mikrokontroléru, který podle změřeného napětí a proudu zátěží nastaví napětí na gate svorce řízeného tranzistoru. Napětí je možné nastavit bez použití DA převodníku změnami střídy PWM signálu, který je následně přiveden na filtr typu dolní propust [1]. Napětí na gate svorce tranzistoru lze nastavit i pomocí DA převodníku [2].

Častým způsobem regulace je řízení pomocí analogové regulační smyčky. Na obrázku 3.1 je příklad blokového schématu pro elektronickou zátěž v režimu konstantního proudu, jenž využívá takový způsob regulace. Tranzistor je ovládán zesilovačem odchyvky, který porovnává referenční hodnotu proudu (zadanou uživatelem) se skutečnou hodnotou měřenou pomocí bočníku. Tento přístup vyžaduje v normálním provozu minimální zásah mikrokontroléru, kterým je nastavení požadované hodnoty.

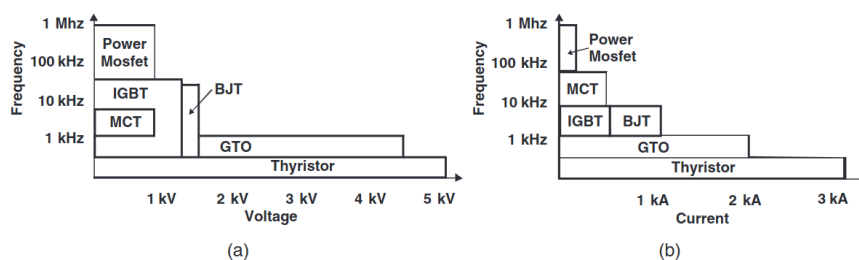


Obrázek 3.1: Blokové schéma elektronické zátěže - CC mód



### 3.1.3 Tranzistor typu IGBT

Tranzistor IGBT je zjednodušeně řečeno kombinace bipolárního a MOSFET tranzistoru. Jeho vstup má vysokou vstupní impedanci a je řízen napětím. V sepnutém stavu vzniká mezi kolektorem a emitorem téměř konstantní napětí. Je navržený pro spínání velmi vysokých napětí a proudů a není vhodný pro použití v lineárních aplikacích.



**Obrázek 3.2:** Pracovní režimy výkonových polovodičů; (a) napětí vs kmitočet (b) proud vs kmitočet [3]

## 3.2 Režimy elektronické zátěže

Odporová dekáda či reostat používané jako pasivní zátěže pracují pouze v režimu konstantního odporu. Pro náročnější testovací požadavky napájecích zdrojů je vhodnější volba elektronicky řízená zátěž nabízející nejčastěji režimy CC, CV, CR a CP [4].

### 3.2.1 Konstantní proud (CC)

Režim konstantního proudu je nejvíce používaný mód v elektronických zátěžích. Při tomto nastavení zátěž odebírá konstantní požadovaný proud z napájecího zdroje, typicky zdroje napětí. Tranzistor, jenž se chová jako proměnný odpor, je řízen takovým způsobem, že odebíraný proud se nemění v závislosti na vstupním napětí. Proud bývá měřen na proudovém bočníku, z nějž je vedena zpětná vazba do zesilovače odchylky. Právě úbytek napětí vzniklý na bočníku a na tranzistoru, který se v sepnutém stavu chová rovněž jako rezistor, omezuje vlivem protékajícího proudu použití elektronické zátěže pro testování zdrojů nízkých napětí. Např. je-li uživatelem zadán proud  $5\text{ A}$  a testovaný zdroj je zdroj napětí  $0,5\text{ V}$ , vzniklo by na tranzistoru a na bočníku o velikosti  $100\text{ m}\Omega$  napětí větší než  $0,5\text{ V}$ , což je v rozporu s testovaným zdrojem. Zátěží tedy nepoteče požadovaných  $5\text{ A}$ .

### 3.2.2 Konstantní napětí (CV)

Při režimu konstantního napětí udržuje zátěž na připojeném zdroji konstantní napětí nezávisle na proudu. Typicky je tento mód užíván s proudovými zdroji. Tranzistor je pomocí regulační smyčky uzavírán, dokud není na vstupu

naměřeno požadované napětí, nicméně, pokud testovaný zdroj nedokáže vytvořit na svých svorkách napětí větší než žádané, tranzistor v elektronické zátěži bude zcela zavřený.

### ■ 3.2.3 Konstantní odpor (CR)

V tomto režimu se elektronická zátěž chová jako konstantní výkonový rezistor. Může sloužit k testování jak napětového, tak proudového zdroje. Regulace může být tvořena čistě analogovou smyčkou. Jiný princip využívá CV obvod k nastavení požadovaného odporu poté, co mikrokontrolér vypočítá referenční hodnotu napětí z naměřeného proudu. Obdobným způsobem lze nastavovat proud z naměřeného napětí pomocí CC obvodu. Tento přístup je využit pro implementaci CR režimu v této práci.

### ■ 3.2.4 Konstantní výkon (CP)

Elektronická zátěž v režimu konstantního výkonu se snaží odebírat z testovaného zdroje konstantní výkon. Stejně jako v režimu CR lze zatěžovat jak napětové, tak proudové zdroje. Tento mód je možné také realizovat částečně analogově pomocí režimu CV či CC a částečně digitálně použitím mikrokontroléru pro výpočet a nastavení správné referenční hodnoty.



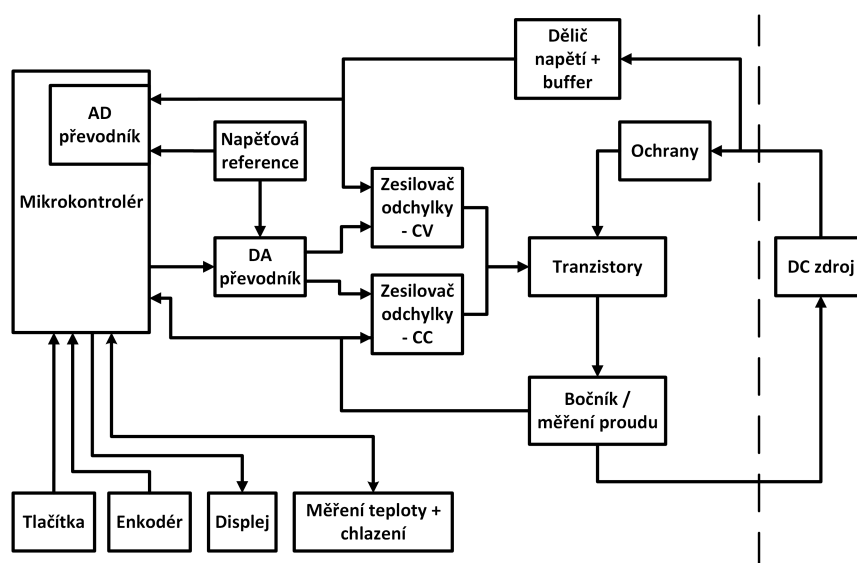
## Kapitola 4

### Návrh elektronické zátěže

Návrh schématu elektronické zátěže byl založen na principu kombinace režimu konstantního napětí a konstantního proudu. Výhoda tohoto zapojení spočívá v absenci přepínače mezi režimy a zároveň při použití CV módu lze nastavit proudové omezení pomocí CC části obvodu. Parametry elektronické zátěže byly zvoleny lepší než vyžaduje zadání. Rozdíl při návrhu zapojení i v ceně by byl totiž nepatrný. Požadované parametry elektronické zátěže jsou:

- Maximální ztrátový výkon 80 W
- Maximální proud 3 A
- Rozsah napětí 0,5 V až 80 V
- Rozsah odporu 1  $\Omega$  až 99999  $\Omega$
- Režimy
  - Konstantní napětí
  - Konstantní proud
  - Konstanrní odpor

Blokové schéma celého přístroje je zobrazeno na obrázku 4.1. Sestává z mnoha bloků, které je možné rozdělit na analogovou část, popsanou v sekci 4.1 a digitální část, popsanou v sekci 4.2. Při výběru konkrétních součástek byl brán zřetel na cenu a dostupnost při nákupu či dostupnost v domácích zásobách.



Obrázek 4.1: Blokové schéma elektronické zátěže

## 4.1 Analogová část

### 4.1.1 Napájecí obvod

Jako hlavní napájecí zdroj byl vybrán MEAN WELL RS-15-5 4.2 s parametry

- Výstupní napětí 5 V
- Výstupní proud 3 A
- Výkon 15 W

Zdroj je napájen z elektrické sítě a byl zabudován dovnitř krabice elektronické zátěže. Disponuje několika ochranami, a sice proti zkratu, přetížení, přepětí a přehřátí [5]. Výstupní napětí 5 V bylo zvoleno podle komponent zátěže popsaných dále.

Napájecí obvod přístroje generuje dále napětí 3,3 V kvůli použitému mikrokontroléru s architekturou ARM, jehož maximální napájecí napětí je 3,8 V [7]. Pro tento účel byl zvolen lineární low-dropout stabilizátor AZ1117E-3.3, jenž reguluje vstupních 5 V na 3,3 V. Výhodou je minimální počet přidaných součástek pro jeho správnou funkčnost.

### 4.1.2 Zesilovač odchylky MCP609

V obvodu elektronické zátěže jsou zapojeny dva bloky zesilovače odchylky. Každý z nich je tvořen reálnou součástkou, a sice operačním zesilovačem MCP609. Jeden blok je součástí regulační smyčky CV režimu a druhý blok je součástí regulační smyčky CC režimu. Jejich úkolem je řídit otevírání



**Obrázek 4.2:** Síťový napájecí zdroj MEAN WELL RS-15-5 [6]

tranzistoru pomocí zpětné vazby, a tím nastavit žádaný parametr elektronické zátěže.

Kombinace obou režimů je realizována pull-up rezistorem R18 na gate svorce MOSFETu a jejím připojením na výstupy operačních zesilovačů. Výstupy nejsou zapojeny přímo na gate, nýbrž přes diody D3 a D5, které jsou potřeba pro jejich vzájemné oddělení. Zamezují spojení dvou zdrojů napětí s nízkou vnitřní impedancí, jež dané výstupy představují. Kombinace dvou režimů je hlavní rozdíl oproti častým zapojením elektronických zátěží, v nichž je zvykem řídit tranzistor pouze jedním operačním zesilovačem [8] [9] [10]. V této práci je tranzistor řízen dvěma operačními zesilovači, ačkoli pouze jeden z nich má přednost a druhý se v danou chvíli neuplatňuje. Zesilovač, jehož výstupní napětí je menší, získává prioritu a tím uzavírá tranzistor. Druhý operační zesilovač se neuplatní, protože dioda vedoucí k jeho výstupu je polarizována v závěrném směru, a tím nedokáže ovlivnit napětí na gate. Toto chování bylo ověřeno simulací v kapitole 4.3.

Pro mód konstantního napětí je zpětná vazba zavedena do neinvertujícího vstupu operačního zesilovače. Jedná se o podělené vstupní napětí odporovým děličem, a to tak, aby bylo v rozsahu daném napětovou referencí. Na invertující vstup je připojeno referenční napětí z DA převodníku. Pokud je napětí testovaného zdroje menší než požadované, operační zesilovač začne uzavírat tranzistor, dokud se napětí nebudou shodovat. Režim CV se deaktivuje nulovým referenčním napětím. Připojené napětí je následně vždy větší a tím se dostane operační zesilovač do kladné saturace a tranzistor může být řízen částí obvodu pro režim konstantního proudu.

Pro mód konstantního proudu je zpětná vazba zavedena opačně, a to do

invertujícího vstupu operačního zesilovače. Vazba je vedena přes neinvertující zesilovač, který zesiluje napětí vzniklé na bočnicku vlivem protékajícího proudu. Na neinvertující vstup operačního zesilovače je připojeno referenční napětí z druhého kanálu DA převodníku. Režim CC nelze zcela deaktivovat, ale nastaví se buď reference odpovídající proudu většímu než je maximální povolený nebo se využije omezovacích schopností tohoto režimu a nastaví se reference odpovídající právě maximálnímu povolenému proudu a tím je řešena nadproudová ochrana. Tento přístup je použit v této práci.

Při výběru operačního zesilovače byl žádoucí nízký vstupní napěťový offset, nesymetrické napájení, vstup bez jevu otočení fáze, rail-to-rail výstup pro správné řízení tranzistoru a malá šířka pásma kvůli větší stabilitě obvodu. Pouzdro vybrané součástky disponuje čtyřmi operačními zesilovači s maximálním vstupním napěťovým offsetem  $250 \mu V$ , šířkou pásma  $155 kHz$  a všemi zbylými požadovanými vlastnostmi. Operační zesilovač lze napájet maximálně  $6 V$ , tzn. že  $6 V$  je také maximální výstupní napětí. To tvoří omezení pro výběr tranzistoru.

### ■ Popis ostatních součástek

Jelikož je operační zesilovač reálná součástka, je nutné brát v potaz jeho parazitní vlastnosti. Jednou z nich je vstupní proud do invertujícího a neinvertujícího vstupu. Tento proud vytváří úbytek napětí na vstupním odporu a tím se zvětšuje nežádoucí napěťový offset [11]. Tento nechťený jev lze kompenzovat, pokud mají impedance před vstupy do zesilovače stejnou velikost. Výstupní odpor napěťového děliče v CV části obvodu je zhruba  $30 k\Omega$ . Proto byl vložen před invertující vstup odpor R13 s velikostí  $30 k\Omega$ . Ze stejného důvodu jsou ve schématu odpory stejné velikosti R11 a R15.

V obvodu elektronické zátěže s operačním zesilovačem může být problém se stabilitou. Nežádoucí stav může nastat, pokud je na výstup operačního zesilovače ve zpětné vazbě připojena kapacita [12]. V případě zátěže tuto kapacitu představuje tranzistor typu MOSFET, který ji má v řádu jednotek  $nF$ . Proto jsou v obvodu zapojeny kompenzační kondenzátory C21 v CV části a C19 v CC části. Jejich kapacita byla určena experimentálně.

### ■ 4.1.3 Tranzistor IPP12CN10L G

Pro správnou funkčnost elektronické zátěže je klíčový tranzistor, který za normálního běhu přístroje funguje v saturačním režimu. Otevírá se a zavírá podle žádaných parametrů zadaných uživatelem. Tranzistor typu MOSFET s N-kanálem se jeví jako nejvhodnější z důvodu jeho řízení napětím a nízkým drain-source odporem v sepnutém stavu (u vybraného tranzistoru  $12 m\Omega$ ). Další výhodou je snadné paralelní zapojení. Vybraný tranzistor IPP12CN10L G v pouzdru TO220 rozptýlí maximálně  $125 W$  [13], pokud by se polovodičový přechod udržel při teplotě  $25 ^\circ C$ . Tuto podmínku je velmi náročné dodržet, proto byla uvažována jiná praktická podmínka pro pouzdro TO220, a to maximální ztrátový výkon  $50 W$  (převzato z katalogového listu jiného tranzistoru ve stejném pouzdru [14]). Pro dosažení požadovaného ztrátového výkonu

elektronické zátěže byly zapojeny dva tranzistory paralelně. Další požadovaná vlastnost tranzistoru je nízké prahové napětí. U vybraného tranzistoru je  $1,84\text{ V}$ . Z jeho charakteristiky bylo určeno, že řídicí napětí na gatu stačí měnit od prahového napětí do  $5\text{ V}$ , aby se dosáhlo požadovaných vlastností zátěže. Dalším parametrem tranzistoru je maximální proud drainem  $69\text{ A}$ , což s velkou rezervou přesahuje žádaný proud. Největší drain-source napětí může být  $100\text{ V}$ , což také vyhovuje zadaným parametrům.

### ■ Popis ostatních součástek

Tranzistor není ideální součástka a pro operační zesilovač představuje při spínání kapacitu. Společně s parazitními indukčnostmi např. cest na desce plošných spojů, můžou nastat oscilace při spínání a rozepínání [3]. Pro jejich tlumení byly přidány rezistory R19 a R20 mezi operačními zesilovači a gaty tranzistorů. Tyto odpory zároveň limitují proud při nabíjení a vybíjení parazitních kapacit tranzistorů.

Zenerovy diody D6 a D7 slouží pro ochranu tranzistorů. Diody zabráňují překročení maximálního napětí gate-source, které činí  $\pm 20\text{ V}$ .

#### ■ 4.1.4 Napěťová reference TL431

Pro AD a DA převodník je potřeba přesná napěťová reference. Omezení tvoří AD převodník, který je součástí použitého mikrokontroléru, jehož katalogový list udává velikost externí reference od  $1\text{ V}$  do  $2,7\text{ V}$  při napájení čipu  $3,3\text{ V}$  [7]. Zvolená napěťová reference TL431 této podmínce vyhovuje a také je poměrně levná a v obchodech snadno dostupná. Její zapojení lze vidět v příloze A. Výstupní napětí reference je  $2,5\text{ V}$ .

#### ■ 4.1.5 DA převodník MCP4922

Pro zvolený návrh elektronické zátěže jsou potřeba dva DA převodníky (jeden pro CC část, druhý pro CV část obvodu). Použitý mikrokontrolér obsahuje pouze jeden kanál DA převodníku, proto bylo nutné použít externí. Z důvodu dostatečně malého kvantizačního kroku je potřeba 10-ti či více bitový převodník. Vybraný převodník MCP4922 disponuje dvěma 12-bitovými kanály a SPI komunikačním rozhraním.

#### ■ 4.1.6 AD převodník

Použitý mikrokontrolér disponuje 12-ti bitovým AD převodníkem až s deseti kanály, což bylo uznáno za dostatečně přesné a vhodné řešení pro měření napětí testovaného zdroje a měření teploty chladiče. Pak nebylo třeba doplňovat obvod o externí AD převodník. Tato periferie mikrokontroléru nabízí různá nastavení, mezi které patří převzorkování a průměrování. Převzorkování umožňuje zvýšit rozlišení, které bylo již dostatečné, a proto se použilo průměrování pro stabilnější měřenou hodnotu a pro zvýšení odstupu signálu od šumu [15].

### 4.1.7 Měření napětí

Měření napětí je zapojeno přímo na testovaný zdroj. Tím lze kontrolovat, zda napětí testovaného zdroje leží v povolených mezích, na základě čehož ho lze připojit ke zbytku obvodu pomocí relé K1. Další výhodou tohoto zapojení spočívá v tom, že zjištěná hodnota napětí není zatížena chybou způsobenou úbytkem napětí na ochranném obvodu, přesněji na relé K1 a na proudové pojistce F1.

Měřicí obvod nejprve snižuje vstupní napětí na žádoucí úroveň pomocí napěťového děliče z rezistorů R14 a R12. Jejich poměr byl zvolen takový, aby jeden krok CV kanálu DA převodníku odpovídal hodnotě  $25\text{ mV}$ , neboli změna o jeden LSB způsobí změnu vstupního napětí o  $25\text{ mV}$ . Stejnou velikost má i nejmenší krok při volbě žádané hodnoty napětí v režimu CV. Výhodou je, že každému uživateli nastavenému napětí odpovídá přesně jedno kódové slovo DA převodníku. Dalším důvodem pro zvolení tohoto přístupu je snadný přepočítání žádané hodnoty na 12-ti bitovou vstupní hodnotu DA převodníku 4.1.

$$DAC = \frac{2^N}{FS} \cdot U = \frac{2^{12}}{102,4\text{ V}} \cdot U = \frac{U\text{ mV}}{25\text{ mV}}, \quad (4.1)$$

kde  $DAC$  je 12-ti bitová vstupní hodnota DA převodníku a  $U$  je žádané napětí.  $N$  představuje rozlišení převodníku a  $FS$  plný rozsah, jehož hodnota je určena rozlišením převodníku a velikostí jednoho kroku vstupního napětí ( $25\text{ mV}$ ) při změně jednoho LSB. Je vidět, že není využit celý rozsah (místo  $102,4\text{ V}$  pouze  $80\text{ V}$ ), což se může jevit jako nevýhoda. Pokud by byl plný rozsah zmenšen na  $80\text{ V}$ , a tím využit celý rozsah, nejmenší krok vstupního napětí by místo  $25\text{ mV}$  byl  $\frac{80}{4096}\text{ V} \approx 19,5\text{ mV}$ , což není příliš velký rozdíl.

Pro výpočet napětí změřeného AD převodníkem platí obrácený postup výpočtu.

$$U = \frac{FS}{2^N} \cdot ADC = \frac{102,4\text{ V}}{2^{12}} \cdot ADC = ADC \cdot 25\text{ mV}, \quad (4.2)$$

kde  $ADC$  je 12-ti bitová hodnota z AD převodníku.

Měření napětí je zapojeno přímo na testovaný zdroj, a proto je potřeba počítat s možnými nežádoucími vstupními hodnotami, jež se mohou objevit i při odpojení testovaného zdroje od zbytku obvodu pomocí relé K1, a sice přepětí a záporné napětí. V prvním případě by se aktivovala schottkyho dioda D4, která omezí napětí z děliče přibližně na  $2,8\text{ V}$ , což je sice hodnota větší než reference AD převodníku, ale zároveň hodnota bezpečná. V případě připojení záporného napětí k elektronické zátěži bude schottkyho dioda D2 polarizována v propustném směru a tím omezí napětí na výstupu děliče na přibližně  $-300\text{ mV}$ , což je opět bezpečná hodnota.

AD převodník v mikrokontroléru je typu SAR (převodník s postupnou aproximací), jehož vnitřní struktura obsahuje tzv. sample and hold obvod, který v určitých časových intervalech odebírá nezanedbatelný proud, a proto je potřeba zajistit dostatečně nízkou výstupní impedanci měřeného zdroje napětí. Ta je určena paralelní kombinací rezistorů R14 a R12 v napěťovém děliči,

jejichž hodnoty jsou 1, 2 MΩ a 30 kΩ. Takto vysoké hodnoty byly zvoleny, aby dělič nezatěžoval testovaný zdroj a nezanášel do měření významnou chybu. Paralelní zapojení rezistorů R14 a R12 má hodnotu přibližně 30 kΩ. To je pro AD převodník příliš vysoká hodnota, proto byl před něj zařazen napěťový sledovač.

Součástí napěťového děliče je kondenzátor C18 vytvářející společně s rezistory děliče filtr typu dolní propust. Hodnota kondenzátoru byla zvolena odhadem.

Výstupní napětí děliče  $U_2$  je určeno podle vztahu 4.3.

$$U_2 = U_1 \cdot \frac{R_{12}}{R_{12} + R_{14}} V = U_1 \cdot \frac{3}{123} V, \quad (4.3)$$

kde  $U_1$  je napětí testovaného zdroje.

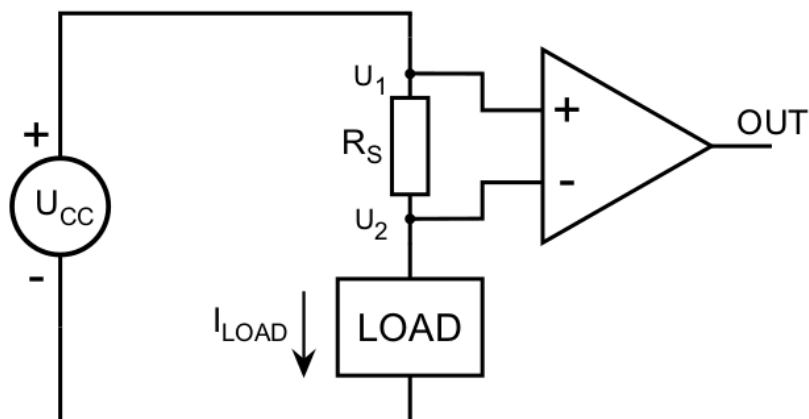
### 4.1.8 Měření proudu

Měření proudu je klíčové pro elektronickou zátěž. Důležité je zejména pro režim konstantního proudu, který ho udržuje na konstantní hodnotě. Proud je měřen pomocí odporového bočnicku s velmi nízkým odporem, na němž vzniká úbytek napětí úměrný protékajícímu proudu. Tento úbytek napětí je měřen diferenciálně integrovaným obvodem INA219, který dokáže poskytnout změřená data přes sběrnici I2C. INA219 je schopen kromě proudu měřit napětí a výkon na zatěžovaném prvku, tj. na tranzitoru, pokud je bočník zapojen tzv. high-side 4.3. V high-side uspořádání je bočník zapojen před zatěžovaným prvkem na zdroj a zatěžovaný prvek je spojen se záporným pólem zdroje. V této práci je elektronická zátěž navrhována pro vstupní napětí do 80 V, nicméně maximální měřené napětí obvodem INA219 je 26 V. Z toho důvodu je bočník umístěn tzv. low-side 4.4. V tomto uspořádání vznikne na snímacím rezistoru pouze malý úbytek napětí, ale měření napětí a výkonu integrovaným obvodem INA219 nelze využít.

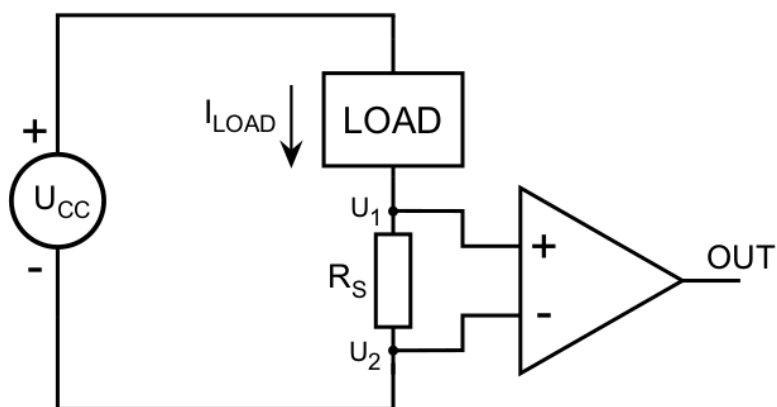
V této práci bylo využito snadno dostupného modulu 4.5 obsahující proudový bočník s hodnotou 100 mΩ, integrovaný obvod INA219 a další součástky pro správnou funkci měření proudu. Maximální měřený proud činí 3,2 A, což vyhovuje požadavku na maximální proud elektronickou zátěží. Napětí na proudovém bočnicku je měřeno čtyřvodičově kvůli minimalizaci chyb měření. Hodnota proudu je přes sběrnici I2C posílána z modulu do mikrokontroléru, který ji mj. zobrazuje na displeji.

Při kontrolním měření 5.5 docházelo k ničení proudového bočnicku výkonovými špičkami. Původní bočník na modulu 4.5 je dimenzovaný na 2 W, což by mělo být dostatečné, jenže výkonové špičky trvající krátkou dobu tento maximální ztrátový výkon přesahují. Bočník je v SMD pouzdru, tudíž nemá dostatečnou tepelnou kapacitu a při příchodu výkonové špičky dochází ke zničení měřicího rezistoru. Z toho důvodu byl původní bočník nahrazen bočníkem se stejným odporem, ale s maximálním ztrátovým výkonem 5 W v keramickém pouzdru s drátovými vývody.

Informace o velikosti proudu je vedena také zpětnou vazbou analogového regulačního obvodu režimu CC a je porovnávána zesilovačem odchylky s



Obrázek 4.3: High-side uspořádání [16]

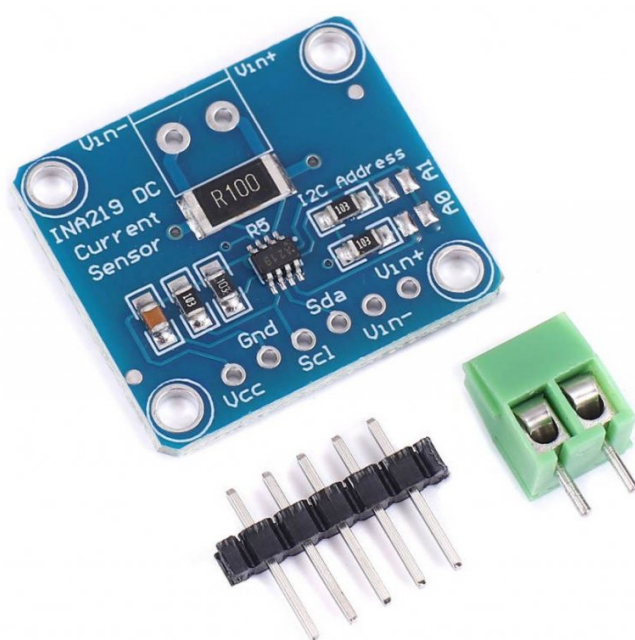


Obrázek 4.4: Low-side uspořádání [16]

referenční hodnotou proudu nastavenou DA převodníkem. Hodnota proudu je měřena opět na bočníku umístěném na modulu senzoru proudu, ale na rozdíl od integrovaného obvodu INA219 není měřena diferencially, což umožňuje jednodušší zapojení obvodu, ačkoli je nutné při navrhování DPS dbát na rozlišování analogových a digitálních zemních potenciálů, protože je napětí na bočníku měřeno právě proti zemi. Takový způsob zapojení je možný pouze v low-side uspořádání, kdy je jeden vývod bočníku spojen se zemí. Kvůli porovnávání měřeného proudu s hodnotou z DA převodníku pohybující se od 0 do 2,5 V je nutné zesílit úbytek napětí na bočníku, jehož hodnota se pohybuje od 0 mV při proudu 0 A do 300 mV při proudu 3 A.

Proto je do zpětné vazby zařazen neinvertující zesilovač, který disponuje vysokou vstupní impedancí, takže není ovlivňován zbytek obvodu. Odpor R21 je před neinvertující vstup operačního zesilovače vložen kvůli kompenzaci





**Obrázek 4.5:** Modul měření proudu s integrovaným obvodem INA219 [17]

napětového offsetu (podrobněji popsáno v 4.1.2). Zapojení neinvertujícího zesilovače má zisk přibližně 6,1 a tím je určeno, že jeden krok DA převodníku odpovídá změně proudu zátěží o  $1\text{ mA}$ . Stejnou velikost má i nejmenší krok při volbě žádané hodnoty proudu v režimu CC. Výhodou je, že každému uživateli nastavenému proudu odpovídá přesně jedno kódové slovo DA převodníku. Dalším důvodem pro zvolení tohoto přístupu je snadný přepočet žádané hodnoty na 12-ti bitovou vstupní hodnotu DA převodníku, což je popsáno rovnicí 4.4.

$$DAC = \frac{2^N}{FS} \cdot I = \frac{2^{12}}{4,096\text{ A}} \cdot I = \frac{I\text{ mA}}{1\text{ mA}}, \quad (4.4)$$

kde  $DAC$  je 12-ti bitová vstupní hodnota DA převodníku a  $I$  je žádaný proud.  $N$  představuje rozlišení převodníku a  $FS$  plný rozsah, jehož hodnota je určena rozlišením převodníku a velikostí jednoho kroku proudu zátěží ( $1\text{ mA}$ ) při změně jednoho LSB. Je vidět, že není využit celý rozsah (místo  $4,096\text{ A}$  pouze  $3\text{ A}$ ). Pokud by byl využit rozsah celý, tzn. plný rozsah zmenšen na  $3\text{ A}$ , nebyl by příliš velký rozdíl mezi velikostmi kroků (podobně jako v režimu CV). Místo kroku o velikosti  $1\text{ mA}$  by měl krok velikost  $0,732\text{ mA}$ .

Součástí zapojení neinvertujícího zesilovače je kondenzátor C20 vytvářející společně s rezistory R16 a R17 filtr typu dolní propust. Hodnota kondenzátoru byla zvolena odhadem.

#### ■ 4.1.9 Ochranný obvod

Elektronická zátěž disponuje následujícími ochranami, které brání jejímu zničení: ochrana proti přepětí, proti nadproudu, proti přehřátí, proti přetížení

a proti zápornému napětí (proudu). Dále obvod umí rozeznat příliš nízké napětí pro správnou funkčnost elektronické zátěže.

Ochranný obvod v blokovém schématu 4.1 obsahuje relé K1 a pojistku F1. Vybraná pojistka má parametry  $4\text{ A}$  a je typu F (rychlá). Chrání obvod před proudem nad limit elektronické zátěže. Relé je ovládáno mikrokontrolérem a slouží ke galvanickému odpojení či připojení testovaného zdroje.

Pokud napětí testovaného zdroje překročí limit  $80\text{ V}$ , zareaguje ochrana proti přepětí (mikrokontrolér) a relé odpojí zdroj od zátěže. Součástí ochrany proti přepětí je i schottkyho dioda D4, která je po připojení vysokého napětí na vstup zátěže polarizována v propustném směru a tím omezí výstupní napětí děliče z rezistorů R14 a R12, které je dále zpracováváno, takže je ochráněn zbytek obvodu.

Podobným způsobem chrání obvod i dioda D2, která je polarizována v propustném směru při připojení záporného napětí. To je rozeznáno mikrokontrolérem pomocí senzoru proudu s integrovaným obvodem INA219, jenž umí měřit i záporný proud. Pokud taková situace nastane, je testovaný zdroj odpojen od zátěže pomocí relé K1.

Ochrana proti přehřátí je aktivována při teplotě chladiče  $80\text{ }^\circ\text{C}$ . Mikrokontrolér ji získává pomocí NTC termistoru TH1 a vyhodnocuje napětí změřené jeho vnitřním AD převodníkem. Aktivovaná ochrana odpojí testovaný zdroj od zátěže pomocí relé K1.

Ochrana proti nadproudu je tvořena jednak již zmíněnou pojistkou F1 a jednak samotným regulačním obvodem režimu konstantního proudu. Obvod zajišťuje, že proud zátěží nebude větší než nastavená prahová hodnota  $3\text{ A}$ . Pokud by byl připojen zdroj proudu generující více než  $3\text{ A}$ , tranzistor by byl řízen tak, aby proud zátěží zůstal na  $3\text{ A}$ , tudíž by testovaný zdroj zvedal svoje napětí, dokud by nedosáhlo  $80\text{ V}$  a poté by zareagovala ochrana proti přepětí a došlo by k odpojení testovaného zdroje.

Elektronická zátěž měří napětí testovaného zdroje i zatěžovací proud. Z těchto údajů mikrokontrolér vypočítá výkon podle vzorce 4.5.

$$P = U \cdot I, \quad (4.5)$$

kde  $P$  je výkon,  $U$  je napětí zdroje a  $I$  je proud zátěží. Ochrana proti přetížení je aktivována, pokud je vypočítaný výkon větší než  $80\text{ W}$ . Následně je testovaný zdroj odpojen pomocí relé K1. Tato ochrana ovšem nezabrání zničení elektronické zátěže v případě skoku napětí z povolené hodnoty na hodnotu mimo limit. Kdyby např. v režimu CC nastaveném na  $2\text{ A}$  a napětí zdroje nastavené na  $30\text{ V}$  (dávající výkon  $60\text{ W}$ ) došlo ke zvýšení napětí na  $130\text{ V}$ , byl by okamžitý výkon na jednom tranzistoru v případě rovnoměrně rozděleného proudu mezi oba tranzistory  $130\text{ W}$ . Maximální výkon podle katalogového listu je ovšem  $125\text{ W}$  [13]. Tím by došlo k destrukci tranzistorů, protože ochrana proti přetížení ani proti přepětí nereaguje okamžitě. Ochrana proti přetížení chrání obvod pouze před přehřátím, které by nastalo až s určitým zpožděním.

Elektronická zátěž je schopná rozeznat příliš nízké napětí, pokud je zátěž aktivní (tzn. pokud je zdroj připojen přes sepnuté relé K1). Minimální vstupní

napětí zátěže je specifikováno na  $500\text{ mV}$  a v případě naměření takové hodnoty a nenulového proudu (tím je zjištěno, zda je zátěž aktivní) je na displeji zobrazeno upozornění nízkého napětí. Více o indikátorech je uvedeno v popisu displeje 4.2.4.

## ■ Popis ostatních součástek

Relé je spínáno tranzistorem Q5, jenž je řízen z výstupního pinu mikrokontroléru přes rezistor R23, který omezuje spínací proud do a ze svorky gate a také brání oscilacím. Rezistor R22 definuje napětí na gate v případě, že je řídicí pin mikrokontroléru ve stavu vysoké impedance. Dioda D8 chrání tranzistor proti napěťovým špičkám, které by nastaly důsledkem uzavření relé K1. Spínací kontakt v relé je řízen magnetickým polem vytvářeným cívkou, jíž nelze měnit skokově proud. Proto by v důsledku rozepnutí tranzistoru došlo k napěťové špičce, která by zajistila plynulou změnu proudu a pravděpodobně také průraz tranzistoru. Proud je ovšem uzavřen obvodem přes diodu D8, a proto nedochází k napěťovým špičkám.

### ■ 4.1.10 Chlazení

Cílem elektronické zátěže je odebírat elektrickou energii. Ta je následně přeměňována na tepelnou energii ve výkonových prvcích, konkrétně v tranzistorech, které musí být opatřeny dostatečným chlazením. V této práci je použito chlazení pasivní i aktivní.

Pasivní chlazení zajišťuje hliníkový chladič vybraný podle množství tepla potřebného k vyzáření. Maximální povolený výkon zátěže je  $80\text{ W}$ , nicméně je uvažován empirický výpočet, podle něhož je potřeba odvést čtyřnásobně méně tepla, pokud je přítomno aktivní chlazení. Tato podmínka je splněna, tudíž lze uvažovat výkon  $20\text{ W}$ , který je potřeba vyzářit chladičem. Jeho tepelný odpor byl vypočítán podle vzorce 4.6, který je obdobný Ohmovu zákonu.

$$T_J = P \cdot (R_{JC} + R_{CH} + R_{HA}) + T_A \quad (4.6)$$

$T_J$  představuje teplotu polovodičového přechodu uvnitř tranzistoru a  $T_A$  je teplota okolí.  $P$  je vyzářovaný výkon a veličiny  $R$  jsou tepelné odpory. Hodnota  $R_{JC}$  je dána tranzistorem a představuje tepelný odpor mezi přechodem tranzistoru a jeho pouzdrem. Hodnota  $R_{CH}$  představuje tepelný odpor mezi pouzdem tranzistoru a chladičem a je dána teplovodivým materiálem použitým na zmíněném přechodu. V této práci byla použita silikonová podložka.  $R_{HA}$  je tepelný odpor mezi chladičem a okolím. Pro výběr chladiče je nutné znát hodnotu  $R_{HA}$ , která ho charakterizuje. Ostatní hodnoty jsou následující:

$$\begin{aligned}
 T_J &= 175 \text{ }^\circ\text{C} \\
 P &= 20 \text{ W} \\
 R_{JC} &= 1,2 \text{ }^\circ\text{C/W} \\
 R_{CH} &= 1 \text{ }^\circ\text{C/W} \\
 T_A &= 40 \text{ }^\circ\text{C}.
 \end{aligned}$$

Teplota okolí byla zvolena pro výpočet  $40 \text{ }^\circ\text{C}$ . Transformací rovnice 4.6 je získána podmínka pro výběr chladiče 4.7.

$$R_{HA} \leq 4,55 \text{ }^\circ\text{C/W} \quad (4.7)$$

Chladič byl vybrán s rezervou. Jeho tepelný odpor je  $2 \text{ }^\circ\text{C/W}$ .

Aktivní chlazení zajišťuje ventilátor, který byl vybrán na základě dostupného napájení, tj.  $5 \text{ V}$ . Vybraný ventilátor disponuje průtokem vzduchu  $43,40 \text{ CFM}$ . Je spínán tranzistorem Q3, jenž je řízen dvoustavově výstupním pinem mikrokontroléru. Rezistor R9 omezuje spínací proud do a ze svorky gate a také brání oscilacím. Rezistor R8 definuje napětí na gate v případě, že je řídicí pin mikrokontroléru ve stavu vysoké impedance. Dioda D1 chrání tranzistor proti napěťovým špičkám způsobeným ventilátorem.

Ventilátor je sepnut při naměření teploty  $50 \text{ }^\circ\text{C}$  a vypnut poté, co teplota klesne na  $40 \text{ }^\circ\text{C}$ .

Teplota je měřena pomocí termistoru NTC, jehož odpor klesá s rostoucí teplotou. Společně s rezistorem R10 tvoří napěťový dělič, jehož výstup je přiveden na vnitřní AD převodník mikrokontroléru.

## 4.2 Digitální část

### 4.2.1 Mikrokontrolér SAMD21E17A-A

Mikrokontrolér je klíčový prvek v této práci, neboť zajišťuje mnoho funkcí, mezi které patří obsluha uživatelského rozhraní, komunikace s DA převodníkem nebo vyhodnocování ochranných situací.

Pro snadnou dostupnost, nízkou cenu a mnoho užitečných periférií byl vybrán 32-bitový mikrokontrolér SAMD21E17A-A od firmy Atmel (dnes již Microchip). Disponuje jádrem ARM Cortex-M0+, pamětí flash o velikosti  $128 \text{ KB}$  a pamětí SRAM o velikosti  $16 \text{ KB}$ .

Mikrokontrolér je napájen zdrojem napětí  $3,3 \text{ V}$  a bylo využito několika jeho periférií, např. AD převodníku s DMA kontrolérem, časovačů či periférií zajišťujících komunikaci po sběrnici I2C nebo SPI. Vnitřní AD převodník mikrokontroléru využívá externí referenční napětí  $2,5 \text{ V}$  přivedené na pin PA03.

Mikrokontrolér byl naprogramován a laděn přes SWD konektor J2 pomocí programátoru Atmel-ICE, který lze vidět na obrázku 4.6.



Obrázek 4.6: Programátor Atmel-ICE [18]

### ■ 4.2.2 Tlačítka

Ve schématu elektronické zátěže A jsou vidět čtyři tlačítka BTN1 až BTN4 napojená na mikrokontrolér. Slouží pro ovládání zátěže, avšak v této práci byly využity pouze dvě tlačítka, a to BTN2 a BTN3.

Stisknutím tlačítka BTN2 uživatel aktivuje či deaktivuje elektronickou zátěž, neboli připojí či odpojí testovaný zdroj pomocí relé K1. Je pojmenováno jako tlačítko *Enable*.

Tlačítko BTN3 slouží k výběru režimu zátěže. Lze přepínat mezi módy CC, CV a CR. Je pojmenováno jako tlačítko *Mode*.

### ■ 4.2.3 Rotační enkodér

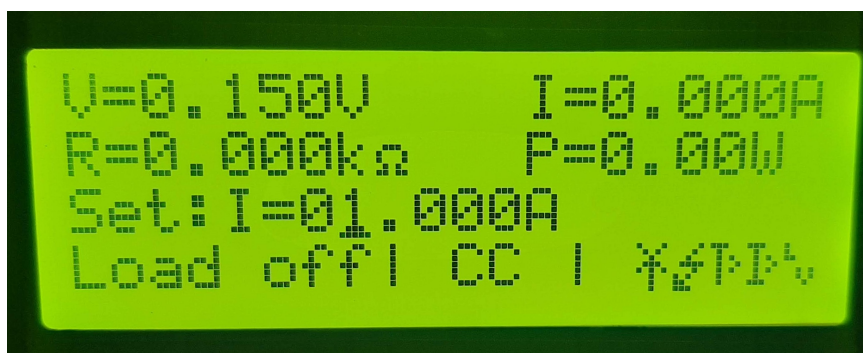
Rotační enkodér je prvek, u něhož nelze určit absolutní polohu natočení, ale pouze relativní. Na jeho výstupech A a B se při jeho otáčení objevuje tentýž obdélníkový signál, ale fázově posunutý, podle kterého lze určit směr otáčení. Vybraný rotační enkodér disponuje i spínacím kontaktem mezi svorkami S1 a S2.

V elektronické zátěži je rotační enkodér se spínačem použit pro nastavení požadované hodnoty aktivního režimu. Otáčením se zvyšuje či snižuje požadovaná hodnota a stisknutím enkodéru se přepíná momentálně nastavovaný řád.

#### 4.2.4 Displej

Pro používání elektronické zátěže je potřeba displej, který zobrazuje data a aktuální nastavení zátěže, a proto byl vybrán alfanumerický LCD displej se čtyřmi řádky a dvaceti znaky na jeden řádek. Koupený displej je přizpůsoben pro komunikaci po rozhraní I2C, čímž je razantně snížen počet potřebných signálových vodičů. Jelikož je nutné displej napájet napětím 5 V a zároveň musí komunikovat s mikrokontrolérem, jenž je napájen napětím 3,3 V, byl aplikován na signály SCL a SDA obousměrný převodník logických úrovní [19].

Na displeji jsou zobrazovány mimo nastavenou hodnotu i naměřené hodnoty napětí a proudu. Z těchto hodnot lze vypočítat hodnoty odporu a výkonu, které jsou také zobrazeny na displeji. Další důležitá informace pro uživatele je stav zátěže, zda-li je testovaný zdroj připojen či odpojen. Tato informace je zobrazena v levém dolním rohu displeje výpisem textu *LOAD ON* či *LOAD OFF*. Uprostřed posledního řádku je vypsán aktuální režim zátěže: *CC*, *CR* nebo *CV*. V pravém dolním rohu displeje jsou za normálního běhu zařízení prázdné znaky, ale při neobvyklých situacích se zobrazují symboly indikující příslušný stav. První indikátor značí stav ventilátoru. Pokud je zobrazen, ventilátor je aktivní. Druhý symbol je zobrazen, pokud je aktivní ochrana proti přepětí, neboli při vstupním napětí větším než 80 V. Třetí indikátor je zobrazen při aktivní ochraně proti přechřátí, tj. při teplotě chladiče větší než 80 °C. Čtvrtý symbol značí aktivní ochranu proti nadproudu. Tento stav nastane, pokud je proud omezen na 3 A regulačním obvodem režimu *CC*. Poslední indikátor značí upozornění nízkého vstupního napětí. Pokud je zátěž aktivní (relé K1 je sepnuto a zátěží teče nenulový proud) a napětí je menší než 500 mV, nemusí elektronická zátěž fungovat podle očekávání, proto se zobrazí tento symbol. Všechny indikátory lze vidět na obrázku 4.7. Vzhled displeje při používání elektronické zátěže je zobrazen na obrázku 4.8.



Obrázek 4.7: Zobrazení všech indikátorů



Obrázek 4.8: Vzhled displeje při používání elektronické zátěže

## 4.3 Simulace

Obvod byl nejprve nasimulován v programu LTspice XVII pro ověření správné funkčnosti zapojení. Vytvořený obvod obsahuje pouze základní komponenty – oproti finálnímu schématu chybí blokovací a filtrační kondenzátory, kompenzační rezistory, ochrana proti přepětí a ochrana proti přepólování. Simulace také nebere v úvahu skutečný operační zesilovač a tranzistor, které jsou při realizaci elektronické zátěže použity. Modely takových reálných součástek totiž nebyly k dispozici. Maximální referenční (vstupní) napětí obou režimů je 3,3 V na rozdíl od použité reference 2,5 V. Proto jsou ve schématu simulace jiné hodnoty rezistorů R3 až R6 než hodnoty k nim odpovídajícím rezistorů ve zrealizovaném schématu A.

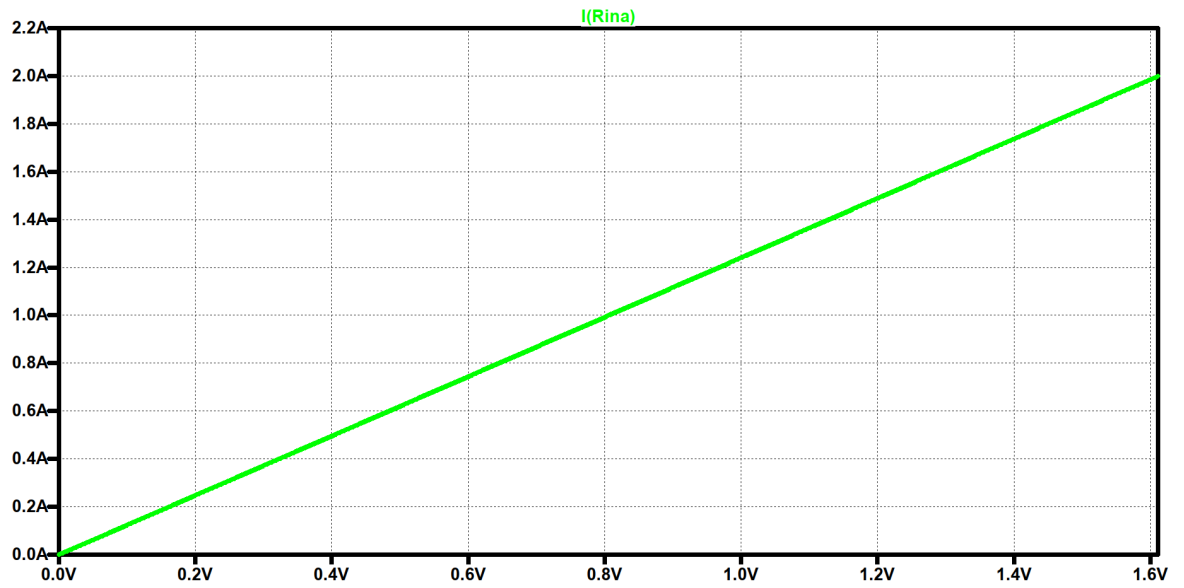
### 4.3.1 Režim CC

Režim konstantního proudu se používá při testování zdroje napětí. Pro jeho správnou funkci je potřeba nastavit nulové referenční napětí režimu CV. Tím se zajistí, že CV část obvodu bude neaktivní.

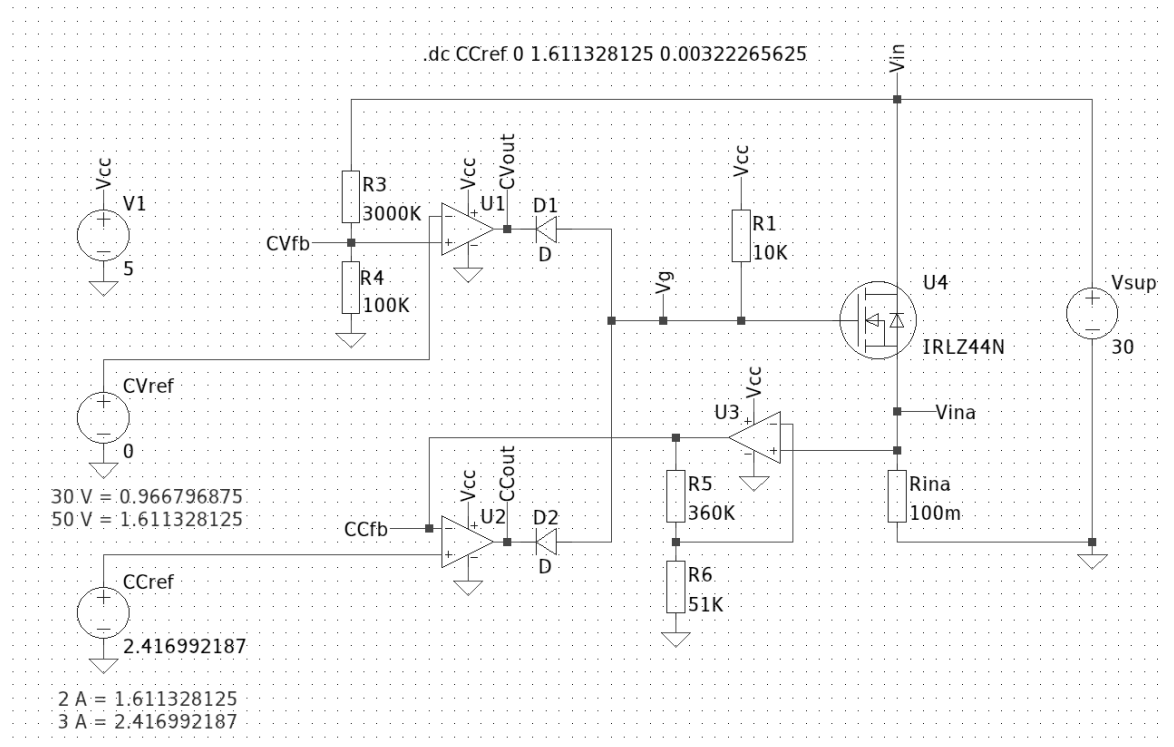
Na obrázku 4.9 je zobrazen proud ze zdroje konstantního napětí 30 V. Při této simulaci se mění referenční napětí CC režimu, které odpovídá proudu 0 až 2 A.

Jak bylo očekáváno, proud se mění od 0 do 2 A. Schéma simulace je na obrázku 4.10.

V další simulaci (obrázky 4.11 a 4.12) se mění napětí zdroje  $V_{sup}$  od 0 do 50 V při nastavení referenčního napětí CC tak, aby ze zdroje tekla proud o velikosti 3 A. V simulaci je vidět, že elektronická zátěž udržuje konstantní proud 3 A.

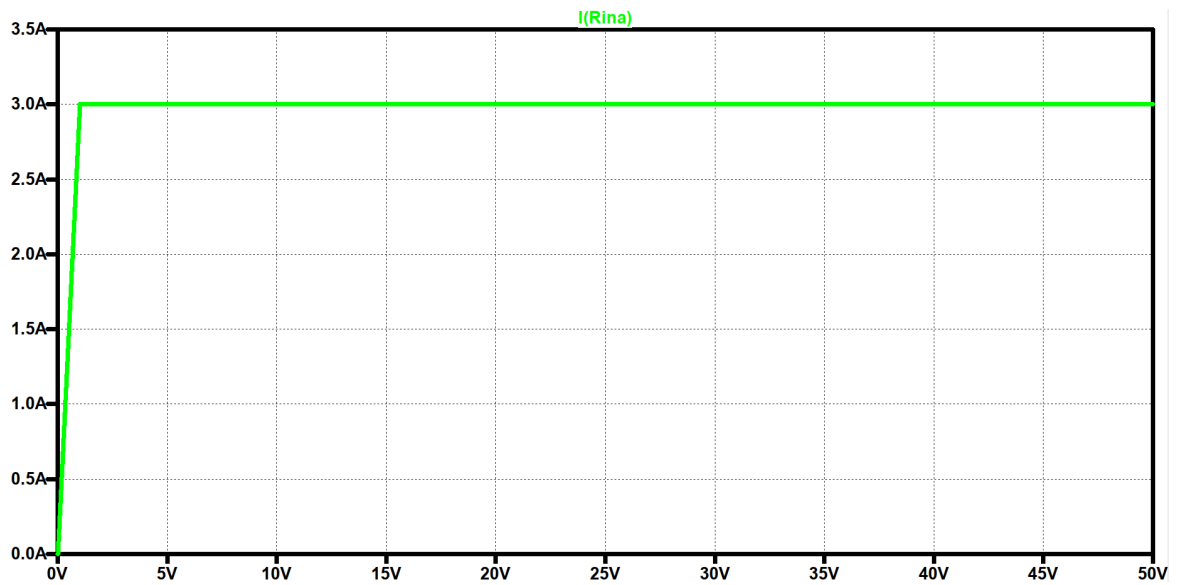


Obrázek 4.9: Proud ze zdroje napětí při změně reference CC režimu

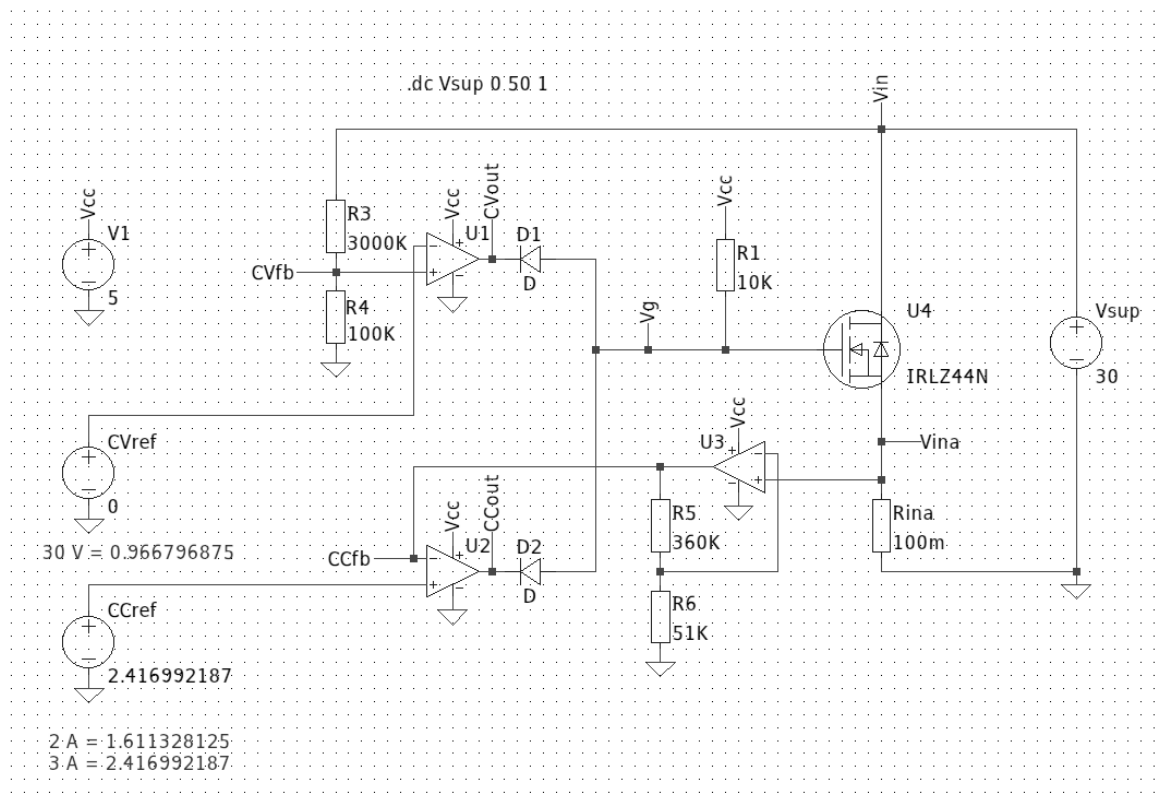


Obrázek 4.10: Schéma simulace zátěže při změně reference CC režimu





**Obrázek 4.11:** Proud ze zdroje napětí při změně jeho napětí



**Obrázek 4.12:** Schéma simulace zátěže v CC režimu při změně napětí testovaného zdroje

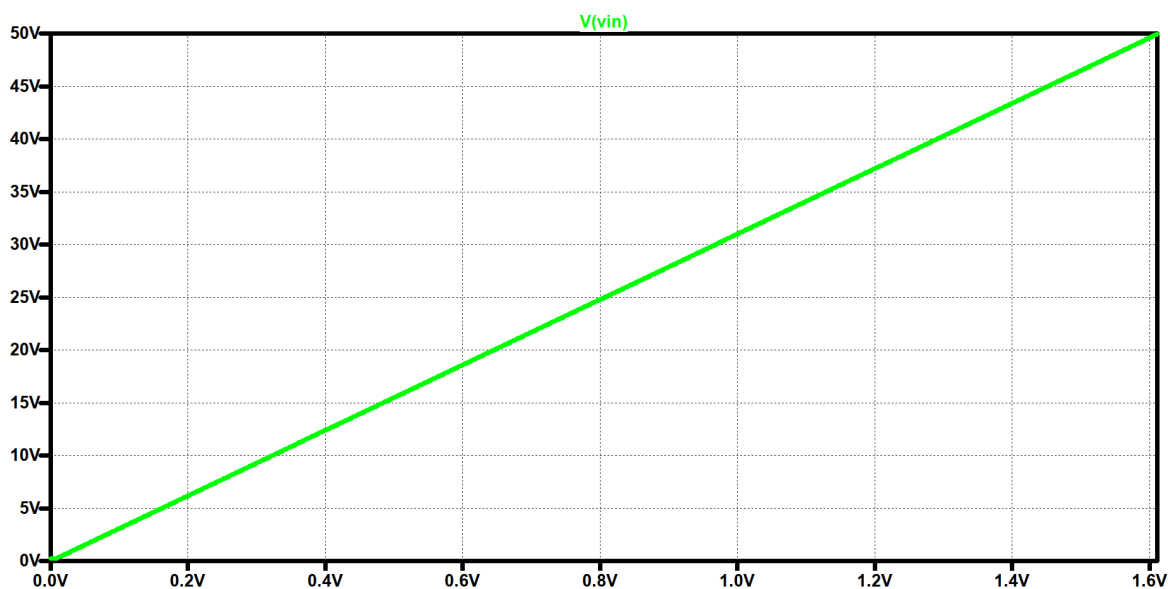
### 4.3.2 Režim CV

Režim konstantního napětí se používá při testování zdroje proudu. Referenční proud CC režimu je nastaven na 3 A, tj. maximální povolený proud zátěží. CC režim je aktivní, pokud se proud svou hodnotou blíží k tomuto limitu, jinak je tato část obvodu neaktivní.

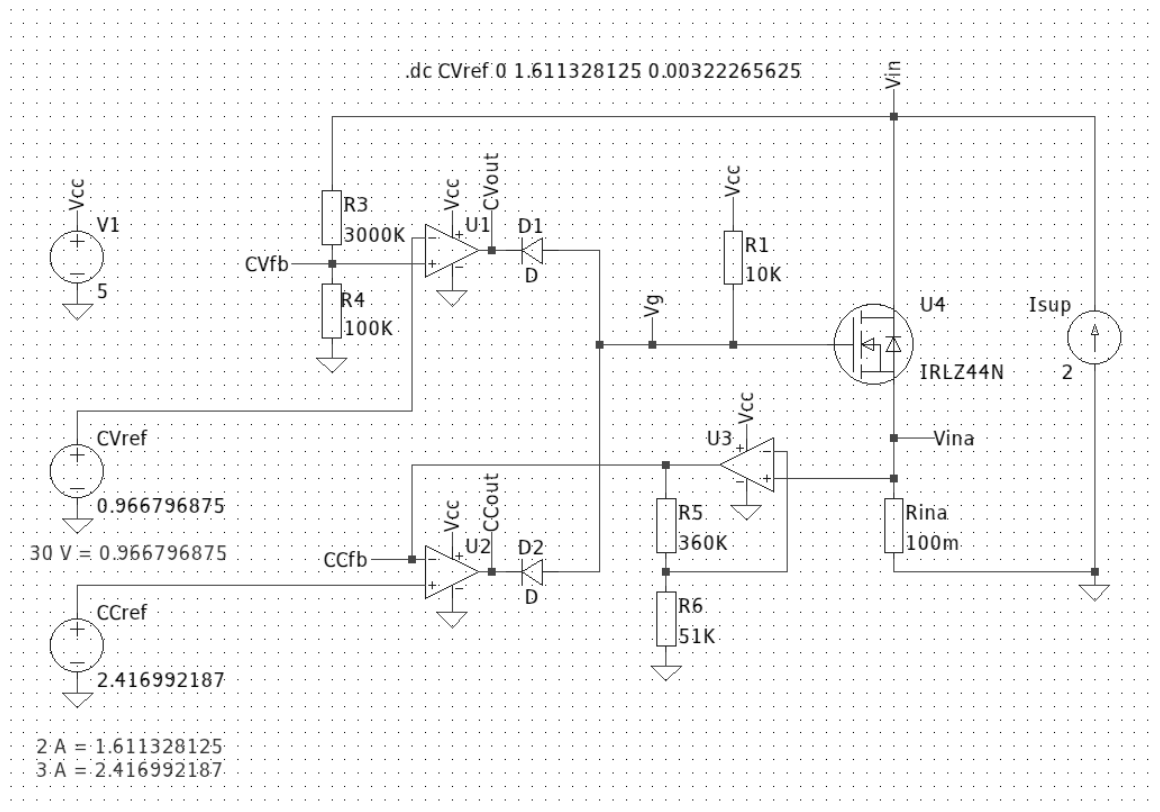
Na obrázku 4.13 je vykreslen průběh napětí na zdroji konstantního proudu 2 A při změně referenčního napětí CV režimu. Napětí by se mělo měnit od 0 do 50 V. Na obrázku 4.14 je schéma této simulace. Je vidět, že napětí se skutečně mění od 0 do 50 V.

Při poslední simulaci byla nastavena CV reference tak, aby napětí na zdroji bylo 30 V. Proměnná je hodnota zdroje proudu od 0 do 2 A. Výsledná simulace je na obrázku 4.15 a její schéma na obrázku 4.16.

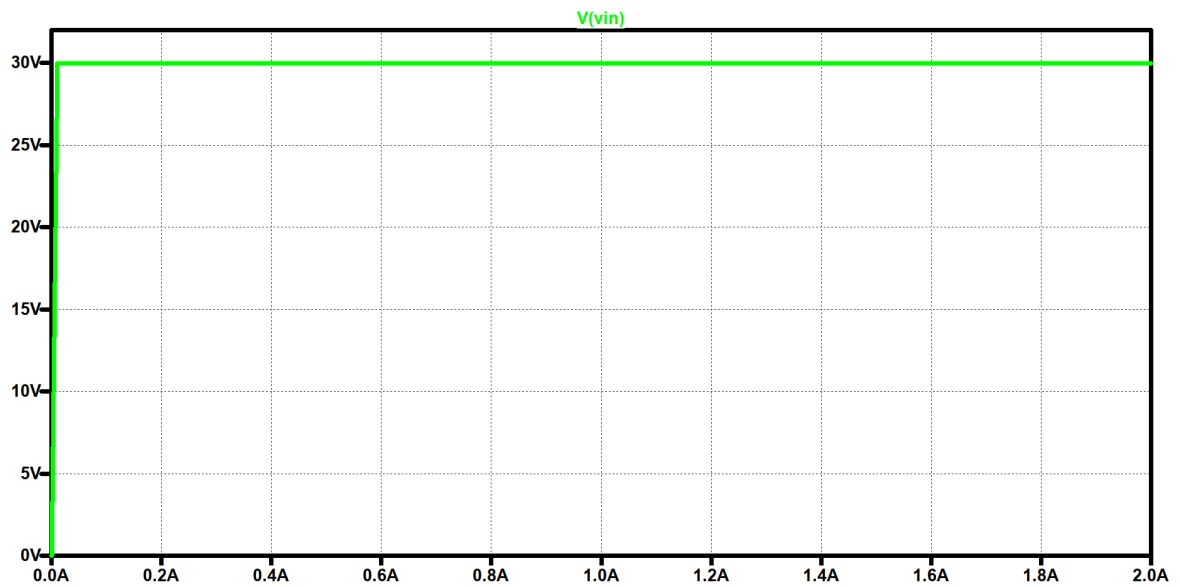
Všechny simulované průběhy dopadly podle očekávání, tudíž byla potvrzena funkčnost zapojení.



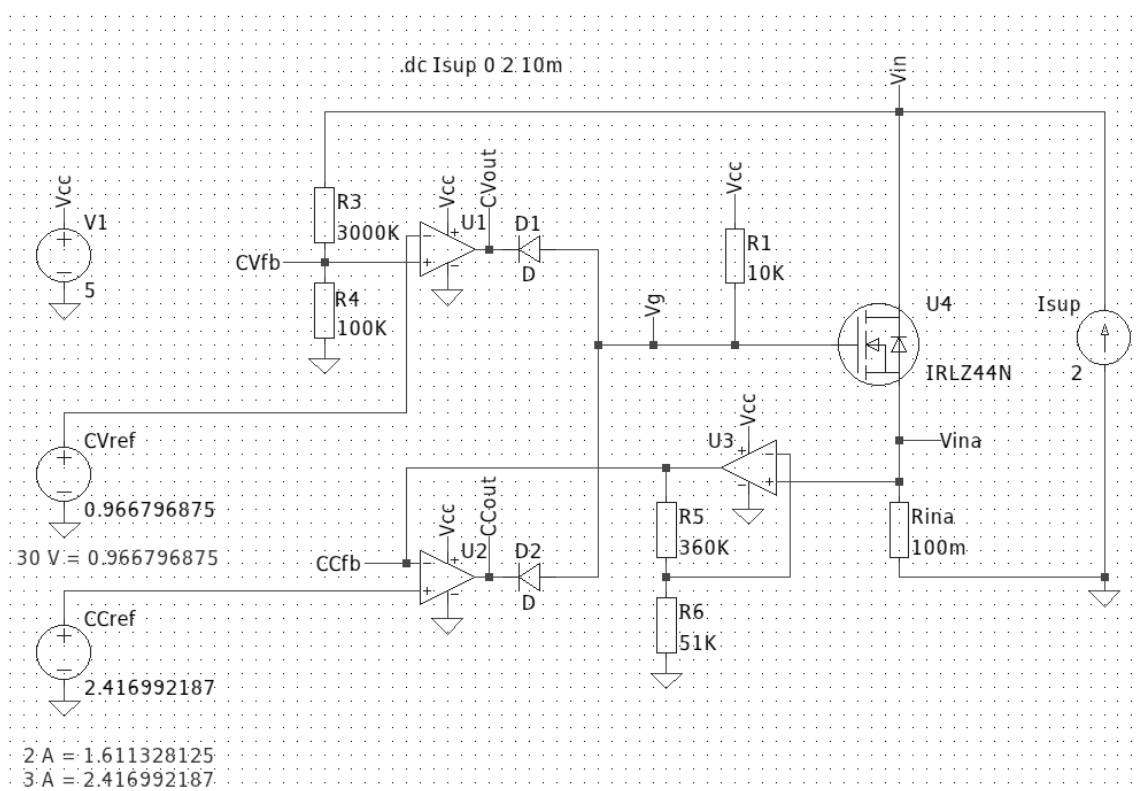
Obrázek 4.13: Napětí na zdroji proudu při změně reference CV režimu



Obrázek 4.14: Schéma simulace zátěže při změně reference CV režimu



Obrázek 4.15: Napětí na zdroji proudu při změně jeho proudu



**Obrázek 4.16:** Schéma simulace zátěže v CV režimu při změně proudu testového zdroje

## Kapitola 5

### Realizace elektronické zátěže

#### 5.1 Mechanická konstrukce

Elektronická zátěž byla zrealizována ve formě přístroje zobrazeného na obrázku 5.1. Mechanická konstrukce byla řešena plastovou krabicí s vyjímatelnými čely, do nichž byly vyvrtány a vyřezány potřebné otvory pro upevnění dalších dílů.

Zepředu je na panelu vlevo připevněn vypínač spínající síťové napětí pro napájecí zdroj elektronické zátěže. Dále je na panel přišroubován displej a napravo od něj dvě tlačítka bez aretace. Na pravé části předního panelu zařízení lze vidět rotační enkodér, zdířky pro připojení testovaného zdroje a držák na pojistku F1.

Zadní panel přístroje je zobrazen na obrázku 5.2. Na jedné straně lze vidět konektor pro připojení napájení. Konektor obsahuje i držák na trubičkovou pojistku. Na druhé straně panelu je vyřezán otvor pro přívod vzduchu skrz ventilátor dovnitř krabice. Ventilátor je chráněn kovovou mřížkou.

Na obrázcích 5.3 a 5.4 lze vidět vnitřek zařízení. Na levé straně je připevněn 5V napájecí zdroj. Přibližně uprostřed je přišroubována na distančních sloupcích deska plošných spojů elektronické zátěže, jež má připevněné dva výkonové tranzistory na hliníkovém chladiči. Na něj je také přilepen teplovodivým lepidlem termistor pro měření jeho teploty. Chladič je umístěn před ventilátorem, který na něj fouká vzduch zvenčí a tím ho ochlazuje.

##### 5.1.1 Deska plošných spojů

V příloze A je schéma DPS. První list obsahuje hlavní schéma, které obsahuje napájení, napětovou referenci, DA převodník a digitální část. Bloky *Logic\_level\_converter-SCL*, *Logic\_level\_converter-SDA* a *Power\_circuit* jsou rozkresleny na následujících listech. Listy 2 a 3 obsahují totožné schéma s jedním tranzistorem typu MOSFET. Toto zapojení slouží k převodu napětových úrovní z 5 V na 3,3 V a opačně. Na posledním listu se nachází schéma výkonové části zapojení.

V příloze B lze vidět vrchní a spodní stranu osazovacího plánu DPS.

Příloha C obsahuje rozvržení vodivých cest DPS na vrchní a spodní straně. Deska byla navržena s rozdělenou digitální a analogovou zemí, které se spojují



Obrázek 5.1: Přední panel elektronické zátěže



Obrázek 5.2: Zadní panel elektronické zátěže

jen v jednom bodě, aby se zabránilo zemním smyčkám a šumům v měřicí analogové části obvodu [20].

## 5.2 Firmware

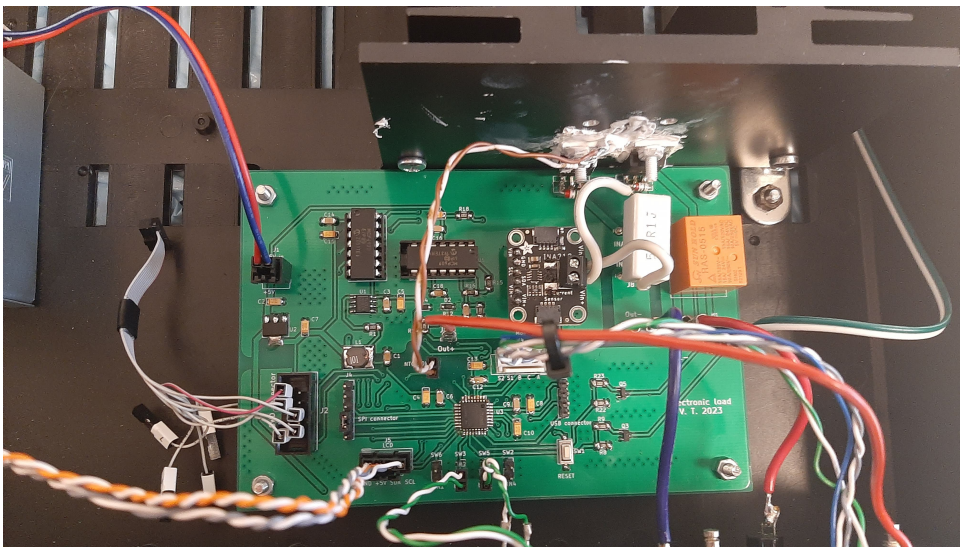
Vývojový diagram programu pro mikrokontrolér je zobrazen na obrázcích 5.5, 5.6, 5.7 a 5.8.

Vývojový diagram začíná inicializací a následně přejde do nekonečné smyčky, na jejímž začátku je čtení napětí a proudu. Napětí je čteno vnitřním AD převodníkem mikrokontroléru a proud je čten pomocí integrovaného obvodu INA219, jenž zmeřenou hodnotu proudu posílá přes sběrnici I2C.

Dalším krokem je regulace režimu CR, která zajišťuje nastavení protékajícího proudu zátěží pomocí obvodu režimu konstantního proudu. Proud



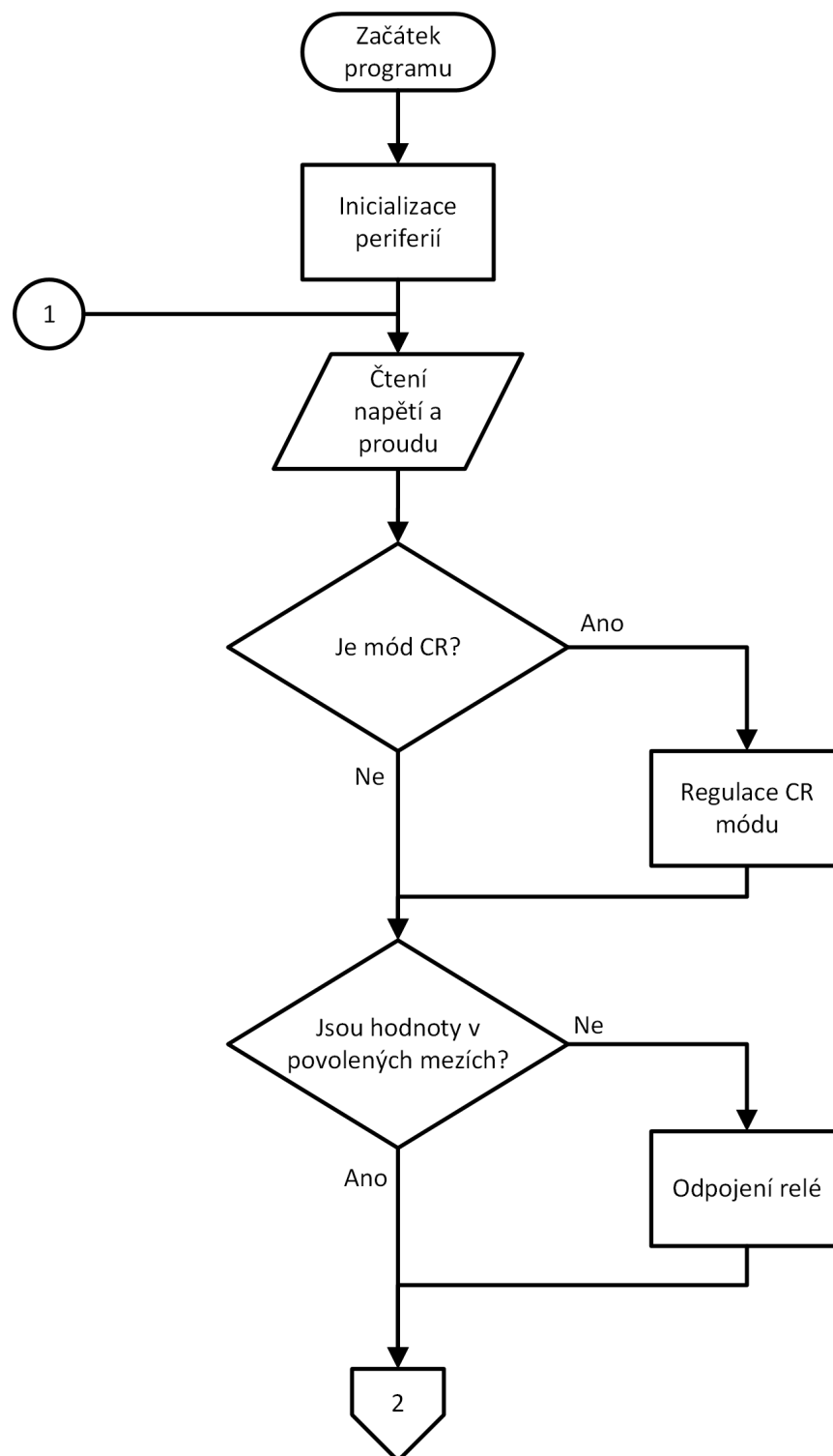
**Obrázek 5.3:** Vnitřek elektronické zátěže



**Obrázek 5.4:** Vnitřek elektronické zátěže - detail DPS

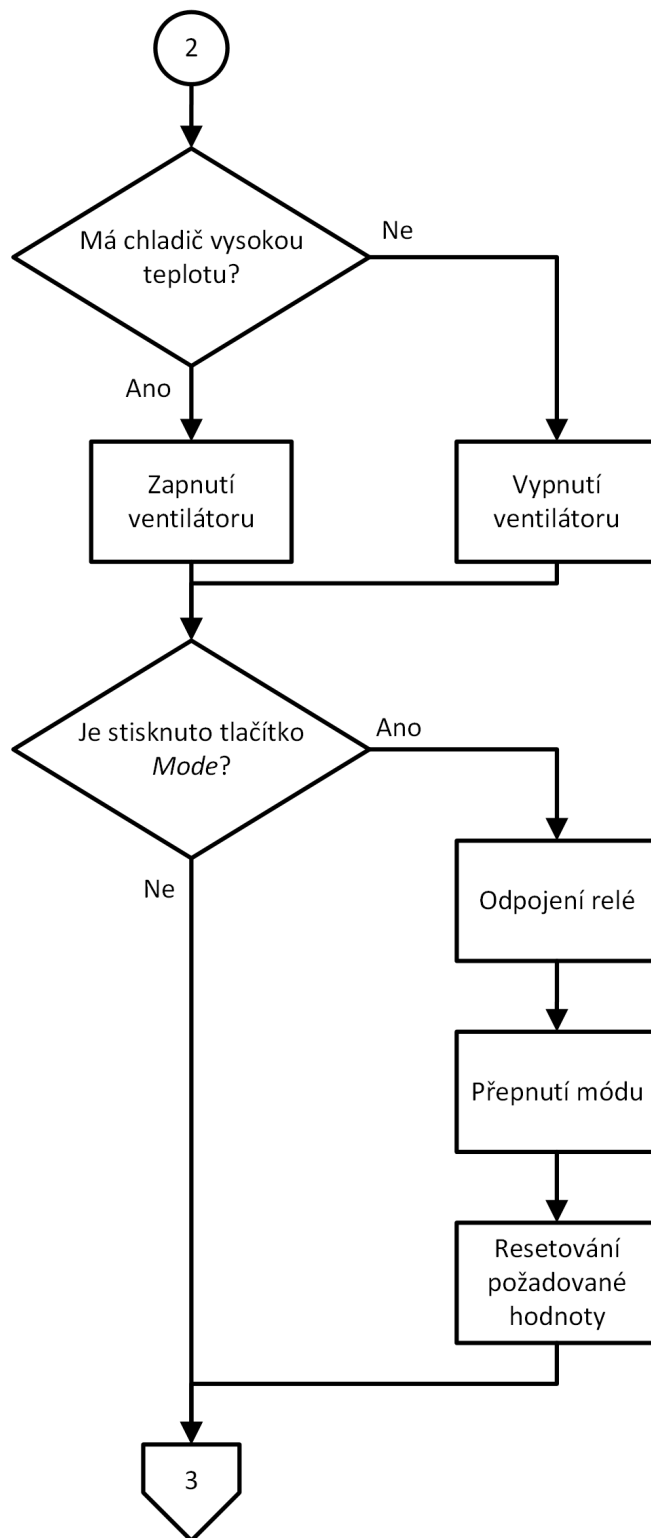
je určen Ohmovým zákonem ze změřeného vstupního napětí a nastaveného odporu.

Poté program testuje, zda jsou hodnoty v povolených mezích. Hodnotami jsou myšleny vstupní napětí, teplota chladiče, vyzařovaný výkon zátěží a proud zátěží. Také je kontrolováno záporné vstupní napětí a příliš nízké vstupní napětí. Pokud je zaznamenáno záporné vstupní napětí anebo je mimo

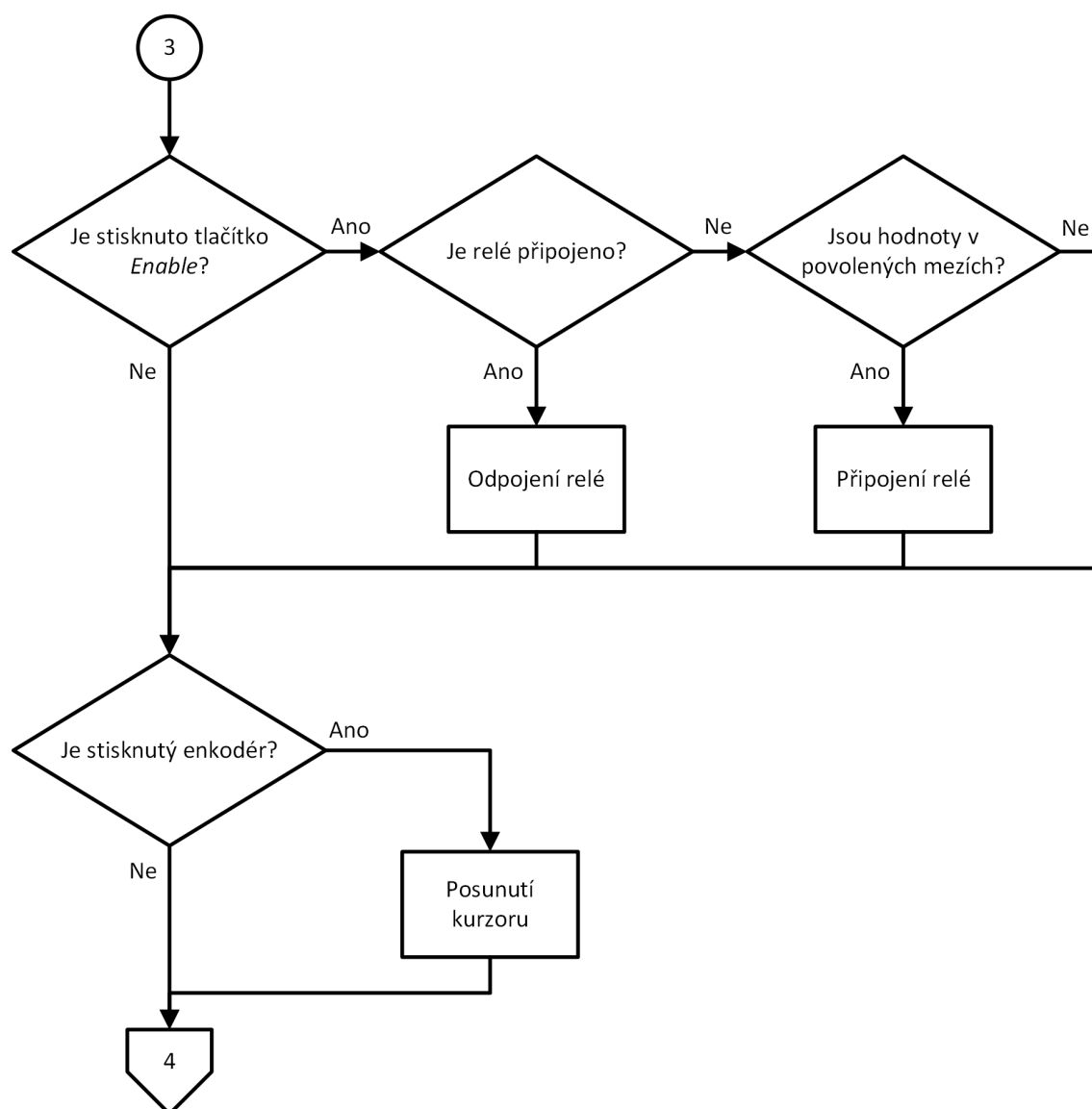


Obrázek 5.5: Vývojový diagram firmwaru - 1. část





Obrázek 5.6: Vývojový diagram firmwaru - 2. část



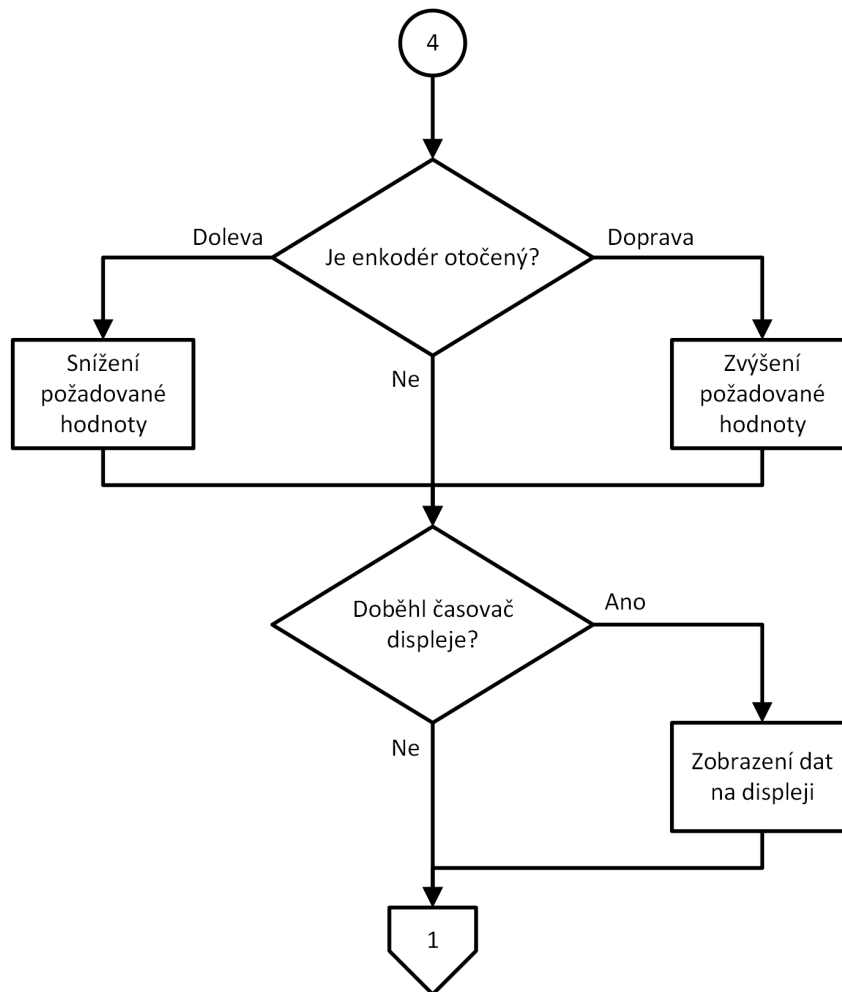
Obrázek 5.7: Vývojový diagram firmwaru - 3. část

povolený limit vstupní napětí, teplota chladiče či výkon, relé odpojí testovaný zdroj od zátěže.

Následuje kontrola teploty chladiče, která v případě jeho vysoké teploty zapne aktivní chlazení.

V nekonečné smyčce je dále testováno, zda-li bylo stisknuto jakékoliv tlačítko. Poté je testován stisk enkodéru a jeho otočení, které zajišťuje změnu požadované hodnoty aktivního režimu.

Nakonec je dotazován časovač, jehož doběhnutí určuje, že mají být přepsána data na displeji. Program dále pokračuje na začátek smyčky, kde je čteno napětí a proud.



Obrázek 5.8: Vývojový diagram firmwaru - 4. část

Použitý mikrokontrolér nedisponuje hardwarovou děličkou, proto je použit pro výpočet 12-ti bitové referenční hodnoty vzorec 5.1 pro režim CV a vzorec 5.2 pro režim CC. Dělení lze v tomto případě provést pouhým bitovým posunem vpravo. Výsledná hodnota je přes rozhraní SPI nahrána do DA převodníku. Napětí  $U$  je hodnota v  $mV$  nastavená uživatelem. Proud  $I$  je v  $mA$ . Konstanty  $FAKTOR$  a  $OFFSET$  lze kalibrací měnit, aby výsledná hodnota byla co nejpřesnější.

$$DAC = \frac{U \cdot FAKTOR}{2^{20}} + OFFSET = ((U \cdot FAKTOR) \gg 20) + OFFSET \quad (5.1)$$

$$DAC = \frac{I \cdot FAKTOR}{2^{20}} + OFFSET = ((I \cdot FAKTOR) \gg 20) + OFFSET \quad (5.2)$$

### 5.3 Kalibrace

Pro přesnější chování elektronické zátěže je třeba zařízení zkalibrovat.

Nejprve byl kalibrován AD převodník, který měří napětí testovaného zdroje a napětí z děliče s termistorem. Měření napětí je klíčové v režimu CR, při kterém se změřené napětí využívá pro výpočet nastavované reference. Byla použita dvoubodová kalibrační metoda podle dokumentu [21]. Periferie AD převodníku v mikrokontroléru disponuje mimo jiné dvěma registry (GAINCORR a OFFSETCORR), jež jsou určeny přímo pro kalibraci. V programu při inicializaci AD převodníku jsou do zmíněných registrů nahrány hodnoty získané kalibrací a dále se v programu kalibrace nemusí řešit. Výsledná hodnota převodníku získaná v programu je již zkalibrována. První zmíněný registr slouží pro napravení zisku a druhý pro nastavení offsetu. Mikrokontrolér převádí změřenou hodnotu  $ADC_{meas}$  na zkalibrovanou hodnotu  $ADC_{calib}$  podle vzorce 5.3.

$$ADC_{calib} = (ADC_{meas} - OFFSETCORR) \cdot \frac{GAINCORR}{2048} \quad (5.3)$$

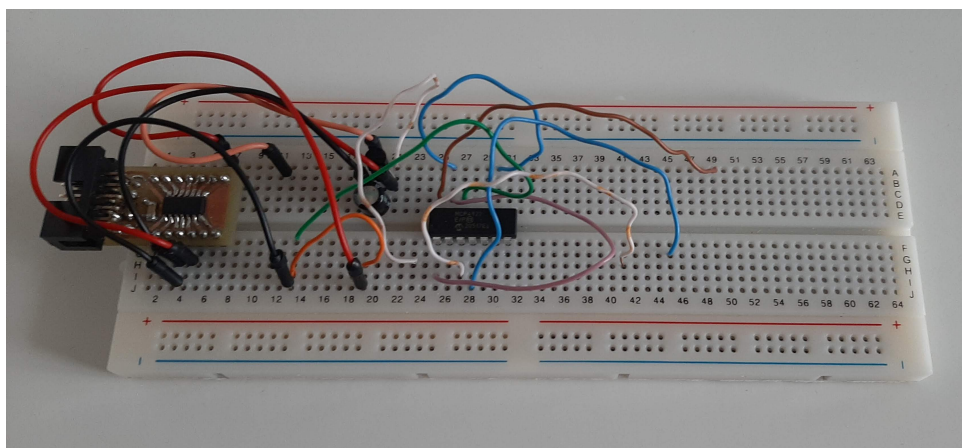
Druhý případ kalibrace elektronické zátěže se týká režimů CV a CC. Režim konstantního odporu se nekalibruje, protože je řízen a nastavován přes režim CC. Kalibrace se snaží o co nejmenší rozdíl mezi nastavenou hodnotou daného režimu a skutečnou hodnotou. Kalibrací se upravují kódová slova DA převodníku. Byla použita opět dvoubodová metoda, nicméně ji bylo nutné upravit, protože dokument [21] zmiňuje kalibraci pouze AD převodníku, nikoliv DA převodníku. Kalibrační konstanty jsou použity pro výpočet nových konstant  $FAKTOR$  a  $OFFSET$  ze vzorců 5.1 a 5.2.

### 5.4 Testování

V rámci realizace elektronické zátěže byly prováděny testy a dílčí ověřování funkčnosti pomocí nepájivého pole a mikrokontroléru SAMD11C14A. Tento způsob testování byl zvolen, protože ještě nebyla k dispozici zhotovená a osazená DPS elektronické zátěže. Mikrokontrolér SAMD11C14A je vyráběn ve 14-ti pinovém SMD pouzdru, a proto byl vytvořen adaptér s programovacím konektorem a kolíkovými lištami, který lze vsadit do nepájivého pole. Příklad testovací sestavy je na obrázku 5.9.

### 5.5 Kontrolní měření

Před kontrolním měřením a ověřením funkčnosti elektronické zátěže bylo zařízení zkalibrováno podle sekce 5.3. Měření bylo provedeno pro všechny tři požadované režimy a v průběhu měření byl vstup zátěže sledován osciloskopem, zda-li je napětí zdroje po ustálení konstantní a nedochází k oscilacím. Použité měřicí přístroje jsou vypsány v tabulce 5.1. Technické údaje použitého digitálního multimetru jsou v tabulce 5.2.



**Obrázek 5.9:** Nepájivé pole s testovacími součástkami - vlevo adaptér s mikrokontrolérem

Typ přístroje	Název přístroje	Výrobce	Počet kusů
Laboratorní zdroj	CPX400D	AIM-TTI	1
Digitální multimetr	M 3270 D	METEX	1
Digitální osciloskop	DS1204B	Rigol	1

**Tabulka 5.1:** Seznam měřicích přístrojů

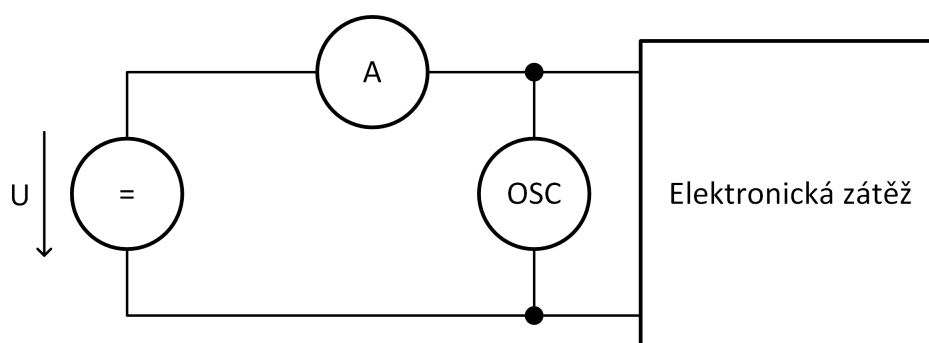
	Rozsah	Rozlišení	Přesnost $\pm(\%rdg+dig)$
DC napětí	4 V	1 mV	0,5 % + 1
	40 V	10 mV	0,5 % + 1
DC proudy	4 mA	1 $\mu A$	0,8 % + 1
	40 mA	10 $\mu A$	1,2 % + 1
	400 mA	100 $\mu A$	1,2 % + 1
	20 A	10 mA	2,0 % + 3

**Tabulka 5.2:** Technické údaje multimetru METEX M 3270 D [22]

### ■ 5.5.1 Režim CC

Pro režim konstantního proudu bylo použito zapojení přístrojů znázorněné na obrázku 5.10. Nejprve byla testována reakce zařízení na změny napětí laboratorního zdroje  $U_t$  při nastaveném proudu zátěží  $I_z$ . Hodnoty včetně skutečného proudu zátěží  $I_m$  jsou zobrazeny v tabulce 5.3 a vyneseny do grafu 5.11.

Lze vidět, že elektronická zátěž udržuje konstantní nastavený proud. Relativní odchylky proudu zátěží jsou vyneseny do grafu 5.12. Největší odchylky jsou u požadovaného proudu 10 mA a 500 mA. V prvním případě je nejistota způsobena nedokonalostí kalibrace režimu CC. Požadovaný proud 10 mA je totiž přepočten na kódové slovo DA převodníku, které odpovídá proudu 11 mA, čemuž je změřená hodnota velmi blízká. Velkou relativní odchylku požadovaného proudu 500 mA může z velké části způsobovat nepřesnost



Obrázek 5.10: Schéma zapojení při měření - režim CC

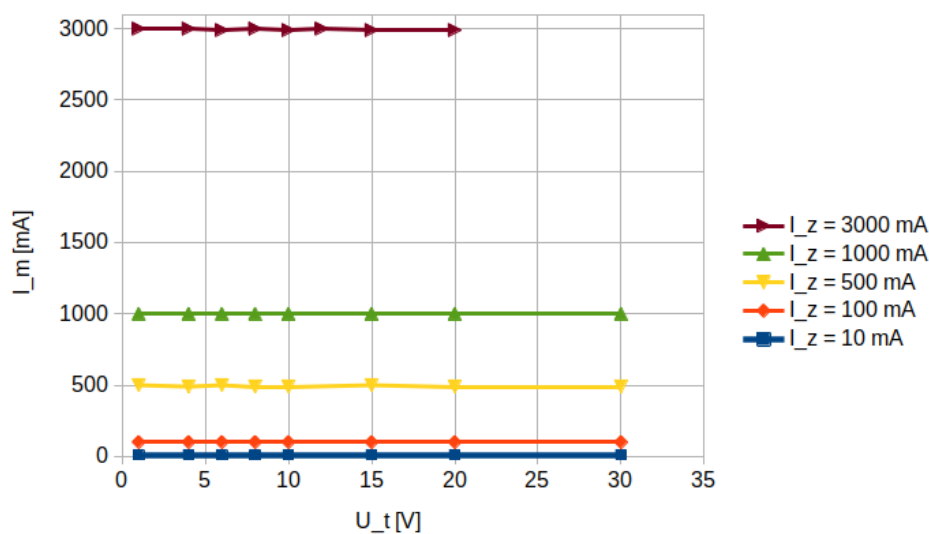
$I_z$ [mA]	$U_t$ [V]	1	4	6	8	10	15	20	30
10	$I_m$ [mA]	11,06	11,08	11,06	11,06	11,06	11,08	11,08	11,08
$I_z$ [mA]	$U_t$ [V]	1	4	6	8	10	15	20	30
100	$I_m$ [mA]	100,4	100,4	100,4	100,4	100,4	100,2	100,2	100,2
$I_z$ [mA]	$U_t$ [V]	1	4	6	8	10	15	20	30
500	$I_m$ [mA]	500	490	500	490	490	500	490	490
$I_z$ [mA]	$U_t$ [V]	1	4	6	8	10	15	20	30
1000	$I_m$ [mA]	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000
$I_z$ [mA]	$U_t$ [V]	1	4	6	8	10	12	15	20
3000	$I_m$ [mA]	3000	3000	2990	3000	2990	3000	2990	2990

Tabulka 5.3: Režim CC - měření proudu zátěží  $I_m$  při změně napětí zdroje  $U_t$  pro referenční proud  $I_z$ 

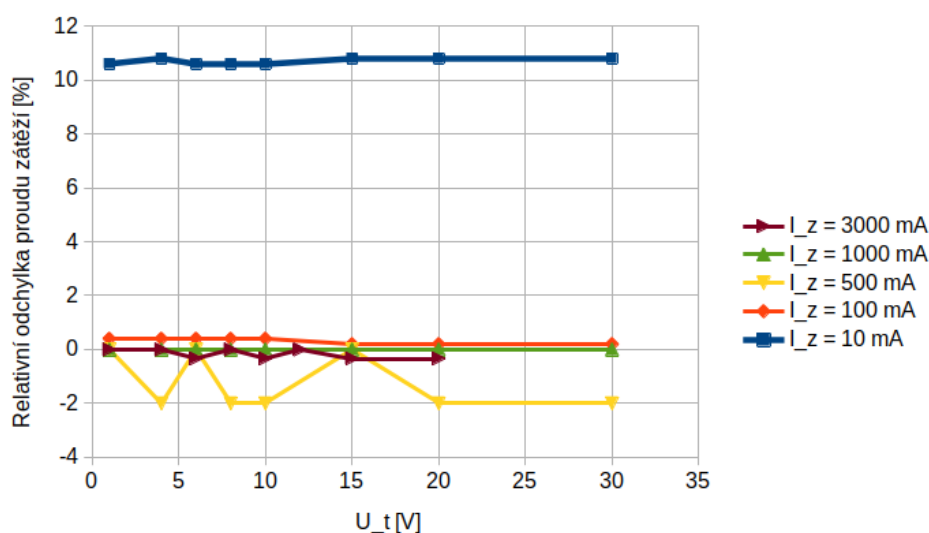
měřicího přístroje, jehož rozsah bylo nutné přepnout ze 400 mA na 20 A.

Následující měření ověřovalo chování zátěže při různých požadovaných hodnotách proudu. Naměřená data jsou v tabulce 5.4. Do grafu 5.13 byl vynesena průběh pouze pro nastavené napětí laboratorního zdroje 15 V. Pro ostatní napětí zdroje by byla křivka také lineární. Na obrázku 5.14 je vykreslena relativní odchylka změřeného proudu od nastaveného proudu. Největší odchylky vznikaly na začátku charakteristiky a jsou způsobeny stejným důvodem jako odchylka pro  $I_z = 10$  mA v grafu 5.12. Pro proudy 1 A a 3 A byla relativní nejistota tak malá, že nebyl zaznamenán multimetrem rozdíl mezi nastavenou a skutečnou hodnotou proudu, a proto byla vypočtena nulová relativní odchylka. Maximální relativní odchylka je 10,7 %.

Při větších hodnotách proudu (nad 1 A) byl zaznamenán problém se stabilitou - napětí na elektronické zátěži začlo oscilovat. Problém se podařilo zcela vyřešit zvětšením kapacity C19 ve zpětné vazbě regulační smyčky a zvětšením rezistorů R19 a R20, které jsou zapojeny před svorkami gate výkonových tranzistorů. Těmito změnami se zpomalila odezva zátěže, nicméně pro stejnosměrnou zátěž, kterou se tato práce zabývá, to není podstatný parametr.



**Obrázek 5.11:** Režim CC - závislost proudu zátěží na změně napětí zdroje



**Obrázek 5.12:** Režim CC - relativní odchylka proudu zátěží při změně napětí zdroje

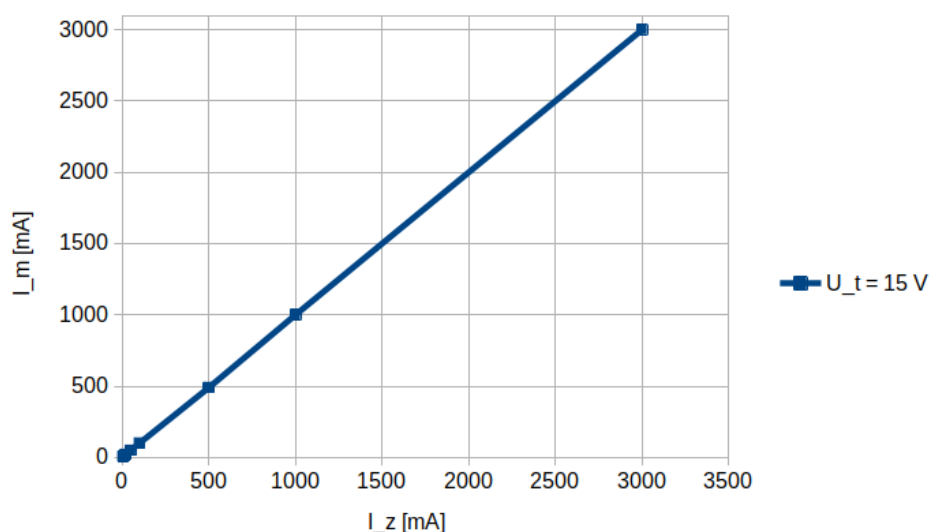
## 5.5.2 Režim CV

V režimu konstantního napětí byly měřicí přístroje zapojeny podle schématu 5.15. V tabulce 5.5 jsou zaznamenány hodnoty z měření vlivu velikosti proudu proudového zdroje  $I_t$  na nastavené napětí na zátěži  $U_z$ .  $U_m$  je skutečné napětí změřené přesným multimetrem. Získané hodnoty jsou také vyneseny do grafu 5.16. Relativní odchylky lze vidět na obrázku 5.17.

Z grafu 5.16 je možné vyčíst, že elektronická zátěž udržuje na svých svorkách

U <sub>t</sub> [V]	I <sub>z</sub> [mA]	5	10	20	50	100	500	1000	3000
5	I <sub>m</sub> [mA]	6,1	11	20,78	50,2	100,2	490	1000	3000
U <sub>t</sub> [V]	I <sub>z</sub> [mA]	5	10	20	50	100	500	1000	3000
10	I <sub>m</sub> [mA]	6,12	11	20,8	50,2	100,2	490	1000	3000
U <sub>t</sub> [V]	I <sub>z</sub> [mA]	5	10	20	50	100	500	1000	3000
15	I <sub>m</sub> [mA]	6,08	11	20,8	50,2	100,2	490	1000	3000
U <sub>t</sub> [V]	I <sub>z</sub> [mA]	5	10	20	50	100	500	1000	3000
20	I <sub>m</sub> [mA]	6,1	11	20,8	50,2	100,2	490	1000	3000
U <sub>t</sub> [V]	I <sub>z</sub> [mA]	5	10	20	50	100	500	1000	2000
30	I <sub>m</sub> [mA]	6,08	11	20,78	50,2	100,2	490	1000	2000

**Tabulka 5.4:** Režim CC - měření proudu zátěží I<sub>m</sub> při změně referenčního proudu I<sub>z</sub> pro napětí zdroje U<sub>t</sub>

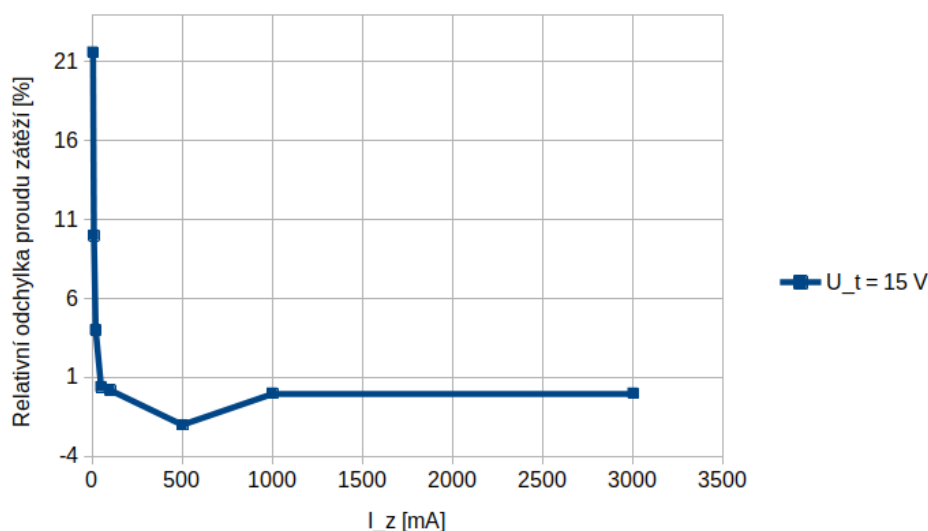


**Obrázek 5.13:** Režim CC - závislost proudu zátěží na změně nastaveného proudu

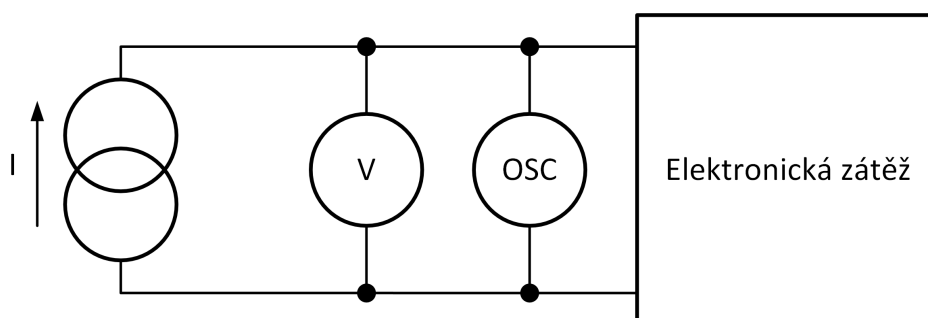
U <sub>z</sub> [V]	I <sub>t</sub> [mA]	50	100	200	300	600	1000	3000
5	U <sub>m</sub> [V]	4,99	4,99	4,99	4,99	4,99	5	5,01
U <sub>z</sub> [V]	I <sub>t</sub> [mA]	50	100	200	300	600	1000	3000
10	U <sub>m</sub> [V]	10,01	10,01	10,01	10,01	10,01	10,02	10,03
U <sub>z</sub> [V]	I <sub>t</sub> [mA]	50	100	200	300	600	1000	3000
15	U <sub>m</sub> [V]	15,03	15,03	15,03	15,03	15,03	15,04	15,04
U <sub>z</sub> [V]	I <sub>t</sub> [mA]	50	100	200	300	600	1000	3000
20	U <sub>m</sub> [V]	20,02	20,02	20,02	20,02	20,02	20,02	20,04
U <sub>z</sub> [V]	I <sub>t</sub> [mA]	50	100	200	300	600	1000	2000
30	U <sub>m</sub> [V]	29,99	29,99	29,99	29,99	29,99	30	30

**Tabulka 5.5:** Režim CV - měření napětí U<sub>m</sub> při změně proudu zdroje I<sub>t</sub> pro referenční napětí U<sub>z</sub>





**Obrázek 5.14:** Režim CC - relativní odchylka proudu zátěži při změně nastaveného proudu



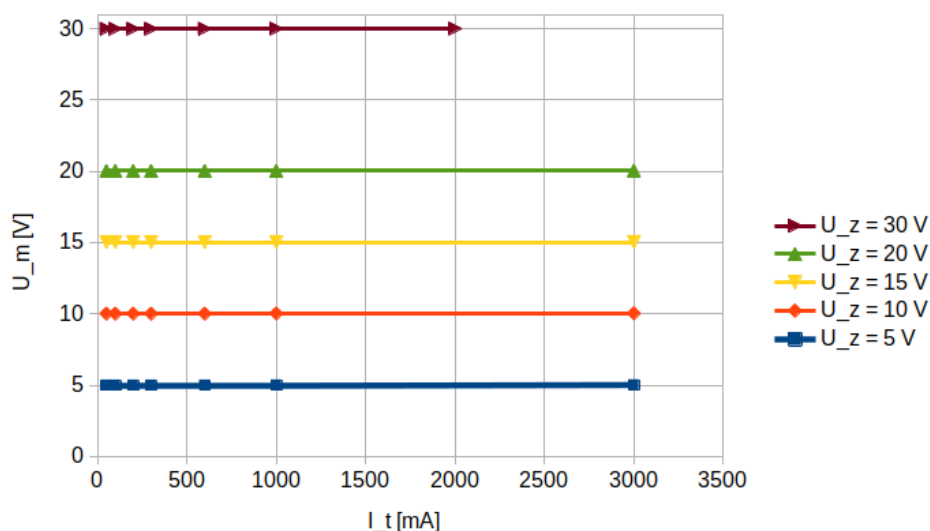
**Obrázek 5.15:** Schéma zapojení při měření - režim CV

konstantní napětí, které bylo nastaveno uživatelem. Relativní odchylky se během průběhu měření výrazně neměnily.

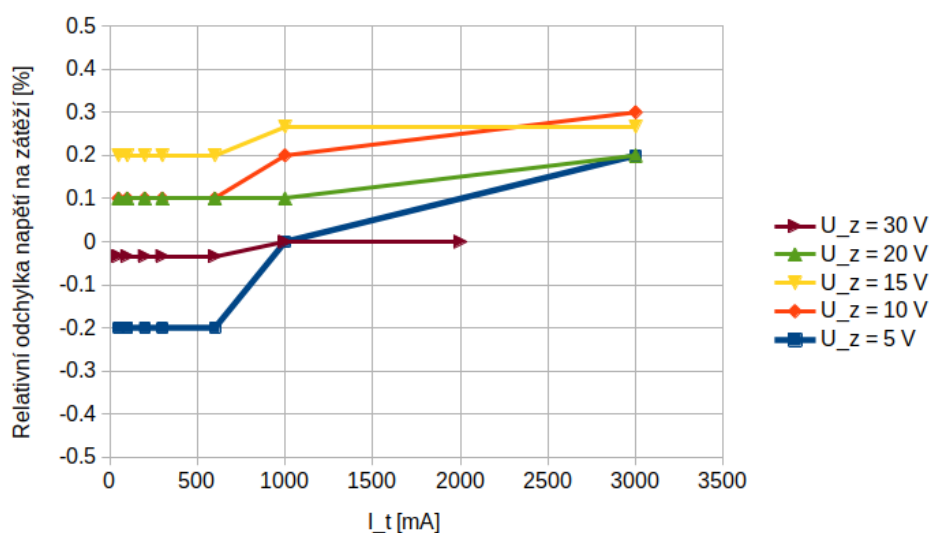
Při dalším ověření funkčnosti režimu CV byl nastaven konstantní proud ze zdroje proudu  $I_t$  a poté byla nastavována požadovaná hodnota napětí na zátěži  $U_z$  a měřena skutečná hodnota napětí  $U_m$ . Získaná data jsou v tabulce 5.6 a v grafu 5.18.

Graf vykazuje lineární průběh, jak bylo očekáváno. Relativní odchylky napětí od požadované hodnoty jsou vyneseny v grafu 5.19. Maximální relativní odchylka režimu CV je 0,22 %.

Při nízkých hodnotách proudu byl zaznamenán problém se stabilitou zátěže. Problém se podařilo částečně odstranit stejnou metodou jako v režimu CC, a to zvětšením kapacity C21 ve zpětné vazbě regulační smyčky. Nicméně přibližně pro proud menší než 100 mA má zátěž stále malou tendenci oscilovat a pro proud menší než 50 mA se nepodařilo problém vyřešit.



Obrázek 5.16: Režim CV - závislost napětí na zátěži na změně proudu zdroje



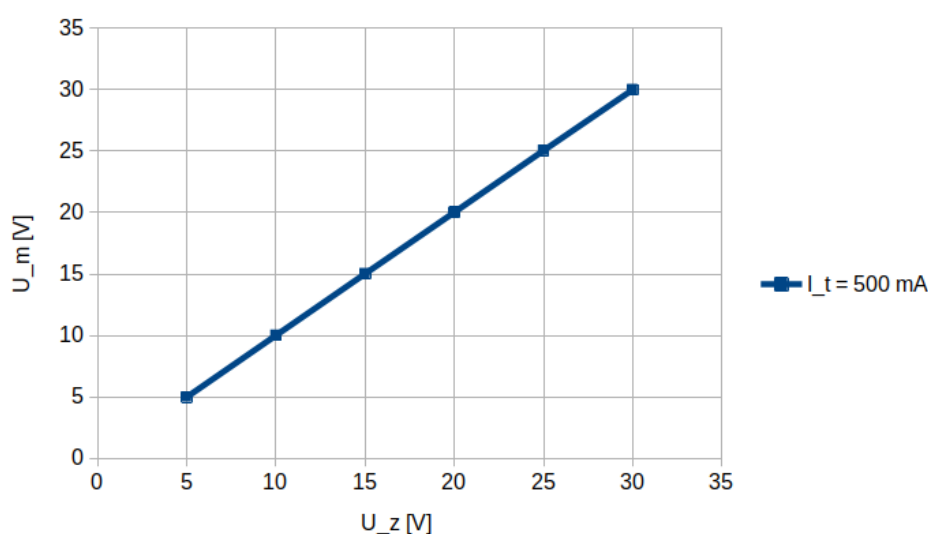
Obrázek 5.17: Režim CV - relativní odchylka napětí na zátěži při změně proudu zdroje

### 5.5.3 Režim CR

Poslední testovaný režim je režim konstantního odporu. Přesnost tohoto módu závisí na změřeném vstupním napětí zátěže, z něhož se vypočítá nastavovaný proud. Přesnost režimu CR tedy také závisí na přesnosti režimu CC. Nejprve byla naměřena závislost odporu zátěže na napětí laboratorního zdroje. Bylo použito zapojení na obrázku 5.20. Na zátěži byl nastaven požadovaný odpor  $R_z$  a poté bylo nastavováno napětí zdroje  $U_t$  a odečítán proud, z něhož

$I_t$ [mA]	$U_z$ [V]	5	10	15	20	25	30
50	$U_m$ [V]	4,98	10	15,03	20,02	25,04	29,99
$I_t$ [mA]	$U_z$ [V]	5	10	15	20	25	30
100	$U_m$ [V]	4,99	10,01	15,03	20,02	25,04	29,99
$I_t$ [mA]	$U_z$ [V]	5	10	15	20	25	30
500	$U_m$ [V]	4,99	10,01	15,03	20,02	25,04	29,99
$I_t$ [mA]	$U_z$ [V]	5	10	15	20	25	30
1000	$U_m$ [V]	4,99	10,01	15,04	20,02	25,04	29,99
$I_t$ [mA]	$U_z$ [V]	5	6	8	10	15	20
3000	$U_m$ [V]	5	6,02	8,01	10,02	15,05	20,03

**Tabulka 5.6:** Režim CV - měření napětí  $U_m$  při změně referenčního napětí  $U_z$  pro proud zdroje  $I_t$

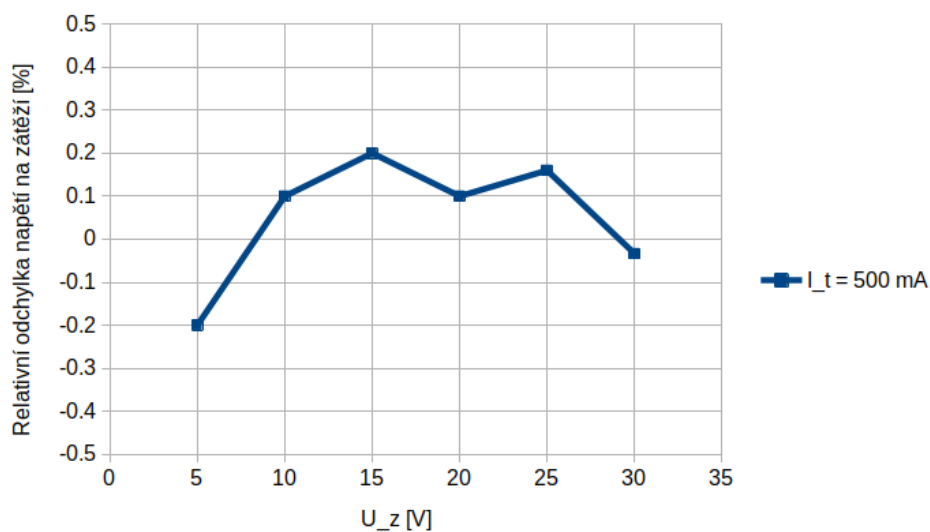


**Obrázek 5.18:** Režim CV - závislost napětí na zátěži na změně nastaveného napětí

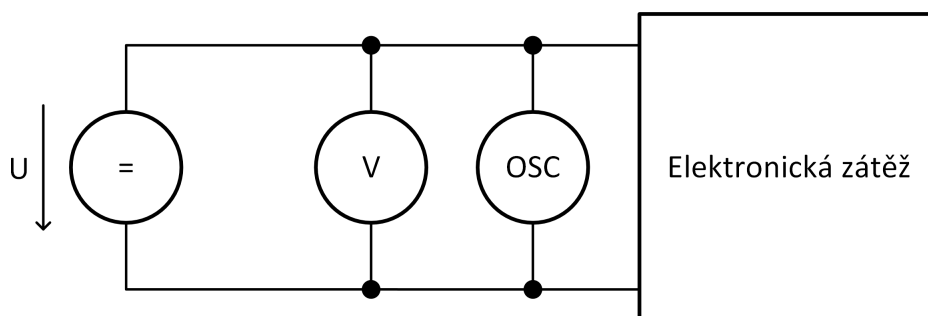
se vypočítal skutečný odpor zátěže  $R_m$ . Tabulka 5.7 a graf 5.20 obsahují naměřená data. V grafu 5.22 je vynesena relativní odchylka odporu od požadované hodnoty odporu.

Lze pozorovat, že elektronická zátěž udržuje konstantní odpor při různých hodnotách napětí zdroje. Relativní odchylky při zvyšování napětí zdroje klesají.

Při dalším měření byla sledována závislost naměřeného odporu na nastaveném odporu zátěže. Bylo použito schéma zapojení, které je na obrázku 5.23. Nejprve bylo nastaveno napětí zdroje  $U_t$  a poté byl nastavován odpor zátěže  $R_z$  a do tabulky 5.8 zapisován skutečný odpor  $R_m$ , jenž byl vypočítán pomocí proudu měřeného multimetrem. Pro napětí zdroje  $U_t = 15$  V byla vynesena závislost do grafu 5.24. Relativní odchylka odporu zátěže je v grafu 5.25.



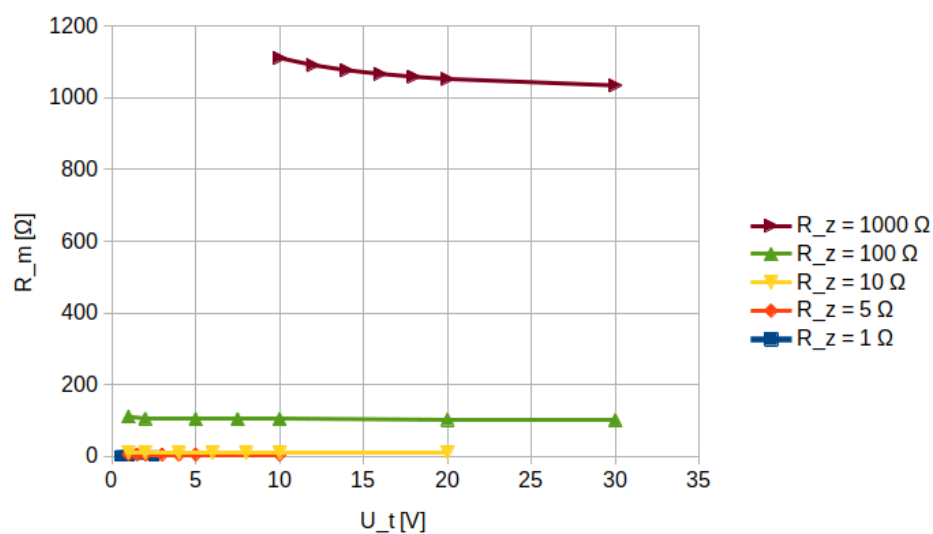
**Obrázek 5.19:** Režim CV - relativní odchylka napětí na zátěži při změně nastaveného napětí



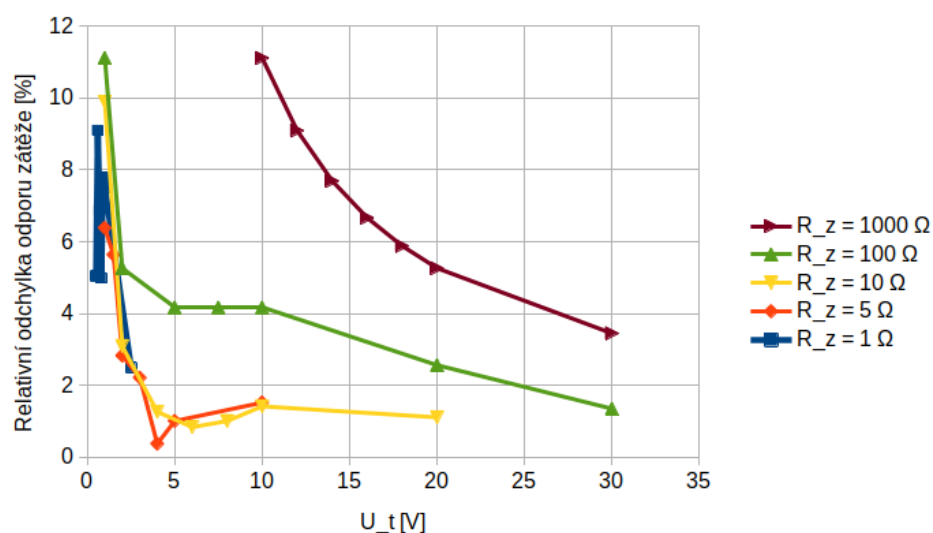
**Obrázek 5.20:** Schéma zapojení při měření - režim CR

$R_z$ [ohm]	$U_t$ [V]	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9	1	2,5
1	$R_m$ [ohm]	1,050	1,091	1,069	1,050	1,078	1,075	1,025
$R_z$ [ohm]	$U_t$ [V]	1	1,5	2	3	4	5	10
5	$R_m$ [ohm]	5,319	5,282	5,141	5,111	5,019	5,051	5,076
$R_z$ [ohm]	$U_t$ [V]	1	2	4	6	8	10	20
10	$R_m$ [ohm]	10,989	10,309	10,127	10,084	10,101	10,142	10,111
$R_z$ [ohm]	$U_t$ [V]	1	2	5	7,5	10	20	30
100	$R_m$ [ohm]	111,11	105,26	104,17	104,17	104,17	102,56	101,35
$R_z$ [ohm]	$U_t$ [V]	10	12	14	16	18	20	30
1000	$R_m$ [ohm]	1111	1091	1077	1067	1059	1053	1034

**Tabulka 5.7:** Režim CR - měření odporu  $R_m$  při změně napětí zdroje  $U_t$  pro referenční odpor  $R_z$



**Obrázek 5.21:** Režim CR - závislost odporu zátěže na změně napětí zdroje

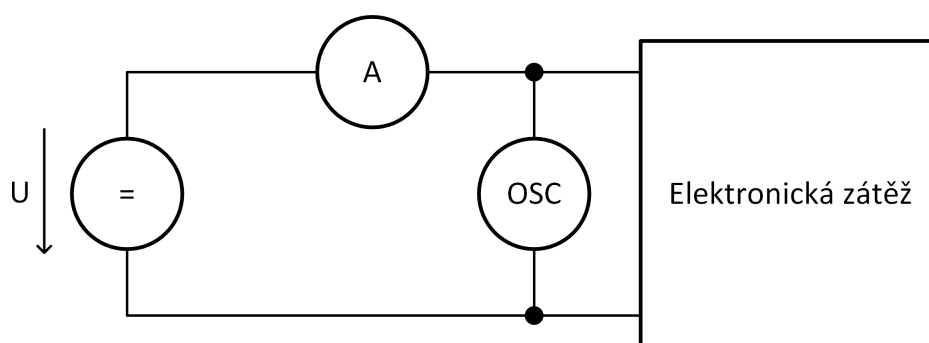


**Obrázek 5.22:** Režim CR - relativní odchylka odporu zátěže při změně napětí zdroje

Jak bylo očekáváno, odpor zátěže se mění lineárně v závislosti na nastaveném odporu. Maximální relativní odchylka režimu CR je 7,02 %.

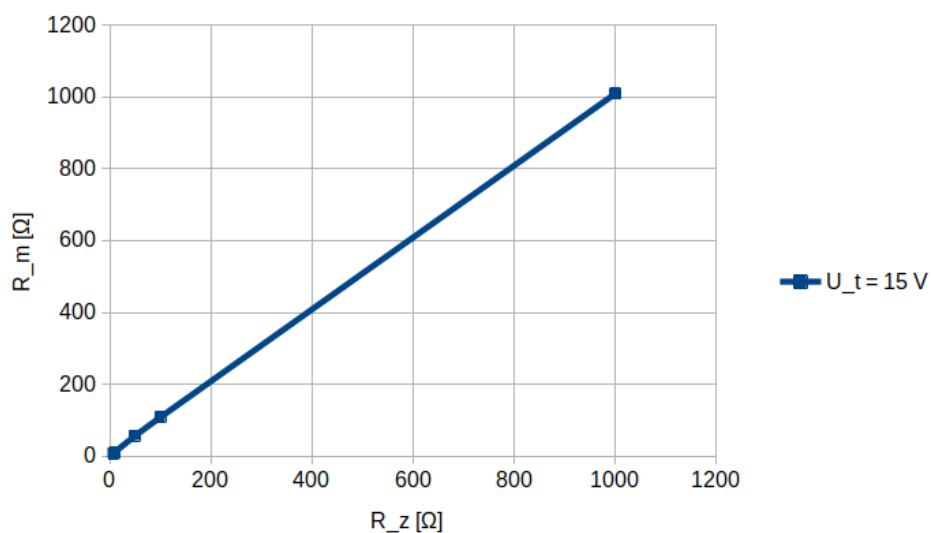
#### 5.5.4 Shrnutí kontrolního měření

Kontrolním měřením byla ověřena funkčnost režimů CC, CV a CR. Podle získaných dat lze potvrdit, že režimy fungují podle očekávání a shodují se

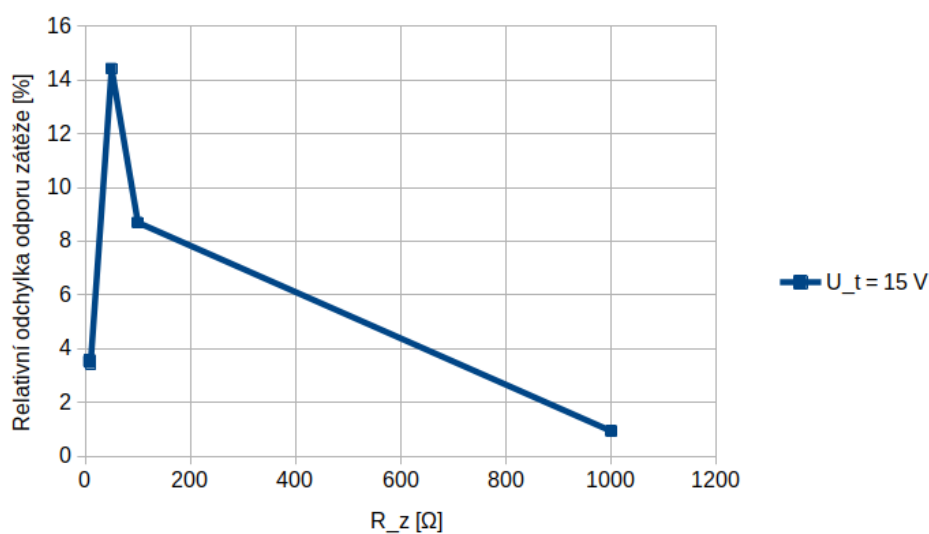


Obrázek 5.23: Schéma zapojení při měření - režim CR

U <sub>t</sub> [V]	R <sub>z</sub> [ohm]	2	4	6	10	50	100	1000
5	R <sub>m</sub> [ohm]	2,232	4,274	6,410	10,638	56,561	105,93	977
U <sub>t</sub> [V]	R <sub>z</sub> [ohm]	6	7	8	10	50	100	1000
10	R <sub>m</sub> [ohm]	6,173	7,194	8,197	10,309	56,243	108,23	1002
U <sub>t</sub> [V]	R <sub>z</sub> [ohm]	7	8	9	10	50	100	1000
15	R <sub>m</sub> [ohm]	7,246	8,287	9,317	10,345	57,208	108,7	1009
U <sub>t</sub> [V]	R <sub>z</sub> [ohm]	12	15	20	50	100	1000	2000
20	R <sub>m</sub> [ohm]	12,346	15,385	20,619	56,561	107,181	1010	2000
U <sub>t</sub> [V]	R <sub>z</sub> [ohm]	16	17	20	25	50	100	2000
30	R <sub>m</sub> [ohm]	16,393	17,341	20,408	25,424	50,847	106,61	2016

Tabulka 5.8: Režim CR - měření odporu R<sub>m</sub> při změně referenčního odporu R<sub>z</sub> pro napětí zdroje U<sub>t</sub>

Obrázek 5.24: Režim CR - závislost odporu zátěže na změně nastaveného odporu



**Obrázek 5.25:** Režim CR - relativní odchylka odporu zátěže při změně nastaveného odporu

s výstupy simulace uvedené v sekci 4.3, ale nelze tvrdit, že elektronická zátěž funguje ideálně. Byly naměřeny relativní odchylky a vybrány jejich maximální hodnoty pro každý režim zvlášť (viz tabulka 5.9). Tyto odchylky od požadované hodnoty jsou způsobeny mnoha faktory, mezi které patří tolerance použitých součástek, napěťový offset operačního zesilovače, nelinearity AD a DA převodníku nebo nepřesnost měřicích přístrojů.

	Režim CC	Režim CV	Režim CR
Max. relativní odchylka [%]	10,7 @ 10 mA	0,22 @ 15 V	7,02 @ 1 kΩ

**Tabulka 5.9:** Maximální relativní odchylky režimů elektronické zátěže





## Kapitola 6

### Závěr

V této práci byl rozebrán princip a možnosti návrhu stejnosměrné elektronické zátěže s mikrokontrolérem. Před samotným návrhem byla ověřena funkčnost a princip zapojení simulací v podkapitole 4.3. Poté bylo navrženo schéma elektronické zátěže s režimy CV, CC a CR, přičemž byl diskutován důvod výběru a vhodnost použití konkrétních součástek. Elektronická zátěž disponuje mikrokontrolérem, ale regulační část obvodu je řešena analogově. Výkonová část obvodu je řešena dvěma tranzistory typu MOSFET, jež jsou zapojené paralelně.

Vyrobena deska plošných spojů byla osazena součástkami a vložena do krabice s ostatními komponenty. Detailní popis mechanické konstrukce je uveden v podkapitole 5.1. Poté byl naprogramován mikrokontrolér, který zajišťuje mj. obsluhu uživatelského rozhraní tvořeného displejem, dvěma tlačítky a rotačním enkodérem.

Po zkalibrování elektronické zátěže byla ověřena funkčnost přístroje kontrolním měřením. Byly otestovány všechny tři režimy, a sice CV, CC a CR. Z naměřených hodnot lze soudit, že se všechny módy chovaly podle očekávání. Bylo ověřeno, že režim konstantního napětí lze použít pro rozsah napětí 0,5 V až 30 V. Maximální napětí je podle teoretického návrhu zátěže 80 V. Režim konstantního proudu byl úspěšně otestován v rozsahu 5 mA až 3 A a režim konstantního odporu, který vykazuje maximální relativní odchylku 7,02 %, byl ověřen na rozsahu 1  $\Omega$  až 1 k $\Omega$ .

Elektronickou zátěž je možné rozšířit o měření kapacity akumulátorů. Režim konstantního proudu by nastavil vybíjecí proud a mikrokontrolér by hlídal hranici napětí, na kterou se má akumulátor vybit. Mikrokontrolér by podle vybíjecího proudu a uplynulé doby vypočítal výslednou kapacitu akumulátoru. Další možné rozšíření přístroje se týká ukládání a zpracování naměřených dat. Hodnoty z měření by se posílaly přes rozhraní USB či bezdrátově přes Wi-Fi a na počítači by byl vykreslen časový průběh měření. Elektronická zátěž disponuje režimem CR, který je regulován mikrokontrolérem a částí obvodu pro CC režim. Podobným způsobem by mohl být implementován režim konstantního výkonu.



## Literatura

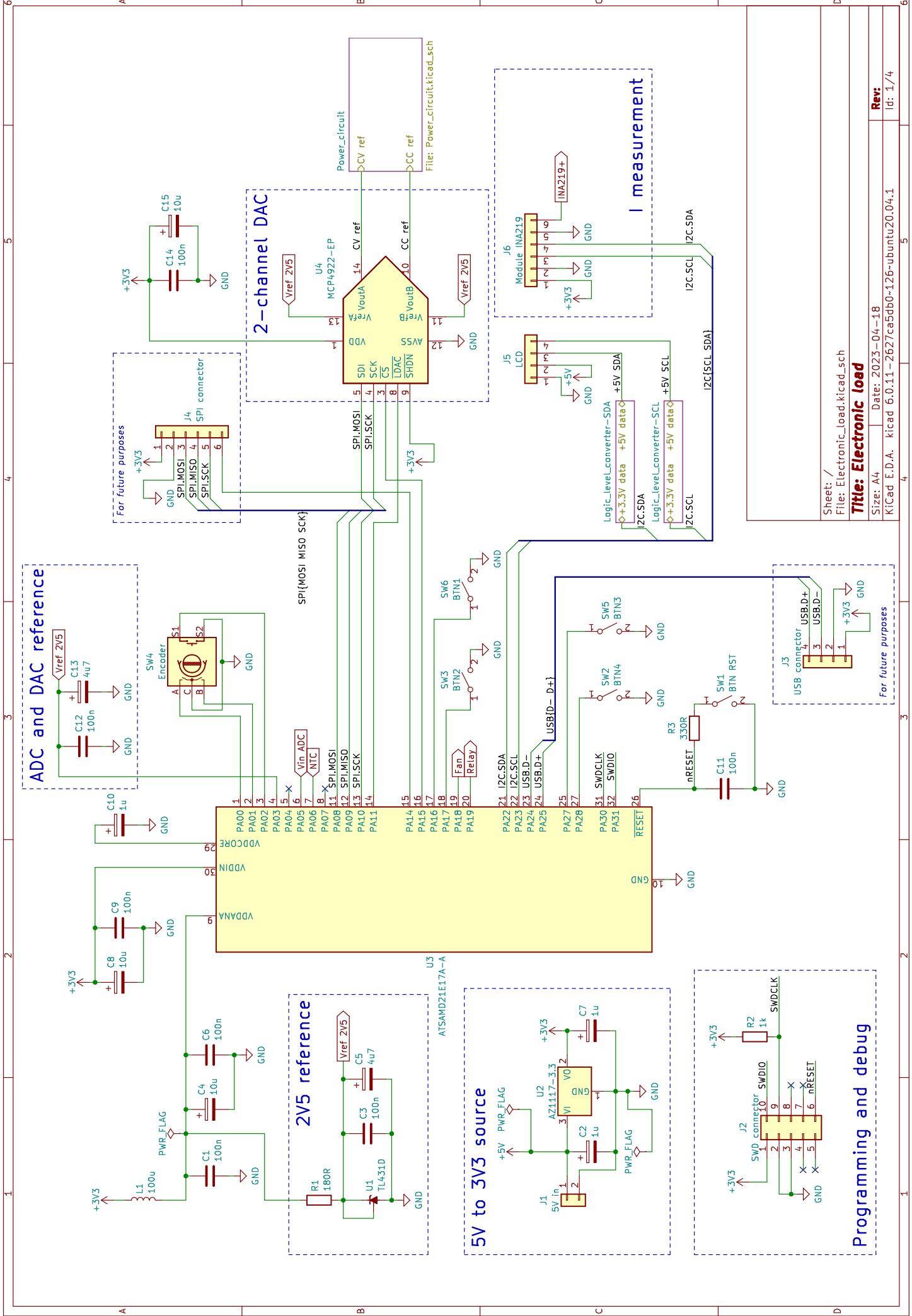
- [1] “DIY Adjustable Constant Load (Current & Power).” <https://www.instructables.com/DIY-Adjustable-Constant-Load-Current-Power/>, 2018.
- [2] “Arduino electronic load.” [https://electronoobs.com/eng\\_arduino\\_tut123.php](https://electronoobs.com/eng_arduino_tut123.php), 2020.
- [3] M. H. Rashid, *POWER ELECTRONICS HANDBOOK*. Pensacola, FL 32514-5754, U.S.A.: Elsevier, third edition ed., 2011.
- [4] “Electronic Load Fundamentals.” <https://www.keysight.com/us/en/assets/7018-06481/white-papers/5992-3625.pdf>, 2022.
- [5] “MEAN WELL RS-15-5 spínaný zdroj pro vestavbu krytý.” [https://img.gme.cz/files/eshop\\_data/eshop\\_data/1/332-302/dsh.332-302.1.pdf](https://img.gme.cz/files/eshop_data/eshop_data/1/332-302/dsh.332-302.1.pdf), 2010-07-09.
- [6] “MEAN WELL RS-15-5 spínaný zdroj pro vestavbu krytý.” <https://www.gme.cz/v/1505959/mean-well-rs-15-5-spinany-zdroj-pro-vestavbu-kryty>.
- [7] “SAM D21/DA1 family.” <https://ww1.microchip.com/downloads/aemDocuments/documents/MCU32/ProductDocuments/DataSheets/SAM-D21-DA1-Family-Data-Sheet-DS40001882H.pdf>, 2021.
- [8] I. Stražil, “Přesná elektronická zátěž,” *Praktická elektronika*, vol. 2008, no. 5, pp. 14–19, 2008.
- [9] F. NEPOR, “Laboratorní elektronická zátěž s USB rozhraním,” diplomová práce, VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ, FAKULTA ELEKTROTECHNIKY A KOMUNIKAČNÍCH TECHNOLOGIÍ, BRNO, 2011.
- [10] T. BORDOVSKÝ, “Elektronická zátěž s digitálním řízením,” diplomová práce, VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ, FAKULTA ELEKTROTECHNIKY A KOMUNIKAČNÍCH TECHNOLOGIÍ, BRNO, 2013.

- [11] “Op Amp Input Bias Current.” <https://www.analog.com/media/en/training-seminars/tutorials/MT-038.pdf>, 2009.
- [12] P. Němec, “ELEKTRONICKÁ AKTIVNÍ ZÁTĚŽ PRO PODPORU LABORATORNÍ PRÁCE - STUDIUM PROVEDITELNOSTI,” diplomová práce, VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ, FAKULTA ELEKTROTECHNIKY A KOMUNIKAČNÍCH TECHNOLOGIÍ, BRNO, 2020.
- [13] “IPP12CN10L G.” [https://www.infineon.com/dgdl/Infineon-IPP12CN10L-DS-v01\\_03-en.pdf?fileId=db3a30431b0626df011b2615b04b6fd1](https://www.infineon.com/dgdl/Infineon-IPP12CN10L-DS-v01_03-en.pdf?fileId=db3a30431b0626df011b2615b04b6fd1), 2011-09-05.
- [14] “IRF530.” <https://www.vishay.com/docs/91019/irf530.pdf>, 02-Aug-2021.
- [15] “IMPROVING ADC RESOLUTION BY OVERSAMPLING AND AVERAGING.” <https://www.silabs.com/documents/public/application-notes/an118.pdf>, 2013.
- [16] J. Lodr, “Modul pro měření proudu s velkým rozsahem,” diplomová práce, ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI, FAKULTA ELEKTROTECHNICKÁ, Plzeň, 2015.
- [17] “Proudový senzor 3,2A, I2C, INA219.” <https://www.laskakit.cz/proudovy-senzor-3-2a--i2c--ina219/>.
- [18] “Atmel-ICE.” <https://www.microchip.com/en-us/development-tool/ATATMEL-ICE>.
- [19] P. Alberts, “Logic Level Bidirectional.” [https://cdn.sparkfun.com/datasheets/BreakoutBoards/Logic\\_Level\\_Bidirectional.pdf](https://cdn.sparkfun.com/datasheets/BreakoutBoards/Logic_Level_Bidirectional.pdf), 2013.
- [20] “PCB Layout Guidelines.” <https://www.renesas.com/us/en/document/apn/pcb-layout-guidelines-dialog-pmics-pm-010>, 2022.
- [21] “ADC Gain and Offset Error Calibration on ARM® Cortex®-M0+ Based MCUs.” <http://ww1.microchip.com/downloads/en/DeviceDoc/90003185A.pdf>, 2018.
- [22] “DIGITÁLNÍ MULTIMETR M 3270 D METEX.” <http://www.rotex.sk/docs/35-prenosne-meracie-pristroje/35a%20Elektrick%C3%A9%20velik%C4%8Diny/35ad-Multimetre/Rucne%20Multimetre/METEX/3470-3219.pdf>.



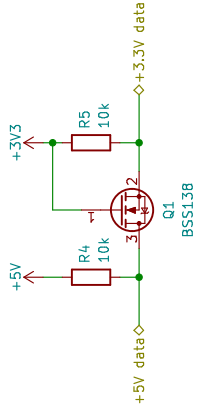
## **Příloha A**

### **Schéma elektronické zátěže**



Sheet: /  
 Title: **Electronic load**  
 Size: A4  
 Date: 2023-04-18  
 KiCad E.D.A. kicad 6.0.11-2627ca5db0-126-ubuntu20.04.1

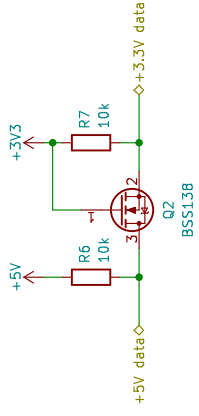
Rev:  
 Id: 1/4



Sheet: /Logic\_level\_converter-SDA/  
File: Logic\_level\_converter.kicad\_sch

**Title: Electronic load**

Size: A4 Date: 2023-04-18  
KiCad E.D.A. kicad 6.0.11-2627ca5db0-1.26-ubuntu20.04.1  
Id: 2/4

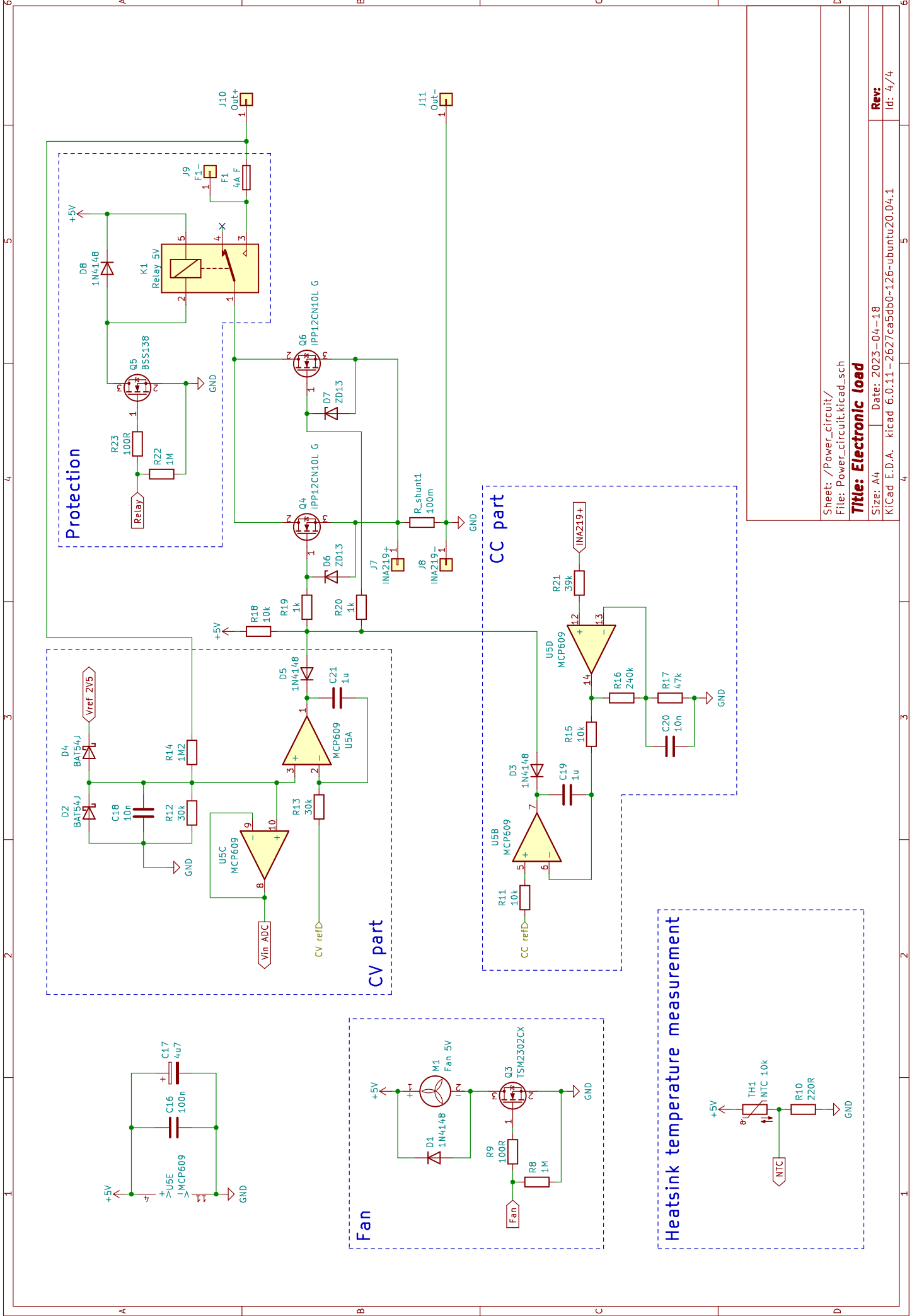


Sheet: /Logic\_level\_converter-SCL/  
File: Logic\_level\_converter.kicad\_sch

**Title: Electronic load**

Size: A4 Date: 2023-04-18  
KiCad E.D.A. kicad 6.0.11-2627ca5db0-1.26-ubuntu20.04.1  
Id: 3/4





Sheet: /Power\_circuit/  
 File: Power\_circuit.kicad\_sch  
**Title: Electronic load**  
 Size: A4 Date: 2023-04-18  
 KiCad E.D.A. kicad 6.0.11-2627ca5db0-126-ubuntu20.04.1

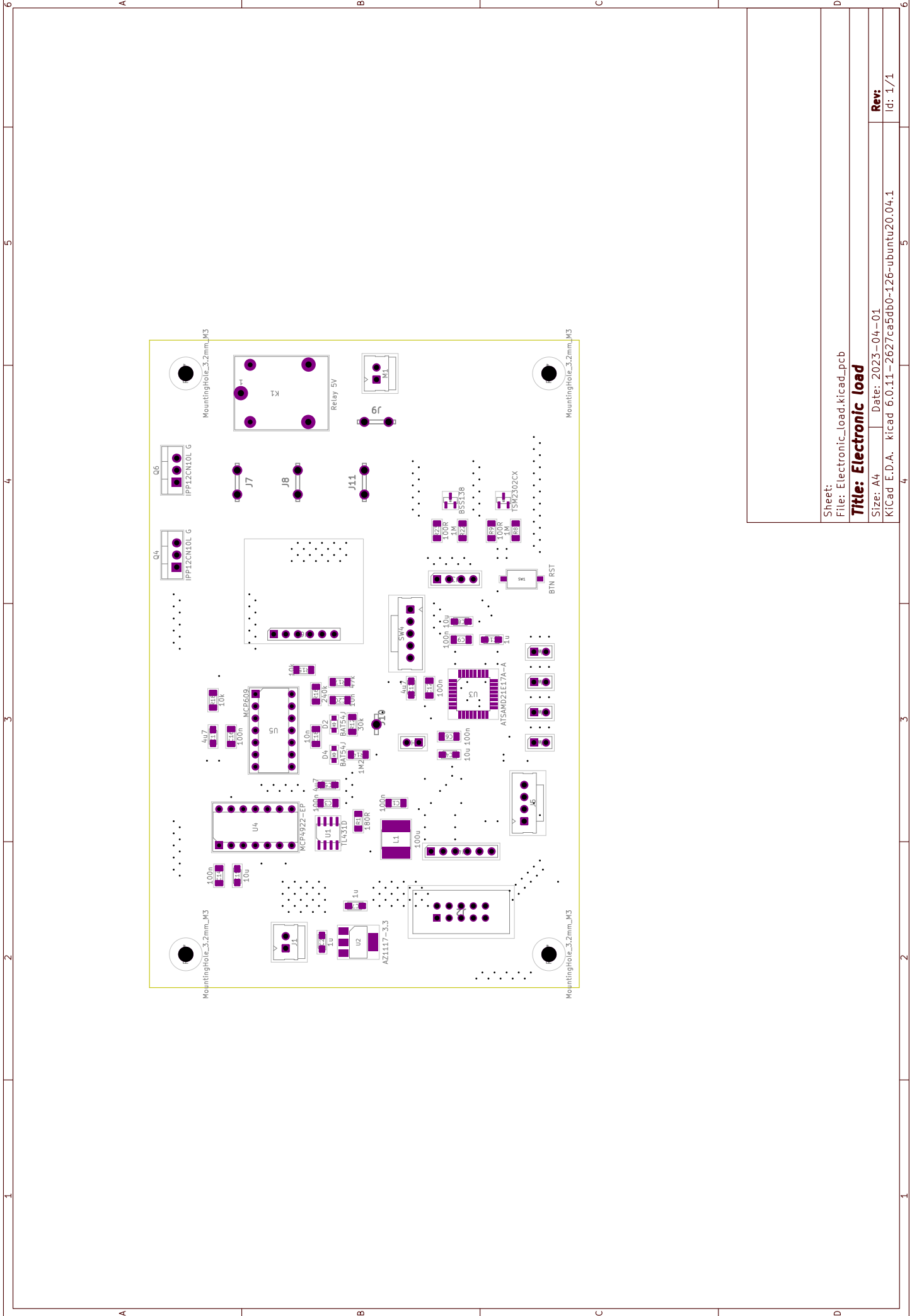
Rev: 4/4  
 Id: 4/4





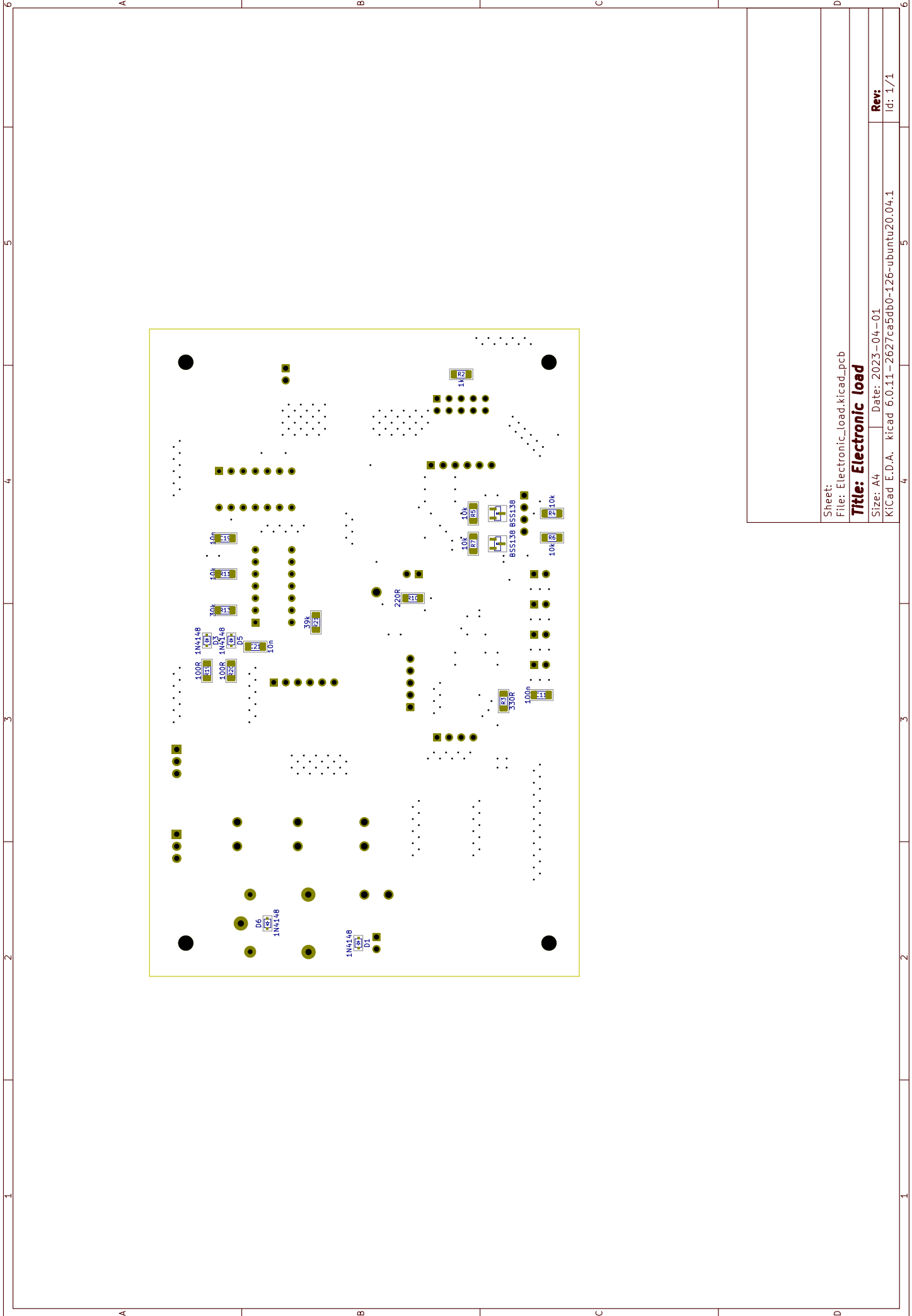
## **Příloha B**

### **Osazení DPS elektronické zátěže**



Sheet:  
 File: Electronic\_load.kicad\_pcb  
**Title: Electronic load**  
 Size: A4 | Date: 2023-04-01  
 KICad: E.D.A. kicad 6.0.11-2627ca5db0-126-ubuntu20.04.1

Rev:  
 Id: 1/1



Sheet:  
File: Electronic\_load.kicad\_pcb  
**Title: Electronic load**  
Size: A4 | Date: 2023-04-01  
KiCad: E.D.A. | kicad 6.0.11-2627ca5db0-126-ubuntu20.04.1

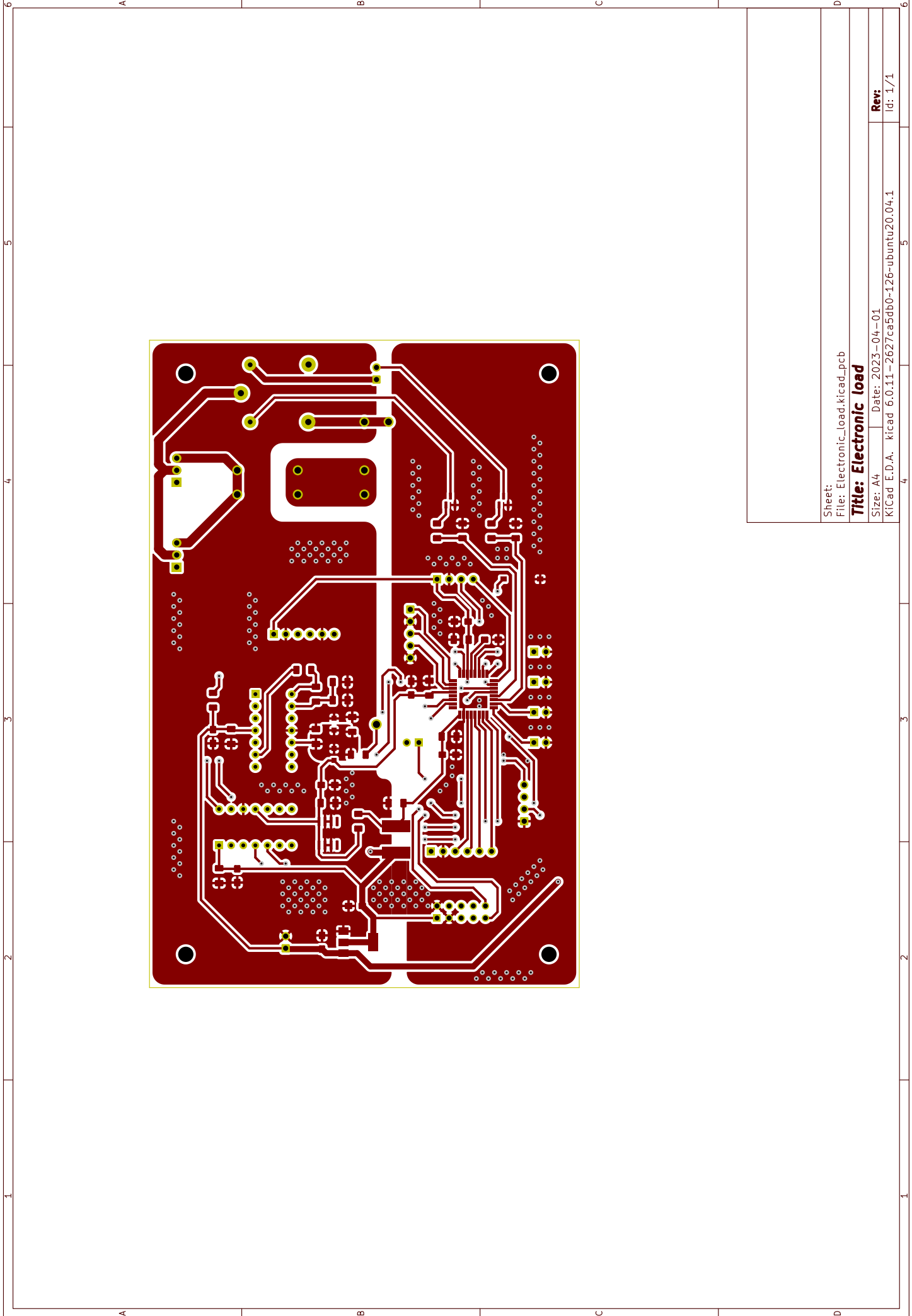
Rev:  
Id: 1/1





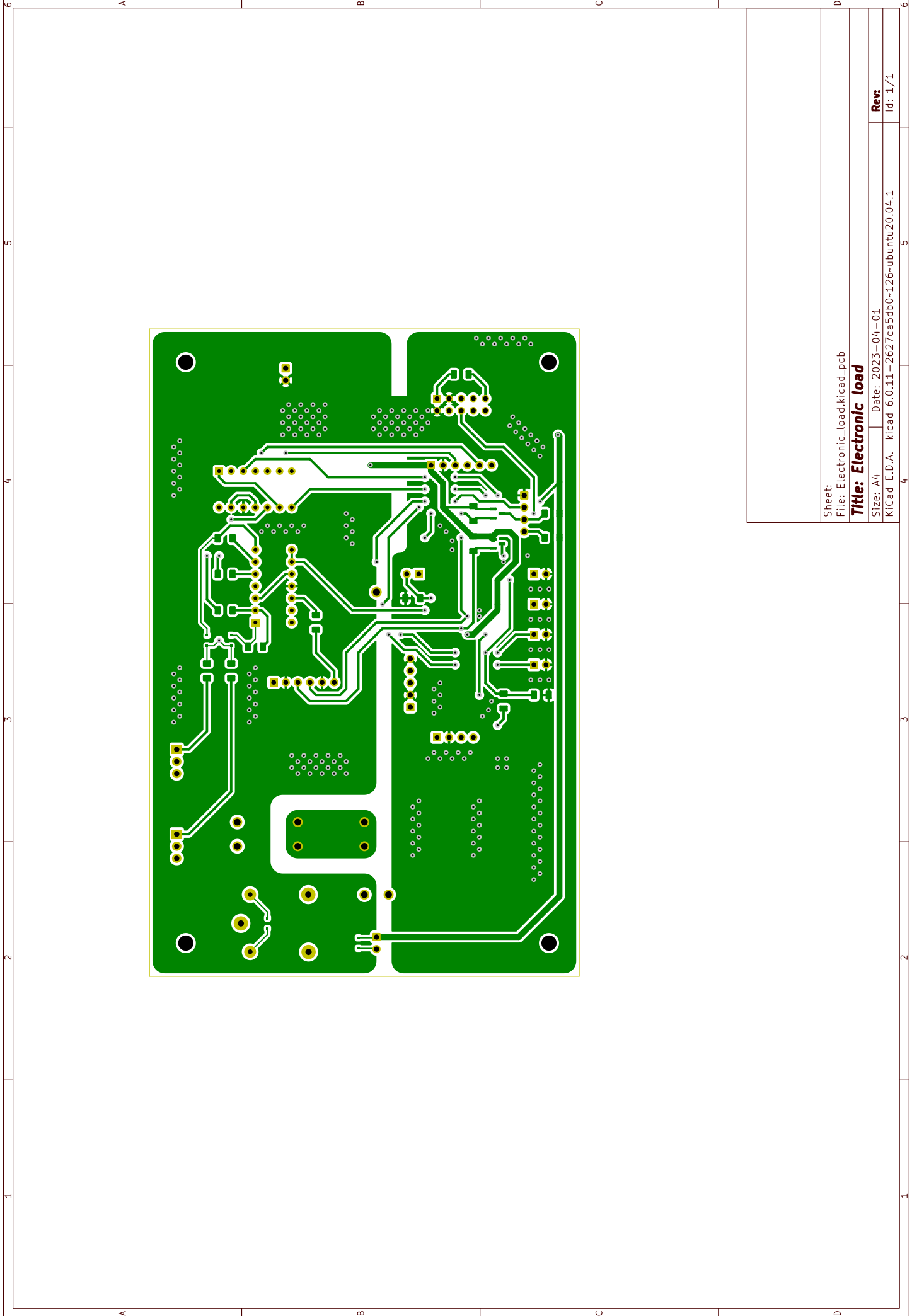
## **Příloha C**

### **Rozvržení DPS elektronické zátěže**



Sheet:  
File: Electronic\_Load.kicad\_pcb  
**Title: Electronic load**  
Size: A4 Date: 2023-04-01  
KICad: E.D.A. kicad 6.0.11-2627ca5db0-126-ubuntu20.04.1  
Rev:  
Id: 1/1





Sheet:	Electronic_load.kicad_pcb
File:	Electronic_load.kicad_pcb
<b>Title:</b>	<b>Electronic load</b>
Size:	A4
Date:	2023-04-01
KiCad:	E.D.A. kicad 6.0.11-2627ca5db0-126-ubuntu20.04.1
Rev:	1/1
Id:	1/1



## Příloha D

### Seznam elektronických příloh

Na přiloženém CD nebo v přiloženém ZIP archivu se nachází následující soubory:

- DPS
  - KiCad\_soubory
    - Electronic\_load.kicad\_pcb
    - Electronic\_load.kicad\_sch
    - Logic\_level\_converter.kicad\_sch
    - Power\_circuit.kicad\_sch
- Elektronicka\_zatez.pdf
- Firmware
  - ...
- Simulace
  - LTspice\_soubory
    - Electronic\_load.asc