



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA ELEKTROTECHNIKY A KOMUNIKAČNÍCH TECHNOLOGIÍ

FACULTY OF ELECTRICAL ENGINEERING AND COMMUNICATION

ÚSTAV TELEKOMUNIKACÍ

DEPARTMENT OF TELECOMMUNICATIONS

MĚŘIČ ODBĚRU USB ZAŘÍZENÍ

POWER METER FOR USB DEVICES

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

BACHELOR'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Josef Macek

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

doc. Ing. Ivo Lattenberg, Ph.D.

BRNO 2024

Bakalářská práce

bakalářský studijní program **Telekomunikační a informační systémy**

Ústav telekomunikací

Student: Josef Macek

ID: 230619

Ročník: 3

Akademický rok: 2023/24

NÁZEV TÉMATU:

Měřič odběru USB zařízení

POKyny PRO VYPRACOVÁNÍ:

Navrhněte a vyrobte autonomní elektronický měřič odběru USB zařízení. Měřič se bude vkládat mezi USB zásuvku a připojené zařízení. Bude napájen z USB zásuvky a bude měřit odběr připojeného zařízení a výsledek zobrazovat na displeji. Mezi zobrazovanými informacemi, které se budou přepínat pomocí tlačítka, budou: aktuální proud, napětí, příkon a spotřeba ve Wh. Měřič by měl umožňovat zaznamenat i nejnižší a nejvyšší hodnotu. Pro realizaci použijte mikrokontrolér ATMEl.

DOPORUČENÁ LITERATURA:

[1] BRTNÍK, Bohumil a David MATOUŠEK. Mikroprocesorová technika: [práce s mikrokontroléry řady ATMEl AVR ATXmega A4]. Praha: BEN - technická literatura, 2011. ISBN 978-80-7300-406-4.

[2] MATOUŠEK, David. Práce s mikrokontroléry ATMEl. 2. vyd. Praha: BEN - technická literatura, 2006. μ C & praxe. ISBN 80-7300-209-4.

Termín zadání: 5.2.2024

Termín odevzdání: 28.5.2024

Vedoucí práce: doc. Ing. Ivo Lattenberg, Ph.D.

prof. Ing. Jiří Mišurec, CSc.
předseda rady studijního programu

UPOZORNĚNÍ:

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

ABSTRAKT

Tato bakalářská práce je zaměřena na konstrukci USB zařízení, které umožňuje monitorovat elektrické parametry, jako jsou napětí a proud, a následně vypočítat spotřebu energie. Práce obsahuje teoretickou část, ve které se čtenář seznámí s historií USB technologie, jejími typy a specifikacemi. Také se zde pojednává o technologiích rychlonabíjení USB. V závěrečné podkapitole teoretické části jsou uvedeny součástky vhodné pro výrobu tohoto zařízení. Praktická část se věnuje návrhu schématu zařízení a desky plošných spojů, programování mikročipu a samotnému testování. Závěr práce shrnuje poznatky získané při výrobě zařízení a nabízí možnosti dalšího rozšíření.

KLÍČOVÁ SLOVA

USB technologie. USB Power Delivery. Rychlonabíjení USB. Návrh schématu zařízení. Návrh PCB.

ABSTRACT

This bachelor's thesis focuses on the construction of a USB device that allows monitoring of electrical parameters, such as voltage and current and subsequently calculates energy consumption. The thesis contains a theoretical section where the reader is introduced to the history of USB technology, its types and specifications. It also discusses USB fast charging technologies. In the final section of the theoretical section the components suitable for creating this device are listed. The practical section deals with the design of the device's schematic and printed circuit board, programming the microchip and the actual testing. The conclusion summarizes the findings from the device's production and suggests further options for expanding the device's capabilities.

KEYWORDS

USB technology. USB Power Delivery. USB fast charging. Design of device schematics. PCB design.

MACEK, Josef. *Měřič odběru USB zařízení*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, Ústav telekomunikací, 2024, 73 s. Bakalářská práce. Vedoucí práce: doc. Ing. Ivo Lattenberg, Ph.D.

Prohlášení autora o původnosti díla

Jméno a příjmení autora: Josef Macek
VUT ID autora: 230619
Typ práce: Bakalářská práce
Akademický rok: 2023/24
Téma závěrečné práce: Měřič odběru USB zařízení

Prohlašuji, že svou závěrečnou práci jsem vypracoval samostatně pod vedením vedoucí/ho závěrečné práce a s použitím odborné literatury a dalších informačních zdrojů, které jsou všechny citovány v práci a uvedeny v seznamu literatury na konci práce.

Jako autor uvedené závěrečné práce dále prohlašuji, že v souvislosti s vytvořením této závěrečné práce jsem neporušil autorská práva třetích osob, zejména jsem nezasáhl nedovoleným způsobem do cizích autorských práv osobnostních a/nebo majetkových a jsem si plně vědom následků porušení ustanovení § 11 a následujících autorského zákona č. 121/2000 Sb., o právu autorském, o právech souvisejících s právem autorským a o změně některých zákonů (autorský zákon), ve znění pozdějších předpisů, včetně možných trestněprávních důsledků vyplývajících z ustanovení části druhé, hlavy VI. díl 4 Trestního zákoníku č. 40/2009 Sb.

Brno

.....

podpis autora*

*Autor podepisuje pouze v tištěné verzi.

PODĚKOVÁNÍ

Rád bych poděkoval všem, kteří mě podpořili a přispěli tak k úspěšnému dokončení této práce. Především děkuji vedoucímu práce panu doc. Ing. Ivu Lattenbergovi, Ph.D. za jeho cenné rady a trpělivost během celého procesu tvorby této práce. Na závěr bych rád poděkoval Bc. Adéle Vodičkové za veškerou její podporu, kterou mi poskytla během tvorby této práce.

Obsah

Úvod	19
1 Úvod do měření USB zařízení	21
1.1 Technologie USB	21
1.1.1 Princip	21
1.1.2 Datové přenosy	22
1.1.3 Plug & Play	23
1.1.4 Konektory USB	23
1.2 Napájení	25
1.2.1 Power Delivery	26
1.2.2 Protokol USB-PD	27
1.2.3 Quick Charge	28
1.2.4 Kabele pro vyšší proudy	29
1.3 Generace USB	30
1.4 Wireless USB	32
1.5 FireWire	33
2 Hardware	35
2.1 Mikrokontrolér	35
2.2 Senzor napětí a proudu	37
2.3 Stabilizátor napětí	38
2.4 Komunikace I2C	39
2.5 OLED displej	40
3 Praktická část	43
3.1 Použité součástky	43
3.1.1 ATtiny85	43
3.1.2 INA219	44
3.1.3 HT7333-A	46
3.1.4 SSD1306 I2C OLED	48
3.2 Kód	48
3.2.1 Vývojové prostředí Arduino IDE 2.3.2	48
3.2.2 Práce s programem	49
3.3 Návrh schématu	51
3.3.1 Popis obvodu	51
3.4 Osazení desky nepájivého pole	52
3.5 Návrh desky plošných spojů	53

3.6 Kryt na zařízení	53
3.7 Výsledky a testování	54
Závěr	57
Literatura	59
Seznam symbolů a zkratk	63
Seznam příloh	65
A Schéma obvodu	67
B Návrh desky plošných spojů	69
C Výsledky testování desky nepájivého pole	71

Seznam obrázků

1.1	USB-A 2.0 [5].	24
1.2	USB-B [5].	24
1.3	USB-C [5].	25
1.4	Architektura protokolu USB-PD [8].	27
2.1	Diagram komunikace I2C [27].	39
3.1	Pinout ATtiny85 [20].	43
3.2	ATtiny85	44
3.3	Vnitřní zapojení obvodu INA219. [22]	45
3.4	INA219	46
3.5	Vnitřní zapojení obvodu HT7333-A [24].	47
3.6	HT7333-A	47
3.7	OLED SSD1306	48
3.8	Návrh schématu obvodu	52
3.9	Osazení desky nepájivého pole.	52
3.10	Návrh modelu krytu v programu Tinkercad.	54
A.1	Schéma obvodu	67
B.1	Návrh desky plošných spojů	69

Seznam tabulek

1.1	USB-PD profily [7].	26
1.2	Verze Quick Charge [10].	29
1.3	Konektory USB 3.1 [13].	31
1.4	Konektory USB4 [14].	32
2.1	Přehled mikrokontrolérů Atmel [17].	36
2.2	Přehled senzorů proudu a napětí.	38
2.3	Přehled stabilizátorů	38
C.1	Výsledky měření napětí bez odběru proudu.	71
C.2	Výsledky měření napětí u powerbanky.	71
C.3	Výsledky měření proudu u powerbanky.	72
C.4	Výsledky měření napětí u telefonu Xiaomi.	72
C.5	Výsledky měření proudu u telefonu Xiaomi.	72
C.6	Výsledky měření napětí u reproduktoru JBL.	73
C.7	Výsledky měření proudu u reproduktoru JBL.	73

Úvod

V posledních letech se technologie USB stala jedním z nejrozšířenějších standardů pro přenos dat a napájení. S rozšířením zařízení, jako jsou smartphony, tablety, notebooky a další elektronika, která spoléhá na USB pro komunikaci a napájení, roste potřeba nástrojů, které mohou měřit a analyzovat spotřebu těchto zařízení.

Bakalářská práce se zabývá návrhem a konstrukcí zařízení, které umožňuje měření spotřeby energie USB zařízení v reálném čase. Tento měřič je umístěn mezi USB zásuvku a připojené zařízení a poskytuje informace o napětí, proudu a výkonu, které lze zobrazit na displeji. Cílem je vytvořit zařízení, které je přesné, snadno použitelné a přenosné, aby se mohlo používat pro různé aplikace, včetně testování a diagnostiky elektroniky.

První kapitola stručně popisuje technologii USB. Tato část zahrnuje její princip, způsob datového přenosu a různé typy konektorů. Dále se práce zabývá napájením USB, včetně technologií jako Power Delivery nebo Quick Charge. Tato kapitola také zahrnuje různé generace a popisuje alternativní technologie, jako je Wireless USB a Firewire.

Ve druhé kapitole se zaměřuji na výběr a obecné popisy komponent, které jsou nezbytné pro konstrukci USB měřiče. Tato část zahrnuje výběr mikrokontrolérů, senzorů napětí a proudu, stabilizátorů napětí a nakonec popisuje komunikační protokol I2C. Dále se zde popisuje výběr OLED displeje, který slouží pro zobrazení výsledků měření v reálném čase.

Třetí kapitola se věnuje konkrétním součástkám, které jsou použity pro konstrukci měřiče. Tato část zahrnuje výběr komponent na základě požadavků na přesnost, spolehlivost a velikost. Je zde také popsán návrh elektrického obvodu, včetně schématu, návrhu desky plošných spojů a krytu pro (DPS). Zde je také popsáno programování mikrokontroléru.

Poslední kapitola je zaměřena na testování vytvořeného zařízení. Tato část zahrnuje testování přesnosti měření. Na základě výsledků testování je provedeno zhodnocení celkového projektu a jsou zde uvedeny závěrečné úvahy a doporučení pro další implementace.

1 Úvod do měření USB zařízení

1.1 Technologie USB

Technologie USB neboli Universal Serial BUS, je multiplatformní sériová sběrnice. Postupně tato technologie nahrazuje starší technologii RS-232. Používá se pro připojování zařízení všeho druhu: myši, klávesnic, tiskáren, kamer, fotoaparátů, flash disků, tabletů, mobilních telefonů, nebo pro napájení. Využitelnost rozhraní USB poroste s nástupem technologie USB-C, která nabízí další rozšíření. Na vývoj a implementaci standardů dohlíží USB Implementers Forum (USB-IF). Standardy jsou aktualizovány a vylepšovány, aby byly schopny obsloužit stále novější a výkonnější zařízení.

1.1.1 Princip

USB funguje na principu master a slave, nebo jako propojení. V tomto případě je vždy zařízení master počítač, tablet, nebo mobilní telefon a všechna data vycházejí z nich. Přenos paketů je zajištěn pomocí krátkých (8 bajtů) a dlouhých (1024 bajtů) zpráv. Zařízení slave žádá data samo od sebe nepožaduje. Přenos dat funguje v rámcích o délce 1 ms. V jednom rámci je možné zasílat pakety pro více než jedno zařízení. Při komunikaci s více zařízeními je využito zařízení hub, které pracuje jako rozdělovač sběrnice [1].

Komunikace: master–slave

1. **Iniciace komunikace:** komunikace mezi masterem a slavem začíná, když master identifikuje připojené zařízení. Toto rozpoznání může probíhat automaticky, když je zařízení připojeno, nebo na základě nějaké události (např. stisknutí tlačítka na periférii).
2. **Konfigurace zařízení:** po rozpoznání zařízení master provede proces konfigurace. To zahrnuje identifikaci zařízení, vyjednávání různých parametrů (např. rychlost přenosu dat) a nastavení připojení mezi masterem a slavem.
3. **Rámce a přenos dat:** přenos dat mezi masterem a slavem probíhá v rámcích, které jsou základními jednotkami komunikace USB. Existují různé typy rámců, včetně řídicích a datových rámců.
4. **Token Packet:** master začíná komunikaci vysláním token packetu, který obsahuje informace o požadavku na přenos dat (čtení nebo zápis) a adresu periferního zařízení.

5. **Data packet:** po úspěšné komunikaci pomocí token packetu následuje přenos dat pomocí data packetu. Data packet obsahuje samotná data, která mají být přenesena mezi masterem a slavem.
6. **Handshake:** po přenosu dat následuje třetí fáze handshake, která slouží k potvrzení správného přenosu dat. Existují tři typy potvrzení: ACK, NAK a STALL.
7. **Přerušeni:** pro některá zařízení je důležité mít schopnost přerušovat mastera a signalizovat mu, že existuje nějaká důležitá událost (např. stisknutí tlačítka na klávesnici). K tomu slouží přerušeni (interrupt mechanismus).
8. **Ukončení komunikace:** po dokončení komunikace master ukončí spojení, to může být v reakci na pokyn od uživatele, nebo na základě vyhodnocení, že přenos dat byl dokončen [2].

1.1.2 Datové přenosy

- **Control Transfer - ovládací přenos**

Tento typ přenosu se používá pro ovládání a konfiguraci zařízení USB. Je to základní mechanismus pro komunikaci s USB zařízením a provádění různých řídicích funkcí, jako je nastavení, konfigurace nebo zjišťování stavu zařízení. Control Transfer využívá speciální endpoint označený jako endpoint 0. Tento endpoint slouží k výměně řídicích zpráv mezi hostitelským počítačem a připojeným zařízením. Typické příklady použití kontrolního přenosu zahrnují požadavky na informace o zařízení, nastavení konfigurace zařízení a řízení funkčnosti USB rozhraní.

- **Interrupt Transfer - přerušovaný přenos**

Tento typ přenosu se používá k pravidelné komunikaci mezi hostitelským počítačem a připojeným zařízením, zejména k aktualizaci stavu zařízení nebo k pravidelnému odesílání malých datových bloků. Interrupt Transfer je často používán pro zařízení, která periodicky vyžadují pozornost hostitelského počítače, jako jsou například klávesnice, myši nebo senzory. Tento typ přenosu zahrnuje definované intervaly, v nichž hostitel a zařízení vyměňují data. Intervaly mohou být nastaveny na různé hodnoty podle požadavků konkrétního zařízení.

- **Isochronous Transfers - isochronní přenos**

Isochronní přenos se používá pro přenos dat v reálném čase, kde je důležité dodržovat konstantní rychlost přenosu dat, jako je přenos zvuku nebo videa. Jedním z hlavních rysů isochronního přenosu je jeho schopnost zajistit předvídatelnost a konzistentní šířku pásma pro přenos dat. Na rozdíl od jiných typů přenosů nezaručuje isochronní přenos doručení dat, ale spíše dodržení přeno-

sového rozvrhu, což je klíčové pro aplikace vyžadující nepřetržitý a pravidelný tok dat.

- **Bulk Transfers - hromadný přenos**

Hromadný přenos se používá k přenosu velkých datových bloků, které nevyžadují okamžitou a pravidelnou dostupnost. Typické použití hromadného přenosu zahrnuje přenos souborů, tiskové úlohy a další úkoly, které nevyžadují okamžitou odezvu a mohou být prováděny efektivně v dávkách. Hromadný přenos má nižší prioritu než přenosy typu control, interrupt a isochronní, což znamená, že se používá, pokud není potřeba specifický časový harmonogram pro přenos dat [3].

1.1.3 Plug & Play

Základní výhodou využívání zařízení USB je technologie Plug & Play, která umožňuje připojení zařízení bez manuální instalace ovladače zařízení, například myši, nebo klávesnice. Podmínkou je že operační systém master, musí být schopen se dotazovat na zařízení slave. Připojení USB zařízení s technologií Plug & Play probíhá následovně:

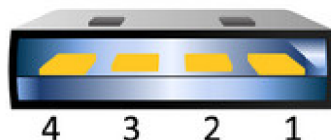
1. Hub oznamuje hostitelskému počítači, že se připojilo nové zařízení.
2. Počítač se zeptá hubu, na který port bylo zařízení zapojeno. Jakmile obdrží odpověď, počítač nařídí portu, aby se aktivoval a sběrnici resetoval.
3. Hub generuje resetovací signál trvající 10 ms a propouští napájecí proud 100 mA pro zařízení. Nyní je zařízení připravené a reaguje na výchozí adresu.
4. Předtím než zařízení získá svou vlastní adresu ve sběrnici, je možné s ním komunikovat přes výchozí adresu 0. Hostitel čte první bajty zařízení, aby určil délku datových paketů.
5. Hostitel přiřazuje zařízení adresu ve sběrnici. Poté načte všechny konfigurační informace z zařízení s novou sběrniceovou adresou.
6. Hostitel nastavuje zařízení do jedné z možných konfigurací. Nyní může zařízení odebírat proud podle informací uvedených v jeho popisovači. Je připravené k použití pro přenos dat [1].

1.1.4 Konektory USB

USB jakožto standard pro kabely a konektory od svého prvního prototypu změnil spoustu podob. Změny podob konektorů byly ovlivněny vylepšováním technologií v oblasti rychlosti a výkonu. Typy konektorů jsou popsány níže:

- **USB-A** je nejběžnějším konektorem USB, často nalezeným na počítačích, adaptérech a různých přístrojích. Jeho charakteristickým rysem je asymetrický tvar, který umožňuje jednoduché a spolehlivé připojení k zařízením. Jednou

z hlavních vlastností USB-A je také odlišnost konců kabelů, což zajišťuje správné párování s porty na zařízeních. Původně měl USB-A konektor čtyři vodiče, což bylo dostatečné pro základní přenos dat a napájení. Nicméně s rozvojem technologie a stoupajícími nároky na rychlost přenosu dat a funkce jako je rychlonabíjení, novější verze USB-A konektoru obsahují až devět vodičů. Tato aktualizace umožňuje vyšší propustnost pásma a podporu dalších funkcí, což přispívá ke zlepšení výkonu a univerzality tohoto rozhraní.



Obr. 1.1: USB-A 2.0 [5].

- **USB mini-A** jedná se pouze o zmenšenou verzi USB-A.
- **USB-B** konektor představuje nástupce USB-A a je často využíván u zařízení jako jsou tiskárny, skenery a další periférie. Podobně jako u USB-A, i USB-B má dvě nesymetrické konce kabelu, což umožňuje snadné a spolehlivé připojení k zařízením. Datový tok přes USB-B je obousměrný, což znamená, že data mohou proudit tam i zpět. Nicméně, co se týče přenosu energie, USB-B umožňuje proud pouze z zařízení master, což může být například počítač, k němuž je tiskárna nebo skener připojen.



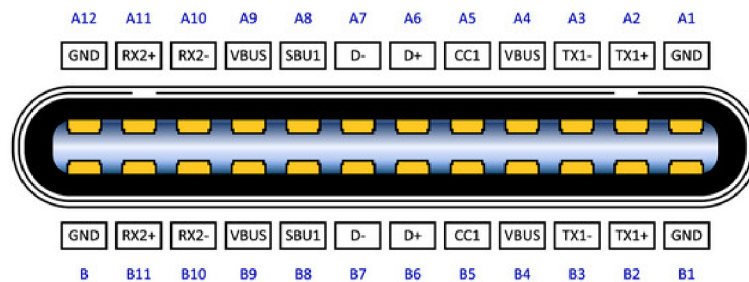
Obr. 1.2: USB-B [5].

- **USB mini-B** jedná se pouze o zmenšenou verzi USB-B.
- **USB micro-B** konektor je charakterizován kompaktními rozměry, asymetrickým designem, a pěti piny, zahrnujícími napájecí vodiče a datové vodiče. Je běžně používán v různých přenosných zařízeních, jako jsou chytré telefony a digitální fotoaparáty.

- **USB-C** představuje moderní standard, který postupně nahrazuje všechny předchozí zmíněné konektory, a to díky své všestrannosti a širokému spektru využití. Jeho přínosy jsou zřejmě zejména v oblastech videa, zvuku a ovládní více displejů, kde umožňuje efektivnější propojení a vyšší kvalitu přenosu. USB-C v sobě násobně zvětšuje možnosti přenosu energie, což umožňuje rychlejší nabíjení zařízení, a dokonce i napájení náročnějších periferií.

Tento univerzální konektor podporuje mnohem více protokolů než jen USB, což zahrnuje standardy jako HDMI, DisplayPort a Thunderbolt, což dává uživatelům širší možnosti připojení a využití.

S 24 piny poskytuje USB-C dostatečnou flexibilitu pro komunikaci a přenos dat, ačkoli jeho cílem je hlavně reverzibilita a jednoduchost. Díky rotačně symetrickému designu se konektor snadno zapojuje bez ohledu na orientaci, což výrazně zjednodušuje používání, zejména ve srovnání s předchozími verzemi. Fyzicky je konektor C sice větší než micro-B, ale jeho velikost je stále poměrně kompaktní, s rozměry 8,4 x 2,6 x 6,65 mm. Tento standard také podporuje technologii Power Delivery, která umožňuje velmi rychlé a efektivní nabíjení. Dále je tato technologie popsána v kapitole: 1.2.1 [4].



Obr. 1.3: USB-C [5].

1.2 Napájení

Zařízení slave připojená k USB sběrnici mohou být napájena ze svého vlastního zdroje energie, nebo využívají napájení poskytované přes USB sběrnici. Nicméně, je třeba si uvědomit, že odběr energie ze sběrnice je omezen proudově a v případě překročení limitu může dojít k odpojení zařízení. Standardní napájecí napětí poskytované sběrnici je 5 V s tolerancí 4,4–5,25 V a odběr je obvykle 100 mA, ačkoli pro USB 2.0 lze tento odběr zvýšit až na 500 mA. Pro většinu datových komunikací je tento výkon dostatečný, avšak při komunikaci s náročnějšími zařízeními, jako jsou např. disky SATA, vyžadující vyšší napájecí nároky, může být nutné využít externího napájení. Tento omezený proud může být překážkou pro některá zařízení.

1.2.1 Power Delivery

USB-PD (Power Delivery) je standard pro dodávání elektrické energie přes USB rozhraní. Jedná se o specifikaci, která umožňuje rychlejší a efektivnější nabíjení zařízení pomocí USB kabelu. Technologie byla vyvinuta s cílem umožnit přenášení vyššího výkonu a zvyšovat flexibilitu v používání rozhraní USB. Technologie byla poprvé představena v roce 2012 a její vývoj stále probíhá. Výkon může dosahovat až 240 W při 48 V a 5 A, podrobnosti viz tabulka 1.1. Protokol, který podporuje tuto technologii využívá kódování BMC (Biphase Mark Code) a pomocí této modulace přenáší informace o podporovaných parametrech, dále protokol využívá nabíjecí profily, které definují maximální podporovatelný výkon, tyto profily jsou nastavovány během handshake procesu viz 1.1.1. Výhodou USB-PD je, že umožňuje i během rychlého napájení vysokorychlostní datový přenos [6].

Hlavní vlastnosti USB-PD zahrnují:

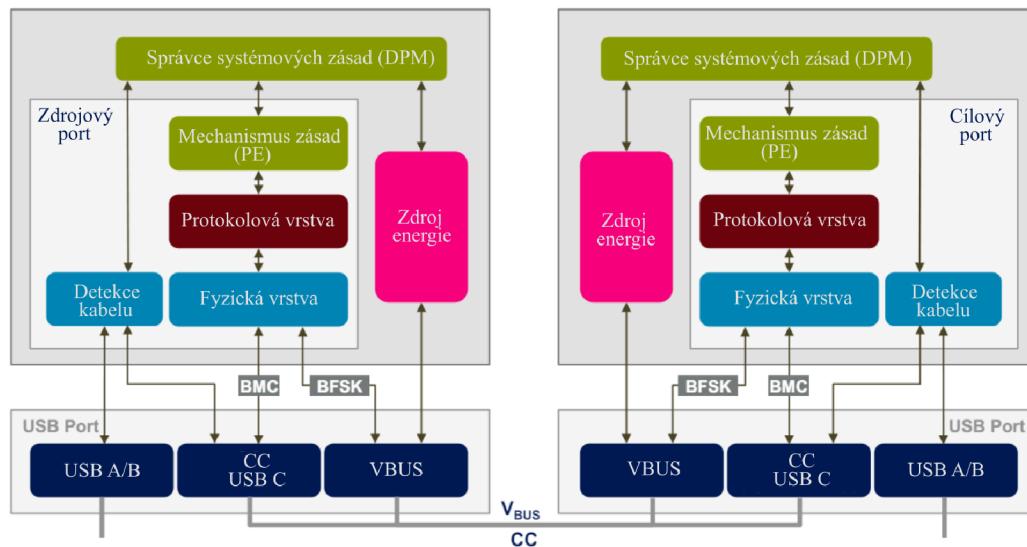
- **Vysoký výkon:** umožňuje přenášení vyššího výkonu než běžné USB specifikace. To je výhodné pro rychlejší nabíjení výkonnějších zařízení, jako jsou notebooky, tablety, chytré telefony a powerbanky.
- **Oboustranný přenos energie:** umožňuje dodávat energii do zařízení, ale také odebírat energii ze zařízení. To může být výhodné například pro napájení externích zařízení nebo pro vzájemné nabíjení mezi dvěma zařízeními.
- **Dynamické nastavení napětí a proudu:** umožňuje dynamicky měnit napětí a proud dodávané energie podle potřeb připojených zařízení. To zajišťuje optimální nabíjení a minimalizuje ztráty energie.
- **Podpora různých typů zařízení:** je navrženo tak, aby bylo schopno nabízet a přijímat energii různým typům zařízení, včetně mobilních telefonů, notebooků, monitorů a dalších elektronických zařízení.

Tab. 1.1: USB-PD profily [7].

USB-PD profil	Napětí	Proud	Max. výkon
1	5 V	0,1–3 A	15 W
2	9 V	1,67–3 A	27 W
3	15 V	1,8–3 A	45 W
4	20 V	2,25–3 A	60 W
5	28 V	3,57–5 A	140 W
6	36 V	3,89–5 A	180 W
7	48 V	3,75–5 A	240 W

1.2.2 Protokol USB-PD

Na obrázku níže je zobrazena architektura protokolu USB-PD. Komunikace mezi zdrojem a příjemcem je zajištěna konfiguračním kanálem (CC), zatímco napájení je přenášeno ze zdroje do zařízení prostřednictvím VBUS.



Obr. 1.4: Architektura protokolu USB-PD [8].

- **Device Policy Manager (DPM):**
Dohled na dodržování zásad mezi různými poskytovateli a spotřebiteli propojenými přes USB je zajišťován správcem systémových zásad. Monitorování a řízení politiky napříč celým systémem, včetně různých portů USB, nabíječek, dokovacích stanic a dalších zařízení, je prováděno tímto prvkem.
- **Policy Engine (PE):**
Policy Engine, neboli mechanismus zásad je zodpovědný za rozhodování o napájecích profilech, včetně určení optimálních hodnot napětí a proudu, a zajišťuje současně bezpečnostní opatření k ochraně před přepětím a přehřátím.
- **Protocol Layer:**
Protokolová vrstva vytváří zprávy pro komunikaci mezi dvojicí portů v systému USB-PD. Je zodpovědná za přijímání vstupů od PE, které určují, jaké zprávy odeslat, a zpětně informuje PE o reakcích. Tímto způsobem umožňuje protokolová vrstva plynulou výměnu informací mezi zařízeními. Jejím hlavním úkolem je zajistit, aby komunikace mezi porty probíhala správně podle specifikací protokolu USB-PD.
- **Physical Layer:**
Tento prvek je zodpovědný za odesílání a přijímání zpráv přes vodiče VBUS

nebo CC. Obsahuje transceiver, který přenáší signál s kódováním BFSK (Binary Frequency Shift Keying) na VBUS, nebo BMC (Biphase Mark Coding) na CC. Zajišťuje správu dat na vodičích, zabraňuje kolizím, a detekuje chyby ve zprávách pomocí kontroly CRC (Cyclic Redundancy Check). Jeho hlavní funkcí je udržovat spolehlivou komunikaci mezi zařízeními, včetně bezpečného přenosu informací bez kolizí nebo chyb.

- **Cable Detection:**

Detekce kabelu umožňuje systému identifikovat typ a schopnosti připojeného kabelu. Tato funkce zjišťuje, zda je kabel správně připojen, ověřuje jeho kvalitu, a zjistí, zda podporuje požadované úrovně napětí, proudu a datových rychlostí. Tím také pomáhá předejít přetížení a zajišťuje bezpečnost. Detekce kabelu zároveň umožňuje systému optimalizovat konfiguraci a nastavit správný režim pro přenos energie a dat.

- **Power Source:**

Zdroj energie slouží k dodávání elektrického napájení jiným zařízením připojeným přes USB-C. Jeho úlohou je poskytnout různé úrovně napětí a proudu podle potřeb připojených zařízení, což umožňuje adaptivní a flexibilní přenos energie. Zdroj energie komunikuje s připojenými zařízeními, aby určil jejich požadavky, a může se přizpůsobit tak, aby poskytoval optimální výkon. Další důležitou funkcí je obousměrný přenos energie, což znamená, že zdroj energie může nejen dodávat energii, ale také ji přijímat, čímž se zvyšuje flexibilita celého systému [8].

1.2.3 Quick Charge

Technologii Quick Charge (QC) vyvinula společnost Qualcomm a jedná se o prokol k nabíjení a správě napájení USB zařízení. Pro dosažení QC nabíjení musí být jak zařízení, tak nabíječka kompatibilní s tímto standardem. Quick Charge umožňuje rychlejší nabíjení baterií v zařízeních ve srovnání se standardním USB nabíjením.

Rychlé nabíjení Qualcomm je široce využíváno z několika důvodů. Technologie Quick Charge je navržena tak, aby byla nezávislá na typu konektoru, což umožňuje její použití s různými typy portů, jako jsou USB-A, USB-C nebo micro-USB. Tím je zajištěna kompatibilita s většinou smartphonů s operačním systémem Android.

Quick Charge také pracuje s vyšším napětím, což minimalizuje problémy spojené s délkou nebo tloušťkou kabelu. Díky tomu poskytuje optimální nabíjení bez ohledu na parametry kabelu. Kromě chytrých telefonů se Qualcomm Quick Charge nachází i v nástěnných nabíječkách, automobilových zásuvkách a powerbankách, které často podporují jak vstupní, tak výstupní rychlé nabíjení. Je klíčové, aby nabíjecí zařízení a smartphone byli kompatibilní, jinak může dojít ke snížení výkonu nabíjení.

Quick Charge je k dispozici v pěti verzích (1.0, 2.0, 3.0, 4.0, 4+), přičemž každá novější verze vede ke snížení používání té předchozí. Výhodou je také, že každá verze je zpětně kompatibilní [9].

Tab. 1.2: Verze Quick Charge [10].

Verze	Rok vydání	Max. výkon	Specifikace
QC 1.0	2013	10 W	AICL (Automatický limit vstupního proudu) APSD (Automatická detekce zdroje napájení)
QC 2.0	2014	18 W (9 V x 2 A)	HVDCP (Vysokonapěťový vyhrazený nabíjecí port) Duální napájení
QC 3.0	2016	36 W (12 V x 3 A)	HVDCP+ Duální napájení+ INOV 2.0 (Technologie spořiče baterie)
QC 4	2017	100 W (20 V x 5 A)	HVDCP++ Duální napájení++ INOV 3.0 Inteligentní tepelné vyvažování
QC 5	2020	>100 W	Duální napájení Inteligentní tepelné vyvažování

1.2.4 Kabely pro vyšší proudy

Kabely pro vyšší proudy se obvykle používají zejména v rámci standardu USB-PD. To umožňuje přenos vyšších výkonů až do několika stovek wattů. Takové kabely jsou využívány pro rychlé nabíjení velkých zařízení, jako jsou například výkonné notebooky. Základní parametry pro vysokonapěťové kabely jsou následující:

- Vodič: kabel by měl být vyroben z materiálu s vysokou vodivostí, obvykle z mědi. Větší průměr vodiče může podporovat vyšší proudy, což je důležité pro rychlé nabíjení. Parametry mědi jsou následující:
 - Měrný odpor: $0,0178 \Omega \cdot mm^2 m^{-1}$
 - Měrná vodivost: $56 S \cdot m \cdot mm^{-2}$
 - Teplotní součinnost odporu: $0,0042 K^{-1}$ [11].
- Izolace: pro izolaci vodiče se často používají moderní materiály s nízkou dielektrickou ztrátou a vysokou odolností vůči teplotě. To může zahrnovat materiály jako PTFE (polytetrafluorethylen) nebo PE (polyethylen).

1.3 Generace USB

Vývoj technologie USB byl zahájen v roce 1995 a cílem tohoto vývoje bylo usnadnit připojení externích zařízení. Vývoj tehdy podpořilo 7 společností: Intel, Microsoft, IBM, NEC, Nortel Compaq a DEC. Standard USB měl postupně nahradit zastaralý sériový port RS-232.

- **USB 1.x**

V roce 1996 byl vydán standard 1.0, který dosahoval přenosových rychlostí 1,5 Mbit/s a 12 Mbit/s. U této verze nebyla vyžadována podpora prodlužovacích kabelů. Verze USB 1.1 začala být aktivně využívána až v roce 1998, kdy byl uveden na trh osobní počítač iMac a Windows 98, oba plně podporovaly tento standard. Nekonkurenceschopnost s technologií FireWire, která dosahovala rychlosti až 400 Mbit/s, představovala komplikaci pro verzi USB 1.0. Verze USB 1.1 byla konfigurována pouze pro konektory typu A a B, bez podpory verzí micro nebo mini. Tato verze byla kódována jednoduchým kódováním NRZ (bez návratu k nule).

- **USB 2.0**

V roce 2000 byl vydán standard 2.0 s rychlostí dosahující 480 Mbit/s. K základním konektorům typu A a B byly již přidány konektory mini. Byla také přidána vlastnost OTG (On-The-Go), která umožňuje tabletům a mobilním telefonům komunikovat s flash diskem, digitálním fotoaparátem, myší nebo klávesnicí. Verze 2.0 byla rovněž kódována jednoduchým kódováním NRZ (bez návratu k nule).

- **USB 3.x**

Standard 3.0 byl vydán v roce 2008. Tato verze přinesla provozní režim *SuperSpeed*, který garantuje rychlost 5 Gbit/s, je však závislá na kódování symbolů a na úrovni spojení. Komunikace probíhá v režimu full-duplex. Tento standard také nabízí zvýšení dostupného proudu při napájení, a to v rozmezí 150 mA a 900 mA. Kódování zde probíhá v režimu 8b/10b (8bitová slova jsou mapovány na 10bitové symboly). V roce 2013 byl vydán standard USB 3.1 a přinesl zdvojnásobení rychlosti na 10 Gbit/s s názvem *SuperSpeedPlus*. Tato verze je kódována v režimu 128b/132b. V roce 2017 byl vydán standard 3.2, který pracuje na základech technologie USB 3.1, ale byly zavedeny 2 nové provozní režimy *SuperSpeedPlus* s novým konektorem USB-C a rychlostmi 10 Gbit/s (s kódováním 8b/10b) a 20 Gbit/s (s kódováním 128b/132b). Zásadní změnou oproti USB 2.0 bylo navýšení počtu vodičů na 9 z původních 4 [12].

- **USB4**

Standard 4.0 byl poprvé uveden na trh v roce 2019. Tato verze vychází z verze 3.2 a využívá i prvky protokolu Thunderbolt 3. Standard USB4 je používán

Tab. 1.3: Konektory USB 3.1 [13].

Pin	Barva	Popis
1	červená	Vcc
2	bílá	D-
3	zelená	D+
4	černá	GND
5	modrá	StdA_SSRX-
6	žlutá	StdA_SSRX+
7	kryt	GND_DRAIN
8	fialová	StdA_SSTX-
9	oranžová	StdA_SSTX+
kryt	-	stínění

pouze pro konektory USB-C. Výhodami USB4 je používání protokolu DisplayPort pro přenos audio a video signálu. DisplayPort verze 2.1 umožňuje přenos videa s rozlišením 8K s frekvencí 60 Hz a HDR10.

- **USB4 Gen 2.1** dosahuje rychlosti 10 Gbit/s. Tato verze je kódována pomocí NRZ s poměrem 64b/66b. Využívá 2 páry spojení full-duplex a 1 pár spojení half-duplex.
- **USB4 Gen 2.2** dosahuje rychlosti 20 Gbit/s. Tato verze je kódována pomocí NRZ s poměrem 64b/66b. Využívá 4 páry spojení full-duplex a 1 pár spojení half-duplex. Bývá označována jako *USB4 20 Gbps*.
- **USB4 Gen 3.1** dosahuje rychlosti 20 Gbit/s. Tato verze je kódována pomocí NRZ s poměrem 128b/132b. Využívá 2 páry spojení full-duplex a 1 pár spojení half-duplex.
- **USB4 Gen 3.2** dosahuje rychlosti 40 Gbit/s. Tato verze je kódována pomocí NRZ s poměrem 128b/132b. Využívá 4 páry spojení full-duplex a 1 pár spojení half-duplex.
- **USB4 Gen 4** Tato verze je kódována pomocí PAM-3 s poměrem 11b/7t (7 3-bitových skupin). Využívá 4 páry spojení full-duplex a 1 pár spojení half-duplex. Rychlosti pro verzi USB4 jsou definovány následovně:
 - * 80 Gbit/s symetricky, definováno jako *USB4 80 Gbps*
 - * 40 Gbit/s upload; 120 Gbit/s download
 - * 120 Gbit/s upload; 40 Gbit/s download

Tab. 1.4: Konektory USB4 [14].

Pin	Signál A	Popis
A1	GND	Uzemnění
A2	TX1+	SuperSpeed diferenciální pár 1 TX, kladný
A3	TX1-	SuperSpeed diferenciální pár 1 TX, záporný
A4	VBUS	Napájení
A5	CC1	Konfigurační kanál
A6	D1+	USB 2.0 diferenciální pár, pozice 1, kladný
A7	D1-	USB 2.0 diferenciální pár, pozice 1, záporný
A8	SBU1	Postranní pásmo
A9	VBUS	Napájení
A10	RX2-	SuperSpeed diferenciální pár 2 RX, záporný
A11	RX2+	SuperSpeed diferenciální pár 2 RX, kladný
A12	GND	Uzemnění
B12	GND	Uzemnění
B11	RX1+	SuperSpeed diferenciální pár 1 RX, kladný
B10	RX1-	SuperSpeed diferenciální pár 1 RX, záporný
B9	VBUS	Napájení
B8	SBU2	Postranní pásmo
B7	D2-	USB 2.0 diferenciální pár, pozice 2, záporný
B6	D2+	USB 2.0 diferenciální pár, pozice 2, kladný
B5	CC2	Konfigurační kanál
B4	VBUS	Napájení
B3	TX2-	SuperSpeed diferenciální pár 2 TX, kladný
B2	TX2+	SuperSpeed diferenciální pár 2 TX, záporný
B1	GND	Uzemnění

1.4 Wireless USB

Wireless USB, neboli WUSB, byla technologie uvedená na trh v roce 2007 s cílem nahradit kabelová spojení zařízení podporujících USB za bezdrátová spojení. Mezi tato zařízení patřily například tiskárny, myši, fotoaparáty a další. Vývoj technologie byl ukončen v roce 2009. Rychlost bezdrátového přenosu dosahovala 480 Mbit/s při vzdálenosti 3 metrů, zatímco při vzdálenosti 10 metrů byla schopnost zařízení posílat data s rychlostí 110 Mbit/s. Pro tuto technologii byly využívány frekvence v rozsahu 3,1 až 10,6 GHz. Dnes není WUSB běžně využíván a jeho standard je považován za zastaralý [15].

1.5 FireWire

Standard FireWire, známý také jako IEEE 1394, byl vyvíjen od 90. let společností Apple ve spolupráci s Panasonic a Sony. Jedná se o rozhraní pro sériovou sběrnici, umožňující vysokorychlostní přenos dat v reálném čase. Maximální délka měděného kabelu je 4,5 metrů, avšak kromě standardních spojovacích kabelů lze využít také kabely typu Cat5 nebo optická vlákna. Standard FireWire podporuje, podobně jako USB, napájení koncových zařízení a umožňuje připojení až 63 zařízení v různých topologiích. K dispozici jsou 6 pinové nebo 9 pinové varianty konektorů s podporou až 45 W. Tento standard umožňuje komunikaci typu peer-to-peer a pro identifikaci zařízení na sběrnici jsou využívány jedinečné ID. FireWire je schopen provádět asynchronní i izochronní přenosy současně.

Základním rozdílem mezi USB a FireWire je, že zatímco USB vyžaduje hostitelský řadič, FireWire je řízeno kooperativně mezi připojenými zařízeními, což umožňuje ovládat libovolný uzel. FireWire může využívat i stromovou topologii. Základní standardy USB (s výjimkou Power Delivery) pracují pouze s napětím 5 V, zatímco FireWire může poskytovat až 30 V. USB bylo původně navrženo s ohledem na nízký výkon a nízké náklady, na rozdíl od FireWire, které bylo od počátku zaměřeno na vysoký výkon. Dnes již tato technologie nemůže konkurovat USB v rychlosti přenosu, ceně, rozšíření ani rychlosti vývoje [16].

2 Hardware

2.1 Mikrokontrolér

Mikrokontrolér je malý integrovaný obvod obsahující procesor, paměť a periferní zařízení, které jsou navrženy tak, aby mohly řídit specifické úkoly nebo funkce v elektronických zařízeních. Tato zařízení mají omezené výpočetní schopnosti ve srovnání s obecnými počítači, ale jsou optimalizovány pro konkrétní aplikace. Mikrokontroléry mají vestavěný procesor, což je jádro, které provádí instrukce uložené v paměti. Procesor může být jednojádrový nebo vícejádrový. Mikrokontroléry mají dvě hlavní typy paměti: programovatelnou paměť (ROM), kde je uložen program, který mikrokontrolér vykonává, a datovou paměť (RAM), která slouží k dočasnému ukládání proměnných a dat během provádění programu. Periferní zařízení jsou další funkce mimo procesor, které umožňují mikrokontroléru komunikovat s vnějším hardwarem. Patří sem například ADC pro převod analogových signálů na digitální, UART pro sériovou komunikaci, SPI a I2C pro komunikaci s dalšími zařízeními, nebo časovače pro generování časových intervalů. Jedním z klíčových rysů mikrokontrolérů je nízký odběr energie. To je důležité zejména v případech, kdy jsou zařízení napájena bateriemi nebo v aplikacích, kde je důležité snížit energetickou spotřebu. Mezi základní výrobce mikrokontrolérů patří:

- **Microchip** je známý svými AVR mikrokontroléry, které jsou používány v Arduino platformě.
- **STMicroelectronics** nabízí širokou škálu mikrokontrolérů, včetně těch s jádrem ARM Cortex-M.
- **Texas Instruments** produkuje různé typy mikrokontrolérů pro průmyslové, spotřební a vědecké aplikace.
- **NXP Semiconductors** specializuje se na vývoj a výrobu NFC a RFID čipů.
- **Renesas Electronics** je známý svými mikrokontroléry pro průmyslové aplikace a má širokou škálu produktů.
- **Infineon Technologies** vyrábí mikrokontroléry pro automobilový průmysl a průmyslovou automatizaci.

Výběr mikrokontroléru pro měření napětí a proudu závisí na spoustě požadavků, které mají vliv na fungování celého zařízení. Při výběru mikrokontroléru musí být zohledněno:

- **Výkon a rychlost**

Procesor musí mít dostatečný výkon a rychlost, aby bylo možné bezchybně provádět měření napětí a proudu a to v reálném čase s rychle měnícími signály a vysokou frekvencí.

- **Přesnost měření**

Přesnost měření napětí a proudu je důležitým parametrem v oblasti V/A měření. Závisí na schopnosti procesoru zpracovávat analogové signály s velkou přesností. Hlavním aspektem při měření je rozlišení analogového konvertoru (ADC), ten je součástí procesoru. ADC převádí hodnoty analogového signálu na digitální hodnoty. Vyšší rozlišení ADC umožňuje přesné měření. Pro přesné měření jsou využívány 16bitové nebo 24bitové ADC. Při měření se dále zohledňuje lineární rozsah (oblast, ve které ADC produkuje výstupní hodnoty ke vstupním).

- **Analogové a digitální vstupy**

Analogové vstupy slouží k měření signálů. Digitální vstupy vyhodnocují stavy, nebo jsou využity k řízení externích zařízení např. detekce tlačítek, spínačů, komunikace dalších digitálních zařízení. U vstupů je třeba dbát na správnou vstupní impedanci, která může negativně ovlivnit měřený signál. Nízká impedance může způsobit ztrátu signálu.

- **Komunikace**

Komunikace v procesoru přenáší naměřená data, konfiguraci a řídicí informace v samotném zařízení a mimo něj. Mezi nejznámější komunikační rozhraní patří: UART, SPI a I2C.

- **Paměť**

Dostatečná velikost paměti procesoru zajišťuje spolehlivé ukládání naměřených dat a následné provádění výpočtů.

- **Spotřební energie**
- **Podpora matematické operace**
- **Rozvojové nástroje**
- **Cena**

Přehled často využívaných mikrokontrolérů od společnosti Atmel lze najít v tabulce 2.1.

Tab. 2.1: Přehled mikrokontrolérů Atmel [17].

Mikrokontrolér	ATtiny13A	ATtiny85	ATmega328P
Architektura	AVR	AVR	AVR
Velikost paměti flash	1 kB	8 kB	32 kB
Velikost paměti RAM	64 B	512 B	2 kB
Počet I/O pinů	6	6	23

Mikrokontroléry ATtiny85, ATtiny13A a ATmega328P představují rozsáhlou škálu výkonu a funkcionalit, kterou lze využít v závislosti na specifických požadavcích konkrétních projektů.

ATtiny13A nabízí extrémně nízkou spotřebu energie a cenovou dostupnost, to je ideální pro bateriové aplikace nebo projekty s omezeným rozpočtem. Jeho omezená paměť a výkon však mohou být limitující pro komplexnější úlohy. Jedná se o vhodný výběr pro jednodušší projekty, jako jsou jednoduché automatizované úlohy nebo hobby aplikace, kde je klíčová ekonomická stránka projektu.

ATtiny85 se vyznačuje malými rozměry a nízkou spotřebou energie, což je ideální pro aplikace, kde je klíčovým faktorem omezený prostor a energetická efektivnost. Jeho malý počet I/O pinů však může být omezující pro složitější projekty, což je důležité vzít v úvahu při návrhu.

ATmega328P poskytuje větší paměť Flash a RAM, které jsou ideální pro náročnější projekty a vývoj v Arduino prostředí. S širokým spektrem periférií, včetně komunikačních rozhraní jako USART, SPI a I2C, se hodí pro robotiku, automatizaci a sensoricky náročné aplikace. Jeho větší fyzická velikost a vyšší spotřeba energie jsou však důležitými faktory, které je třeba vzít v úvahu.

2.2 Senzor napětí a proudu

Senzory napětí a proudu jsou klíčovými prvky v oblasti mikroelektroniky, sloužící k měření a monitorování elektrických parametrů v elektrických obvodech.

Senzor napětí detekuje elektrický potenciál mezi dvěma body v obvodu a může být implementován různými technologiemi, jako jsou odporové děliče napětí nebo polovodičové senzory. Jeho využití zahrnuje měření napětí napájecích zdrojů, regulaci napětí v elektronických zařízeních a kontrolu napěťových úrovní pro bezpečné fungování obvodů.

Senzor proudu měří aktuální proud, který prochází určitým místem v obvodu. Jeho princip fungování může spočívat v technologiích využívajících Hallův jev nebo odporové senzory. Senzory proudu jsou klíčové pro měření spotřeby energie, ochranu před přetížením a zkratem, a také pro monitorování nabíjecích a vybíjecích obvodů baterií.

Existuje i kombinace těchto senzorů, které měří jak napětí, tak proud, a poskytují digitální výstup pro snadné čtení a interpretaci hodnot mikrokontrolérem. Tyto senzory jsou klíčové pro monitorování spotřeby energie a výkonu v reálném čase, regulaci elektrických obvodů a diagnostiku elektronických systémů.

Mezi nejpoužívanější senzory proudu a napětí patří:

Tab. 2.2: Přehled senzorů proudu a napětí.

Stabilizátor	Výrobce	Max. U_{in}	Rozměry
LM1117	Texas Instruments	15 V	SOT-223
LD1117	STMicroelectronics	15 V	SOT-223
AMS1117	Advanced Monolithic Systems	18 V	SOT-223
LP2950	Texas Instruments	30 V	SOT-89
HT7333-A	Holtek Semicon	12 V	SOT-89-3
MIC5205	Microchip Technology	20 V	SOT-23-5

2.3 Stabilizátor napětí

Stabilizátor napětí neboli lineární regulátor napětí je zařízení, které slouží k udržování stabilního výstupního napětí i přes náhlé výkyvy vstupního napětí a změny zátěže. Stabilizace napětí regulátor dosahuje pomocí ztrátového prvku: tranzistoru, nebo zpětnovazební smyčky. Stabilizátor dále zajišťuje: filtraci šumu, ochranu proti přetížení a přehřátí, snížení rizika přepětí [19].

Některé klíčové vlastnosti stabilizátorů napětí zahrnují:

- Stabilita výstupního napětí: stabilizátor napětí se snaží minimalizovat změny výstupního napětí v reakci na změny vstupního napětí, teploty a zatížení.
- Zatížitelnost: schopnost udržet stabilní výstupní napětí při změnách zatížení, tedy při připojení nebo odpojení zátěže.
- Teplotní stabilita: schopnost udržet stabilní výstupní napětí při změnách teploty.
- Rozsah vstupního napětí: maximální a minimální hodnoty vstupního napětí, při kterých stabilizátor může správně fungovat.

Tab. 2.3: Přehled stabilizátorů

Stabilizátor	Výrobce	Výst. napětí	Vstup. napětí	Max. proud
LM1117	Texas Instruments	5 V	15 V	800 mA
XC6206	Torex Semiconductor	3 V	6 V	200 mA
HT7333-A	Holtek	5 V	12 V	250 mA
LT1763	Analog Devices	5 V	20 V	500 mA
MAX603	Maxim Integrated	5 V	12 V	50 mA

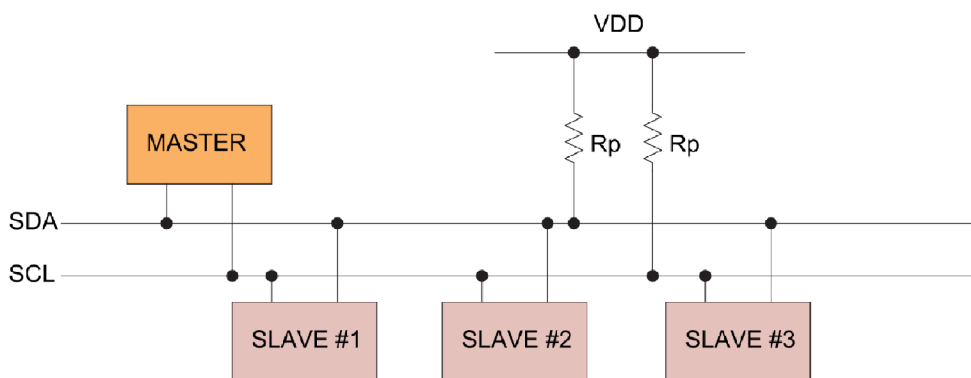
Stabilizátory napětí jsou důležité v mnoha elektronických zařízeních, kde je nezbytné udržet stabilní napětí pro správný provoz citlivých elektronických komponent. Používají se například v napájecích zdrojích pro mikrokontroléry, integrovaných obvodech a dalších elektronických zařízeních.

2.4 Komunikace I2C

I2C (Inter-Integrated Circuit) je sériové komunikační rozhraní, které bylo vyvinuto společností Philips (dnes NXP Semiconductors), která vyvinula tento sériový synchronní protokol s cílem usnadnit efektivní komunikaci mezi integrovanými obvody (IC) na jednom zařízení. Název I2C značí Inter-IC a definuje původní účel navržený pro přenos dat mezi integrovanými obvody. Klíčovými prvky I2C jsou dvě linky – datová (SDA) a hodinová (SCL). Philips zveřejnil první specifikace v roce 1985 a představil ji veřejnosti v roce 1992. Standardizace u IEEE proběhla v roce 1995. Od té doby se I2C stal široce využívaným protokolem v průmyslu i spotřební elektronice, poskytujícím jednoduchý a efektivní způsob komunikace mezi různými zařízeními.

I2C rozhraní je dvoudrátové, SDA slouží k přenosu dat a SCL řídí hodinový signál mezi zařízeními. Komunikace probíhá obousměrně a po 2 vodičích. Je využíváno jako architektura master-slave, kde master řídí komunikaci s jedním nebo více slave zařízeními. Adresace I2C je 7-bitová a může tedy podporovat až 128 zařízení. Komunikace je zahájena signálem START, v té chvíli se změnil SDA stav z logické 1 do logické 0, SCL je v logické 0. Dále je zde využíván signál STOP, kdy SDA se změnil z log 0 do log. 1. Mimo tyto případy se SDA stav může změnit pouze pokud je stav SCL v 0. Při odeslání signálu START je odesláno několik bajtů, jehož prvním bajtem je MSB, každý bajt potvrdí bit ACK, kterým slave zařízení může potvrdit doručení. Zda se jedná o zápis nebo o čtení, specifikuje první bajt v 7-bitové adrese.

Výhodami komunikace I2C je jednoduchost, podpora více zařízení na jedné sběrnici, široká podpora. Nevýhodami jsou omezený dosah a nižší rychlost [26].



Obr. 2.1: Diagram komunikace I2C [27].

2.5 OLED displej

Displeje jsou klíčovými komponenty v mikroelektronice, poskytujícími vizuální rozhraní mezi uživatelem a elektronickým zařízením. Jejich multifunkční povaha umožňuje široké spektrum aplikací, a jejich vývoj přinesl do mikroelektroniky nové možnosti. Displeje jsou primárním prostředkem prezentace informací. Osvětlují texty, čísla, grafiku a další vizuální prvky, což umožňuje uživatelům rychle a intuitivně rozumět obsahu. V mikroelektronice slouží displeje také k navigaci a ovládání zařízení. Menu, volby a tlačítka na obrazovce umožňují uživatelům snadný přístup a ovládání funkcí. Displeje jsou klíčové pro prezentaci dat v různých formách. Od grafů a diagramů v profesionálních aplikacích po zobrazení obsahu webových stránek na mobilních zařízeních. Typy displejů a jejich využitelnost v mikroelektronice:

- **LCD** neboli Liquid Crystal Display využívá kapalných krystalů, které se mění pod vlivem elektrického pole. Když je krystal nabit, umožňuje světlu procházet nebo ho blokuje v závislosti na typu LCD. Barevné LCD obvykle kombinují filtry a podsvícení pro zobrazení barev. Vyznačuje se dobrou barevnou reprodukcí, nízkou spotřebou energie, širokým využitím od mobilních telefonů po monitory.
- **LED** neboli Light Emitting Diode využívá světelných diod k zobrazování informací. Každá dioda generuje světlo, což umožňuje vytvářet jasné a kontrastní obrazy. Vyznačuje se vysokým kontrastem, živými barvami, nízkou spotřebou energie, rychlou odezvou. LED displeje jsou běžné v mikroelektronice pro zobrazení informací na přístrojích, LED indikátory, hodinové displeje, a také jako podsvícení pro televize a monitory.
Mezi LED displeje se řadí také segmentové displeje, které jsou specifickým typem displeje. Ty se skládají z jednotlivých segmentů nebo číselných segmentů, které mohou být rozsvíceny nebo ztmaveny nezávisle. Tyto segmenty jsou uspořádány tak, aby vytvářely čísla, písmena nebo jiné symboly. Segmentové displeje jsou běžné v různých elektronických zařízeních. Nejčastěji se využívají 7, 9, 14, nebo 15-segmentové displeje.
- **OLED** neboli Organic Light Emitting Diode využívá organické sloučeniny, které emitují světlo při průchodu elektrického proudu. Každý pixel svítí nezávisle. Vyznačuje se vynikajícím kontrastem, širokými pozorovacími úhly, rychlou odezvou. OLED displeje jsou často využívány v chytrých telefonech, televizích, hodinkách a dalších zařízeních, kde je vyžadována vysoká kvalita obrazu a flexibilita..
- **E-ink** neboli Electronic Ink využívá mikroskopické černé a bílé částice, které reagují na elektrický náboj. Zobrazení je statické a spotřebovává energii pouze při změně obrazu. Vyznačuje se velmi nízkou spotřebou energie, vysokým kon-

trastem, čitelností na přímém slunci. Často se používá v čtečkách elektronických knih, nebo v informačních tabulích.

- **Plazmové displeje** neboli Plasma Display Panel (PDP) využívá ionizovaných plynů k vytvoření světelných pixelů. Každý pixel je tvořen třemi buňkami pro červenou, zelenou a modrou barvu. Vyznačují se vysokým kontrastem a dobrou barevnou reprodukcí. Přestože byly plazmové displeje populární, jejich výroba byla postupně zastavena ve prospěch LCD a OLED technologií [28].

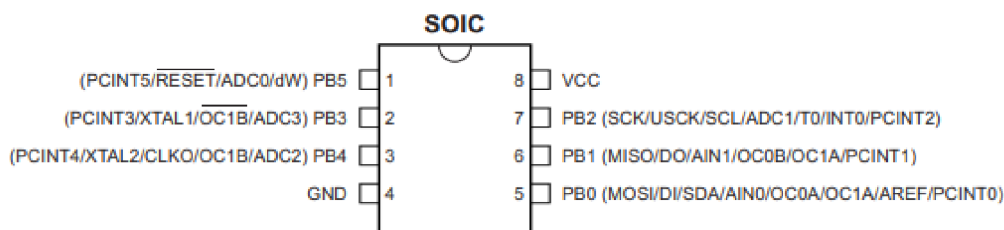
3 Praktická část

3.1 Použité součástky

3.1.1 ATtiny85

S ohledem na požadavky mikrokontroléru zmíněné výše, byl vybrán pro tento projekt mikrokontrolér ATtiny85 od společnosti Atmel (Microchip Technology). Mikročip ATtiny85 je malý a výkonný mikrokontrolér, který má několik výhod oproti jiným mikrokontrolérům. Je k dispozici v malém pouzdře SMD, což je výhodou pro použití na malých deskách plošných spojů a v aplikacích s omezeným prostorem. Díky své nízké ceně je cenově dostupný pro projekty s omezeným rozpočtem.

ATtiny85 má také nízkou spotřebu energie, což ho činí ideální volbou pro bateriově napájené zařízení nebo aplikace, které potřebují minimalizovat energetickou náročnost. Programování tohoto mikrokontroléru je jednoduché, protože je možné využít Arduino IDE s rozsáhlou knihovnou, nebo komunitní podporu pro vývoj softwaru. Existuje také mnoho zdrojů, jako jsou tutoriály, knihy a online diskusní fóra, které poskytují informace o práci s ATtiny85, což usnadňuje učení a vývoj aplikací s tímto mikrokontrolérem. Mezi nevýhody se řadí omezený počet I/O pinů. Mikrokontrolér ATtiny 85 má velikost paměti 8 kB, počet pinů je 8 [20].



Obr. 3.1: Pinout ATtiny85 [20].

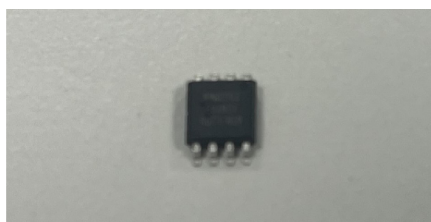
Z výše uvedeného obrázku je zřejmé, že každý pin mikrokontroléru ATtiny85 je silně multiplexován, přičemž některé piny mají až 9 různých funkcí (z nichž můžeme použít pouze jednu).

1. **PB5** pin RESET umožňuje resetovat mikrokontrolér. Když se na tento pin přivede nízká úroveň, dojde k resetování programu.
2. **PB3** digitální vstupně-výstupní pin s možností nastavení jako vstup, nebo výstup. Tento pin podporuje generování signálu PWM (Pulse Width Modulation).
3. **PB4** digitální vstupně-výstupní pin s možností nastavení jako vstup, nebo výstup. Tento pin podporuje generování signálu PWM.

4. **GND** zemní pin slouží k propojení s uzemněním.
5. **PB0** pin je digitální vstupně-výstupní pin, který může být použit jako vstup, nebo výstup. Má také speciální funkci jako vstup pro datový signál MOSI (Master Out Slave In) v režimu SPI (Serial Peripheral Interface).
6. **PB1** digitální vstupně-výstupní pin s možností nastavení jako vstup nebo výstup. Má speciální funkci jako výstup pro datový signál MISO v režimu SPI.
7. **PB2** digitální vstupně-výstupní pin, který může být použit jako vstup, nebo výstup. Má speciální funkci jako vstup pro hodinový signál SCK (Serial Clock) v režimu SPI.
8. **VCC** tento pin slouží k přivedení napájecího napětí, které napájí mikrokontrolér [21].

Hlavní technické parametry Attiny85:

- Jádru: AVR RISC
- Počet bitů: 8-bitový mikrokontrolér
- Rychlost hodin: Až 20 MHz
- Velikost paměti Flash: 8 kB
- Velikost paměti SRAM: 512 B
- Velikost paměti EEPROM: 512 B
- Napájecí napětí: 1,8 V až 5,5 V
- Počet (I/O): 6
- Komunikační rozhraní: I2C, SPI, UART (s podporou USART)
- Fyzické provedení: DIP-8, SOIC-8, MLF-8.



Obr. 3.2: ATtiny85

3.1.2 INA219

Pro tento projekt byl vybrán integrovaný obvod INA219, který slouží k měření proudu a napětí. Byl vybrán pro jeho velmi přesné měření proudu a napětí s minimální chybou, což je zvláště důležité pro aplikace, které vyžadují přesné monitorování elektrických parametrů. Dále kombinuje měření proudu a napětí v jednom čipu,

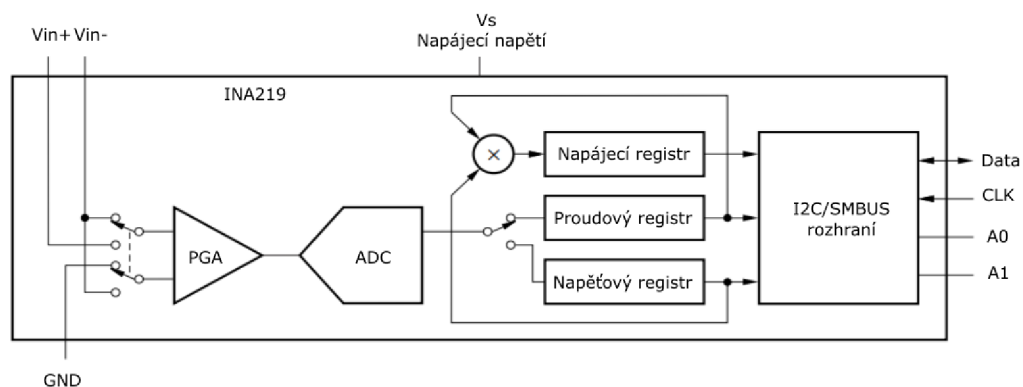
což snižuje potřebu více komponent a zjednodušuje návrh obvodů. Komunikuje pomocí sběrnice I2C, což je standardní a rozšířená komunikační sběrnice, usnadňující integraci do mnoha různých systémů, viz kapitola 2.4.

S nízkou spotřebou energie je vhodný pro aplikace s omezeným napájením. Existuje mnoho dostupných knihoven a příkladů kódu pro INA219 pro různé platformy, což zjednodušuje integraci do projektů a zkracuje vývojový čas. Navíc poskytuje možnost nastavení různých parametrů měření, jako je rozsah měření proudu a napětí, což umožňuje přizpůsobit obvod specifickým potřebám aplikace.

Integrovaný obvod INA219 byl navržen a zkonstruován firmou Texas Instruments, umožňuje připojení více externích součástí [22].

Parametry INA219:

- Měření stejnosměrného proudu $\pm 3,2 \text{ A}$
- Měření stejnosměrného napětí $\pm 26 \text{ V}$
- Maximální výkon $83,2 \text{ W}$
- 16 programovatelných adres – I2C
- Chybovost měření maximalně $0,5 \%$
- Odběr max. 1 mA , v módu power down max. $15 \mu\text{A}$
- Napájecí napětí $3,3 \text{ V}$
- Možnost nastavení parametrů.



Obr. 3.3: Vnitřní zapojení obvodu INA219. [22]

Snímání proudu

INA219 měří proud v elektrickém obvodu pomocí snímacího rezistoru (shunt rezistor), který je umístěn v sérii s cestou proudu. Tento rezistor má nízkou hodnotu odporu ($5 \text{ m}\Omega$), aby minimalizoval ztráty a dopad na celkový obvod. Když proud prochází tímto rezistorem, podle Ohmova zákona se vytváří úbytek napětí úměrný velikosti proudu.

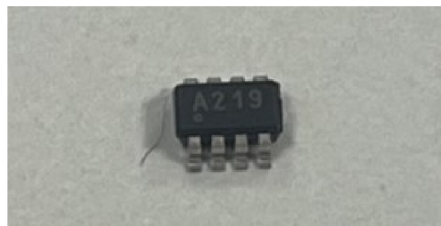
INA219 má dva vstupy, které umožňují měřit tento úbytek napětí diferenciálně. Jeden vstup je připojen na jednu stranu snímacího rezistoru, zatímco druhý vstup je připojen na druhou stranu. Rozdíl napětí mezi těmito dvěma vstupy je přesně změřen a použit k výpočtu proudu podle známého odporu snímacího rezistoru.

Snímání napětí

INA219 také umožňuje měřit napětí vůči zemi, což slouží k monitorování celkového napětí v elektrickém obvodu. Tento typ měření je důležitý pro kontrolu napájecích podmínek v systému a umožňuje zjistit, zda je obvod napájen správným napětím.

Digitalizace

Po změření proudu a napětí se tyto analogové hodnoty převedou do digitální podoby pomocí integrovaného 12-bitového analogově–digitálního převodníku (ADC). Tento převodník má dostatečnou přesnost pro přesné měření proudu a napětí, což je klíčové pro aplikace, které vyžadují přesné monitorování výkonu a spotřeby energie [23].



Obr. 3.4: INA219

3.1.3 HT7333-A

S ohledem na požadavky stabilizátoru napětí byl vybrán regulátor HT7333-A od firmy Holtek Semicon. Byl vybrán pro jeho energetické vlastnosti a pro jeho velikost. Série regulátorů řady HT73XX představuje skupinu třísvorkových, nízkoenergetických vysokonapěťových regulátorů, realizovaných technologií CMOS. Tato řada vyniká extrémně nízkým klidovým proudem, obvykle dosahujícím $4\ \mu\text{A}$, a umožňuje vstupní napětí až 12 V. Tato zařízení poskytují vysoký výstupní proud při výrazně nízkém výpadkovém napětí.

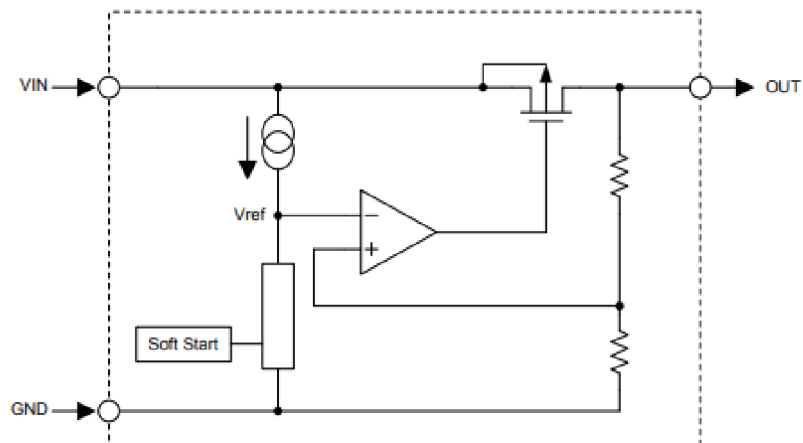
HT7333-A se skládá z vysoce přesné napěťové reference, obvodu pro korekci chyb a proudového omezení výstupního ovladače. Díky technologii CMOS je zajištěno nízké výpadkové napětí a nízká spotřeba proudu. I když je toto zařízení primárně navrženo jako pevný regulátor napětí, lze jej použít i s externími komponenty pro generování proměnného napětí [24].

V našem projektu byl stabilizátor zvolen tak, aby poskytoval stabilní výstupní napětí 3,3 V. Tato hodnota byla vybrána pro kompatibilitu s ostatními součástkami v systému. Hlavní součástky, které jsou tímto napětím napájeny, zahrnují senzor napětí a proudu INA219, mikrokontrolér Attiny85 a OLED displej SSD1306.

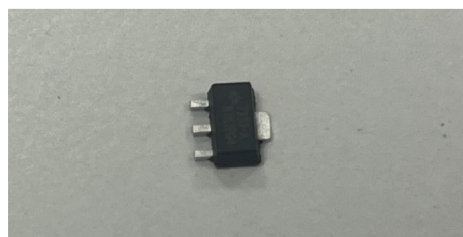
Výběr stabilizátoru s výstupním napětím 3,3 V je důležitý pro zajištění stability a správný provoz všech komponent. Díky tomuto stabilizátoru je konzistentní napájení zajištěno i při kolísání vstupního napětí nebo změnách zatížení obvodu. Tímto způsobem lze dosáhnout vysoké spolehlivosti a minimalizovat riziko selhání způsobené nestabilním napájením.

Hlavními výhodami stabilizátoru HT7333-A jsou:

- Malá spotřeba energie
- Nízký pokles napětí
- Rozměry SOT-89-3
- Vysoké vstupní napětí až 12 V
- Přesnost vstupního napětí: tolerance $\pm 3\%$
- Výstupní napětí: 3,3 V
- Maximální výstupní proud: 250 mA
- Nízký klidový proud 3,5 μA .



Obr. 3.5: Vnitřní zapojení obvodu HT7333-A [24].



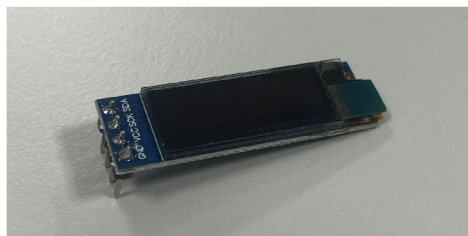
Obr. 3.6: HT7333-A

3.1.4 SSD1306 I2C OLED

Pro tento projekt byla zvolena řada integrovaných obvodů SSD1306, která se využívá pro řízení OLED displejů. Výhodou tohoto displeje je jeho tenkost, lehkost, barevné vlastnosti a kontrast. SSD1306 je řadič OLED se 128 x 64 pixely, ale tento OLED podporuje pouze 128 x 32 pixelů, takže tato obrazovka využívá pouze první polovinu oblasti vyrovnávací paměti SSD1306. Toto rozlišení displeje splňuje požadavky pro náš projekt a je proto vhodným displejem. Tento OLED podporuje komunikační metody, jako je 8 bitová 8080 paralelní, 8 bitová 6800 paralelní, třívodičová SPI, čtyřvodičová SPI a I2C. Pro náš projekt budeme využívat komunikaci I2C, která je více popsána v kapitole 2.4. Výhodou displeje SSD1306 je interní paměť ukládání dat o displeji, což umožňuje snadnou aktualizaci obsahu, dále tento displej umožňuje upravit kontrast displeje podle svých potřeb [25].

Parametry displeje SSD1306 jsou následující:

- Velikost displeje: 0,91 palce
- Provozní napětí: 3,3 V
- Rozhraní: I2C
- Ovladač: SSD1306
- Rozlišení: 128 x 32
- Rozměr: 36 x 12,5 mm
- Barva displeje: bílá.



Obr. 3.7: OLED SSD1306

3.2 Kód

3.2.1 Vývojové prostředí Arduino IDE 2.3.2

Arduino IDE 2.3.2 je využíváno jako vývojové prostředí pro programování mikrokontrolérů, včetně desek Arduino a dalších menších čipů, jako je ATtiny85. V tomto projektu byl Arduino IDE 2.3.2 využit ke kompilaci a nahrávání kódu do mikročipu ATtiny-85 prostřednictvím desky Arduino Nano. Tento proces zahrnoval použití

Arduino Nano jako programátoru, který byl propojen s vývojovým prostředím, což umožnilo přenesení kódu z počítače do čipu ATtiny85.

Specifikace pro nahrávání kódu do ATtiny85 pomocí Arduino Nano s použitím ATtinyCore obsahují následující:

- **Core:** Využíváno je ATtinyCore, což je speciální jádro pro programování čipů řady ATtiny s platformou Arduino.
- **Board:** Nastavení je provedeno na ATtiny25/45/85 (bez bootloaderu). V tomto nastavení je bootloader vynechán, čímž je umožněno nahrávat kód přímo do paměti čipu, což přispívá ke snížení režie a zajišťuje nezávislost na externích zařízeních.
- **Chip:** Vybrán je čip ATtiny85. Výběr probíhá v závislosti na konkrétním použitém čipu. Tato volba zahrnuje identifikaci cílového čipu, který má být programován.
- **Clock:** Frekvence hodin je nastavena na 1 MHz s použitím interního oscilátoru. Volba nižší frekvence může být výhodná pro úsporu energie nebo pro specifické aplikace, které nevyžadují vyšší frekvenci.
- **B.O.D.(Brown-out Detection):** Hranice detekce napětového poklesu je nastavena na 2,7 V. Brown-out Detection je ochranná funkce, která zabraňuje chodu čipu při nestabilním napájení nebo při nízkém napětí, což pomáhá chránit čip a zachovat jeho spolehlivost.

3.2.2 Práce s programem

Program USB měřiče je spouštěn okamžitě po zapojení do USB adaptéru. Na displeji jsou zobrazovány veškeré hodnoty, včetně napětí, proudu, výkonu a spotřeby. Uživateli je umožněno získat aktuální hodnoty a provádět další funkce. Vyčítání maximální a minimální hodnoty napětí, proudu, měřeného náboje a výkonu jsou vyčítány po stisknutí druhého tlačítka. Počítadlo vteřin je spuštěno a měří čas od spuštění nebo od posledního resetování tlačítkem.

Výpočet hodnot pro zobrazení na displeji měřiče zahrnuje následující operace: Spotřeba energie se vypočítá jako součin napětí a proudu, přičemž výsledek je dělen 1000 pro převod na jednotky wattů. Kapacita se zvětšuje o součin intervalu a proudu, přičemž výsledek je dělen 3600 pro převod na hodnotu ve Wh. Energie se zvětšuje o součin intervalu a power, přičemž výsledek je také dělen 3600 pro převod na hodnotu ve Wh.

<code>power</code>	<code>= (uint32_t)voltage * current / 1000;</code>	1
<code>capacity</code>	<code>+= interval * current / 3600;</code>	2
<code>energy</code>	<code>+= interval * power / 3600;</code>	3

Výpis 3.1: Ukázka kódu pro výpočet v reálném čase.

V následujících definicích jsou popsány konstanty a registry, které se používají při práci s čipem INA219 pro měření napětí a proudu. Adresa čipu INA219 na sběrnici I2C je definována jako 0x80 pro zápisový režim. Konfigurační hodnota INA_CONFIG určuje nastavení čipu podle specifikací datasheetu. Adresy registrů INA_REG_CONFIG, INA_REG_CALIB, INA_REG_SHUNT, INA_REG_VOLTAGE, INA_REG_POWER a INA_REG_CURRENT definují umístění jednotlivých registrů v paměti čipu INA219. Tyto definice umožňují snadný a srozumitelný přístup k různým funkcím a vlastnostem čipu INA219 při programování.

Přesná hodnota shunt rezistoru není definována přímo v kódu, ale je nastavena v registru INA_CALIB, který se používá k výpočtu proudu na základě napětí měřeného přes tento rezistor. Pro výpočet kalibrační hodnoty shunt rezistoru, pokud je známa hodnota rezistoru $0,005\ \Omega$ a maximální očekávaný proud 2 A, je postupováno tak, že je využit vzorec pro výpočet hodnoty, který je aplikován na známé hodnoty, viz rovnice 3.1. Tato hodnota je používána k zajištění správného měření proudu, přičemž jsou brány v úvahu konkrétní hodnoty shunt rezistoru a maximálního očekávaného proudu.

$$\frac{0,04096}{100 * 10^{-5} * 0,005} = 8192, \quad (3.1)$$

<code>#define</code>	<code>INA_ADDR</code>	<code>0x80</code>	1
<code>#define</code>	<code>INA_CONFIG</code>	<code>0b0000011111111111</code>	2
<code>#define</code>	<code>INA_CALIB</code>	<code>8192</code>	3
<code>#define</code>	<code>INA_REG_CONFIG</code>	<code>0x00</code>	4
<code>#define</code>	<code>INA_REG_CALIB</code>	<code>0x05</code>	5
<code>#define</code>	<code>INA_REG_SHUNT</code>	<code>0x01</code>	6
<code>#define</code>	<code>INA_REG_VOLTAGE</code>	<code>0x02</code>	7
<code>#define</code>	<code>INA_REG_POWER</code>	<code>0x03</code>	8
<code>#define</code>	<code>INA_REG_CURRENT</code>	<code>0x04</code>	9

Výpis 3.2: Ukázka kódu registrace čipu INA219.

3.3 Návrh schématu

V tomto projektu byl pro návrh schématu zapojení a desky plošných spojů (DPS) použit program EAGLE 9.6.2 Education od vývojářů Autodesk. Tento software poskytuje nástroje pro automatizaci elektronického návrhu (EDA), což zahrnuje schématické zachycení, rozložení desek plošných spojů (PCB), automatické směřování a funkce CAM pro výrobu. Díky využití programu EAGLE 9.6.2 mohl být navržen celý systém zapojení, včetně umístění součástek a trasování spojů na desce. Proces návrhu byl zjednodušen funkcí automatického směřování, která zajistila optimální cestu pro elektrické signály.

3.3.1 Popis obvodu

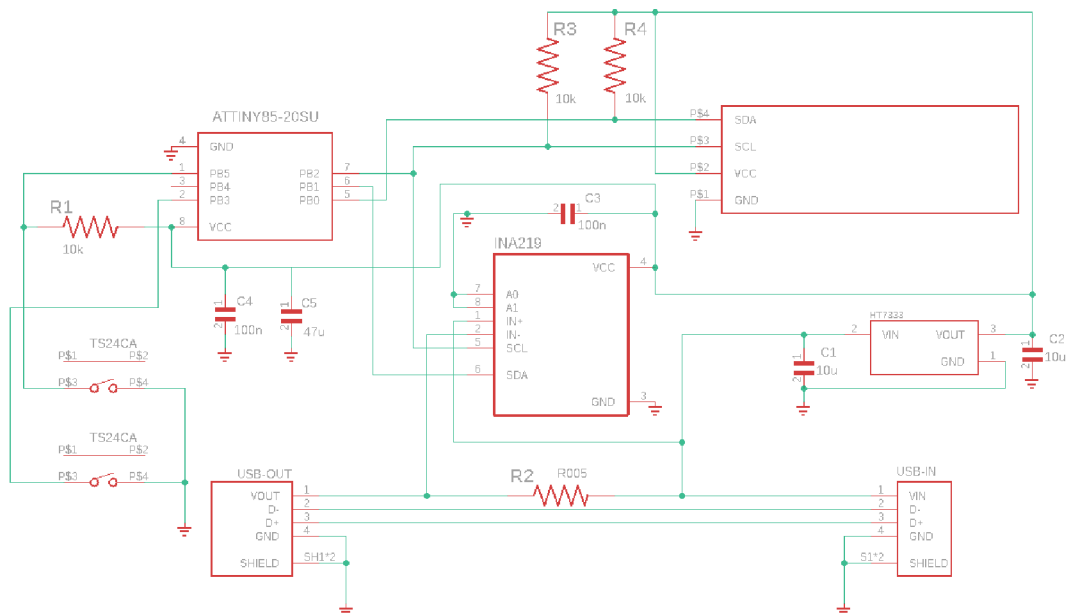
Napájení obvodu je realizováno přes USB-IN konektor a regulováno na 3,3 V pomocí stabilizátoru HT7333. Výstupní napětí je stabilizováno kondenzátory C1 a C2 ($10\ \mu\text{F}$) umístěnými na vstupu a výstupu stabilizátoru.

Mikrokontrolér ATtiny85 je napájen připojením 8. pinu na VCC. Pin 1 je uzemněn přes rezistor R1 ($10\ \text{k}\Omega$), tím je zajištěno správné resetování programu. Komunikace s proudovým a napěťovým senzorem INA219 je realizována prostřednictvím I2C sběrnice, kde jsou konektory SCL (pin 7) a SDA (pin 6) připojeny k odpovídajícím pinům mikrokontroléru. Pull-up rezistory R3 a R4 ($10\ \text{k}\Omega$) jsou zapojeny mezi VCC a piny SCL a SDA, což zajišťuje správnou funkci I2C komunikace.

Senzor INA219 měří proud procházející přes rezistor R2 ($0,008\ \Omega$) umístěný mezi piny IN+ (pin 1) a IN- (pin 2) senzoru. Napětí je měřeno mezi IN+ (pin 1) a GND, přičemž je stabilizováno kondenzátorem C3 ($10\ \mu\text{F}$). Piny A0 (pin 5) a A1 (pin 6) senzoru jsou uzemněny. Obvod obsahuje dva spínací prvky TS24CA, které jsou připojeny k mikrokontroléru.

USB výstup je propojen přes měřicí rezistor R2 s IN+ a IN- piny senzoru INA219, což umožňuje měření proudu tekoucího k zařízení připojenému k USB-OUT.

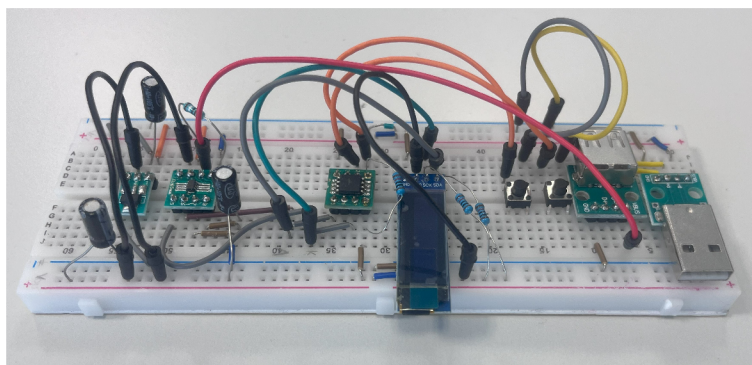
Kondenzátory C1 a C2 ($10\ \mu\text{F}$) jsou umístěny na vstupu a výstupu stabilizátoru HT7333 pro filtraci a stabilizaci napájecího napětí, což pomáhá eliminovat šum a udržet stabilní napětí. Kondenzátor C3 ($100\ \text{nF}$) poskytuje filtraci napájecího napětí pro INA219, odstraňuje vysokofrekvenční šum a zajišťuje stabilní provoz měřiče. Kondenzátory C4 ($100\ \text{nF}$) a C5 ($47\ \mu\text{F}$) jsou umístěny na napájecím pinu mikrokontroléru ATtiny85, kde C4 eliminuje vysokofrekvenční šum a C5 poskytuje širší filtraci a stabilizaci napájecího napětí při změnách v odběru proudu. Kombinace těchto kapacit zajišťuje stabilní napájení a minimalizaci šumu.



Obr. 3.8: Návrh schématu obvodu

3.4 Osazení desky nepájivého pole

Vytvoření desky nepájivého pole, také známé jako breadboard, bylo důležitým krokem před vývojem desky plošných spojů. Komponenty vybrané již při návrhu schématu se umístily na desku nepájivého pole a propojily se propojovacími vodiči. Následovala fáze testování a ověřování, během níž se kontrolovalo, zda obvod funguje podle očekávání. Dle potřeby se prováděly úpravy a optimalizace obvodu. Jakmile byl obvod na desce nepájivého pole plně funkční přistoupilo se k návrhu DPS.



Obr. 3.9: Osazení desky nepájivého pole.

3.5 Návrh desky plošných spojů

Po vytvoření schématu obvodu byla navržena deska plošných spojů podle daného schématu. Její rozměry nebyly pevně stanoveny, ale cílem bylo minimalizovat velikost. Výsledné rozměry PCB jsou 100 x 21,58 mm. Deska je dvouvrstvá. Konstrukce desky využívá 6. konstrukční třídu, která zahrnuje různé parametry, jako je tloušťka spojů, šířka izolačních mezer a rozdíl průměrů pro vrtání. Pro osazení desky byly použity SMD součástky velikostí 0402, 0603, 1206 a 2512.

Deska plošných spojů byla navržena tak, aby komponenty, které vyžadují interakci, jako tlačítka, byly snadno přístupné a vzájemně se neblokovaly.

Na jedné straně plošného spoje byl integrován vstup USB-A, zatímco na druhé straně byl umístěn výstup USB-A. Toto rozložení poskytuje snadné propojení mezi vstupním a výstupním rozhraním na desce a umožňuje standardní kompatibilitu s běžnými USB zařízeními.

Polovina plošného spoje je určena pro displej. Druhá polovina je vyhrazena pro elektronické součástky. Elektronické komponenty byly rozmístěny s většími rozestupy, aby se vyřešily problémy s instalací velmi malých součástek a usnadnilo se porozumění obvodu.

Širší rozestupy mezi součástkami zjednodušují montáž a umožňují lepší přístup k jednotlivým prvkům, což je výhodné pro testování, ladění nebo výměnu součástek. Tento přístup k návrhu zvyšuje praktičnost a přehlednost.

Celý návrh desky plošných spojů je umístěn v příloze B.

3.6 Kryt na zařízení

Pro výrobu krytu pro zařízení byl použit 3D tisk. Vytvořený obal byl navržen tak, aby odpovídal rozměrům desky plošných spojů o velikosti 100 x 21,58 mm. Materiálem zvoleným pro tento 3D tisk byl PLA, což je běžný termoplastický materiál používaný pro 3D tisk díky své snadné tisknutelnosti a ekologické šetrnosti.

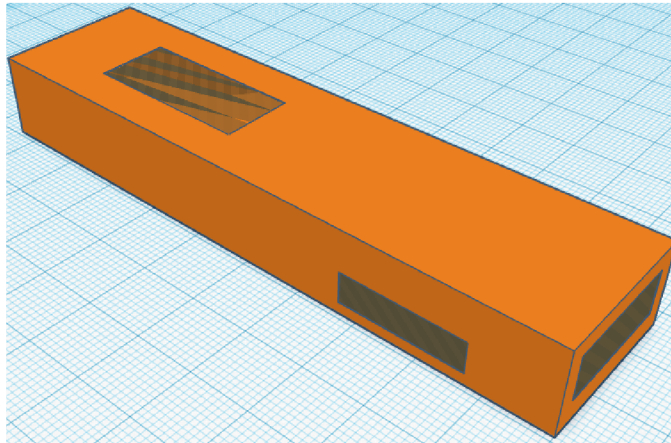
Pro vytvoření modelu obalu byl nejprve navržen 3D model pomocí specializovaného softwaru pro modelování Tinkercad. Tento model obsahoval přesné rozměry a umístění otvorů pro různé prvky zařízení, včetně USB-A vstupu i výstupu, otvorů pro tlačítka a výřezu pro displej.

Následně byl model zpracován softwarem pro přípravu 3D tisku, kde byly určeny parametry tisku, jako je tloušťka vrstvy, rychlost tisku a nastavení podpěr. Po této přípravě byl 3D model odeslán na 3D tiskárnu k výrobě fyzického krytu.

Během tisku byla využita metoda FDM (Fused Deposition Modeling), při které je materiál postupně extrudován a nanášen vrstvu po vrstvě, dokud není dokončen celý model. Tímto způsobem byl vytvořen obal s potřebnými otvory a výřezy, které

byly pečlivě umístěny tak, aby odpovídaly rozložení komponent na desce plošných spojů.

Po dokončení tisku byl obal vyčištěn od přebytečných podpěr a dalších tiskových artefaktů. Následně byl testován, aby se zajistilo, že všechny komponenty zařízení do něj správně zapadají a že otvory a výřezy odpovídají jejich pozici a velikosti.



Obr. 3.10: Návrh modelu krytu v programu Tinkercad.

3.7 Výsledky a testování

K testování a zhodnocení měřiče bylo využito několik zařízení, které reprezentují typické domácí spotřebiče. Testování bylo zaměřeno na měření napětí a proudu, aby byla ověřena přesnost a spolehlivost měřiče při různých podmínkách zatížení.

Zdroj napájení

Adaptér AlzaPower A101CA Fast Charge 20 W byl použit jako zdroj napájení pro všechna měření. Jedná se o rychlonabíjecí adaptér s maximálním výkonem 20 W, který je schopen dodávat stabilní napětí a proud pro nabíjení různých zařízení. Adaptér podporuje technologie rychlého nabíjení, což je důležité pro testování zařízení s vyššími nároky na napájení.

Měřená zařízení

- Xiaomi Redmi 9 SE
- Powerbanka AlzaPower Metal 20000mAh Fast Charge + PD3.0
- JBL Charge 5

Metoda měření

Pro všechna měření byl použit USB měřič zapojený na desce nepájivého pole. Tato konfigurace umožnila snadné propojení měřiče se zdrojem napájení a měřenými zařízeními. Měření byla provedena v následujících konfiguracích:

- **Měření bez odběru:** USB měřič byl zapojen pouze mezi zdroj napájení a měřicí zařízení bez připojení jakéhokoliv spotřebiče. Cílem bylo stanovit základní přesnost a stabilitu měřiče v klidovém stavu.
- **Měření napětí a proudu s odběrem jednotlivých zařízení:** Pro každé zařízení (smartphone, powerbanka, reproduktor) bylo provedeno měření napětí a proudu.

Každé měření bylo opakováno několikrát, aby byla získána reprezentativní data pro analýzu a zhodnocení přesnosti měřiče.

Výsledky

1. Měření bez odběru

- Průměrný rozdíl napětí: 18,7 mV
- Směrodatná odchylka: 8,856 mV

Měření bez odběru ukazuje velmi malý rozdíl napětí, což naznačuje vysokou přesnost měřicího zařízení v klidovém stavu. Nízká směrodatná odchylka indikuje malou variabilitu mezi jednotlivými měřeními.

2. Měření napětí s odběrem powerbanky

- Průměrný rozdíl napětí: 0,2899 V
- Směrodatná odchylka: 39,47 mV

Výraznější průměrný rozdíl napětí při odběru powerbanky naznačuje, že vyšší zatížení má vliv na přesnost měření. Tento rozdíl může být způsoben vnitřními odpory a ztrátami na kontaktech, což je běžné při vyšších proudech. Směrodatná odchylka je také vyšší, což znamená větší rozptyl měřených hodnot.

3. Měření proudu s odběrem powerbanky

- Průměrný rozdíl proudu: 8,1 mA
- Směrodatná odchylka: 8,591 mA

Průměrný rozdíl proudu při odběru powerbanky je velmi malý, což ukazuje na vysokou přesnost měřicího zařízení při měření proudu. Nicméně směrodatná odchylka je relativně vysoká vzhledem k průměrnému rozdílu, což naznačuje větší variabilitu v měřených hodnotách. To může být důsledkem dynamických změn v odběru proudu powerbankou.

4. Měření napětí u telefonu Xiaomi

- Průměrný rozdíl napětí: 28 mV
- Směrodatná odchylka: 2,061 mV

Nízký průměrný rozdíl napětí u telefonu Xiaomi ukazuje, že měřicí zařízení je schopno přesně měřit napětí. Velmi nízká směrodatná odchylka indikuje vysokou konzistenci měření.

5. Měření proudu u telefonu Xiaomi

- Průměrný rozdíl proudu: 66 mA
- Směrodatná odchylka: 5,418 mA

Při měření proudu u telefonu Xiaomi byl zaznamenán vyšší průměrný rozdíl proudu, což může být způsobeno kolísáním odběru proudu během nabíjení. Relativně nízká směrodatná odchylka ukazuje, že měření jsou stále konzistentní.

6. Měření napětí u reproduktoru JBL

- Průměrný rozdíl napětí: 325,8 mV
- Směrodatná odchylka: 1 mV

Výrazný průměrný rozdíl napětí u reproduktoru JBL může být způsoben vysokým odběrem proudu a vnitřními odpory zařízení. I přes značný průměrný rozdíl, velmi nízká směrodatná odchylka naznačuje vysokou konzistenci jednotlivých měření.

7. Měření proudu u reproduktoru JBL

- Průměrný rozdíl proudu: 155,4 mA
- Směrodatná odchylka: 11 mA

Vyšší průměrný rozdíl proudu u reproduktoru JBL může být způsoben dynamickými změnami v odběru proudu během přehrávání hudby nebo jiného využití reproduktoru. Vyšší směrodatná odchylka ukazuje větší variabilitu měření.

USB měřič prokázal vysokou přesnost měření napětí a proudu v různých podmínkách. Největší rozdíly byly zaznamenány při měření s odběrem powerbanky a reproduktoru JBL. Směrodatné odchylky napříč měřeními ukazují, že měřicí zařízení je schopno poskytovat opakovatelné výsledky, i když se hodnoty měřených veličin mohou lišit v závislosti na specifických podmínkách měření.

Závěr

Tato bakalářská práce se zabývala návrhem a výrobou měřiče spotřeby USB zařízení. Projekt byl zaměřen na různé aspekty technologie USB, včetně datových přenosů, napájení, konektorů USB a jejich alternativ. Zvláštní důraz byl kladen na prohloubení poznání protokolu USB Power Delivery, který umožňuje variabilní přenos energie mezi USB zařízeními, a technologie Quick Charge, která zajišťuje rychlé nabíjení. Tyto protokoly jsou zásadní pro pochopení, jak USB zařízení komunikují a jaká jsou jejich energetická omezení.

Pro návrh měřiče byly vybrány různé komponenty, včetně mikrokontrolérů, senzorů napětí a proudu, stabilizátorů napětí a komunikačních protokolů. OLED displej byl použit pro zobrazení naměřených dat v reálném čase. Konstrukční část zahrnovala návrh elektrického obvodu, schématu, testování na desce nepájivého pole, návrh tištěného spoje (PCB) a tvorba krytu pro tento měřič.

Vzhledem k neočekávané chybě na 2. verzi PCB, bylo testování provedeno na desce nepájivého pole. Chyba na zařízení vytváří nesprávné vyčítání napětí na senzoru napětí a nulový proud na bočníku. Výsledky měření na desce nepájivého pole byly v souladu s očekáváním, nicméně bylo zapotřebí využít jinou hodnotu shunt rezistoru a upravit kalibrační registr.

Výsledky testování potvrdily, že měřič USB spotřeby splňuje očekávání a poskytuje přesné údaje o napětí, proudu a výkonu. To umožňuje analýzu spotřeby energie v různých USB zařízeních, což je užitečné pro techniky, vývojáře a uživatele, kteří chtějí optimalizovat spotřebu energie ve svých zařízeních.

Tato práce nabízí možnosti dalšího vylepšení a rozšíření projektu. Jednou z potenciálních oblastí rozšíření je přidání podpory pro konektory USB-C, které jsou stále více používány v moderních zařízeních.

Mezi další možnosti rozšíření patří implementace pokročilých měřících funkcí, jako je analýza energetické účinnosti a detekce anomálií v energetické spotřebě. Dále by mohl být projekt rozšířen o schopnost měření vyšších proudů a napětí, což by umožnilo testování širšího spektra zařízení, včetně těch, která používají technologii USB Power Delivery na vyšších profilech.

Bakalářská práce poskytuje pevný základ pro další výzkum a vývoj v oblasti měření USB spotřeby. Výsledky této práce mohou být užitečné nejen pro odborníky v elektrotechnice, ale také pro širokou veřejnost, která se zajímá o optimalizaci spotřeby energie a zlepšení energetické účinnosti v každodenním životě.

Literatura

- [1] KAINKA, B. *USB: Měření, řízení a regulace pomocí sběrnice USB*. PC & elektronika. Praha: BEN - technická literatura, 2002. ISBN 80-7300-073-3.
- [2] PEACOCK, C. *USB Protocols* [online]. [cit. 10. 1. 2024]. Dostupné z URL: <<https://www.beyondlogic.org/usbnutshell/usb3.shtml>>.
- [3] KEIL. *USB Component* [online]. [cit. 12. 12. 2023]. Dostupné z URL: <https://www.keil.com/pack/doc/mw/USB/html/_u_s_b__endpoints.html>.
- [4] ANKER. *How to Identify Different Types Of USB Cables: A Brief Guide* [online]. [cit. 25. 1. 2024]. Dostupné z URL: <<https://www.anker.com/blogs/cables/how-to-identify-different-types-of-usb-cables-a-brief-guide>>.
- [5] COOLVECTORMAKER. *Set computer connectors or usb universal vector image* [online]. [cit. 25. 1. 2024]. Dostupné z URL: <<https://www.vectorstock.com/royalty-free-vector/set-computer-connectors-or-usb-universal-vector-36085550>>.
- [6] AKYGA. *Power Delivery-what is it?* [online]. [cit. 25. 1. 2024]. Dostupné z URL: <<https://www.akyga.com/news-list/67-power-delivery-what-is-it.html>>.
- [7] SAUNDERS, B. *USB PD Revision 3.1* [online]. [cit. 31. 1. 2024]. Dostupné z URL: <<https://www.usb.org/usb-charger-pd>>.
- [8] STMICROTRONICS. *USB type-C and Power Delivery* [online]. [cit. 6. 5. 2024]. Dostupné z URL: <https://www.st.com/content/ccc/fragment/corporate/event_information/event_image/group0/af/74/88/0c/da/c8/48/b7/APEC2018_USB_PD/files/APEC2018_USB_PD.pdf/jcr:content/translations/en.APEC2018_USB_PD.pdf>.
- [9] RADU. *Power Bank Expert: What is qualcomm quick charge technology?* [online]. [cit. 6. 5. 2024]. Dostupné z URL: <<https://www.powerbankeexpert.com/what-is-qualcomm-quick-charge-technology/>>.
- [10] QUALCOMM. *Products* [online]. [cit. 31. 1. 2024]. Dostupné z URL: <<https://www.qualcomm.com/products>>.

- [11] JAVORSKÝ L., BOBEK A., MUSIL R. *Základy elektrotechniky pro SPŠ elektrotechnické*. Praha: SNTL 1981.
- [12] SMOOT, J. *The History of USB Standards from 1.0 to USB4* [online]. [cit. 16. 1. 2023]. Dostupné z URL: <https://www.cuidevices.com/blog/the-history-of-usb-standards-from-1-to-usb4>.
- [13] DAVID, L. *USB 3.0 Cable Interface* [online]. [cit. 16. 1. 2023]. Dostupné z URL: <http://www.interfacebus.com/usb-cable-diagram-30.html>.
- [14] HOPKINS, J. *The Relationship Between USB4 and the USB Type-C Connector* [online]. [cit. 17. 1. 2023]. Dostupné z URL: <https://www.totalphase.com/blog/2020/02/usb4-and-usb-type-c-connector/>.
- [15] KOLIC, R. *Wireless USB Brings Greater Convenience and Mobility to Devices* [online]. [cit. 17. 1. 2023]. Dostupné z URL: <https://www.ecs.csun.edu/~cputnam/Comp546/AT9015145687.html>.
- [16] YAGHMOUR, K. *Building embedded Linux systems*. 2nd ed. Sebastopol: O'Reilly, 2008. ISBN 978-0-596-52968-0.
- [17] MICROCHIP. *Mikrokontroléry* [online]. [cit. 10. 2. 2024]. Dostupné z URL: <https://www.microchip.com/en-us/products/microcontrollers-and-microprocessors>.
- [18] TEXAS INSTRUMENTS. *Digital power monitors* [online]. [cit. 10. 2. 2024]. Dostupné z URL: <https://www.ti.com/amplifier-circuit/current-sense/digital-power-monitors/overview.html>.
- [19] ELUC. *Stabilizátory napětí* [online]. [cit. 10. 2. 2024]. Dostupné z URL: <https://eluc.ikap.cz/verejne/lekce/657>.
- [20] MICROCHIP. *ATtiny85* [online]. [cit. 9. 10. 2023]. Dostupné z URL: <https://www.microchip.com/en-us/product/attiny85#>.
- [21] PRASAD, L. *Pinout ATtiny85* [online]. [cit. 6. 1. 2024]. Dostupné z URL: <https://www.electronicshub.org/attiny85-pinout/>.
- [22] TEXAS INSTRUMENTS. *INA219* [online]. [cit. 22. 10. 2023]. Dostupné z URL: <https://www.ti.com/lit/ds/symlink/ina219.pdf>.

- [23] ČECH, J. *Malý programovatelný napájecí zdroj* [online]. [cit. 23. 10. 2023]. Dostupné z URL:
<<https://core.ac.uk/download/pdf/44402265.pdf>>.
- [24] HOLTEK SEMICONDUCTOR. *Low Power Consumption LDO* [online]. [cit. 1. 2. 2024]. Dostupné z URL:
<<https://www.holtek.com/page/index>>.
- [25] SOLOMON SYSTECH. *SSD1306* [online]. [cit. 1. 2. 2024]. Dostupné z URL:
<<https://cdn-shop.adafruit.com/datasheets/SSD1306.pdf>>.
- [26] I2C INFO. *I2C Bus Specification* [online]. [cit. 26. 10. 2023]. Dostupné z URL:
<<https://i2c.info/i2c-bus-specification>>.
- [27] AFZAL, S. *I2C Primer: What is I2C?* [online]. [cit. 26. 2. 2024]. Dostupné z URL:
<<https://www.analog.com/en/resources/technical-articles/i2c-primer-what-is-i2c-part-1.html>>.
- [28] FRAJDL, M. *Displeje – využití, funkce, typy* [online]. [cit. 22. 2. 2024]. Dostupné z URL:
<<https://blog.laskakit.cz/displeje-vyuziti-funkce-typy/>>.

Seznam symbolů a zkratek

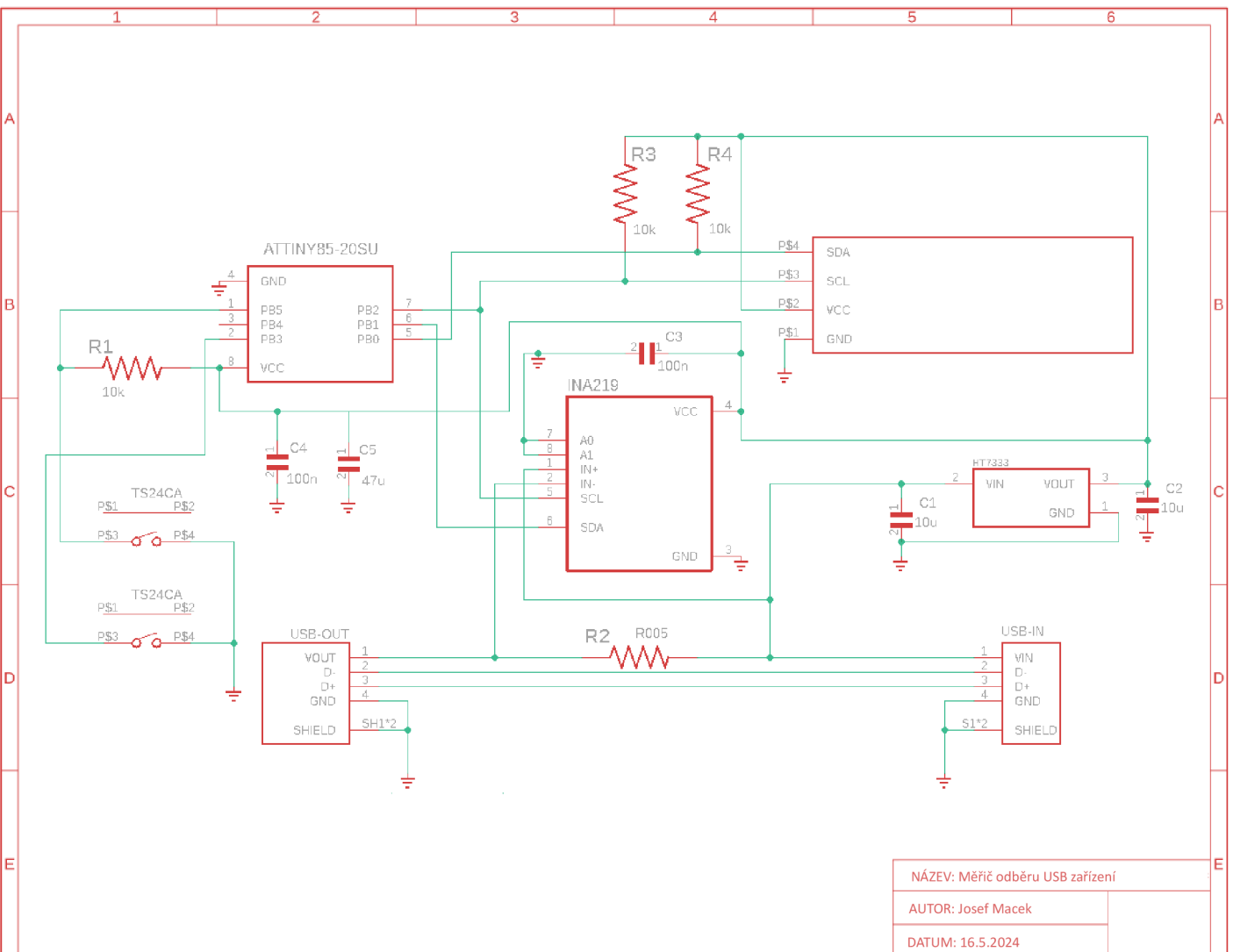
USB	Universal Serial BU
USB-IF	USB Implementers Forum
BMC	Biphase Mark Code
USB-PD	USB Power Delivery
QC	Quick Charge
PTFE	Polytetrafluorethylen
PE	polyethylen
IBM	International Business Machines
DEC	Digital Equipment Corporation
OTG	On-The-Go
NRZ	Non-Return-Zero
PAM	Plus-Amplitude Modulation
WUSB	Wireless USB
ROM	Read-only memory
RAM	Random-access memory
ADC	Analog-to-Digital Converters
UART	Universal Asynchronous Receiver/Transmitter
SPI	Serial Peripheral Interface
I2C	Inter-Integrated Circuit
NFC	Near Field Communication
RFID	Radio-Frequency Identification
I/O	Input/Output
IC	Integrated Circuit
SDA	Serial Data Line

SCL	Serial Clock Line
LCD	Liquid-Crystal Display
LED	Light Emitting Diode
OLED	Organic Light Emitting Diode
E-ink	Electronic ink
PDP	Plasma Display Panel
SMD	Surface Mount Devices
PWM	Pulse Width Modulation
MOSI	Master Out Slave In
SMBUS	System Management Bus
CMOS	Complementary Metal-Oxide Semiconductor
DPS	Deska Plošných Spojů
PCB	Printed Circuit Board
CAM	Computer Aided Design
PLA	Polylactic Acid
FDM	Fused Deposition Modelin

Seznam příloh

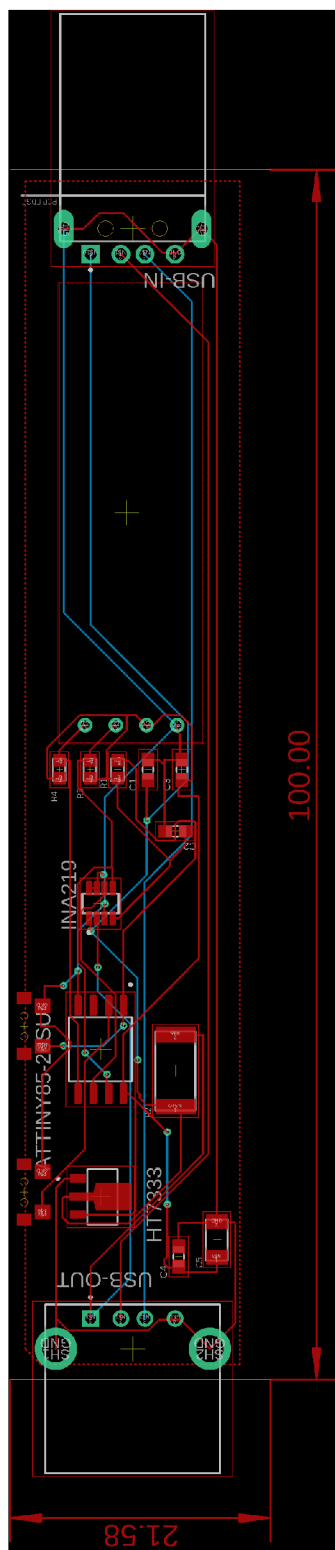
A Schéma obvodu	67
B Návrh desky plošných spojů	69
C Výsledky testování desky nepájivého pole	71

A Schéma obvodu



Obr. A.1: Schéma obvodu

B Návrh desky plošných spojů



Obr. B.1: Návrh desky plošných spojů

C Výsledky testování desky nepájivého pole

Tab. C.1: Výsledky měření napětí bez odběru proudu.

Počet měření	Zařízení [V]	Multimetr [V]	Odchylka [abs V]	Druhá mocnina [V]	Rozdíl [V]
1.	4,944	4,960	0,003	0,00001156	0,016
2.	4,952	4,968	0,011	0,0001299	0,016
3.	4,940	4,962	0,001	0,00000036	0,022
4.	4,936	4,958	0,005	0,00002116	0,022
5.	4,928	4,947	0,013	0,0001587	0,019
6.	4,932	4,953	0,009	0,00007396	0,021
7.	4,944	4,960	0,003	0,00001156	0,016
8.	4,928	4,947	0,013	0,0001587	0,019
9.	4,950	4,968	0,009	0,00008836	0,018
10.	4,952	4,970	0,011	0,0001299	0,018
Průměr:	4,941	4,959	0,008	0,00007844	0,0187
Směr. odchylka:				0,008856 V	

Tab. C.2: Výsledky měření napětí u powerbanky.

Počet měření	Zařízení [V]	Multimetr [V]	Odchylka [abs V]	Druhá mocnina [V]	Rozdíl [V]
1.	8,872	8,555	0,017	0,0002958	0,317
2.	8,876	8,556	0,021	0,0004494	0,32
3.	8,776	8,554	0,079	0,006209	0,222
4.	8,776	8,555	0,079	0,006209	0,221
5.	8,872	8,556	0,017	0,0002958	0,316
6.	8,876	8,540	0,021	0,0004494	0,336
7.	8,872	8,556	0,017	0,0002958	0,316
8.	8,876	8,557	0,021	0,0004494	0,319
9.	8,872	8,560	0,017	0,0002958	0,312
10.	8,880	8,660	0,025	0,000635	0,22
Průměr:	8,855	8,565	0,032	0,001558	0,2899
Směr. odchylka:				0,03947	

Tab. C.3: Výsledky měření proudu u powerbanky.

Počet měření	Zařízení [A]	Multimetr [A]	Odchylka [abs A]	Druhá mocnina [A]	Rozdíl [A]
1.	0,470	0,482	0,010	0,00009409	0,012
2.	0,480	0,490	0,000	0,00000009	0,01
3.	0,465	0,474	0,015	0,000216	0,009
4.	0,472	0,480	0,008	0,00005929	0,008
5.	0,477	0,487	0,003	0,00000729	0,01
6.	0,482	0,490	0,002	0,00000529	0,008
7.	0,492	0,494	0,012	0,0001512	0,002
8.	0,487	0,495	0,007	0,00005329	0,008
9.	0,492	0,496	0,012	0,0001512	0,004
10.	0,480	0,490	0,000	0,00000009	0,01
Průměr:	0,480	0,488	0,007	0,00007381	0,0081
Směr. odchylka:				0,008591	

Tab. C.4: Výsledky měření napětí u telefonu Xiaomi.

Počet měření	Zařízení [V]	Multimetr [V]	Odchylka [abs V]	Druhá mocnina [V]	Rozdíl [V]
1.	6,912	6,945	0,001	0,00000225	0,033
2.	6,910	6,938	0,003	0,00001225	0,028
3.	6,915	6,942	0,002	0,00000225	0,027
4.	6,914	6,940	0,001	0,00000025	0,026
5.	6,916	6,945	0,003	0,00000625	0,029
6.	6,916	6,945	0,003	0,00000625	0,029
7.	6,912	6,950	0,001	0,00000225	0,038
8.	6,912	6,935	0,001	0,00000225	0,023
9.	6,916	6,935	0,003	0,00000625	0,019
10.	6,912	6,940	0,001	0,00000225	0,028
Průměr:	6,914	6,942	0,002	0,00000425	0,0280
Směr. odchylka:				0,002061	

Tab. C.5: Výsledky měření proudu u telefonu Xiaomi.

Počet měření	Zařízení [A]	Multimetr [A]	Odchylka [abs A]	Druhá mocnina [A]	Rozdíl [A]
1.	1,285	1,290	0,005	0,00002304	0,005
2.	1,280	1,284	0,000	0,00000004	0,004
3.	1,286	1,291	0,006	0,00003364	0,005
4.	1,286	1,288	0,006	0,00003364	0,002
5.	1,270	1,280	0,010	0,000104	0,01
6.	1,274	1,280	0,006	0,00003844	0,006
7.	1,286	1,290	0,006	0,00003364	0,004
8.	1,280	1,288	0,000	0,00000004	0,008
9.	1,275	1,291	0,005	0,00002704	0,016
10.	1,280	1,286	0,000	0,00000004	0,006
Průměr:	1,280	1,287	0,004	0,00002936	0,0066
Směr. odchylka:				0,005418	

Tab. C.6: Výsledky měření napětí u reproduktoru JBL.

	Zařízení [V]	Multimetr [V]	Odchylka [abs V]	Druhá mocnina [V]	Rozdíl [V]
1.	4,600	4,465	0,050	0,0025	0,135
2.	4,520	4,475	0,030	0,0009	0,045
3.	4,528	4,470	0,022	0,000484	0,058
4.	4,560	4,465	0,010	0,0001	0,095
5.	4,608	4,460	0,058	0,003364	0,148
6.	4,532	4,463	0,018	0,000324	0,069
7.	4,536	4,471	0,014	0,000196	0,065
8.	4,528	4,472	0,022	0,000484	0,056
9.	4,558	4,476	0,008	0,000064	0,082
10.	4,530	4,465	0,020	0,0004	0,065
Průměr:	4,550	4,468	0,025	0,0008816	0,0818
Směr. odchylka:				0,02969	

Tab. C.7: Výsledky měření proudu u reproduktoru JBL.

Počet měření	Zařízení [A]	Multimetr [A]	Odchylka [abs A]	Druhá mocnina [A]	Rozdíl [A]
1.	0,612	0,470	0,023	0,0005336	0,142
2.	0,625	0,480	0,010	0,0001020	0,145
3.	0,650	0,465	0,015	0,0002220	0,185
4.	0,628	0,472	0,007	0,00005041	0,156
5.	0,634	0,477	0,001	0,00000121	0,157
6.	0,633	0,482	0,002	0,00000441	0,151
7.	0,636	0,492	0,001	0,00000081	0,144
8.	0,640	0,487	0,005	0,00002401	0,153
9.	0,644	0,492	0,009	0,00007921	0,152
10.	0,649	0,480	0,014	0,0001932	0,169
Průměr:	0,635	0,480	0,009	0,0001210	0,1554
Směr. odchylka:				0,011	