



Zadání bakalářské práce

Název:	Programovatelná elektronická zátěž
Student:	Miloš Pánek
Vedoucí:	Ing. Pavel Kubalík, Ph.D.
Studijní program:	Informatika
Obor / specializace:	Počítačové inženýrství
Katedra:	Katedra číslicového návrhu
Platnost zadání:	do konce letního semestru 2023/2024

Pokyny pro vypracování

Prozkoumejte existující řešení programovatelné elektronické zátěže.

Analyzujte problémy současných řešení a navrhnete vlastní řešení.

Navržené řešení bude podporovat tyto režimy: stálý proud, stálý odpor, stálý výkon a stálé napětí.

Programovatelná zátěž bude splňovat tyto požadavky:

- nastavení všech parametrů zátěže přes rozhraní na samotném zařízení,
- komunikace s PC aplikací přes bluetooth, USB a wifi,
- záznam naměřených dat lokálně na SD kartu,
- jednoduchý protokol pro komunikaci s PC s možným rozšířením pro další funkcionalitu.

Pro PC navrhnete a naprogramujete aplikaci v jazyce C# s grafickým rozhraním.

Aplikace v PC bude umožňovat nastavit všechny parametry zátěže, včetně průběžného sledování naměřených hodnot a jejich zobrazení přímo v aplikaci.

Parametry zátěže bude možné v průběhu měření měnit podle předem nastavených hodnot.

Navržené řešení zrealizujte a řádně otestujte

Bakalářská práce

PROGRAMOVATELNÁ ELEKTRONICKÁ ZÁTĚŽ

Miloš Pánek

Fakulta informačních technologií
Katedra číslicového návrhu
Vedoucí: Ing. Pavel Kubalík, Ph.D.
11. května 2023

České vysoké učení technické v Praze

Fakulta informačních technologií

© 2023 Miloš Pánek. Odkaz na tuto práci.

Tato práce vznikla jako školní dílo na Českém vysokém učení technickém v Praze, Fakultě informačních technologií. Práce je chráněna právními předpisy a mezinárodními úmluvami o právu autorském a právech souvisejících s právem autorským. K jejímu užití, s výjimkou bezúplatných zákonných licencí a nad rámec oprávnění uvedených v Prohlášení na předchozí straně, je nezbytný souhlas autora.

Odkaz na tuto práci: Pánek Miloš. *Programovatelná elektronická zátěž*. Bakalářská práce. České vysoké učení technické v Praze, Fakulta informačních technologií, 2023.

Obsah

Poděkování	viii
Prohlášení	ix
Abstrakt	x
Seznam zkratk	xi
Úvod	1
1 Analýza	3
1.1 Proud, napětí a odpor	3
1.1.1 Kirchhoffovy zákony	3
1.1.2 Odpor	4
1.2 Polovodiče a polovodičové součástky	5
1.2.1 Typ P a N	5
1.2.2 Přejchod PN a diody	5
1.2.3 Zenerovy diody	5
1.2.4 Tranzistory	5
1.2.5 Bipolární tranzistory	5
1.2.6 Unipolární tranzistory	6
1.3 Operační zesilovače	6
1.3.1 Zapojení s operačními zesilovači	6
1.4 DA a AD převodníky	8
1.4.1 Digitálně analogové převodníky	8
1.4.2 Analogově digitální převodníky	8
1.5 Komunikační sběrnice	9
1.5.1 I2C	10
1.5.2 SPI	10
1.5.3 UART	10
1.6 Měření teploty	11
1.6.1 Termistory	11
1.6.2 Termočlánky	11
1.7 Existující řešení	11
1.7.1 Rigol DL3000	11
1.7.2 DL24	12
1.7.3 Elektronická zátěž	12
1.8 Požadavky	13
1.8.1 Mezní hodnoty	14
1.8.2 Přesnost	14
1.8.3 Bezpečnost	14
1.8.4 Funkcionalita	14
1.9 Určení mezních hodnot elektronické zátěže	14

2	Návrh	15
2.1	Výkonová část	16
2.1.1	Popis principu funkce jednotlivých bloků	16
2.1.2	Návrh řídicího obvodu regulačního prvku	16
2.2	Použitý hardware výkonové části	18
2.2.1	Arduino Pro mini	18
2.2.2	Regulační prvek	19
2.2.3	MCP4921	19
2.2.4	INA226	19
2.2.5	Výběr senzoru teploty	20
2.3	Řídicí část	20
2.3.1	ESP32 Dev kit	21
2.3.2	Display	21
2.3.3	Ovládací prvky	21
2.4	Napájecí schéma	21
2.5	Návrh desky plošných spojů	22
2.5.1	Proudová zatížitelnost vodičů	22
2.5.2	Provize pro chlazení	23
2.5.3	Použitá pouzdra pasivních součástek	23
2.5.4	Blokovací kondenzátory	23
2.6	Finanční analýza navrženého zařízení	23
3	Software	27
3.1	Program pro výkonovou část	27
3.1.1	Komunikace mezi procesory	27
3.1.2	Regulace proudu	27
3.1.3	Bezpečnostní metody	28
3.2	Program pro řídicí část	29
3.2.1	FreeRTOS a řízení toku programu	29
3.2.2	Řízení měření	30
3.2.3	Interakce s ovládacími prvky	30
3.2.4	Displej	31
3.3	SD karta	31
3.3.1	Vzdálená komunikace	31
3.4	Aplikace pro počítač	32
3.4.1	Popis aplikace	32
4	Testování	35
4.1	Průběh proudu	35
4.2	Přesnost stejnosměrných měření	35
4.2.1	Naměřené hodnoty a zhodnocení	35
4.3	Měření doby náběhu	37
4.3.1	Naměřené hodnoty a zhodnocení	37
4.4	Problém při měření napětí vyšších než 15 V	37
4.5	Měření vybíjecí charakteristiky 9V baterie	38
4.5.1	Postup měření	38
4.5.2	Výsledky měření	38
5	Závěr	43
A	Otisk Desky plošných spojů	45
B	Elektronické schéma	49

Seznam obrázků

1.1	Zapojení s operačními zesilovači, a) invertující zesilovač, b) neinvertující zesilovač, c) napěťový sledovač, d) komparátor e) sčítací zesilovač	8
1.2	Vnitřní schéma DA převodníku [6]	9
1.3	Vnitřní schéma AD převodníku [7]	9
1.4	DL3000 [10]	12
1.5	DL24 [12]	13
2.1	Blokové schéma zařízení	15
2.2	Původní návrh	17
2.3	Neinvertující sčítací zesilovač	18
2.4	Modul INA226 [21]	20
2.5	Senzor teploty LM35 [23]	21
2.6	Průběh výstupů enkodéru [26]	22
2.7	Fotografie vyrobeného zařízení	25
3.1	Ukázka aplikace pro osobní počítač v průběhu měření	33
4.1	Závislost procházejícího proudu (zelená), napětí na gate (fialová) a výstupního napětí DA převodníku (žlutá) na čase, před opravou	36
4.2	Závislost procházejícího proudu (zelená), napětí na gate (fialová) a výstupního napětí DA převodníku (žlutá) na čase, po opravě	36
4.3	Měření doby náběhu, Nastavený proud 1 A	40
4.4	Závislost vstupního napětí (fialová) a napětí 5V napájecí linky (žlutá) na čase, $V_{IN} < 15V$	41
4.5	Závislost vstupního napětí (fialová) a napětí 5V napájecí linky (žlutá) na čase, $V_{IN} > 15V$	41
4.6	Vybíjecí charakteristika 9V baterie	42
A.1	Přední strana DPS	46
A.2	Zadní strana DPS	47
B.1	Schéma zařízení	50
B.2	Schéma analogové části zařízení	51
B.3	Schéma ovládacích prvků	52

Seznam tabulek

2.1	Ceny součástek	24
-----	--------------------------	----

4.1	Naměřené hodnoty napětí a jejich porovnání	37
4.2	Nastavené hodnoty proudu a jejich porovnání s naměřenými hodnotami	39
4.3	Naměřené hodnoty doby náběhu	39

Seznam výpisů kódu

3.1	Struktury pro komunikaci mezi procesory	28
-----	---	----

Chtěl bych poděkovat především vedoucímu práce Ing. Pavlu Kubalíkovi, Ph.D. za cenné rady, odborné vedení práce a trpělivost při řešení problémů. Dále patří poděkování mým rodičům za podporu při studiu, které si nesmírně vážím a bez které bych práci nedokončil.

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. Beru na vědomí, že se na moji práci vztahují práva a povinnosti vyplývající ze zákona č. 121/2000 Sb., autorského zákona, ve znění pozdějších předpisů, zejména skutečnost, že České vysoké učení technické v Praze má právo na uzavření licenční smlouvy o užití této práce jako školního díla podle § 60 odst. 1 citovaného zákona.

V Praze dne 11. května 2023

.....

Abstrakt

Práce se zabývá návrhem vestavného systému elektronické zátěže. V práci je popsán výběr vhodného mikrokontroléru, elektronický návrh zařízení, včetně návrhu desky plošných spojů, návrh programu a také návrh demonstrační aplikace pro Microsoft Windows sloužící pro vzdálené ovládní zařízení. Výsledné zařízení umožňuje měření kapacity baterií a záznam naměřených dat na SD kartu, stejně jako záznam do počítače pomocí připojení přes USB, WiFi nebo Bluetooth.

Klíčová slova analogový návrh, měření elektrických veličin, vestavný systém, mikrokontroléry AVR, ESP32, C++

Abstract

The work deals with the design of an embedded system for an electronic load. The paper describes the selection of a suitable microcontroller, the electronic design of the device including the design of a printed circuit board, program design, and also the design of a demonstration application for Microsoft Windows used for remote control of the device. The resulting device enables the measurement of battery capacity and the recording of measured data on an SD card, as well as recording to a computer via a connection through USB, WiFi or Bluetooth.

Keywords analog design, measurement of electrical quantities, embedded system, AVR micro-controllers, ESP32, C++

Seznam zkratek

AD	Analogově digitální
DA	Digitálně analogový
DC	Direct current
GPIO	General-purpose input/output
I2C	Inter-integrated circuit
IO	Integrovaný obvod
LCD	Liquid crystal display
LGA	Land grid array
MOSFET	Metal oxide field effect transistor
NTC	Negative temperature coefficient
PTC	Positive temperature coefficient
RX	Receive
SD	Secure digital
SPI	Serial peripheral interface
TX	Transmit
UART	Universal asynchronous receiver / transmitter
USB	Universal serial bus
WPF	Windows presentation foundation

Úvod

Přenosná zařízení se stala naprosto běžnou součástí našeho života. Všechna tato zařízení, stejně jako mnohá další pro svou funkci vyžadují baterie nebo častěji dobíjecí akumulátory. Návrh a testování těchto zdrojů energie, případně jejich správná volba se tak staly důležitou součástí návrhu různého druhu elektroniky. Při testování baterií a akumulátorů, ale i jiných zdrojů el. energie se využívají zařízení zvané elektronické zátěže. Jedná se o zařízení, ke kterému připojíme testovaný zdroj energie a zátěž tento zdroj zatíží podle námi nastavených parametrů. Pokud známe míru zatížení zdroje a čas po který byl zdroj zatížen, lze určit kapacitu baterie (často udávané v mAh). Pokud bychom si v průběhu měření zaznamenávali napětí na baterii, lze také určit její takzvanou vybíjecí charakteristiku, tedy závislost napětí na baterii a její míry nabití. Takového měření může být časově náročné a zdlouhavé. Proto je vhodné takové zařízení vybavit schopností automatického záznamu těchto dat. Zařízení by tak mohlo pracovat automaticky bez lidské obsluhy. Tímto je velice ulehčeno testování baterií a akumulátorů.

Podobná zařízení jsou již dostupná na trhu. Jednak jako profesionální zařízení určené pro profesionální návrh spotřební elektroniky. Tato zařízení jsou často příliš drahá pro amatérské elektrotechniky. Podobná zařízení jsou také dostupná ke koupi z Číny skrze internetové trhy. Tato zařízení jsou často velice levná a plní svůj účel dostatečně pro hobby elektrotechniky. Často k nim ovšem chybí dokumentace.

Práce volně navazuje na mou maturitní práci, která se zabývala návrhem podobného zařízení.

Cílem práce je sestavit zařízení elektronické zátěže, podporující různé režimy měření, vzdálené ovládání a záznam naměřených dat, spolu s podpůrnou aplikací pro její ovládání.

Cílem teoretické části práce je seznámit čtenáře s již existujícími řešeními dané problematiky a poskytnout jejich analýzu. Dále seznamuje čtenáře s pojmy a principy, které jsou pro danou problematiku stěžejní.

Cílem praktické části je představení vlastního návrhu, popis principu fungování a zdůvodnění daného řešení. Následným cílem je otestování a kvantifikování daného řešení.

Kapitola 1

Analýza

V této kapitole provedeme analýzu dostupných řešení a seznámíme se se základními principy a pojmy důležitými pro řešení daného problému.

1.1 Proud, napětí a odpor

Tyto tři veličiny jsou absolutním základem elektrotechniky a pochopení jejich vzájemného vztahu je klíčové pro další postup.

Elektrický proud udává objem náboje za jednotku času. Značíme jej I a jeho jednotkou je ampér (značíme A). Jedná se jednu ze základních jednotek SI, jejíž definice zní: „Stálý elektrický proud, který při průchodu dvěma přímými rovnoběžnými nekonečně dlouhými vodiči zanedbatelného kruhového průřezu umístěnými ve vakuu ve vzájemné vzdálenosti 1 m vyvolá mezi nimi stálou sílu $2 \cdot 10^{-7}$ N na 1 m délky vodiče“ [1].

Elektrické napětí vyjadřuje potenciál zdroje dodávat elektrický proud. Značíme jej U a jednotkou je volt (V). V anglické literatuře bývá napětí často také značeno jako V . Napětí vždy uvádíme mezi dvěma body, jedná se tedy o rozdíl potenciálů těchto bodů.

Elektrický proud a napětí známe dvojího druhu, střídavé a stejnosměrné. Střídavé napětí periodicky mění svojí velikost a znaménko, nejčastěji ve tvaru funkce sinus. Takovéto napětí je vhodné pro přenosovou síť, neboť vykazuje nižší ztráty při přenosu. Stejnosměrné napětí je vhodné pro napájení spotřební elektroniky, hlavně z důvodu nemožnosti napájení logických obvodů pomocí střídavého napětí.

Vynásobením elektrického napětí proudem získáme elektrický výkon. Výkon vyjadřuje práci kterou zdroj elektrické energie vykonává, případně která je spotřebována. V případě, že je energie do zařízení dodávána, mluvíme o příkonu. Běžně značíme P a jednotkou je Watt (W). Elektrický výkon je jednoduché měnit na jiné formy výkonu, jako je tepelný, mechanický atp.

1.1.1 Kirchhoffovy zákony

Kirchhoffovy zákony jsou dva a to:

1. zákon - Také zvaný "O proudu", říká, že součet proudů v uzlu je roven nule, kde proudy do uzle přitékající označujeme kladným znaménkem a proudy z uzle odtékající znaménkem záporným, tedy:

$$\sum_{k=1}^n I_k = 0 \quad (1.1)$$

kde $I_1 - I_n$ jsou proudy uzlu. Jednoduše řečeno, součet proudů které do uzle vtékají musí být roven součtu proudů z uzle vytékajících. Tento zákon má důležité důsledky, například říká, že dvěma součástkami zapojenými sériově protéká stejný proud.

2. zákon - Zvaný "O napětí", říká, že součet napětí v elektrickém obvodu je roven nule. Tentokrát uvažujeme zdroje napětí jako kladné a součástky jako záporné.

$$\sum_{k=1}^n U_k = 0 \quad (1.2)$$

Důsledkem je fakt, že napětí mezi dvěma body je rovno součtu všech dílčích napětí mezi těmito dvěma body nebo také, že na dvou paralelně zapojených součástkách je stejné napětí.

1.1.2 Odpor

Elektrický odpor představuje veličinu, která brání průchodu elektrického proudu. Její vztah je přesně definován pomocí takzvaného Ohmova zákona, jednotka odporu se nazývá Ohm. Zákon zní $R = \frac{U}{I}$. Tento vztah popisuje lineární závislost napětí na proudu procházejícím odporem. Tento vztah je užitečný pro měření proudu. Pokud známe odpor, kterým proud prochází a změříme napětí na tomto odporu, z uvedeného vztahu jednoduše odvodíme proud odporem procházející. Pro tyto účely volíme odpory malých hodnot, abychom minimalizovali ztráty. Takovéto odpory se běžně nazývají bočníky.

1.1.2.1 Čtyřvodičové měření proudu a napětí

Odpor vodičů je v elektrotechnice často zanedbatelný, ovšem pokud vodičem protéká značný proud, může pokles napětí na vodičích, způsobený odporem vodičů, znamenat nepřesnost napětí měřeného na druhé straně těchto vodičů. Měřené napětí tak bude nižší, než je skutečné napětí měřeného zdroje. Tento jev lze eliminovat pomocí takzvaného čtyřvodičového měření, kdy používáme dva vodiče pro přenos silového proudu a další dva vodiče pro měření napětí. Proud napětovými vodiči je zanedbatelný z důvodu vysokého vstupního odporu měřičů napětí. Na těchto vodičích tak nevzniká úbytek napětí a měření napětí je rovné napětí na svorkách zdroje.

1.1.2.2 Napěťové děliče

Jedná se o zapojení dvou rezistorů za sebe (sériově), nejčastěji mezi zdroj napětí nebo signálu a zem. Bodu, který je pro rezistory společný se říká odbočka. Podle prvního K. zákona víme, že odpory musí procházet stejný proud. Díky Ohmovu zákonu také víme, že napětí na rezistoru je přímo úměrné jeho odporu. Tak lze jednoduše vyvodit, že napětí na takto zapojených rezistorech bude platit vztah:

$$\frac{R_1}{R_2} = \frac{U_1}{U_2} \quad (1.3)$$

tedy, že poměr napětí na rezistorech je ve stejném poměru, jako je poměr jejich odporů. Zapojení se využívá pokud potřebujeme signál před zpracováním snížit, není však vhodné pro snižování napětí za účelem napájení jiných obvodů. Pokud bychom z odbočky děliče začali odebírat proud, narušili bychom rovnováhu proudů a došlo by ke změně napětí na rezistorech. Dělič tak lze použít pouze tam, kde je proud odbočkou velmi nízký až zanedbatelný. V praxi se používají rezistory s vysokou hodnotou odporu za účelem minimalizace procházejících proudů a tím minimalizace ztrát v zapojení.

1.2 Polovodiče a polovodičové součástky

Polovodičové materiály mají malou vlastní vodivost. Příměsí jiných druhů materiálů však mohou získat vodivost nevlastní.

1.2.1 Typ P a N

Polovodiče typu P vznikají příměsí trojvazného prvku, například india ke křemíku. Protože atom india má pouze tři valenční elektrony, oproti sousedním atomům křemíku, vzniká v látce elektronová díra. Vzniká tak nevlastní vodivost pozitivního typu.

Polovodiče typu N vznikají příměsí pětivazného prvku, například fosforu ke křemíku. Atom fosforu má o valenční elektron navíc, který zůstává volný a způsobuje nevlastní vodivost záporného typu.

1.2.2 Přechod PN a diody

Při spojení polovodičů P a N dojde v místě jejich spojení k zaplnění elektronových děr volnými elektrony z polovodiče typu N. Vzniká tak takzvaná vyprázdněná oblast, kde nefiguruje ani jeden typ vodivosti. Přechod je tak nevodivým. Ovšem při přivedení kladného napětí na stranu P přechodu a záporného napětí na stranu N přechodu, jsou elektrony přitahovány ke zdroji a vyprázdněná oblast se opět stane oblastí vodivou [2]. Tento princip je hojně využíván u součástek zvaných diody. Jedná se o součástky, které propouštějí elektrický proud pouze v jednom směru. Nacházejí tak využití v ochranách proti prepólování, při usměrňování střídavého napětí na stejnosměrné.

1.2.2.1 Schottkyho diody

Jedná se o diody, kde je polovodič typu P nahrazen kovem. Na diodě je tak v propustném směru nižší úbytek napětí, což vede k nižším ztrátám. Schottkyho diody také mohou pracovat při vyšších frekvencích než diody klasické, díky menší vyprázdněné oblasti. Tyto diody však vykazují vyšší zpětný proud. Nacházejí využití ve spínacích zdrojích.

1.2.3 Zenerovy diody

Tyto diody se v propustném směru chovají stejně jako diody klasické. Při opačném zapojení však propouštějí proud a to při přesně definovaném napětí, které je určeno výrobou [3]. Takovéto chování se využívá pro zdroje referenčního napětí, nebo jako ochrana proti vysokým napětím a napětovým špičkám. Pokud napětí přesáhne závěrné napětí diody, dioda se otevře a přebytečné napětí je uzemněno. Součástky přímo určené pro takovou ochranu se nazývají transily.

1.2.4 Tranzistory

Tranzistory jsou polovodičové součástky umožňující ovládání signálu pomocí mnohonásobně nižšího signálu. Tranzistory tak nacházejí využití při spínání obvodů, v zesilovačích či v logických obvodech. Podle technologie výroby rozlišujeme dva hlavní druhy tranzistorů a to tranzistory bipolární a unipolární.

1.2.5 Bipolární tranzistory

Bipolární tranzistory tvoří dvojice polovodičových PN přechodů. Mají tři vývody označované jako báze, kolektor a emitor. Báze slouží k ovládání průtoku proudu mezi kolektorem a emito-

rem. Velikost procházejícího proudu je určena velikostí proudu procházejícího bázi tranzistoru. Bipolární tranzistory se vyrábějí ve dvou provedeních PNP a NPN, podle druhů využitých polovodičů. Tranzistory NPN se se zvyšujícím se proudem bázi otevírají, zatímco tranzistory PNP se uzavírají. Bipolární tranzistory jsou vhodné pro zesilovače, nehodí se příliš pro spínací úlohy.

1.2.6 Unipolární tranzistory

Vývody unipolárních tranzistorů označujeme jako drain, source a řídicí signál gate. Velikost napětí přivedené mezi gate a source tranzistoru řídí proud procházející mezi vývody drain a source. Tranzistor je řízený napětím a proud tekoucí do gate je zanedbatelný. Tyto tranzistory tedy mívají nižší ztráty než tranzistory bipolární. Jsou však více náchylné na elektrostatické poškození. Pro výkonové aplikace se hodí jejich varianta MOSFET.

1.3 Operační zesilovače

Operační zesilovače jsou jedním ze základních stavebních prvků návrhu analogové techniky. Jedná se o součástku se dvěma vstupy a výstupem. Vstupy se nazývají invertující, značíme symbolem mínus, a neinvertující, který značíme symbolem plus. Značení napovídá funkci vstupů, signály přivedené k neinvertujícímu vstupu jsou k výstupu přičítány, zatímco signály na invertujícímu vstupu jsou od výstupního signálu odečítány. V zapojení s operačními zesilovači je často uplatněna zpětná vazba, tedy přivedení části výstupního signálu zpátky na vstup. Podle znaménka mluvíme o kladné nebo záporné zpětné vazbě. V případě operačních zesilovačů se nejčastěji jedná o zápornou zpětnou vazbu, která sice vede ke snížení zesílení, ale pomáhá odstranit nelinearitu výstupu a snižuje šum signálu [4].

1.3.1 Zapojení s operačními zesilovači

Zde probereme některá základní zapojení s operačními zesilovači, z nichž některá budou později využita v návrh zařízení.

1.3.1.1 Invertující zesilovač

Zapojení invertujícího zesilovače využívá dva odpory, které tvoří dělič napětí mezi výstupem operačního zesilovače a vstupním napětím. Odbočka děliče je připojena k invertujícímu vstupu zesilovače a neinvertující vstup je přiveden k nulovému potenciálu. Napětí na výstupu je rovno vstupnímu napětí vynásobenému zesílením obvodu. Zesílení tohoto obvodu je vždy záporné a je určeno poměrem odporů rezistorů v napětovém děliči.

$$U_{out} = -\frac{R_1}{R_2} \times U_{in} \quad (1.4)$$

Toto zapojení nachází časté využití, ovšem jejich funkce je závislá na symetrickém napájení, aby bylo možné na výstup dodat záporné napětí. V praxi se doporučuje použít rezistory s co nejvyšší hodnotou odporu, protože vstupní impedance zapojení je určena hodnotou odporu R_1 . Vyšší hodnota odporu také snižuje proudový odběr zapojení.

1.3.1.2 Neinvertující zesilovač

Zapojení neinvertujícího zesilovače tvoří operační zesilovač a dvojice odporů tvořící odporový dělič mezi výstupem operačního zesilovače a zemí. Odbočka děliče je připojena k invertujícímu vstupu operačního zesilovače. Vstupní napětí je připojeno k neinvertujícímu vstupu operačního

zesilovače. Zesílení zapojení je určeno poměrem odporů v děliči zvýšeného o jedničku. Výstupní napětí je poté rovno napětí vstupnímu krát zesílení zapojení.

$$U_{out} = \left(\frac{R_2}{R_1} + 1\right) \times U_{in} \quad (1.5)$$

Neinvertující zapojení je vhodné, pokud potřebujeme zesilovač který nepotřebuje symetrické napájení, ovšem nelze dosáhnout zesílení menších než jedna. Zapojení vykazuje vysoké hodnoty vstupní impedance, typicky v desítkách $M\Omega$.

Zvláštním typem neinvertujícího zesilovače je poté takzvaný napěťový sledovač. Jedná se o zapojení, kde je vstupní napětí přivedeno na neinvertující vstup a výstup je propojen s invertujícím vstupem. Jedná se tak o neinvertující zesilovač, kde $R_1 = 0$ a $R_2 = \infty$, jehož zesílení je rovné jedné. Napětí na výstupu je tak rovné napětí na vstupu.

Napěťové sledovače nacházejí uplatnění tam, kde potřebujeme impedanční oddělení obvodů.

1.3.1.3 Sčítací zesilovač

Zapojení se skládá z operačního zesilovače, jednoho zpětnovazebního rezistoru a vstupních rezistorů, kterých je jeden pro každý vstup zesilovače. Zapojení je popsáno na obrázku 1.1. Jak napovídá název zapojení, zapojení slouží ke sčítání napětí na vstupu. Jsou-li všechny rezistory shodné, je výstupem součet všech vstupních napětí. Použitím rozdílných odporů pro jednotlivé vstupy můžeme měnit poměr jakým tyto vstupy přispívají k výstupu. Výstupní napětí má opačné znaménko než napětí vstupní.

$$U_{out} = -R_0 \left(\frac{U_1}{R_1} + \frac{U_2}{R_2} + \dots + \frac{U_K}{R_K} \right) \quad (1.6)$$

1.3.1.4 Rozdílový zesilovač

Zapojení má dva vstupy. Dále jej tvoří dvojice odporových děličů. Jeden z děličů je zapojen mezi první vstupní napětí a výstup operačního zesilovače, s odbočkou připojenou k invertujícím vstupu zesilovače. Druhý dělič je připojen mezi druhý vstup a zem, s odbočkou připojenou k neinvertujícímu vstupu zesilovače. Při volbě hodnot rezistorů je nutno dodržet: $\frac{R_1}{R_2} = \frac{R_3}{R_4}$. Výstupní napětí je poté rovno rozdílu vstupních napětí, vynásobeného zesílením daným $A = \frac{R_2}{R_1}$.

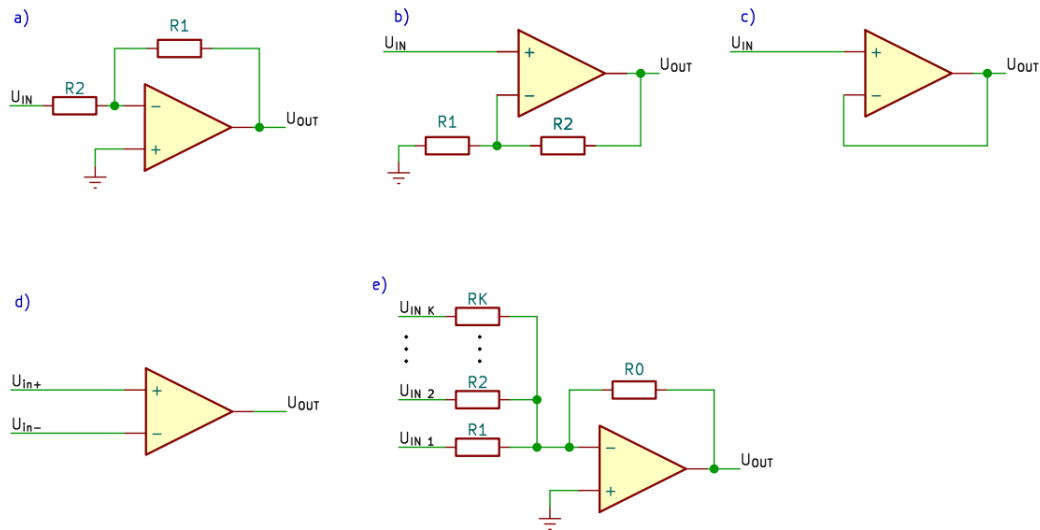
$$U_{out} = \frac{R_2}{R_1} \times (U_1 - U_2) \quad (1.7)$$

Hlavní uplatnění rozdílových zesilovačů je při měření proudu procházejícího obvodem. Vstupy zesilovače jsou připojeny ke svorkám rezistoru a protože napětí na rezistoru je přímo úměrné proudu tímto rezistorem procházejícím, je i rozdíl těchto napětí přímo úměrný procházejícímu proudu. Zesilovač tento rozdíl měří a může ho i zesílit pro jednoduchost dalšího zpracování. V praxi běžně volíme rezistory s velmi malými hodnotami odporu, běžně v řádu desítek až stovek $m\Omega$, z důvodu minimalizace ztrát.

1.3.1.5 Komparátor

Samotný operační zesilovač lze také použít jako takzvaný komparátor. Jedná se o obvod sloužící k porovnání dvou napětí. Vstupní napětí jsou přivedena na invertující a neinvertující vstup. Napětí na výstupu se rovná kladné napájecí větvi, pokud je napětí na neinvertujícím vstupu vyšší než na vstupu invertujícím. V opačném případě je na výstupu záporné napájecí napětí.

$$U_{out} = \begin{cases} U_+, & \text{pokud } U_{in+} > U_{in-} \\ U_-, & \text{jinak} \end{cases}$$



■ **Obrázek 1.1** Zapojení s operačními zesilovači, a) invertující zesilovač, b) neinvertující zesilovač, c) napěťový sledovač, d) komparátor e) sčítací zesilovač

1.4 DA a AD převodníky

V elektrotechnice se setkáme s dvěma hlavními druhy elektrického signálu, analogovým a digitálním. Analogový, nebo také spojitý signál nabývá libovolných hodnot v daném rozsahu a jeho hodnota se může plynule měnit. Digitální signál, také zvaný číslicový či diskretní nabývá pouze předem daných hodnot. Zatímco mezi libovolnými analogovými hodnotami leží nekonečně mnoho jiných hodnot, mezi digitálními hodnotami je pouze konečné množství. Příkladem reálného analogového signálu je zvuk nebo teplota.

Často však potřebujeme tyto druhy signálu převádět k čemuž slouží právě analogově-digitální (AD) a digitálně-analogové (DA) převodníky

1.4.1 Digitálně analogové převodníky

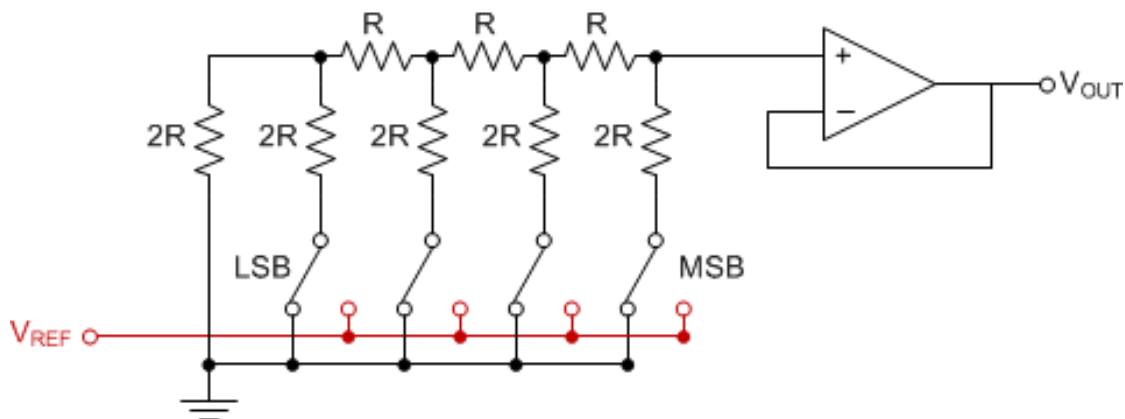
DA převodníky přijímají digitální signál, který transformují na odpovídající analogový signál. Běžná struktura DA převodníku je popsána na obrázku 1.2, jedná se o odporovou síť s digitálními vstupy. Napětí na těchto vstupech je nulové nebo rovno referenčnímu napětí převodníku. Počet těchto vstupů odpovídá rozlišení převodníku. Napětí na výstupu převodníku je rovno:

$$U_{out} = \frac{D_0 \times 2^0 + D_1 \times 2^1 + \dots + D_{n-1} \times 2^{n-1}}{2^n} \times V_{ref} [5] \quad (1.8)$$

Rozlišení převodníku nám udává, kolika různých hodnot může výstupní signál nabývat. Pro rozlišení n to může být 2^n , a výstupní napětí je zvyšováno v krocích, jejichž velikost je určena jako $V_{ref} 2^{-n}$. Pro vyšší rozlišení je tak možné reálnou hodnotu napětí přesněji aproximovat.

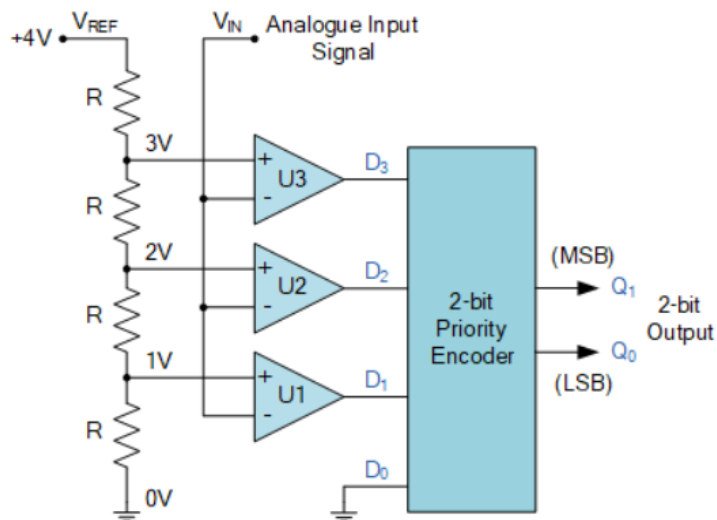
1.4.2 Analogově digitální převodníky

Pro převod analogového signálu na digitální slouží AD převodníky. Existuje více principů funkce těchto převodníků. Jeden z těchto principů využívá sérii rezistorů zapojených mezi referenčním



■ Obrázek 1.2 Vnitřní schéma DA převodníku [6]

napětím a zemí. Body mezi těmito rezistory jsou připojeny na záporné vstupy komparátorů. Druhý vstup komparátorů je připojen ke vstupnímu napětí. Kaskáda rezistorů vytváří snižující se napětí na vstupech jednotlivých komparátorů, v důsledku čehož pouze některé z nich vysílají kladný signál na svůj výstup. Podle toho, které komparátory jsou aktivní, můžeme zjistit odpovídající digitální hodnotu. Převodníky tohoto typu pracují rychle, využívají však velké množství součástek v poměru proti výstupnímu rozlišení. Diagram odpovídající dvoubitovému převodníku je k nahlédnutí na obrázku 1.3



■ Obrázek 1.3 Vnitřní schéma AD převodníku [7]

1.5 Komunikační sběrnice

Pro komunikaci mezi jednotlivými zařízeními používáme takzvané komunikační sběrnice. Jedná se o sadu vodičů, propojujících komunikující zařízení a nějaký protokol, diktující, jak tato komunikace probíhá. Sběrnice mohou být synchronní nebo asynchronní. Synchronní sběrnice mají

vodič pro hodinový signál, díky kterému se zařízení na sběrnici synchronizují, tedy reagují ve stejnou dobu. Asynchronní sběrnice používají synchronizační signály posílané spolu s daty. Dalším problémem, který je nutné při přenosu dat vyřešit, je adresace. Na sběrnici je typicky připojeno více zařízení, je tedy nutné nějakým způsobem určit, kterému zařízení jsou data určena. Dalším problémem sběrnic bývá takzvaná arbitráž, neboli přiřazení sběrnice. Protože dvě zařízení nemohou ovládat sběrnici najednou je nutné určit pravidla pro převzetí kontroly nad sběrnici a také pro řešení případných kolizí.

Hlavní dělení datových sběrnic je na sběrnice paralelní a sériové. Paralelní sběrnice používají vlastní vodič pro každý přenášený bit. Výhodou tohoto přístupu je fakt, že v jeden okamžik může být přenášeno více bitů najednou. Také obvody pro zpracování těchto signálů mohou být jednodušší, než je běžné u sériových sběrnic. Nevýhodou je potřeba velkého množství vodičů, což bývá problém, protože mikrokontroléry mají omezený počet kontaktů. Paralelní sběrnice jsou také více náchylné na rušení a běžně nedosahují tak vysokých frekvencí přenosu jako sběrnice sériové. Sériové sběrnice přenáší data typicky pouze po jednom vodiči. Data jsou tak přenášena pouze po jednom bitu. Sériové sběrnice tak pro svou funkci vyžadují nižší počet vodičů a dosahují také vyšších frekvencí přenosu, často tak přenosovou rychlostí překonávají i sběrnice paralelní. Dále se budeme věnovat pouze sběrnicím sériovým.

1.5.1 I2C

I2C (také I²C, Integrated-inter circuit) je synchronní sériová sběrnice vyvinutá v roce 1982 společností Philips Semiconductors. Nachází využití pro připojení periferních zařízení k mikrokontrolérům na malé vzdálenosti. Využívá dva vodiče, SDA (Serial DAta) a SCL (Serial Clock Line). Tyto vodiče jsou pomocí pull-up rezistorů nastaveny na log. úroveň jedna. Každé zařízení na sběrnici má vlastní sedmibitovou adresu. Komunikace začíná START sekvencí, po které následuje adresa zařízení. Pokud nějaké zařízení pozná vlastní adresu, je povinno odpovědět signálem potvrzení (ACK). Po potvrzení od přijímacího zařízení může komunikace začít [8].

1.5.2 SPI

SPI (Serial Periferal Interface) je synchronní sériová sběrnice určená pro komunikaci na krátké vzdálenosti pro použití ve vestavných zařízeních. Byla vyvinuta v roce 1979 společností Motorola. Sběrnice má tři vodiče společné pro všechny zařízení. MOSI (Master out slave in) slouží pro přenos dat z master zařízení do periferie. MISO (Master in slave out) slouží k přenosnému přenosu dat. Tyto přenosy mohou probíhat současně. Pokud zařízení data pouze odesílá nebo přijímá, nemusí oba vodiče obsahovat. Dále sběrnice obsahuje vodič SCK (Serial Clock), nesoucí hodinový signál pro účely synchronizace. Každé zařízení má také vlastní CS (Chip select) vodič, pomocí kterého master zařízení periferie adresuje. Tyto signály jsou aktivní v log. nule. Přenos začíná tím, že master stáhne CS požadovaného zařízení k log. nule. Následně vysílá jednotlivé bity odesílaných dat, mezi kterými vysílá hodinové signály. Přenos a příjem dat na straně zařízení je běžně realizován pomocí jednoho nebo více posuvných registrů.

1.5.3 UART

UART (universal asynchronous receiver-transmitter) je asynchronní sběrnice. UART zařízení má dva kontakty RX a TX (Recieve - přijímač a transmit - vysílač). Pro připojení dvou zařízení je pin RX připojen k pinu TX druhého a obráceně. Obě zařízení mohou komunikovat současně. Oba vodiče jsou v klidovém stavu v log. úrovni 1. Přenos začíná takzvaným start bitem, kdy je linka stažena k log. úrovni 0. Následují datové bity, po nich následuje stop bit. Počet datových bitů a stop bitů je určen konfigurací, která musí být pro obě zařízení shodná. Nejčastěji se jedná o osm

datových bitů a jeden stop bit (označované jako 8N1). Spolu s datovými bity můžeme také poslat jeden bit paritní, pro detekci chyb při přenosu.

1.6 Měření teploty

Při měření teploty, stejně jako i u jiných neelektrických veličin, je nutné použít nějaký senzor, který teplotu převede na některou z elektrických veličin, které je možné následně měřit. Nejčastěji se jedná o napětí, které je následně jednoduše zpracováno například pomocí AD převodníku. Při volbě takovýchto senzorů máme na výběr z několika principů měření.

1.6.1 Termistory

Jedná se o polovodičovou součástku, která mění svůj elektrický odpor za základě teploty. Termistoru jsou dvou druhů, termistory NTC (Negative temperature coefficient), také zvané negistory, se záporným teplotním koeficientem a PTC (Positive temperature coefficient), zvané pozistory, s kladným teplotním koeficientem. Odpor negistoru s teplotou klesá, zatímco odpor pozistoru s teplotou roste. Odpor nelze měřit přímo, proto jsou termistor zapojovány do děličů napětí s jedním pevným rezistorem. Vlivem změny odporu termistoru se tak mění napětí na odbočce děliče, které je možné dále měřit. Nevýhodou termistorů je nelinearita závislosti odporu na teplotě, vyžadující přesnou znalost této závislosti pro odvození teploty. Z tohoto důvodu jsou termistory často také zapojovány s linearizačními obvody, které tuto nelinearitu odstraňují. Pozistory také nacházejí využití jako vratné proudové pojistky. Vlivem průchodu příliš velkého proudu se termistor zahřeje, čímž zvýší svůj odpor a zamezí tak průchodu proudu. Po vychladnutí pojistka opět umožňuje běžný provoz zařízení.

1.6.2 Termočlánky

Termočlánky pro svou funkci využívají takzvaný termoelektrický jev. Ten vzniká při spojení dvou vodičů z různých kovů. Pokud má místo spoje rozdílnou teplotu od konců těchto vodičů, vzniká na těchto vodičích napětí přímo úměrné rozdílu těchto teplot. Citlivost těchto článků je v závislosti na použitých kovech mezi jednotkami až desítkami μV . Termočlánky tak často vyžadují zesílení signálu pro další zpracování. Dalším problémem je nutnost měření okolní teploty, bez které nemůžeme odvodit absolutní teplotu měřenou termočlánkem. Termočlánky jsou vyráběny v různých typech v závislosti na použitých kovech, například typ "K" z kovů chromel-alumel.

1.7 Existující řešení

V následující části probereme existující řešení problému a jejich parametry.

1.7.1 Rigol DL3000

Jako zástupce profesionálních elektronických zátěží jsem zvolil Rigol DL3021. Jedná se o nejlevnější model z řady DL 3000, vhodný pro profesionální dílny, zabývající se návrhem spotřební elektroniky. Maximální vstupní rozsah je 150 V DC a 40 A DC. Maximální disipovaný výkon je 200 W. Disponuje čtyřmi režimy: režim konstantního proudu, konstantního napětí, konstantního odporu a konstantního výkonu. Pro režim konstantního proudu je rozlišení nastavení 1 mA a přesnost 0.1 %. Samozřejmostí je možnost čtyřvodičového zapojení. Podporuje připojení přes USB a to jak v režimu zařízení tak, v režimu host. Dále podporuje RS232 a LAN připojení. Rozměry zařízení jsou 239 x 157 x 418 mm, hmotnost 9 kg [9].

Cena zařízení udávána výrobcem je \$499 [9], v České republice se cena pohybuje kolem 13000 Kč [10]. Vysoká cena zařízení je, kromě rozměrů, hlavní nevýhodou.



■ Obrázek 1.4 DL3000 [10]

1.7.2 DL24

Jedná se o elektronickou zátěž dostupnou k zakoupení přes různá internetová tržiště. Zařízení je určeno převážně hobby elektronikům. Zařízení podporuje módy konstantního proudu, výkonu, odporu a napětí. Mezní hodnoty jsou 0.2 až 20 A pro proud, 2 až 200 V vstupní napětí a až 150 W výkon. Zařízení podporuje připojení přes bluetooth a to jak s mobilní aplikací, tak s aplikací pro osobní počítač. Nechybí podpora čtyřvodičového zapojení.

Cena zařízení se pohybuje v okolí \$45 [11] pro zahraniční trhy a přibližně 1800 Kč [12] v České republice. Relativně nízká pořizovací cena zařízení je jeho hlavní výhodou. Nevýhodou je nedostatečná a špatně srozumitelná uživatelská dokumentace.

1.7.3 Elektronická zátěž

Jedná se o zařízení, které vzniklo v rámci méj maturitní práce na SPŠSE v Liberci. Zařízení je velmi omezené funkcionalitou, umožňuje pouze měření konstantním proudem a výkonem. Neumožňuje čtyřvodičové zapojení ani vzdálené ovládání. Naměřená data umí odeslat do počítače pro další zpracování [13]. Proudový rozsah je do 3 A, napěťový do 30 V. Maximální výkon je 60 W. Hlavní nevýhodou je fakt, že zátěž odebírá proud z testovaného zařízení i v době kdy není



■ Obrázek 1.5 DL24 [12]

aktivní měření a to přibližně 20 mA. Nižší proud není možné odebírat. Zátěž neimplementuje žádné ochrany proti přehřátí, přepětí či zpětnému zapojení.

1.8 Požadavky

Na programovatelnou zátěž můžeme klást celou řadu požadavků. Zejména se ale jedná o požadavky na:

1. mezní hodnoty
2. přesnost
3. bezpečnost
4. funkcionality

Dále si probereme jednotlivé požadavky.

1.8.1 Mezní hodnoty

Jedná se o maximální přípustné hodnoty měřených veličin, zejména tedy el. napětí, proudu a výkonu. Hlavním faktorem určujícím maximální proud a napětí je regulační prvek zátěže, v případě výkonu je to chlazení tohoto regulačního prvku.

1.8.2 Přesnost

Udává maximální přípustnou odchylku mezi hodnotami nastavenými uživatelem a skutečnou hodnotou.

1.8.3 Bezpečnost

Zařízení musí za všech okolností a podmínek pracovat spolehlivě a bezpečně.

1.8.4 Funkcionalita

Programovatelná zátěž může implementovat několik pracovních módů. Nejčastější je mód konstantního proudu, kdy uživatel určí proud, který bude zátěží odebíráný. Dále může zátěž pracovat například v módu konstantního výkonu nebo konstantního odporu. Všechny zmíněné módy také mohou pracovat dynamicky, podle uživatelem předprogramovaného profilu.

Další funkcionalita může zahrnovat ukládání naměřených dat, například na SD kartu, případně jejich posílání do počítače. Pomocí počítače také může být umožněno zátěž vzdáleně řídit.

1.9 Určení mezních hodnot elektronické zátěže

Po srovnání s existujícími řešeními a po zvážení požadavků na běžné měření jsem si stanovil následující mezní hodnoty pro navrhovaný výrobek.

- Maximální pracovní proud – 5 A
- Maximální vstupní napětí – 30 V
- Maximální výkon – 150 W

V porovnání s existujícími řešeními nejsou mezní hodnoty příliš vysoké, jsou však postačující pro běžná měření při testování baterií. Maximální vstupní napětí je úmyslně nízké. Návrh pro vysoké napětí složitější z důvodu nutnosti dodržení dostatečných izolačních mezer.

Kapitola 2

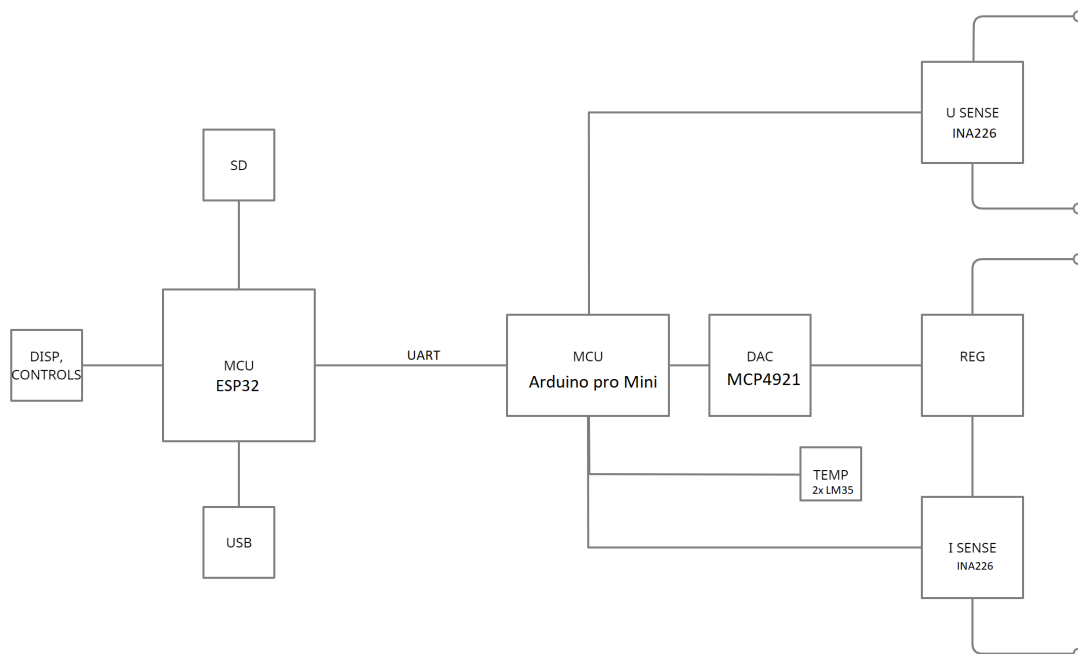
Návrh

Programovatelnou zátěž tvoří dvě hlavní části a to:

řídící část – Zpracovává vstup od uživatele, obsluhuje display a zajišťuje zápis dat na SD kartu a komunikaci s počítačem.

výkonová část – Upravuje proud odebíraný ze zdroje, podle příkazů řídicí části.

Rozdělení na dvě nezávislé části zvyšuje bezpečnost zařízení. Procesor ve výkonové části tak dělá nejmenší množství práce a je schopný rychle reagovat na změny vstupu. Výpočetně náročnější úkoly jsou svěřeny řídicí části. Obě části mezi sebou komunikují pomocí sériové sběrnice. Rozdělení zařízení také zvyšuje modularitu zařízení. Je tak možné vytvořit i jiné způsoby řízení bez nutnosti zásahu do návrhu výkonové části. Na obrázku níže je uvedeno blokové schéma zařízení. V levé části se nachází část řídicí, v pravé výkonová.



■ Obrázek 2.1 Blokové schéma zařízení

2.1 Výkonová část

MCU – Procesor, přijímá příkazy od řídicí části a podle nich skrze DAC upravuje velikost procházejícího proudu. Také měří hodnoty proudu a napětí, které posílá řídicí části.

DAC – Digitálně analogový převodník, na svém výstupu generuje procesorem specifikované napětí, kterým působí na regulační prvek.

UREF – Zdroj referenčního napětí pro DAC. Převodník toto napětí používá jako svojí maximální hodnotu výstupu.

U SENSE – Snímač napětí, převádí napětí na vstupu zátěže do podoby, kterou je procesor schopen snímat.

I SENSE – Snímač proudu, převádí proud procházející zátěží do digitální podoby, kterou následně odesílá procesoru.

REG – Regulační prvek - udržuje stálou hodnotu procházejícího proudu podle napětí na jeho vstupu.

TEMP – Snímač teploty, dodává procesoru informaci o teplotě chladiče regulačního prvku.

2.1.1 Popis principu funkce jednotlivých bloků

DAC – Realizován pomocí MCP-4921, jedná se o 12ti bitový jednokanálový DA převodník s vnějším zdrojem referenčního napětí. Převodník s řídicím procesorem komunikuje pomocí SPI sběrnice.

UREF – Jako zdroj referenčního napětí slouží odporový trimr zapojený jako dělič napětí mezi 5 V a zem. Referenční napětí DA převodníku je tak upravitelné, pro nastavení maximálního proudového rozsahu.

U SENSE – Snímač napětí je realizován integrovaným obvodem INA226. Jedná se o měřicí zesilovač s I2C výstupem. Pomocí této sběrnice poskytuje procesoru informace o aktuálním napětí na svorkách zátěže.

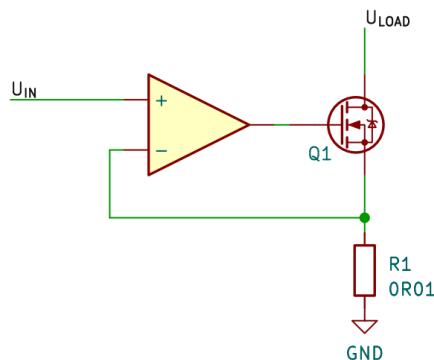
I SENSE – Snímač proudu je proveden pomocí integrovaného obvodu INA226 a bočnicku. Integrovaný obvod je sdílen s prvkem snímače napětí. Obvod měří napětí na bočnicku, jehož hodnotu převádí do digitální podoby a následně odesílá procesoru pomocí I2C sběrnice.

REG – Regulační prvek tvoří čtveřice operačních zesilovačů a unipolární tranzistor. První ze zesilovačů je zapojen jako neinvertující zesilovač se zesílením dva. Jeho vstupem je výstupní napětí DA převodníku a jeho výstupem je napětí dvojnásobné. Toto napětí je přivedeno do napětového sledovače, za účelem impedančního oddělení. Výstup sledovače poté vede do sčítacího zesilovače. Druhým vstupem sčítacího zesilovače je napětí na výstupu odporového trimru, přivedené skrze vlastní napětový sledovač. Tato napětí jsou posléze sečtena pomocí sčítacího zesilovače. Výstup sčítacího zesilovače je připojen na gate tranzistoru, který tímto napětím řídí.

2.1.2 Návrh řídicího obvodu regulačního prvku

Původní návrh využíval zapojení popsané na obrázku 2.2. Jedná se o klasické zapojení elektronické zátěže běžně dohledatelné na internetu [14]. Zapojení funguje následovně:

Výstupní napětí operačního zesilovače přímo ovládá tranzistor a tím také procházející proud. Na invertující vstup je přivedeno napětí na bočnicku, přímo úměrné proudu, který obvodem



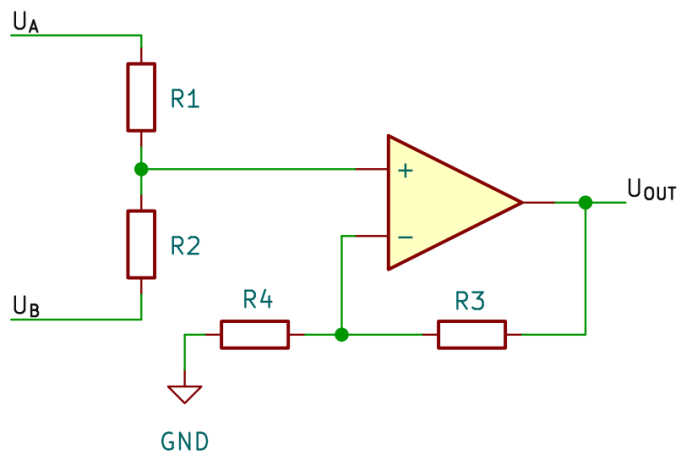
■ **Obrázek 2.2** Původní návrh

prochází. Operační zesilovač se tak snaží držet rovnost mezi napětím U_{in} a napětím na bočníku. Zapojení tak umožňuje pomocí napětí na vstupu ovládat odebíraný proud. Pro hodnotu odporu bočníku 0.01Ω platí, že za každý mV vstupního napětí zátěží poteče proud 100 mA. Zapojení tak dovoluje přímo ovládat odebíraný proud pomocí napětí. Má to ale háček, ovládací napětí musí být nulové, pokud chceme průtok proudu úplně zastavit. V praxi je ovšem velice složité nulového napětí dosáhnout, protože reálné obvody mají v důsledku nedokonalostí při výrobě jisté takzvané offsetové napětí, tedy napětí, pod které výstup nemůže klesnout. Při testování tohoto zapojení byla minimální nastavitelná hodnota protékajícího proudu přibližně 80 mA. Tento proud zátěž odebírala i v klidovém stavu, kdy neprobíhalo měření, což není přípustné.

Možným řešením, které tento princip využívá, by bylo použití sčítače napětí spolu se zdrojem napětí záporného, a offsetové napětí tak odečíst. Takovéto zapojení by však vyžadovalo symetrický zdroj napájení, což by zkomplikovalo návrh.

2.1.2.1 Finální návrh

Konečný návrh obvodu využívá sčítací zesilovač, který ovládá tranzistor. Vstupem tohoto zesilovače je napětí z DA převodníku a napětí na trimrovém děliči. Pomocí trimru je nastaveno odsazení napětí. Tranzistory typu mosfet mají totiž určité prahové napětí, při kterém začínají spínat. Pokud bychom tohoto napětí dosahovali pouze pomocí DA převodníku, velká část jeho rozsahu by byla vyplývána pouze pro dosažení stavu, kdy tranzistor začíná spínat. Přičtením tohoto napětí může být využit plný rozsah převodníku. Využitý sčítací zesilovač je v neinvertující variantě. Pro zapojení viz 2.3. Pokud se odpory $R1$ a $R2$ rovnají, vzniká na neinvertující vstup operačního zesilovače napětí rovné průměru těchto vstupních napětí. Toto průměrné napětí je následně zesíleno neinvertující zesilovačem. Při rovnosti $R3$ a $R4$ je zesílení rovno dvěma. Protože průměr dvou hodnot je jejich součet dělený dvěma, opětovným vynásobením tohoto průměru dvěma získáme součet napětí [15]. Nevýhodou tohoto přístupu je nelineární závislost procházejícího proudu na ovládacím napětí.



■ **Obrázek 2.3** Neinvertující sčítací zesilovač

2.2 Použitý hardware výkonové části

2.2.1 Arduino Pro mini

Jde o vývojovou desku s osazeným mikrokontrolérem ATmega328. Jedná se o stejný mikrokontrolér jako je využit na populární desce Arduino UNO. Vybavení mikrokontroléru: [16]

- Frekvence CPU až 20MHz
- FLASH 32KB
- EEPROM 1KB
- SRAM 2KB
- 14x digital I/O
- 1x 10-bit ADC 8 kanálů
- 6 PWM kanálů
- 2x 8-bit časovač
- 1x 16-bit časovač
- 1x programovatelný Watchdog časovač
- 1x USART
- 1x SPI
- 1x I2C

Deska Pro Mini je navržena pro minimální rozměry. Deska tak neobsahuje stabilizátor napětí ani převodník UART na USB. Z důvodu absence převodníku desku nelze programovat přímo ale je nutné použít externí programátor. Procesor výkonové části však nepotřebuje komunikovat pomocí USB a menší rozměry vývojové desky umožňují menší rozměry zařízení.

2.2.2 Regulační prvek

Jako regulační prvek slouží N-kanálový MOSFET tranzistor IRF250. Při volbě tranzistoru bylo potřeba zvážit jeho mezní hodnoty. IRF250 má mezní napětí drain-source 200 V, maximální stálý proud 30 A při 25 °C a 19 A při teplotě 100 °C. Mezní výkon činí 190 W [17]. Tranzistor tak bez potíží vyhovuje našim potřebám. V obvodu je využita verze v pouzdře TO-220AB. Pouzdro je sice rozměrné, ale je vhodné pro výkonové aplikace, kde je primární možnost chlazení tranzistoru.

2.2.3 MCP4921

MCP4921 je 12ti bitový DA převodník s vnějším referenčním napětím od společnosti Microchip. Převodník implementuje SPI rozhraní pro komunikaci s procesorem. Komunikace je zahájena stažením CS pinu k zemi. Převodník poté očekává čtyřbitovou hlavičku. Význam těchto bitů je následovný: [18]

bit 0 – Výběr kanálu, převodník se vyrábí i ve verzi s dvěma kanály, pro MCP4921, který má pouze jeden kanál bit slouží pro povolení výstupu

bit 1 – Určuje, zda má být referenční napětí přivedeno skrze oddělovací posilovač

bit 2 – Výběr dvojnásobného zesílení, pokud je bit jedna, je výstup převodníku dvakrát vyšší

bit 3 – Vypnutí zařízení, pokud je bit jedna, převodník přejde do režimu nízké spotřeby

Po odeslání hlavičky následuje požadovaná hodnota převodníku. Jedná se o dvanáctibitové číslo.

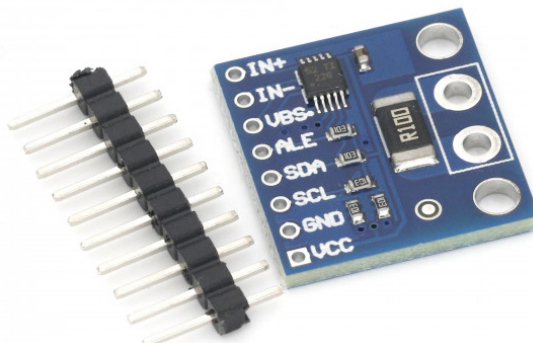
2.2.4 INA226

Jedná se o měřicí zesilovač určený pro měření proudu a napětí. Integrovaný obvod poskytuje diferenciální vstupy pro měření napětí na bočníku a vstup pro měření napětí. Naměřené informace odesílá pomocí sběrnice I2C. Rozmezí vstupního napětí je 0 až 36 V, rozmezí pro rozdílový vstup je -80 mV až 80 mV. Při odporu bočníku 10 mΩ lze tedy měřit proud až 8 A. Výrobce garantuje chybu zesílení maximálně 0.1 % [19]. Obvod také poskytuje funkci konfigurovatelného alarmu, který může být podle nastavení aktivován např. v případě překročení měřeného napětí či proudu, či při poklesu těchto hodnot pod nastavenou mez.

V obvodu je integrovaný obvod využit v podobě modulu. Důvodem je nedostupnost IO jako samostatné součástky v době tvorby práce. Použití modulu také usnadňuje návrh i konečné pájení, protože obvod je jinak dostupný pouze v pouzdrech pro povrchovou montáž s velmi malou roztečí vývodů. Takovéto moduly se prodávají s již připájeným bočníkem. Já jsem se však rozhodl použít bočník vlastní, proto jsem rezistor z modulu odebral. Důvodem byl neznámý maximální proud bočníku, který výrobce ani prodejce modulu neuvádí.

2.2.4.1 Výběr bočníku

Jak bylo popsáno výše, odpor bočníku 10 mΩ je dostačující pro dosažení maximálního možného proudu 8 A. Vybraný bočník musí být schopný takovýto proud vydržet. Také odchylka hodnoty odporu by měla být co nejmenší, pro maximální přesnost měření, ovšem tento problém je minimalizován možností kalibrace INA226. odpor by však měl být teplotně a časově stabilní. Pro tyto účely jsou vhodné odpory drátové. Jedná se o rezistory které tvoří sekce drátu přesné délky a průřezu. Tyto odpory jsou časově i teplotně stabilní, snášejí vysoké proudy a protože často nejsou obaleny v pouzdru také dobře odvádí přebytečné teplo. V obvodu je využit odpor CSR-1.8-R010 od společnost SR PASSIVES s maximální hodnotou pracovního proudu 11 A [20].



■ Obrázek 2.4 Modul INA226 [21]

2.2.5 Výběr senzoru teploty

Jak bylo uvedeno v kapitole výše, samotné termistory se k měření teplot příliš nehodí. Řešením by mohly být termočlánky, ty ovšem přinášejí vlastní problémy. Za prvé, je nutné měřit okolní teplotu, což nás opět vede k výběru i jiného způsobu měření než jsou termočlánky. Za druhé, termočlánky jsou vyrobeny z kovu a potřebujeme je v kontaktu s chladičem regulačního prvku. Tento chladič je však elektricky propojen s drainem tranzistoru má tak vlastní elektrický potenciál, který by tak byl připojen přímo k termočládku. Termočlánky by také vyžadovaly zesilovače pro umožnění měření teploty pomocí AD převodníku procesoru.

2.2.5.1 LM35

Z těchto důvodů jsem pro měření teploty zvolil integrovaný obvod LM35. Jedná se o obvod typu převodník teplota napětí. Nejčastější provedení je v třípinovém pouzdře TO-92, s piny pro napájení 4 až 20 V, zemí a výstupem pro signální napětí. Napětí na výstupu je přímo úměrné teplotě čidla a odpovídá vztahu:

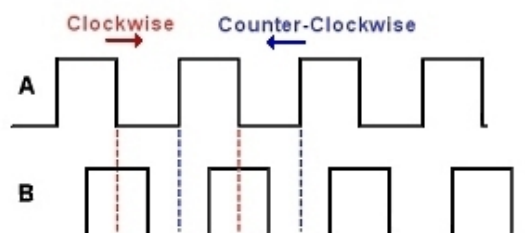
$$V_{out} = T \times 10 \quad (2.1)$$

Teplota je ve stupních Celsia a výsledné napětí je v milivoltech, Například pro teplotu 20 °C je výstupní napětí rovno 200 mV. Výrobce zaručuje přesnost měření ± 0.25 °C, pro pokojovou teplotu a ± 0.75 °C pro celý teplotní rozsah senzoru [22].

Senzor se vyrábí pro různé teplotní rozsahy, v obvodu je použit obvod značený LM35DZ jehož teplotní rozsah je 0 až 100 °C [23].

2.3 Řídící část

Hlavním účelem řídicí části je komunikace s uživatelem a okolním prostředím. To zahrnuje čtení ovládacích prvků, vykreslování obrazu na display, ukládání naměřených dat, atd.



■ **Obrázek 2.6** Průběh výstupů enkodéru [26]

pájecího adaptéru. Tato linka poskytuje napájení pro ventilátor chladiče a také napájí operační zesilovače. Pětivoltové napájení zajišťuje integrovaný lineární stabilizátor typu LM7805. Stabilizátor snižuje napětí z dvanácti voltů na pět, vzniká na něm tedy úbytek napětí 7 V. Proud stabilizátorem činí přibližně 200 mA, disipovaný výkon na stabilizátoru tak dosahuje 1,4 W. Stabilizátor proto musí být vybaven chladičem.

Pětivoltová linka poskytuje napájení pro obě desky s mikrokontroléry, DA převodník, modul INA226 a senzory teploty. Vývojová deska ESP32 má vlastní integrovaný stabilizátor pro 3,3 V. Ten poskytuje napájení samotnému procesoru desky, stejně tak jako napájení pro modul displeje, tlačítka a enkodér. Tyto obvody není možno napájet pomocí pěti voltů, protože komunikují s deskou ESP32, jejíž maximální vstupní napětí nesmí přesáhnou hodnotu 3,3 V [27].

V obvodu jsou dva zemnicí body, jeden určený pro analogové obvody a druhý pro digitální. Je tak učiněno za účelem minimalizace rušení mezi analogovými a digitálními obvody. Tyto dvě země jsou spojeny pouze v jednom bodě, aby v zemnicích vodičích nedocházelo k proudovým smyčkám.

2.5 Návrh desky plošných spojů

K návrhu desky plošných spojů bylo použito prostředí KiCAD¹. Jedná se integrované prostředí umožňující návrh elektronických schémat a k nim odpovídajících desek plošných spojů. Navržená deska je dvouvrstvá, nevodivé křížení vodičů je tak umožněno jejich vedením po různých vrstvách. Nejdůležitějším aspektem návrhu desek plošných spojů je rozmístění součástek. Součástky je nejlepší rozmístit tak, aby cesty mezi nimi nebyly příliš dlouhé a aby docházelo k co nejmenšímu počtu křížení. Rozmístění součástek se ovšem také řídí fyzickými potřebami zařízení. Není například vhodné ovládací prvky umístit na těžko přístupná místa na desce, u součástek vyžadujících chlazení musíme nechat místo pro chladič atd. Je také nutné brát ohled na adekvátní šířku vodičů.

2.5.1 Proudová zatížitelnost vodičů

Potřebná šířka závisí na očekávaném proudu, který bude vodičem procházet, tloušťce měděné vrstvy a maximálním povoleném teplotním nárůstu. Typická tloušťka povrchové měděné vrstvy činí 35 μm . Maximální proud vnějším vodičem lze určit pomocí vzorce:

$$I = 0.0647(DT^{0.4281})(S^{0.6732})[28] \quad (2.2)$$

Kde I značí maximální proud, DT značí maximální teplotní nárůst a S značí průřez vodiče. Pro účely našeho návrhu se proudovou zatížitelností vodičů zabýváme pouze v části, která nese silový proud z testovaného zdroje, proud signálních vodičů je zanedbatelný. Na navržené desce

¹<https://www.kicad.org/>

mají tyto vodiče proměnou šířku, nejužší místo má šířku 6 mm, což je dostatek pro přibližně 12 A, při nárůstu teploty vodičů o 20 °C oproti okolní teplotě. Spoje tak mají dostatečnou rezervu, protože maximální proudový rozsah zátěže činí 5 A.

2.5.2 Provize pro chlazení

Deska je navržena pro umožnění chlazení regulačního tranzistoru pomocí běžně dostupných procesorových chladičů pro patice AMD AM3+ a Intel LGA 1155. Tyto patice zachovávají kompatibilitu chladičů z předchozích generací procesorů, takže na trhu je celá řada možností. Vhodné jsou chladiče s ventilátorem mířícím směrem k desce, protože poskytují ventilaci i pro další součástky v okolí, jako je chladič napěťového stabilizátoru, bočník či ochranná dioda.

Jako chladič byl zvolen „Alpine 12 LP“ od společnosti Arctic. Jedná se o chladič pro procesory patice Intel LGA 1155 a kompatibilní. Chladič má přimontovaný ventilátor s čtyřpinovým rozhraním pro napájení, regulaci otáček a měření rychlosti otáčení [29]. Procesory na základních deskách jsou však o pár milimetrů vyšší, než je tranzistor připájený plošně k desce. Pro zajištění správného kontaktu tranzistoru s chladičem bylo nutné tranzistor podložit podložkou o výšce přibližně 2 mm.

2.5.3 Použitá pouzdra pasivních součástek

Na desce jsou použity pasivní součástky velikosti 1206. Jedná se o součástky pro povrchovou montáž. Použití povrchové montáže šetří místem na desce. Více místa by mohlo být ušetřeno použitím součástek menší velikosti, ovšem další minimalizace by ztížila pájení, které je prováděné ručně a vzhledem k tomu, že velikost zařízení spíše určují faktory jako je chlazení či řídicí moduly, považují použití menších součástek za zbytečné.

2.5.4 Blokovací kondenzátory

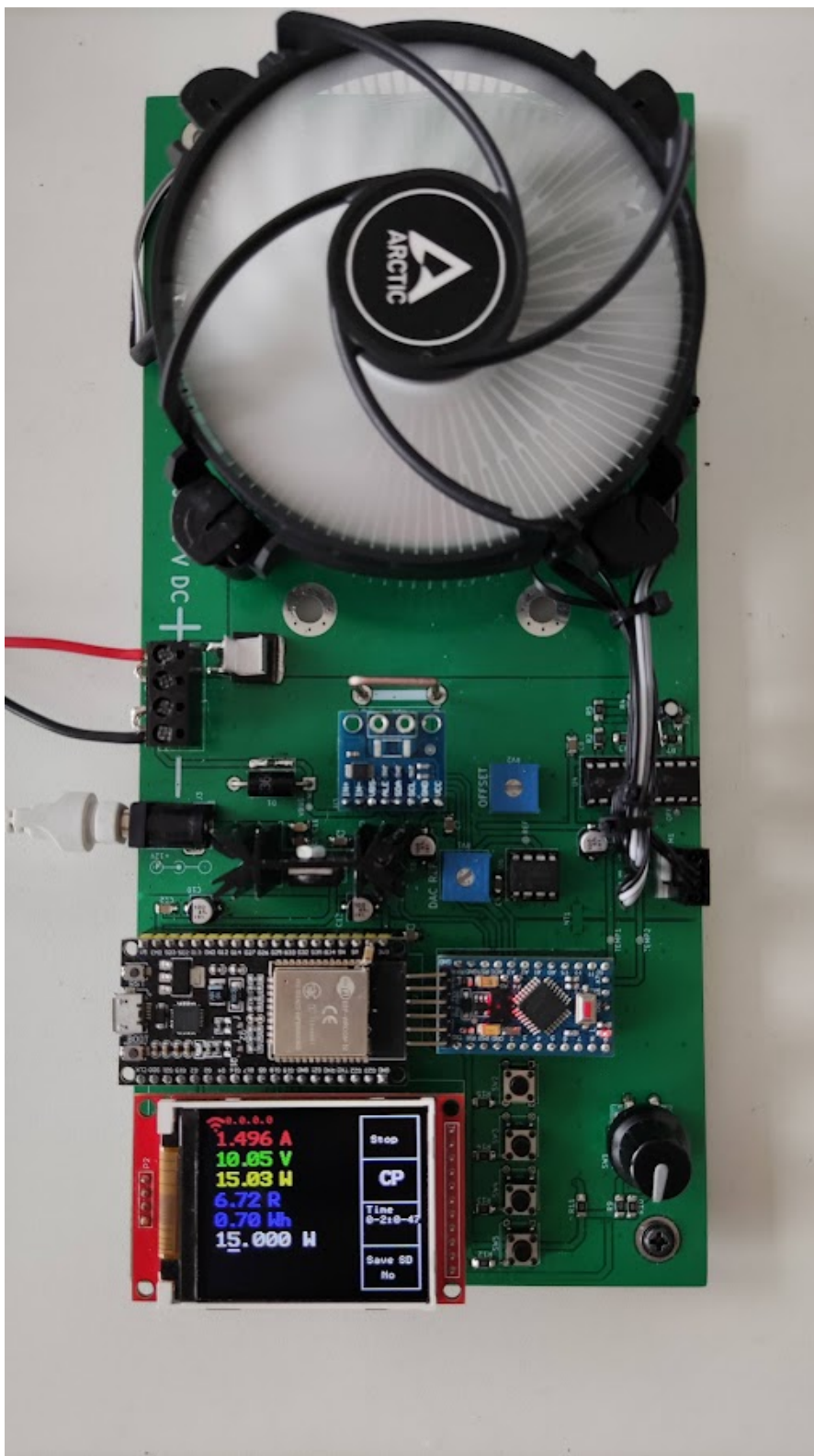
Integrované obvody ze svého napájení odebírají měnící se proud na základě právě prováděné činnosti. Tyto proudové špičky způsobují náhlý pokles napájecího napětí, čímž snižují spolehlivost napájení a představují v obvodu rušení. Tomuto jevu lze zabránit pomocí takzvaných blokovacích kondenzátorů. Nejčastěji jde o keramické kondenzátory, řádové se jejich hodnoty pohybují kolem stovky nF. Tyto kondenzátory umísťujeme co možná nejbližší napájenému obvodu, abychom minimalizovali odpor přívodního vedení. Při nárůstu vyžadovaného proudu si tak obvod energii odebere převážně z blízkého kondenzátoru. Po skončení proudové špičky je kondenzátor opět nabit ze zdroje.

2.6 Finanční analýza navrženého zařízení

Podrobné náklady na výrobu zařízení jsou popsány v tabulce 2.1. Pro DPS se jedná o cenu za pět kusů, bez ceny doručení. Celkové náklady činí přibližně 1800 Kč.

■ **Tabulka 2.1** Ceny součástek

Popis	Prodejce	Přibližná cena [Kč]
ESP32	LaskaKit	220
Arduino Pro Mini	LaskaKit	200
Displej	LaskaKit	270
MCP4921	GME	80
INA226 modul	Pajeníčko	160
DPS	JLCPCB	330
Chladič	CZC	170
Ovládací prvky	TME	70
Pasivní součástky	TME	200
Konektory	TME	100



■ Obrázek 2.7 Fotografie vyrobeného zařízení

Kapitola 3

Software

V této kapitole probereme programové vybavení elektronické zátěže

Software elektronické zátěže tvoří tři části: program pro výkonovou část, program pro řídicí část a aplikace pro osobní počítač.

3.1 Program pro výkonovou část

Program slouží hlavně k obsluze periferií určených k měření a kontrole procházejícího proudu. Tato naměřená data předává řídicí části pomocí sériové sběrnice UART. Programy pro Arduino mikrokontroléry mají dvě základní funkce. Funkci setup, která je volána jednou po resetu procesoru a slouží pro původní konfiguraci a inicializaci. Dále funkci loop, neboli smyčka, která je následně volána opakovaně, dokud je procesor v běhu.

3.1.1 Komunikace mezi procesory

Jak již bylo zmíněno, komunikace mezi procesory probíhá přes sériové rozhraní UART. Základem komunikace jsou dvě struktury, struktura command, sloužící pro posílání příkazů od řídicí k výkonové části a struktura entry, neboli záznam měření posílaný výkonovou částí do části řídicí.

Struktury jsou definovány s pomocí atributu "packed", který zajišťuje, že kompilátor nebude data ve struktuře zarovnávat na celá slova. V strukturách by tak mohly vznikat mezery a kompilátory pro různé platformy by mohly data zarovnávat podle jiných parametrů, což by vedlo k nemožnosti data správně přečíst na přijímajícím procesoru.

3.1.2 Regulace proudu

O regulaci proudu se stará funkce update. Funkce v první řadě načte nové hodnoty proudu a napětí, ze kterých také odvodí výkon. Pokud probíhá měření postupuje dále podle aktivního režimu. Pokud je například aktivní mód konstantního proudu funkce porovná nastavený proud s proudem skutečným. Je-li skutečný proud nižší, než proud nastavený funkce sníží hodnotu DA převodníku, aby došlo ke snížení procházejícího proudu. V opačném případě hodnotu zvýší. Ostatní režimy pracují podobně, pouze pracují s jinými hodnotami. Protože postupné zvyšování napětí na výstupu DA převodníku je poměrně pomalé (přibližně jednou za 2 ms) je prvotní hodnota nastavena pomocí funkce preValue. Tato funkce přijímá nastavený proud a vrací přibližnou

■ Výpis kódu 3.1 Struktury pro komunikaci mezi procesory

```
typedef __attribute__((packed)) struct
{
    uint64_t timeStamp;
    uint8_t state;
    float current;
    float voltage;
    uint8_t temp;
} entry;

struct __attribute__((packed)) command
{
    uint8_t type;
    float value;
};
```

hodnotu, potřebnou k jeho dosažení. Funkce je volána pouze na začátku měření, další úpravy jsou realizovány postupem popsaným výše.

Funkce `preValue` aproximuje potřebnou hodnotu pomocí logaritmické funkce. Tato funkce byla odvozena měřením hodnot potřebných pro dané napětí a jejich odhadem s použitím nástroje Wolfram alpha ¹.

3.1.2.1 Měření proudu a napětí

Ke komunikaci s INA226 za účelem měření proudu a napětí na vstupu je využívána knihovna INA226². Knihovna poskytuje funkce pro inicializaci zařízení a také pro čtení dat z jeho jednotlivých registrů. Pro začátek je nutné zavolat metodu `begin`, která může přijímat I2C adresu zařízení, je-li odlišná od adresy výchozí. Následuje konfigurační metoda, která přijímá jako parametry typ měření, konverzní dobu měření a počet průměrů. Hodnoty nastavené v programu jsou jedna průměrná hodnota, konverzní časy proudu i napětí $1100 \mu s$ a typ měření je kontinuální měření proudu i napětí. Dále je potřeba zavolat kalibrační funkci. Kalibrační funkce přijímá velikost odporu bočnicku a očekávaný maximální proud. Podle těchto hodnot nastavuje konfigurační registry INA226. Vrací maximální možný měřený proud.

3.1.2.2 Ovládání procházejícího proudu

K regulaci procházejícího proudu je využit DA převodník MCP4921 komunikující s procesorem pomocí SPI sběrnice. K ovládní převodníku jsem napsal vlastní třídu implementující nutné funkce pro zapsání hodnoty na výstup převodníku. Třída v konstruktoru přijímá piny, ke kterým je převodník připojen. Dále implementuje metodu `analogWrite`, přijímající šestnáctibitové číslo, představující požadovanou hodnotu na výstupu DA převodníku. Metoda podle SPI protokolu stáhne CS pin převodníku k nule a začne posílat data. Nejprve posílá hlavičku, čtyři bity, představující konfiguraci převodníku. Následuje dvanáct bitů hodnota výstupu. Mezi jednotlivými bity metoda vyšle puls na hodinový vodič převodníku. Nakonec opět zapíše log. jedničku na CS pin převodníku a komunikaci tím ukončí.

3.1.3 Bezpečnostní metody

¹<https://www.wolframalpha.com/>

²<https://github.com/jarzebski/Arduino-INA226>

3.1.3.1 Kontrola teploty

Funkce `checkTemp` se stará o kontrolu dosažení maximální teploty, případně o kontrolu selhání jednoho z teplotních senzorů. Funkce pro měření využívá zabudovaný AD převodník Arduina s rozlišením 10 bitů a hodnotou referenčního napětí 1.1 V. Hodnoty naměřené z obou senzorů teploty jsou porovnány, jestli se příliš neliší. Pokud se naměřené hodnoty liší, nejspíše jeden ze senzorů selhal a funkce v tom případě ukončí měření. K ukončení měření také dojde, pokud některý ze senzorů dosáhne teploty přibližně 80 °C. Z důvodu rychlosti výpočtu není hodnota AD převodníku nikdy přepočítávána na napětí nebo teplotu. Hodnoty jsou přímo porovnány s předem vypočítanou hodnotou podle vzorce $2^n \times T_{MAX}/10$, kde n je počet bitů AD převodníku a teplota je ve stupních Celsia.

3.1.3.2 Kontrola ventilátoru

O kontrolu ventilátoru se stará funkce `checkFan`. Funkce ověřuje, jestli došlo na pinu, připojeném k snímači otáček, ke změně logické úrovně. Funkce si drží počítadlo, jak dlouho ke změně log. úrovně nedošlo. Pokud počítadlo přesáhne hraniční hodnotu, znamená to, že je ventilátor buď odpojen nebo je mechanicky zastaven. V takovém případě metoda měření ukončí. Pokud ovšem ke změně log. úrovně na pinu pravidelně dochází, funkce při každé změně vynuluje počítadlo a k dosažení limitní hodnoty nedochází.

3.1.3.3 Kontrola napětí a proudu

Dalšími funkcemi jsou funkce pro kontrolu přítomnosti napětí, `checkVoltage`, která kontroluje zda je na vstupu přítomno vůbec nějaké napětí. Pokud ne, funkce ukončí měření. Další funkcí je `checkCurrent`, kontrolující průchod proudu. Pokud je hodnota DA převodníku blízko maximu ale zátěž neprochází žádný proud, nejspíše se jedná o chybu připojení testovaného zdroje. V tom případě funkce měření ukončí. Dále metoda `checkMaxCurrent` kontroluje, zda-li nedošlo k překročení maximálního proudového rozsahu. Pokud ano, sníží hodnotu výstupu DA převodníku, aby udržela proud pod limitní hodnotou.

3.2 Program pro řídicí část

Program řídicí části obsluhuje periferie sloužící pro komunikaci s uživatelem, řídí část výkonovou a zajišťuje komunikaci zařízení s okolním světem pomocí USB, WiFi nebo Bluetooth.

Program řídicí části využívá ke svojí funkci operační systém reálného času FreeRTOS. Program je napsán v programovacím jazyku Wiring. K vývoji bylo použito vývojové prostředí Visual Studio Code s rozšířením³ umožňujícím vývoj pro Arduino a jiné podobné vývojové moduly. Rozšíření poskytuje společnost Microsoft a přidává možnost kompilace a nahrávání programů spolu se sériovým terminálem.

3.2.1 FreeRTOS a řízení toku programu

FreeRTOS je operační systém určený pro mikrokontroléry pro aplikace reálného času. Poskytuje rozhraní pro vytvoření takzvaných úloh. Tyto úlohy plánovač systému volá v pravidelných intervalech, podle konfigurace. Dále poskytuje prostředky pro synchronizaci a správu těchto úloh. Systém je velice vhodný pro více jádrové procesory, jako je zrovna ESP32, protože nám umožňuje současně provozovat několik úloh najednou. Jednotlivé úlohy mají také vlastní prioritu, která je využita při plánování.

Stejně jako všechny programy v jazyce Wiring, program implementuje funkce `setup` a `loop`. Jejich význam je popsán v sekci o výkonové části, ovšem v tomto případě je funkce `loop` prázdná,

³<https://marketplace.visualstudio.com/items?itemName=vsciot-vscode.vscode-arduino>

protože o spuštění podprogramů se stará plánovač operačního systému. Funkce setup stále slouží ke konfiguraci a inicializaci periférií. Funkce také resetuje procesor výkonové části.

3.2.2 Řízení měření

O řízení měření se stará úloha `measureTask`. Úloha kontroluje, zda je připravené nové měření ke spuštění. Pokud tomu tak je, odešle náležitý příkazy výkonové části. V průběhu měření úloha počítá čas po který měření probíhá a počítá nastřádané hodnoty kapacity a energie.

3.2.2.1 Ukončení měření

K ukončení měření dochází třemi způsoby:

- Příkazem uživatele – uživatel může měření kdykoliv ukončit buď pomocí tlačítka nebo pomocí vzdáleného příkazu
- Dosažením ukončovací podmínky – Při zahájení měření může uživatel zvolit, podmínku, při které se má měření ukončit. Ukončovací podmínky jsou dvě a to časová, kdy uživatel nastaví časovou délku, po které bude měření ukončeno nebo minimální napětí, kdy výkonová část ukončí měření při poklesu vstupního napětí pod nastavenou úroveň.
- Chyba při měření – Pokud výkonová část vrátí chybové hlášení, např. z důvodu vysoké teploty, chyby ventilátoru atp.

3.2.2.2 Komunikace s výkonou částí

Komunikaci s výkonovou částí zajišťuje úloha `serial2Handle`. Tato úloha periodicky kontroluje objem dat připravených k přečtení ze sériové linky 2, kde je připojena výkonová část zařízení. Pokud je objem dat dostatečný, aby se mohlo jednat o záznam naměřených dat od výkonové části, přečte tato data do pole bajtů a pomocí přetypování převede na strukturu záznamu. Ze záznamu poté přečte naměřené hodnoty. Dále zkontroluje, zda jsou připraveny nové příkazy. Pokud jsou, odešle tyto příkazy výkonové části.

3.2.3 Interakce s ovládacími prvky

Následuje popis řízení ovládacích a zobrazovacích prvků umístěných na zařízení.

3.2.3.1 Tlačítka

Pro čtení stavu tlačítek slouží úloha `readBtns`. Ta periodicky kontroluje stav jednotlivých tlačítek. Pokud je tlačítko stisknuto přečte k jeho počítadlu jedničku. Pokud tlačítko stisknuto není, je jeho čítač vynulován. Dále zkontroluje zda od posledního průběhu funkcí došlo ke změně stavu tlačítka. Pokud ano, a tlačítko není stisknuto, musel uživatel tlačítko zrovna pustit. Funkce zkontroluje hodnotu čítače tohoto tlačítka. Pokud je dostatečně vysoká, vyhodnotí stisknutí jako dlouhé. Informace o stisknutém tlačítku a zda se jednalo o dlouhé stisknutí předává funkci `handleButtons`, která spustí akci přiřazenou tlačítku.

První tlačítko slouží pro zahájení nebo ukončení měření. Dlouhé stisknutí smaže případné chybové hlášení a také vynuluje akumulované hodnoty energie a kapacity. Druhé tlačítko slouží pro přepínání módů. Dlouhým stisknutím přepínáme mezi zobrazením energie a kapacity. Třetí tlačítko přepíná mezi jednotlivými ukončovacími podmínkami. Dlouhým stiskem můžeme nastavit hodnotu této podmínky. Poslední tlačítko umožňuje zapnout nebo vypnout záznam na SD kartu, je li karta přítomna.

3.2.3.2 Rotační enkodér

Čtení rotačního enkodéru zajišťuje knihovna ESP32Encoder. Knihovna poskytuje rozhraní pro založení objektu enkodéru. Knihovna poskytuje metody pro čtení aktuální hodnoty, její nastavení a ovládání enkodéru. Na pozadí metoda čte enkodér pomocí přerušení pro dosažení minimální reakční doby. Otáčením enkodéru jsou nastavovány hodnoty pro měření, případně hodnoty pro ukončovací podmínky. Stisknutím enkodéru přepínáme mezi nastavovanou cifrou.

3.2.4 Displej

Pro ovládání displeje je použita knihovna TFT_22_ILI9225. O vykreslování na displej se stará úloha updateLCD, která periodicky vykresluje naměřené hodnoty, stav tlačítek a případné chybové hlášení. Display zobrazuje aktuální hodnotu procházejícího proudu, napětí, a jím odpovídající hodnotu výkonu a odporu. Dále ukazuje nastřádané hodnoty energie nebo kapacity, podle nastavení uživatele.

3.3 SD karta

Zařízení umožňuje záznam naměřených dat na SD kartu. Pokud je tato možnost povolena, jsou v průběhu měření v intervalu jedné sekundy zaznamenány aktuální hodnoty proudu a napětí, spolu s časovým razítkem. Záznam ostatních hodnot není důležitý. Výkon a odpor lze ze zaznamenaných hodnot vypočítat, z celého průběhu lze také určit energii i kapacitu. Data jsou zaznamenána do souboru "data.txt" v kořenovém adresáři SD karty. Veškerý obsah souboru je při zahájení měření vymazán a přepsán novými hodnotami. SD karta také slouží k nahrání informací o WiFi síti do zařízení.

3.3.1 Vzdálená komunikace

Komunikace s programovatelnou zátěží může probíhat třemi způsoby, pomocí USB, přes Bluetooth a přes WiFi. Zátěž také na tyto rozhraní periodicky posílá naměřená data pro další zpracování.

ESP32 disponuje pouze jedním bezdrátovým modulem. Není tak možné využívat připojení WiFi a Bluetooth zároveň. Části programu, které jednu z těchto periférií používají jsou v blocích podmíněného překladu. Při nahrávání programu do mikrokontroléru tak zvolíme kterou z metod bezdrátového připojení chceme využívat.

3.3.1.1 Podoba příkazů

Zátěž přijímá textové příkazy posílané zmíněnými metodami. Příkaz má čtyři části oddělené čárkami a je zakončen znakem "#". První částí je identifikace příkazu. Druhou je hodnota. Následuje způsob ukončení měření a pokud se nejedná o manuální ukončení, hodnota ukončovací podmínky.

Příklady příkazů:

CC,2.356,M,0# - Mód konstantního proudu, 2.356 A, manuální ukončení

CR,100,V,5.25# - Mód konstantního odporu, odpor 100 Ω , ukončit při poklesu pod 5.25 V

Křížek (#) v příkazu slouží jako ukončovací znak. Jinou volbou pro ukončovací znak by mohl být znak nové řádky, ne však všechny běžně používané terminály tento znak se zprávou vždy posílají a také je problém při použití Unixových a Windows nových řádek. Volbou konkrétního znaku je dekodování příkazu zjednodušeno.

3.3.1.2 WiFi připojení

Pro připojení k WiFi síti potřebujeme znát její název a heslo k této síti. ESP32 si tyto údaje uchovává v nevolatilní paměti EEPROM. Pokud chceme tyto údaje změnit, použijeme SD kartu. Pokud do zařízení vložíme SD kartu, která má v kořenovém adresáři soubor s názvem „Wifi.txt“ a při startu zařízení přidržíme tlačítko rotačního enkodéru, zátěž nahraje obsah tohoto souboru a uloží jej pro další použití. Zápis nových dat do paměti je takto podmíněn, protože EEPROM paměť ESP32 má omezený počet zápisů. Nechceme tak do paměti zapisovat při každém spuštění aplikace.

Po startu programu se ESP32 pokusí připojit k síti, jejíž informace má uložené. Pokud se připojení podaří, zobrazí se v horní části displeje zelená ikona WiFi a ip adresa, kterou zařízení dostalo přiřazenou. V případě neúspěšného připojení je ikona červená a je zobrazena nulová ip adresa.

Pro připojení k WiFi je použita vestavěná knihovna. Zařízení umožňuje připojení pouze jednoho uživatele. Připojení k zátěži je možné na zmíněné ip adrese pod portem 23 (Telnet). Pro připojení je možné použít libovolný telnet terminál, například putty ⁴.

3.3.1.3 Bluetooth připojení

Pro připojení Bluetooth je využita knihovna BluetoothSerial, implementující sériové rozhraní pomocí bluetooth připojení. Pro připojení k zařízení je možné použít libovolný bluetooth terminál na osobním počítači či mobilním telefonu.

3.4 Aplikace pro počítač

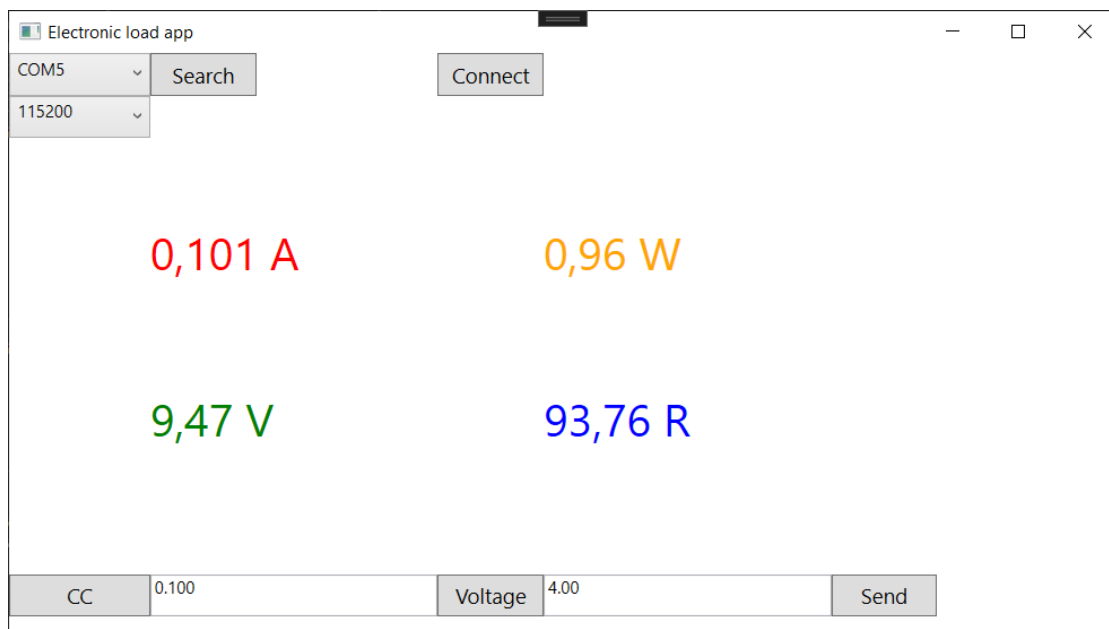
Aplikace pro počítač je určena pro operační systém Microsoft Windows. Je napsána v jazyce C# a využívá grafický systém WPF. Aplikace umožňuje vzdálené řízení zátěže pomocí sériové linky a zobrazení měřených dat. Pomocí funkce Windows, která umožňuje mapování Bluetooth zařízení na COM porty [30], je možné pomocí aplikace také ovládat zařízení bezdrátově skrze Bluetooth.

3.4.1 Popis aplikace

V horní části aplikace se nacházejí ovládací prvky sloužící pro připojení k elektronické zátěži. Uživatel zvolí Příslušný COM port a rychlost připojení. Následně klikne na tlačítko připojení. Tlačítkem pro vyhledávání lze seznam zařízení obnovit. při neúspěšném připojení aplikace upozorní uživatele pomocí dialogového okna. V případě úspěšného připojení se v prostřední části aplikace ukáží aktuálně měřené hodnoty zátěže.

Ve spodní části se nachází rozhraní pro odesílání příkazů. Prvním tlačítkem tohoto rozhraní uživatel volí způsob měření, případně možnost měření ukončit. Následuje textové pole pro hodnotu měření. Další tlačítko volí ukončovací podmínku.

⁴<https://www.putty.org/>



■ **Obrázek 3.1** Ukázka aplikace pro osobní počítač v průběhu měření

Kapitola 4

Testování

V následující kapitole probereme metodiku a výsledky testování, stejně jako některé odhalené problémy a jejich řešení.

Při testování byly použity tyto přístroje vypůjčené v dílně na FIT ČVUT.

Osciloskop Agilent DSO7104A ev.číslo 13-03015829/000

Proudová sonda Agilent 1147A, ev. číslo 13-03015478/000

Laboratorní zdroj napětí Matrix MPS-3005L-3 ev. číslo Z2-16000493/000

Multimetr V&A VA18B ev. číslo 1108123

4.1 Průběh proudu

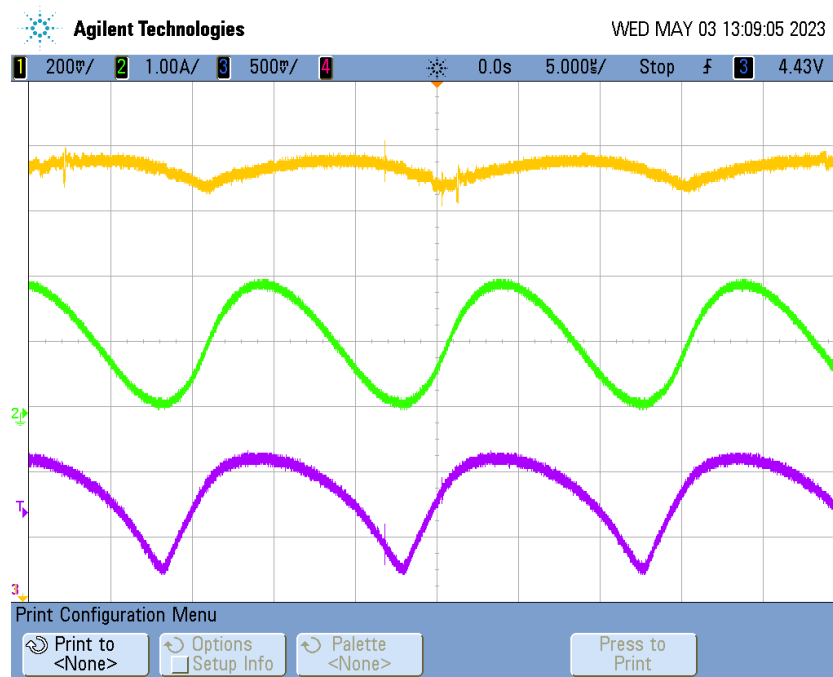
Po prvotním měření, kdy jsem porovnával hodnoty procházejícího proudu pomocí multimetru použitého jako stejnosměrný ampérmetr se zdálo, že hodnota procházejícího proudu odpovídá nastavené hodnotě. Následně jsem stejný proud změřil pomocí osciloskopu. Z průběhu je patrné, že zátěž odebírá proud impulzně, v rozmezí jednoho a dvou ampér (viz obr. 4.1). Průměr této hodnoty tedy odpovídá nastavené hodnotě jednoho ampéru, odebíraný proud by však měl být stálý. Příčinou tohoto průběhu proudu je nestálé napětí na gate tranzistoru. Přidáním $2 \mu\text{F}$ a 100 nF kondenzátoru problém pomohlo vyřešit (viz obr. 4.2). Přidáním kondenzátorů sice zvyšujeme kapacitu gate, čímž způsobujeme zpomalení reakční doby tranzistoru, tento problém je však zanedbatelný v porovnání s problémem původním.

4.2 Přesnost stejnosměrných měření

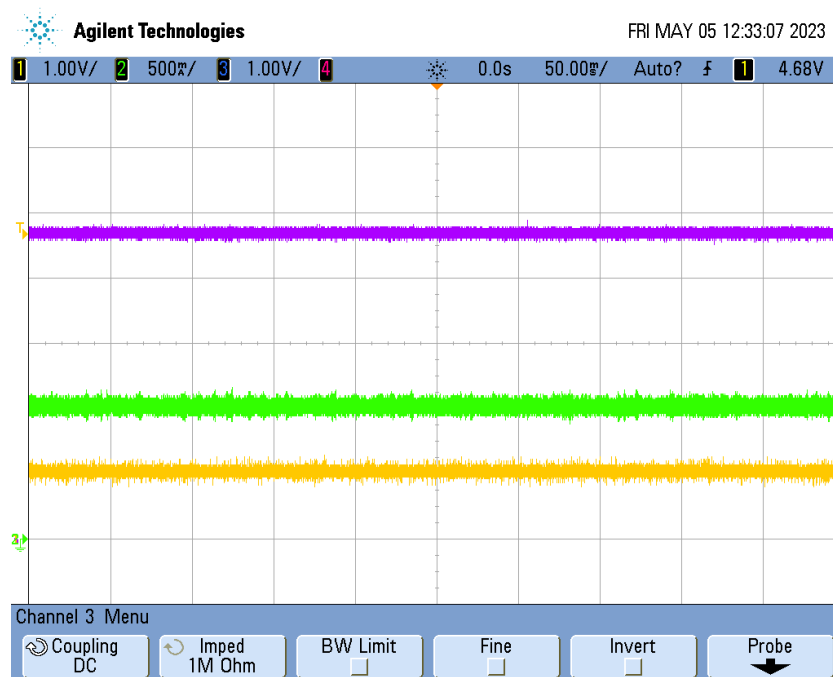
Pro určení přesnosti měření napětí jsem zátěž připojil k laboratornímu zdroji napětí, Na kterém jsem postupně zvyšoval hodnotu výstupního napětí. Po nastavení nové hodnoty jsem odečetl napětí naměřené zátěží a napětí měřené pomocí multimetru. Obdobný postup jsem následoval i při měření proudu.

4.2.1 Naměřené hodnoty a zhodnocení

Hodnoty napětí jsou k nalezení v tabulce 4.1. Odchylka měření napětí je velice dobrá.



■ **Obrázek 4.1** Závislost procházejícího proudu (zelená), napětí na gate (fialová) a výstupního napětí DA převodníku (žlutá) na čase, před opravou



■ **Obrázek 4.2** Závislost procházejícího proudu (zelená), napětí na gate (fialová) a výstupního napětí DA převodníku (žlutá) na čase, po opravě

Hodnoty proudu jsou uvedeny v tabulce 4.2. Při nízkých proudech je odchylka od nastavené hodnoty značná. S rostoucí velikostí nastaveného proudu však odchylka klesá, až postupně dosáhne přibližně jednoho procenta.

Multimetr[V]	Zátěž[V]	Odchylka[%]
1.08	1.08	0.00
2.04	2.03	-0.49
3.11	3.10	-0.32
4.06	4.05	-0.25
5.06	5.04	-0.40
10.13	10.09	-0.40
15.21	15.16	-0.33
20.10	20.07	-0.15
25.10	25.04	-0.24
30.00	29.99	-0.03

■ **Tabulka 4.1** Naměřené hodnoty napětí a jejich porovnání

4.3 Měření doby náběhu

Elektronická zátěž byla připojena k laboratornímu zdroji napětí nastaveného pro výstupní napětí přibližně 10 V. Testováno bylo dvou a čtyřvodičové zapojení zátěže. Zátěž byla nastavena do módu konstantního proudu. Po nastavení hodnoty proudu byla zátěž spuštěna. Pomocí osciloskopu byla posléze změřena doba, za kterou proud zátěží dosáhne nastavené hodnoty.

4.3.1 Naměřené hodnoty a zhodnocení

Naměřené hodnoty uvedené v tabulce 4.3 ukazují, že doba náběhu závisí na použití čtyřvodičového zapojení zátěže. Při tomto zapojení je doba náběhu i více než dvojnásobná. Důvod je ten, že v případě čtyřvodičového zapojení je společný bod přívodních vodičů až na svorkách testovaného zdroje. Napětí gate-source, které ovládá tranzistor je tak sníženo o napětí na přívodních vodičích. Z toho důvodu musí být výstupní napětí DA převodníku vyšší, pro dosažení stejné hodnoty procházejícího proudu. Doba náběhu je tak převážně určena dobou k dosažení potřebného napětí na výstupu DA převodníku.

4.4 Problém při měření napětí vyšších než 15 V

Při testování byl odhalen další problém. Pokud je vstupní napětí testovaného zdroje vyšší, než přibližně 15 V, chová se zátěž nepředvídatelně. Jak je vidět na obrázcích 4.5 a 4.4 zvýšení napětí nad tuto hranici způsobuje vysokofrekvenční oscilace na pětivoltové napájecí lince. Tyto oscilace negativně ovlivňují proudové měření a zátěž tak odebírá jiný proud než jaký je nastaven. Na lince se již nachází několik blokových kondenzátorů s kapacitou 100 nF a elektrolytický kondenzátor s kapacitou 10 μ F. Přidáním dalších kondenzátorů pro odrušení této linky nebyl problém vyřešen. Vyzkoušeny byly kondenzátory s hodnotou od jednotek pF až po stovky μ F.

4.5 Měření vybíjecí charakteristiky 9V baterie

Informace o baterii: [31]

Nominální napětí - 9 V

Kapacita - 190 mAh

4.5.1 Postup měření

Baterii jsem připojil k zátěži pomocí dvou vodičového zapojení. Na zátěži jsem nastavil mód konstantního odporu. Stejným způsobem je měřena vybíjecí charakteristika uváděna v dokumentaci baterie. Hodnotu odporu jsem však zvolil menší, aby měření netrvalo příliš dlouho. Výrobce uvádí výdrž přibližně 270 minut při stálém odporu 180Ω [31]. Já jsem zvolil odpor 45Ω . Také jsem nastavil ukončení měření při poklesu napětí baterie pod 4 V. Při měření jsem použil funkci zátěže pro záznam dat na SD kartu. Před zapnutím zařízení jsem kartu vložil do konektoru a zvolil jsem možnost zápisu. Po ukončení měření jsem kartu vyjmul a data z ní přesunul do počítače, kde jsem k jejich vizualizaci použil online nástroj Desmos¹.

4.5.2 Výsledky měření

Vybíjecí charakteristika je uvedena na obrázku 4.6. Výsledná charakteristika odpovídá očekávání, a bylo jednoduché ji získat. Po nastavení hodnoty odporu a ukončovací podmínky zátěž sama zaznamenala měřená data a měření také řádně ukončila, bez nutnosti zásahu uživatele.

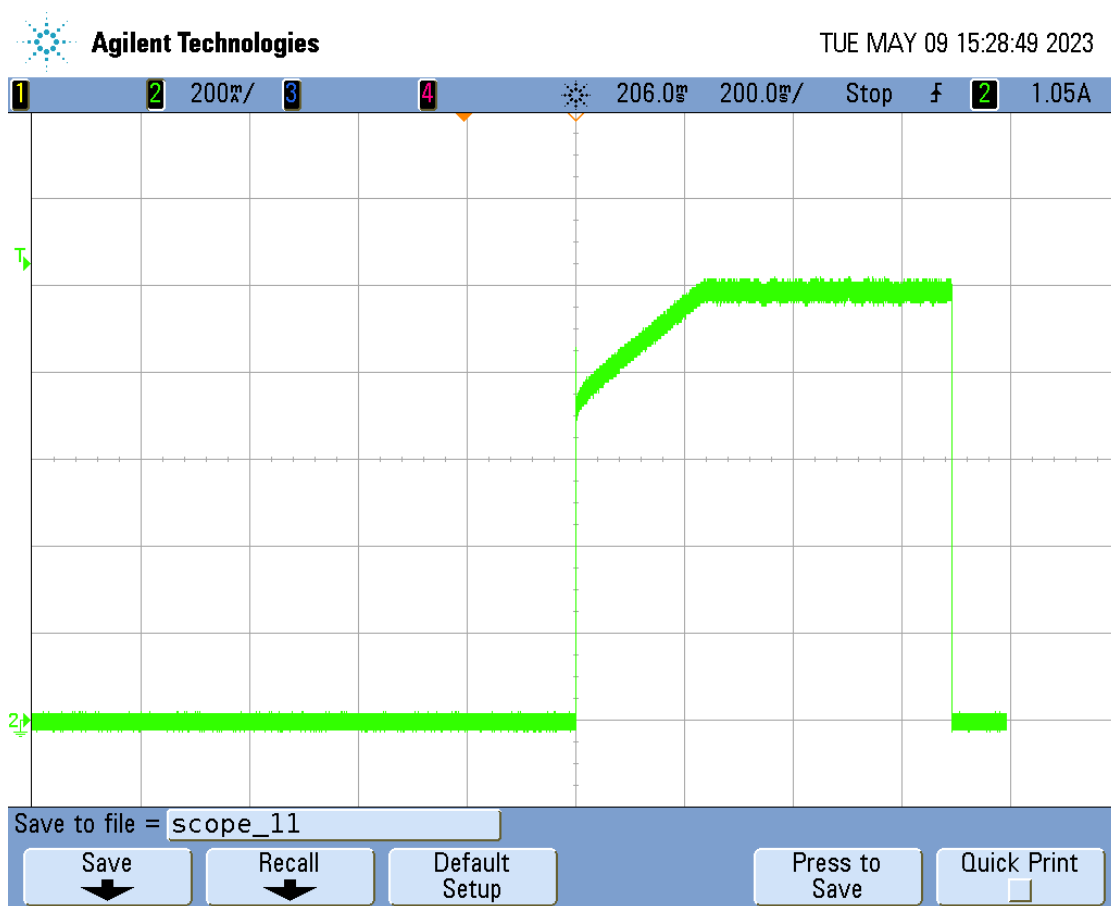
¹<https://www.desmos.com/calculator>

I nast. [mA]	I skut. [mA]	Odchylka [%]
1	1,4	28,6
5	5,74	12,9
10	10,9	8,3
20	21,2	5,7
30	31,3	4,2
40	41,3	3,1
50	51,6	3,1
60	61,7	2,8
70	71,8	2,5
80	81,7	2,1
90	91,5	1,6
100	102,5	2,4
200	203	1,5
300	303	1,0
400	403	0,7
500	505	1,0
600	606	1,0
700	707	1,0
800	808	1,0
900	909	1,0
1000	1007	0,7
2000	2011	0,5
3000	3018	0,6
4000	4031	0,8
5000	5051	1,0

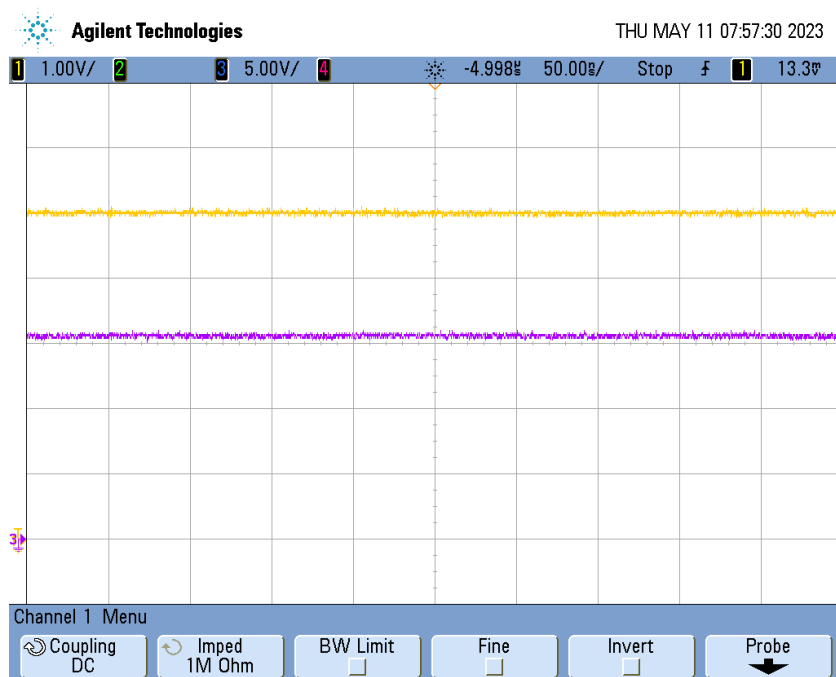
■ **Tabulka 4.2** Nastavené hodnoty proudu a jejich porovnání s naměřenými hodnotami

Nastavená hodnota	Doba náběhu 2W	Doba náběhu 4W
100 mA	20 ms	25 ms
1 A	150 ms	210 ms
3A	250 ms	600 ms
5 A	400 ms	1000 ms

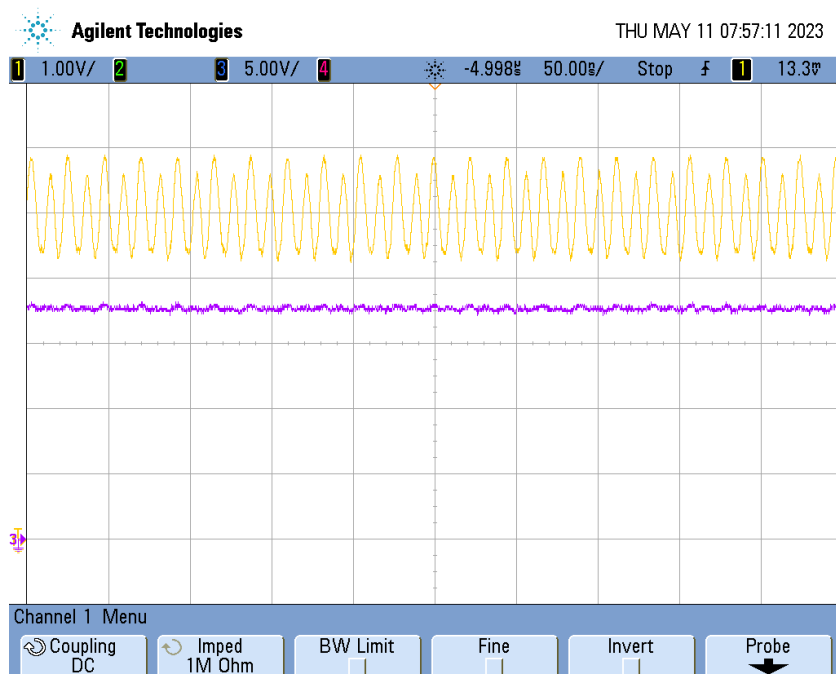
■ **Tabulka 4.3** Naměřené hodnoty doby náběhu



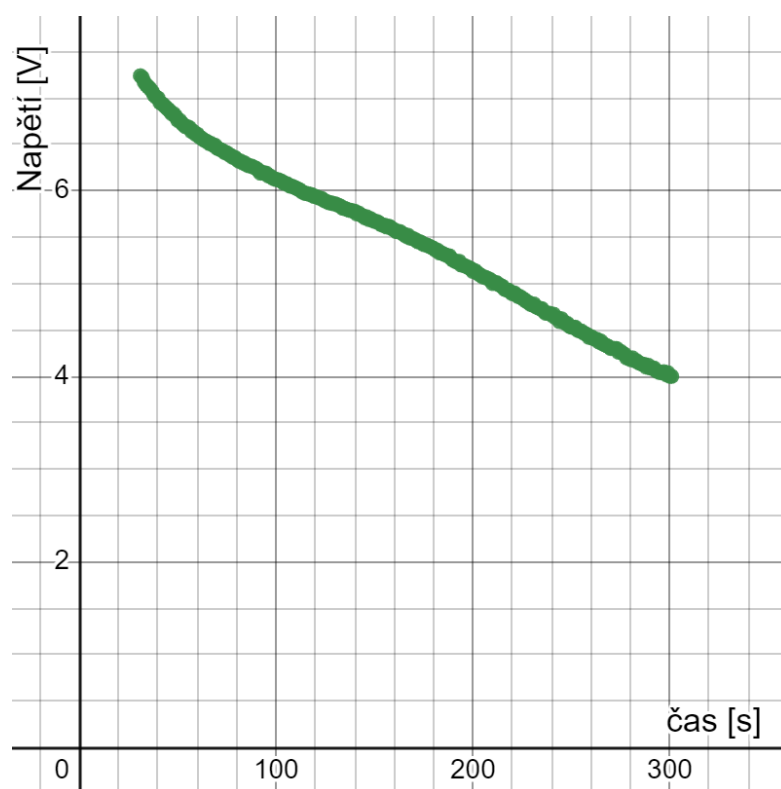
■ Obrázek 4.3 Měření doby náběhu, Nastavený proud 1 A



■ Obrázek 4.4 Závislost vstupního napětí (fialová) a napětí 5V napájecí linky (žlutá) na čase, $V_{IN} < 15V$



■ Obrázek 4.5 Závislost vstupního napětí (fialová) a napětí 5V napájecí linky (žlutá) na čase, $V_{IN} > 15V$



■ Obrázek 4.6 Vybíjecí charakteristika 9V baterie

Kapitola 5

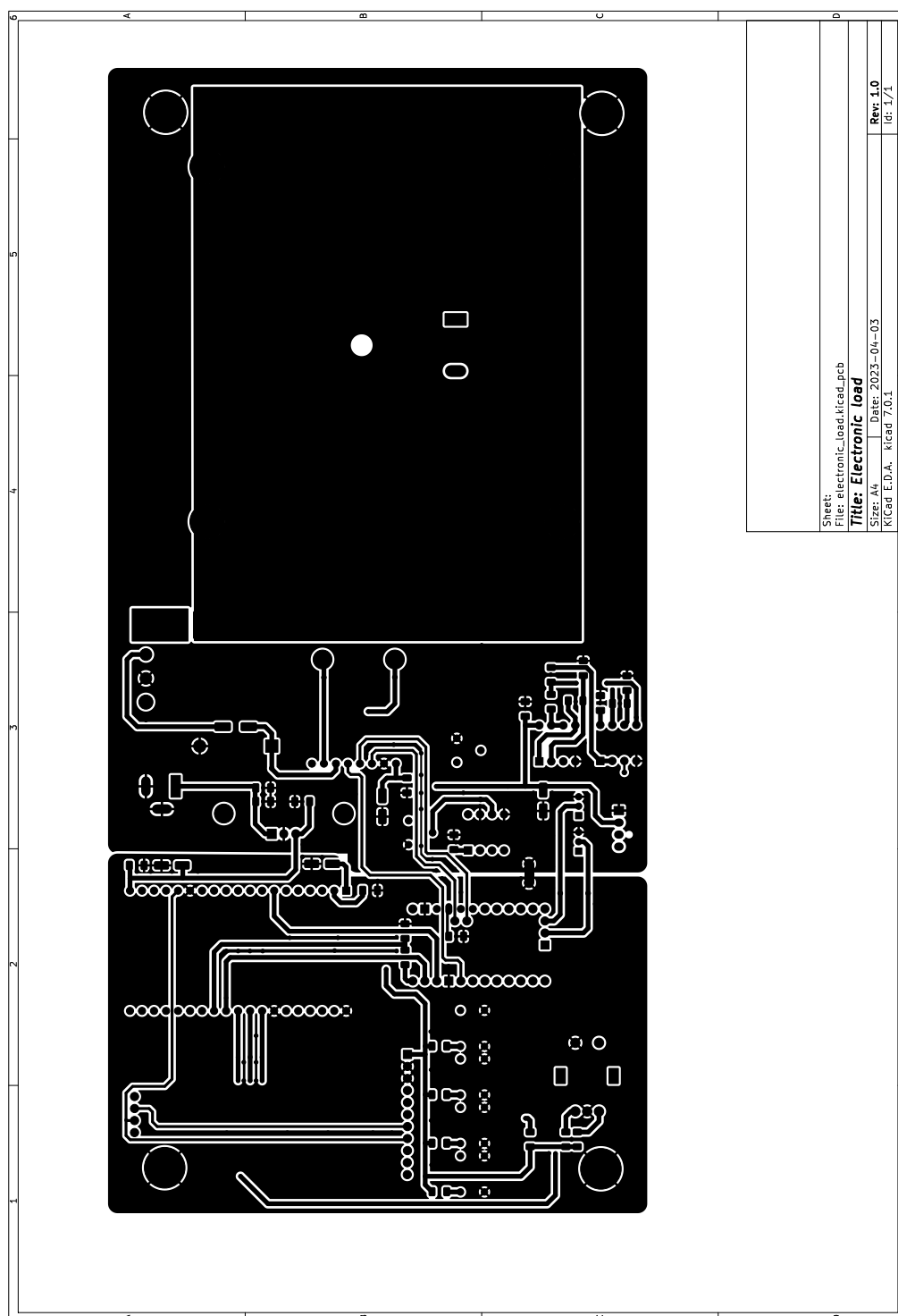
Závěr

Cílem práce bylo vytvořit zařízení elektronické zátěže podporující různé režimy měření s možností elektronického záznamu dat a vzdáleného řízení. Výsledkem je prototyp zařízení, který umožňuje testování zdrojů napětí pomocí čtyř pracovních režimů a umožňuje vzdálené ovládání pomocí USB, WiFi nebo bluetooth připojení. Zařízení může také pracovat samostatně, neboť je vybaveno všemi potřebnými ovládacími prvky a barevným LCD displejem. Také umožňuje automatický záznam naměřených dat na SD kartu. Zátěž umí měření automaticky ukončit podle předem nastavených parametrů. Dalším cílem bylo vytvoření jednoduché aplikace pro osobní počítač, pomocí které je možné data ze zařízení číst a umožňuje zařízení vzdáleně ovládat. Výsledná demonstrační aplikace tyto požadavky splňuje. Cíle práce tak byly naplněny. Hlavním nedostatkem zařízení je problémové měření pokud vstupní napětí přesahuje 15 V.

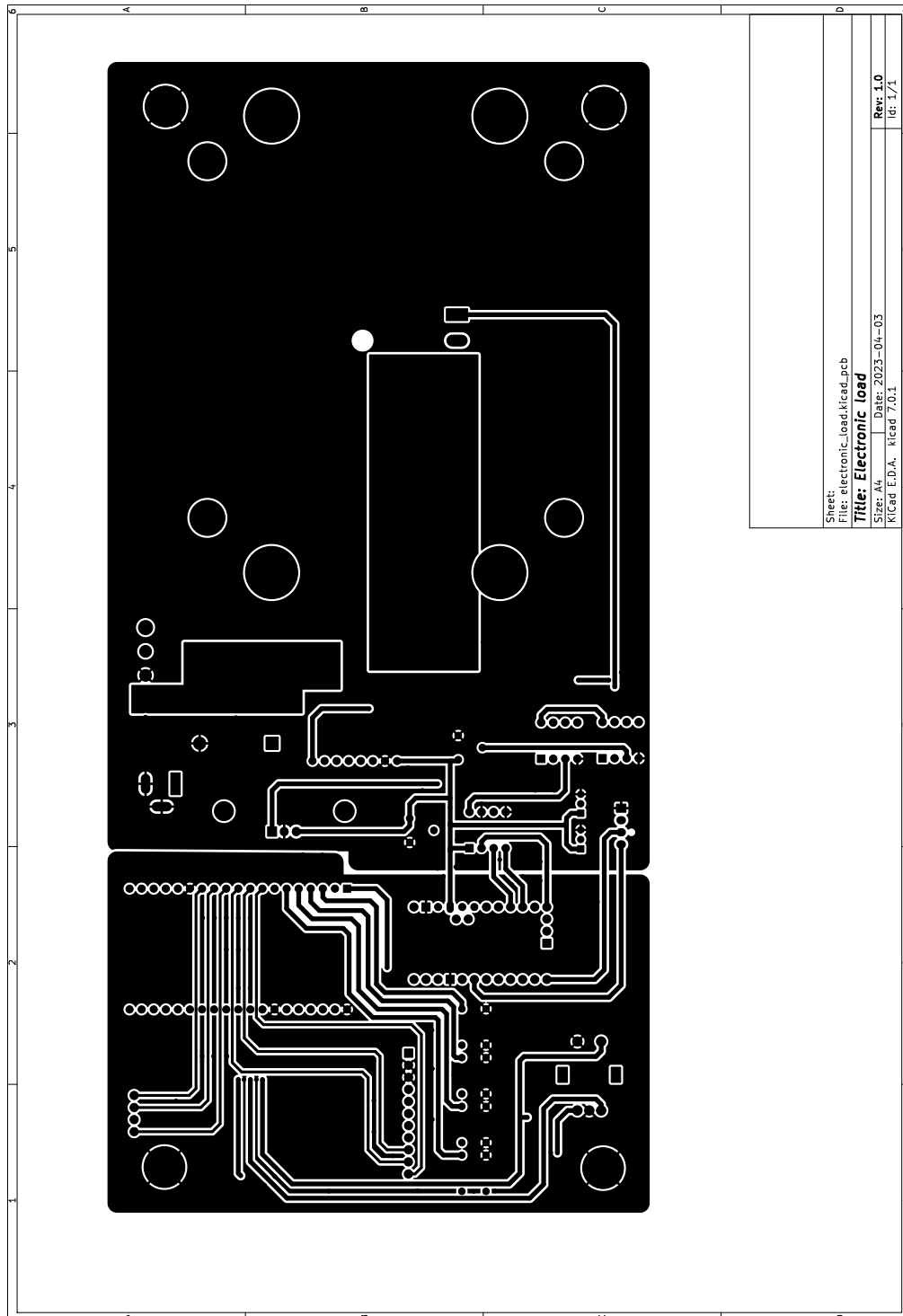
Budoucím vylepšením zařízení by mohla být implementace USB C Power Delivery protokolu, pro možnost přímého testování těchto zdrojů. Tento protokol se čím dál častěji objevuje u USB zdrojů a jako výstup přenosných nabíjecích zařízení (powerbanky). Testování kapacity tohoto typu zdroje je častým úkolem pro elektronickou zátěž, proto by bylo vhodné tento protokol implementovat. Další oblastí rozšíření práce by mohlo být vylepšení aplikace pro osobní počítač, implementace automatických měřicích profilů či vylepšení grafického a uživatelského rozhraní. V neposlední řadě by bylo vhodným rozšířením práce implementace mobilní aplikace umožňující vzdálené ovládání a řízení zařízení.

..... Příloha A

Otisk Desky plošných spojů



■ Obrázek A.1 Přední strana DPS

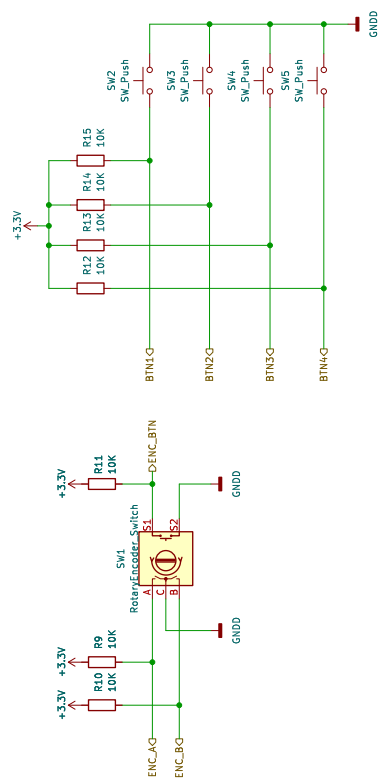


■ Obrázek A.2 Zadní strana DPS



Příloha B

Elektronické schéma



■ Obrázek B.3 Schéma ovládacích prvků

Bibliografie

1. *Soustava SI* [online]. Praha: Redakce Elektro, 2010 [cit. 2023-05-08]. Dostupné z: <http://www.odbornecasopisy.cz/res/pdf/40491.pdf>.
2. *PN Přechod - dioda* [online]. Česká republika: Jaromír Kekule, 2004 [cit. 2023-05-09]. Dostupné z: http://elektross.gjn.cz/soucastky/jeden_prechod/dioda.html.
3. *Zenerova (stabilizační) dioda* [online]. Česká republika: Reichl, 2006 [cit. 2023-05-10]. Dostupné z: <http://fyzika.jreichl.com/main.article/view/274-zenerova-stabilizacni-dioda>.
4. STEPHAN, Karl David. *Analog and mixed-signal electronics*. 1. vyd. Hoboken: Wiley, 2015. ISBN 978-1-118-78266-8.
5. NASHELSKY, Louis; BOYLESTAD, Robert. *Devices: Discrete and Integrated*. 1. vyd. Eaglewood Cliffs, New Jersey, USA: PRENTICE-HALL, INC., 1981. ISBN 0-13-208165-2.
6. *Trimming a digital-to-analog converter to improve accuracy* [online]. USA: AspenCore, Inc., 2023 [cit. 2023-05-10]. Dostupné z: <https://www.edn.com/trimming-a-digital-to-analog-converter-to-improve-accuracy/>.
7. *Analogue to Digital Converter* [online]. USA: AspenCore, Inc., 2023 [cit. 2023-05-10]. Dostupné z: <https://www.electronics-tutorials.ws/combo/analogue-to-digital-converter.html>.
8. *UM10204: I2C-bus specification and user manual*. USA: NXP Semiconductors, 1982. Dostupné také z: <https://www.pololu.com/file/0J435/UM10204.pdf>.
9. *DL3000 SERIES | PRECISION DC ELECTRONIC LOADS*. [B.r.]. Dostupné také z: <https://www.rigolna.com/products/dc-power-loads/dl3000/>.
10. *Elektronická zátěž RIGOL DL3021*. Česká republika: Micronix, 2023. Dostupné také z: <https://eshop.micronix.cz/merici-technika/elektricke-veliciny/laboratorni-zdroje-a-zateze/elektronicke-zateze/rigol-dl3021.html>.
11. *DL24/P Color 2.4"APP DC USB tester electronic load 18650 battery capacity monitor discharge charge power meter supply checker* [online]. China: AliExpress, 2023 [cit. 2023-05-11]. Dostupné z: <https://www.aliexpress.com/item/4000478442757.html>.
12. *Laboratorní elektronická zátěž - ATORCH-DL24 150W 20A DC* [online]. Česká republika: ECLIPSE s.r.o., 2023 [cit. 2023-05-11]. Dostupné z: <https://dratek.cz/arduino/122951-laboratorni-elektronicka-zatez-200v-20a-150w.html>.
13. PÁNEK, Miloš. *Elektronická zátěž*. Liberec, česká republika, 2019. Maturitní práce. SPŠSE a VOŠ Liberec.

14. *Tutorials: Simple Electronic Load Circuit* [online]. USA: COOL CAP ENGINEER, 2014 [cit. 2023-05-10]. Dostupné z: <https://coolcapengineer.wordpress.com/2014/09/15/tutorials-simple-electronic-load-circuit/>.
15. *Summing Amplifier* [online]. USA: ElectronicsHub.org, 2023 [cit. 2023-05-10]. Dostupné z: <https://www.electronicshub.org/summing-amplifier/>.
16. *Arduino Pro Mini, ATmega328PB TQFP 5V 16MHz* [online]. Česká republika: LaskaKit, 2023 [cit. 2023-05-11]. Dostupné z: <https://www.laskakit.cz/arduino-pro-mini--atmega328-5v-16mhz--klon/>.
17. *IRFP250, SiHFP250* [online]. USA: VISHAY INTERTECHNOLOGY, INC., 2021 [cit. 2023-05-04]. Dostupné z: <https://www.vishay.com/docs/91212/91212.pdf>.
18. *MCP4921/4922*. USA: Microchip technology, 2007. Dostupné také z: <https://ww1.microchip.com/downloads/en/DeviceDoc/21897B.pdf>.
19. *INA226*. USA: Texas instruments, 2011. Dostupné také z: <https://www.ti.com/lit/ds/symlink/ina226.pdf>.
20. *CSR-1.8-R010SR PASSIVES* [online]. Polsko: TME, 2023 [cit. 2023-05-11]. Dostupné z: <https://www.tme.eu/cz/details/csr-1.8-r010/other-resistors/sr-passives/>.
21. *Modul s INA226 pro měření napětí, proudu a výkonu s nastavitelným alarmem* [online]. Česká republika: Pájeničko s.r.o., 2023 [cit. 2023-05-09]. Dostupné z: <https://pajeniccko.cz/modul-s-ina226-pro-mereni-napeti-proudu-a-vykonu-s-nastavitelnym-alarmem>.
22. *LM35 Precision Centigrade Temperature Sensors*. USA: Texas instruments, 1999. Dostupné také z: <https://www.ti.com/lit/ds/symlink/lm35.pdf>.
23. *TEXAS INSTRUMENTS LM35DZ: analogový teplotní sensor* [online]. Praha: NetDirect, 2004 [cit. 2023-05-09]. Dostupné z: <https://www.gme.cz/v/1490443/texas-instruments-lm35dz-analogovy-teplotni-sensor>.
24. *2.0"176x220 TFT displej, ILI9225, SPI* [online]. Česká republika: LaskaKit, 2023 [cit. 2023-05-10]. Dostupné z: <https://www.laskakit.cz/176x220-barevny-lcd-tft-displej-2-0--spi/>.
25. *EC11 Series Specification* [online]. Neznámé: SRPassives, 2016 [cit. 2023-05-10]. Dostupné z: <https://www.tme.eu/Document/44e8c47524c4eb6c460cbc7fca5d0c53/EC11E12-15P30C-SW.pdf>.
26. *Rotary Encoder Tutorial* [online]. United Kingdom: HobbyTronics Ltd, 2023 [cit. 2023-05-10]. Dostupné z: <https://www.hobbytronics.co.uk/rotary-encoder-tutorial>.
27. *ESP32 Series* [online]. China: Espressif Systems, 2023 [cit. 2023-05-11]. Dostupné z: https://www.espressif.com/sites/default/files/documentation/esp32_datasheet_en.pdf.
28. *Proudová zatížitelnost vodiče* [online]. Česká republika: PragoBoard s.r.o., 2012 [cit. 2023-05-10]. Dostupné z: https://www.pcb.cz/proudova_zatizitelnost.
29. *Alpine 12 LP* [online]. Německo: Arctic, nez. [Cit. 2023-05-11]. Dostupné z: https://www.arctic.de/media/2a/3d/a7/1667491109/spec_sheet_Alpine_12_LP_210104_r4_EN.pdf.
30. *Standard Serial over Bluetooth on Windows 10* [online]. Anglie: Premier Farnell Ltd, 2023 [cit. 2023-05-11]. Dostupné z: <https://community.element14.com/technologies/internet-of-things/b/blog/posts/standard-serial-over-bluetooth-on-windows-10>.
31. *6F22(1604D)* [online]. Nez.: WESTINGHOUSE, nez. [Cit. 2023-05-10]. Dostupné z: https://img.gme.cz/files/eshop_data/eshop_data/10/543-060/dsh.543-060.2.pdf.

Obsah přiloženého média

Src	Obsahuje veškeré zdrojové soubory
├─ libraries	Obsahuje knihovny pro Arduino a ESP32
├─ Mini	Obsahuje kód pro desku Arduino pro mini
├─ ESP	Obsahuje kód pro desku ESP32
├─ electronic_load_app	Obsahuje projekt aplikace pro osobní počítač
└─ Thesis	Obsahuje zdroj tohoto dokumentu
DPS.....	Obsahuje projekt pro prostředí KiCad s návrhem schéma a DPS
├─ 2023-bp-panekmi3.pdf	Text práce ve formátu pdf