



# VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

## FAKULTA ELEKTROTECHNIKY A KOMUNIKAČNÍCH TECHNOLOGIÍ

FACULTY OF ELECTRICAL ENGINEERING AND COMMUNICATION

## ÚSTAV MIKROELEKTRONIKY

DEPARTMENT OF MICROELECTRONICS

## ELEKTRONICKÁ CIGARETA

ELECTRONIC CIGARETTE

### BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

BACHELOR'S THESIS

### AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Lukáš Brím

### VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

Ing. Veronika Junasová

BRNO 2024

# Bakalářská práce

bakalářský studijní program **Mikroelektronika a technologie**

Ústav mikroelektroniky

**Student:** Lukáš Brím

**ID:** 211222

**Ročník:** 3

**Akademický rok:** 2023/24

**NÁZEV TÉMATU:**

## Elektronická cigareta

### POKYNY PRO VYPRACOVÁNÍ:

Navrhněte a realizujte elektronickou cigaretu. Nejprve se zaměřte na prostudování problematiky týkající se mechanické a elektrické stránky uvedeného zařízení. Dále proveďte rešerši dostupných možností a popište adekvátní náležitosti, kterými bude zařízení disponovat. Součástí práce bude obvodový návrh a realizace osazené desky plošných spojů, která bude schopna fungovat v několika režimech. Vybrané funkce a režimy elektronické cigarety řádně otestujte, přičemž všechny kroky detailně popište v textové části bakalářské práce.

### DOPORUČENÁ LITERATURA:

Podle pokynů vedoucího práce.

**Termín zadání:** 5.2.2024

**Termín odevzdání:** 30.5.2024

**Vedoucí práce:** Ing. Veronika Junasová

**doc. Ing. Pavel Šteffan, Ph.D.**  
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 návrh elektronické cigarety. Práce popisuje části, ze kterých se elektronické cigarety skládají. Celé zařízení napájí bateriový článek, které lze nabíjet v zařízení přes USB konektor. Navrhnuté zařízení funguje na principu zahřívání odporového drátu v podobě spirály. Celé zařízení je ovládané pomocí mikrokontroleru, díky kterému lze ovládat jednotlivé pracovní režimy. Zařízení dokáže pracovat ve třech režimech, a to konkrétně v bypass režimu, režimu teplotní kontroly a wattovém režimu. Nastavení daných režimů probíhá pomocí taktálních spínačů a následně se nastavený výkon či teplota zobrazuje na displeji.

## **Klíčová slova**

Elektronická cigareta, Li-Ion, bypass režim, režim teplotní kontroly, wattový režim, mikrokontroler STM, STM32.

## **Abstract**

This bachelor thesis focuses on the design of an electronic cigarette. The thesis describes the parts that part of an electronic cigarette. The whole device is powered by a battery cell that can be charged in the device via a USB connector. The designed device works on the principle of heating a resistive wire in the form of a spiral. The whole device is controlled by a microcontroller, which makes it possible to control the different modes of operation. The device can operate in three modes namely bypass mode, temperature control mode and watt mode. The setting of the modes is done using tactile switches and then the set power or temperature is displayed on the display.

## **Keywords**

Electronic cigarette, Li-Ion, bypass mode, temperature controll mode, watt mode, microcontroller STM, STM32.

## **Bibliografická citace**

BRÍM, Lukáš. Elektronická cigareta [online]. Brno, 2024 [cit. 2024-05-30]. Dostupné z: <https://www.vut.cz/studenti/zav-prace/detail/160774>. Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, Ústav mikroelektroniky. Vedoucí práce Veronika Junasová.

# Prohlášení autora o původnosti díla

**Jméno a příjmení studenta:** *Lukáš Brím*

**VUT ID studenta:** *211222*

**Typ práce:** *Bakalářská práce*

**Akademický rok:** *2023/24*

**Téma závěrečné práce:** *Elektronická cigareta*

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

Jako autor uvedené závěrečné práce dále prohlašuji, že v souvislosti s vytvořením této závěrečné práce jsem neporušil autorská práva třetích osob, zejména jsem nezasáhl nedovoleným způsobem do cizích autorských práv osobnostních a jsem si plně vědom následků porušení ustanovení § 11 a následujících autorského zákona č. 121/2000 Sb., včetně možných trestněprávních důsledků vyplývajících z ustanovení části druhé, hlavy VI. díl 4 Trestního zákoníku č. 40/2009 Sb.

V Brně dne 30. května 2024

-----  
podpis autora

## **Poděkování**

Děkuji vedoucí bakalářské práce Ing. Veronice Junasové za účinnou metodickou, pedagogickou a odbornou pomoc a další cenné rady při zpracování mé bakalářské práce. Dále děkuji své rodině, kolegům a kamarádům za morální podporu.

V Brně dne: 29. května 2024

-----  
podpis autora

# Obsah

SEZNAM OBRÁZKŮ .....	8
SEZNAM TABULEK.....	9
ÚVOD .....	10
<b>1. TEORIE NÁVRHU.....</b>	<b>11</b>
1.1 REŽIMY ELEKTRONICKÉ CIGARETY .....	11
1.1.1 <i>Bypass režim</i> .....	12
1.1.2 <i>Wattový režim</i> .....	12
1.1.3 <i>Režim teplotní kontrola</i> .....	12
1.2 ŽHAVÍCÍ SPIRÁLA .....	13
1.3 BATERIOVÉ ČLÁNKY .....	14
1.3.1 <i>Lithium-Iontová baterie</i> .....	14
1.3.2 <i>Lithium-Polymerová baterie</i> .....	15
1.4 MĚŘENÍ TEPLoty .....	16
1.4.1 <i>Termočlánky</i> .....	16
1.4.2 <i>Termistory</i> .....	17
1.5 SÉRIOVÉ SBĚRNICE.....	19
1.5.1 <i>UART sběrnice</i> .....	19
1.5.2 <i>Serial Periphetal Interface sběrnice</i> .....	21
1.5.3 <i>Inter-Integrated Circuit sběrnice</i> .....	22
<b>2. NÁVRH ZAŘÍZENÍ .....</b>	<b>24</b>
2.1 NAPÁJENÍ ELEKTRONICKÉ CIGARETY .....	24
2.1.1 <i>Nabíjecí obvod s měřením proudu</i> .....	25
2.2 MĚNIČE NAPĚTÍ.....	27
2.2.1 <i>Měnič napětí z baterie</i> .....	27
2.2.2 <i>Měnič napětí pro řídicí část</i> .....	29
2.3 VOLBA MIKROKONTROLERU .....	30
2.3.1 <i>Výběr programátoru</i> .....	31
2.4 GRAFICKÉ A UŽIVATELSKÉ ROZHRAŇÍ.....	32
2.5 SYSTÉM ŽHAVENÍ.....	34
2.6 MĚŘENÍ PROUDU .....	36
<b>3. OŽIVENÍ A TESTOVÁNÍ ZAŘÍZENÍ.....</b>	<b>38</b>
3.1 OŽIVENÍ DESKY PLOŠNÝCH SPOJŮ .....	40
3.2 PROGRAMOVÉ VYBAVENÍ ZAŘÍZENÍ .....	42
<b>ZÁVĚR .....</b>	<b>45</b>
<b>LITERATURA.....</b>	<b>46</b>
<b>SEZNAM SYMBOLŮ A ZKRATEK .....</b>	<b>50</b>
<b>SEZNAM PŘÍLOH.....</b>	<b>52</b>

## SEZNAM OBRÁZKŮ

Obrázek 1: Rozdělení elektronických cigaret, převzaté z [2] .....	11
Obrázek 2: Vybíjecí charakteristika Li-Ion baterie, převzaté z [15] .....	15
Obrázek 3: Vybíjecí charakteristiky Li-Po baterie, převzaté z [17] .....	16
Obrázek 4: Základní zapojení termoelektrického snímače, převzato z [19] .....	17
Obrázek 5: Teplotní závislost NTC termistoru, převzaté z [22] .....	18
Obrázek 6: Teplotní závislost PTC termistoru, převzatá z [24] .....	19
Obrázek 7: Datový paket UARTu, převzato z [25] .....	20
Obrázek 8: Zapojení SPI, převzato z [29] .....	21
Obrázek 9: I2C protokol, převzato z [33] .....	22
Obrázek 10: Datový paket, převzato z [32] .....	22
Obrázek 11: Blokové schéma elektronické cigarety .....	24
Obrázek 12: Zapojení USB-C konektoru .....	25
Obrázek 13: Nabíjecí obvod baterie .....	26
Obrázek 14: Schéma zapojení asynchronního budícího měniče na 5 V .....	28
Obrázek 15: Schéma zapojení měniče napětí s nízkým úbytkem napětí .....	30
Obrázek 16: Schéma zapojení mikrokontroleru .....	31
Obrázek 17: Schéma zapojení programátoru .....	32
Obrázek 18: Schéma zapojení k modulu SSD1306 .....	33
Obrázek 19: Schéma zapojení taktilních spínačů .....	34
Obrázek 20: Schéma zapojení systému žhavení .....	35
Obrázek 21: Spínání synchronního posilovače .....	36
Obrázek 22: Zapojení integrovaného obvodu U4 .....	37
Obrázek 23: Průřez DPS .....	38
Obrázek 24: Fotografie hotové a osazené DPS, vrchní strana vlevo, spodní strana vpravo .....	39
Obrázek 25: Kompletní elektronická cigareta .....	40
Obrázek 26: Zobrazení vstupního napětí baterie (červený průběh) a výstupní napětí měniče na 5V (modrý průběh) bez zátěže .....	41
Obrázek 27: Zobrazení vstupní a výstupní napětí na měniči z 5 V (modrý průběh) na 3,3 V (červený průběh) .....	42
Obrázek 28: Vývojový diagram .....	43
Obrázek 29: Výběr režimů na OLED displeji .....	44
Obrázek 30: Zvolený Bypass režim s měřeným napětím .....	44
Obrázek 31: Chybová hláška pro vybitou baterii .....	44



# SEZNAM TABULEK

Tabulka 1: Srovnání odporových drátů.....	14
Tabulka 2: Indikace LED diod u nabíjecího obvodu STBC08PMR [36] .....	27

# ÚVOD

V posledním dvacetiletí se rozmohl fenomén s elektronickými cigaretami. Elektronická cigareta má pomoci lidem se odnaučit kouřit postupným, ale trvalým způsobem. Pomocí snižováním dávky nikotinu v náplni si tak kuřáci pomalu odvyknou až přestanou úplně kouřit.

Bohužel elektronické cigarety jsou v mnoha uzavřených prostorách tolerovány a někdy bývá účinek opačný. Elektronická cigareta nezapáchá jako klasická cigareta, takže člověk má tendenci ji mít pořád při sobě. V elektronické cigaretě nedochází k hoření papíru, tabáku a jiných látek, a proto je elektronická cigareta zásadně méně škodlivá než klasická cigareta.

Na světovém trhu existuje spousta zařízení, která mají chytřejší elektroniku a jsou někdy až překombinovaná a složitá na ovládání. Běžnému uživateli to může připadat matoucí. Tato bakalářská práce má poukázat na to, jak lze navrhnout elektronickou cigaretu bez složitého dostávání se do nastavení.

Vzhledem ke zmíněným okolnostem a faktu, že na trhu není český výrobce elektronických cigaret, jsem se rozhodl zpracovat bakalářskou práci na téma elektronická cigareta. K rozhodnutí přispělo i to, že sám elektronickou cigaretu užívám jako prostředek pro odnaučení kouření.

V první části této práce jsou popsány pracovní režimy elektronické cigarety a všechny druhy elektronických cigaret. Podrobněji rozebrané nejčastěji používané bateriové články, teplotní senzory. Jsou zde představeny nejčastější sériové datové sběrnice mikrokontrolerů, a jak v nich funguje přenos dat.

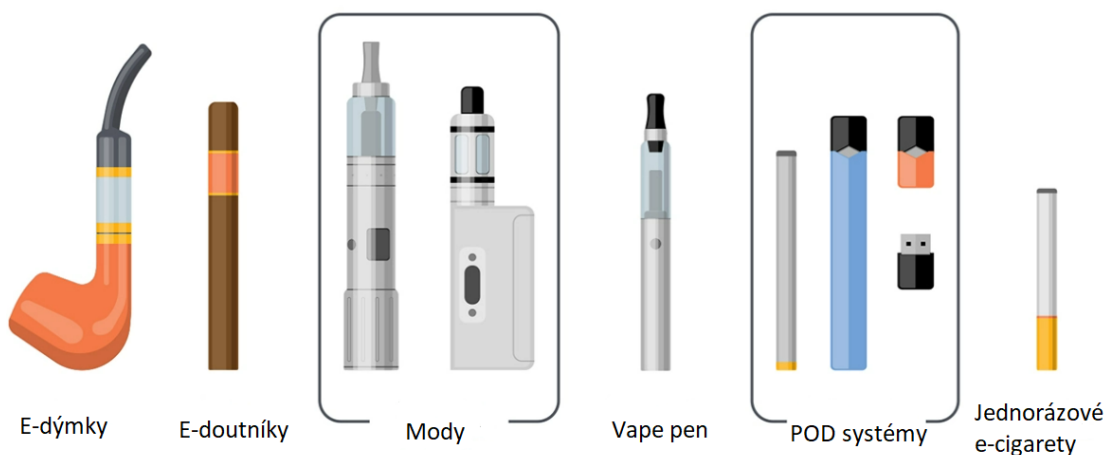
V druhé části bakalářské práce je představeno blokové schéma celého zařízení a následně popsána funkčnost jednotlivých bloků a propojení mezi nimi. Tato část se také zaměřuje na detailnější popis návrhu jednotlivých částí obvodu. Tato podkapitola se zabývá danými výpočty parametrů při návrhu schémata.

V poslední části je vysvětlen návrh desky plošných spojů, zvolená patřičná technologie výroby a následné osazení. Také zde bude ukázána navrhnutá konstrukce zařízení a následně vyobrazeno celé zařízení. Dále bude popsáno oživení a testování jednotlivých částí zařízení a popsán postup měření s následnými grafy z měření na osciloskopu. Po sléze budou vysvětleny jednotlivé funkce a pohyb v programovém vybavení.

# 1. TEORIE NÁVRHU

Elektronické cigarety (dále jen E-cigarety) existují v mnoha tvarech a velikostech. Zařízení mají buď externí baterii, anebo mají vyjímatelný bateriový článek, zahřívací složku a nádrž pro uchování náplně. E-cigarety zahříváním liquidu (náplně) produkují aerosol, který může, ale nemusí obsahovat nikotin – návykovou látku, která je v klasických cigaretách, žvýkacích tabácích a v jiných tabákových výrobcích. Liquid obsahuje také příchut' a jiné složky na podporu aerosolu. Uživatelé vdechují tento aerosol do svých plic.

E-cigarety jsou známy pod různými jmény. Někdy jsou nazývány „Vape“, „Vapo“, „Elektronka“, „mody“, „Vape pen“. Některé se dělají tak, aby vypadaly jako klasické cigarety, doutníky a dýmky, anebo aby napodobovaly nejobyčejnější předměty, například propisky, Flash disky a další. Vzhled E-cigaret lze vidět na obrázku 1. Větší zařízení, jako jsou třeba tank systémy „mody“ se nepodobají tabákovým výrobkům. [1]



Obrázek 1: Rozdělení elektronických cigaret, převzaté z [2]

V následujících podkapitolách jsou popsány základní režimy elektronické cigarety a jaké se používají baterie. Následně jsou vysvětleny termistory, které se používají nejen pro měření teploty na spirále a je uvedeno, jaké datové sběrnice používá mikrokontroler.

## 1.1 Režimy elektronické cigarety

Od dob začátků vapingu uběhlo již mnoho let, během kterého se měnila jejich technologie. Dnes v E-cigaretách existuje řada zajímavých a užitečných funkcí a režimů, které ale mohou být pro nezkušeného kuřáka matoucí. Každá E-cigareta má uvnitř alespoň jednu takovou funkci. Například jednorázové E-cigarety mají podtlakový senzor pro sepnutí žhavení topné spirály, a nemusí tak obsahovat tlačítka, tím pádem jsou kompaktnější. [3]

### 1.1.1 Bypass režim

Režim *bypass* patří k základním a nejjednodušším režimům elektronické cigarety. *Bypass* režim obchází veškerou řídicí elektroniku a žhavicí spirálou prochází napětí přímo z baterie. Jakmile u baterie dojde k poklesu napětí, tak klesne i celkový výkon zařízení, bez kontroly kapacity baterie by došlo k jejímu podbití. Tento režim využívají tzv. mechanické e-cigarety, kde cigareta má pouze baterii a spínací tlačítko. *Bypass* režim u e-cigaret s řídicí elektronikou však nevynechává bezpečnostní prvky, jako je například příliš nízký odpor žhavicí spirály nebo vybití baterie. [4]

### 1.1.2 Wattový režim

Wattový neboli výkonový režim je pro jeho jednoduchost a efektivnost nejčastěji používaný režim e-kuřáky. Pomocí tohoto režimu se nastavuje přímý výkon na žhavicí spirálu. Zobrazený výkon na displeji znázorňuje watt za sekundu na spirále a dále je zobrazeno napětí na spirále. [5]

Tento režim také nabízí funkci předžhavení spirály, který při sepnutí žhavicího tlačítka pošle na spirálu větší výkon. Po dosažení požadované teploty je výkon opět nastaven na námi zvolenou hodnotu. Této funkce se využívá především při používání robustnějších a složitějších žhavicích spirál. Typ předžhavení lze u většiny modelů nastavit pomocí písmen H/N/S (Hard/Normal/Soft). Pro wattový režim se používá odporový drát z nerezové oceli, kanthalu a nichromu. [6]

### 1.1.3 Režim teplotní kontrola

Tento režim umožňuje nastavit danou teplotu na spirále, při které se bude e-liquid odpařovat. E-cigareta si na základě zvolené teploty nastaví potřebný výkon, a tím způsobí, že teplota na žhavicí spirále bude konstantní. V momentě, kdy teplotní režim funguje správně, tak se předchází kouření na sucho. Toto je jev, kdy se vata ve spirále nestíhá zásobit e-liquidem. Žhavicí spirála vydrží oproti jiným režimům déle, a to díky udržování stálé teploty. [7]

Odpor je hlavní veličinou pro teplotní kontrolu neboli množství proudu, které prochází žhavicí spirálou. Některé odporové materiály mají stálý odpor při změně teploty, ale ty, které potřebujeme, mají proměnlivý odpor při vzrůstající teplotě. Jakmile se spirála začne zahřívat, tak jí poroste i její odpor a teplotní kontrola bude regulovat proud na požadovanou teplotu. Vzniká tak zpětnovazební smyčka, která udržuje teplotu a poskytuje konzistentní kouření. [7]

Pro teplotní kontrolu se dříve využíval odporový drát z niklu nebo titanu, ale pro větší univerzálnost se používá drát z nerezové oceli, který se dá použít i na wattový režim. Titan ani nikl nelze použít pro wattový režim, protože při vyšších teplotách uvolňují karcinogenní látky. [6]

## 1.2 Žhavicí spirála

Nedílnou součástí atomizéru v elektronické cigaretě je žhavicí spirála, která je tvořena z odporového drátu. Žhavicí spirály se dělí na dvě kategorie. Jednou jsou předpřipravené spirály do atomizéru pro žhavicí hlavy, kde žhavicí spirála je uvnitř kovové konstrukce omotaná sacím materiálem. Druhá kategorie je pouze žhavicí spirála pro tzv. udělej si sám (DIY, z angl. *Do It Yourself*), kde si kuřák připevní žhavicí spirálu do atomizéru a přidá sací materiál. V této podkapitole jsou vysvětleny druhy žhavicích spirál, a také uvedeny materiály a jejich vlastnosti. [8]

Odporové dráty jsou tvořeny z kantalů, nerezové oceli, nichromu a niklu. Žhavicí spirálu lze vytvořit jak z jednoho odporového drátu, tak i z několika propletených drátů (z angl. *braided*). Spirála může být tvořena i z několika tlustších drátů omotaným tenčím drátem, tzv. *clapton*. [9]

Se složitostí drátu se váže pojem nástupná doba (z angl. *Ramp-up Time*), která udává dobu, za kterou se žhavicí spirála nažhaví do teploty odpařování e-liquidu. Čím tlustší nebo komplikovanější drát, tím je doba rozzhavení větší. Naopak tenčí drát se zahřeje velmi rychle, ale má větší odpor. Na dobu rozzhavení má také vliv materiál, ze kterého je žhavicí spirála vytvořena. Pro wattový režim je nejrychlejší nerezová ocel, následuje nichrom, a poté kanthal. [10]

Kanthal je slitina skládající se z železa (70 %), chromu (20 – 30 %) a hliníku (4 – 7 %). Při zahřátí vzniká na drátu oxid hliníku a vznikne tak na povrchu drátu ochranná vrstva. Kanthal patří mezi vzácné slitiny, které se používají pro žhavicí spirály, protože elektronické cigarety neumožňují jeho teplotní kontrolu. Díky jeho snadné dostupnosti a nízké ceně je kanthal vhodný pro e-kuřáky, kteří si začínají vytvářet vlastní žhavicí spirály. [11, 12]

Kanthal sice nedokáže podat takovou chuť jako ostatní odporové dráty, ale je velice jednouchý na zpracování a drží svůj tvar. Jeho mechanické a odporové vlastnosti jsou tedy vhodné pro vaping. Kanthal se používá pouze pro wattový režim. [12]

Nerezová ocel je slitina tvořená z železa, chromu, niklu a uhlíku. Nerezová ocel, která se používá pro žhavicí spirály SS316L obsahuje také malé množství molybdenu (2,5 %) a manganu (2 %). Chrom se zde vyskytuje ve 13 % obsahu a zabraňuje oxidaci slitiny [11].

Tento drát je vhodný pro použití jak ve wattovém režimu, tak i pro režim teplotní kontroly. Nerezová ocel poskytuje rychlejší dobu náběhu na požadovaný výkon než ostatní dráty, protože ve stejném průměru drátu má nižší odpor. Při vypalování spirály se nerezová ocel nevypaluje na vysokém výkonu. Při vysokém výkonu se uvolňují nežádoucí chemické sloučeniny, jelikož slitina obsahuje nikl. Spirála se vytváří s mezerami mezi závity z důvodu rychlejšího vypálení. [10]

Niklový drát, také známý jako Ni200, je tvořen čistě z niklu. Nikl se rozzhaví rychleji než ostatní materiály, proto se používá jen pro režim teplotní kontroly. Výhodou niklového drátu je jeho silné podání chuti e-liquidu. Jednou z velkých nevýhod je

neudržitelnost tvaru spirály při osazení sací vatou. Další z nevýhod je vypařování niklu do vdechované páry a také nevhodnost použití pro wattový režim. Kuřáci elektronických cigaret mohou být na nikl alergičtí. [10, 12]

Nichrom se skládá z chromu (80 %) a z niklu (20 %). Při jeho vypalování vzniká oxid chromitý, který zabraňuje další oxidaci při žhavení. Nichromový drát se při vypalování chová podobně jako kanthalový drát s tím, že má menší odpor a rychleji se zahřívá. Díky podílu niklu má nichrom nižší teplotu tavení, a je tak vyžadována větší opatrnost při vypalování na vyšších teplotách. [10, 12]

Celkové porovnání drátů k výrobě spirál pro elektronické cigarety lze vidět v tabulce 1.

Tabulka 1: Srovnání odporových drátů

Kanthal	Nerezová ocel	Nikl	Nichrom
snadná manipulace	snadná manipulace	těžká manipulace	snadná manipulace
drží tvar	drží tvar	nedrží tvar	drží tvar
levný	levný	drahý	levný
dostupný	dostupný	méně dostupný	dostupný
pouze wattový režim	teplotní kontrola i wattový režim	pouze teplotní kontrola	pouze wattový režim

Z tabulky 1 vyplývá, že nejuniverzálnější drát je z nerezové oceli, který jako jediný je vhodný jak pro wattový režim, tak i pro teplotní kontrolu.

## 1.3 Bateriové články

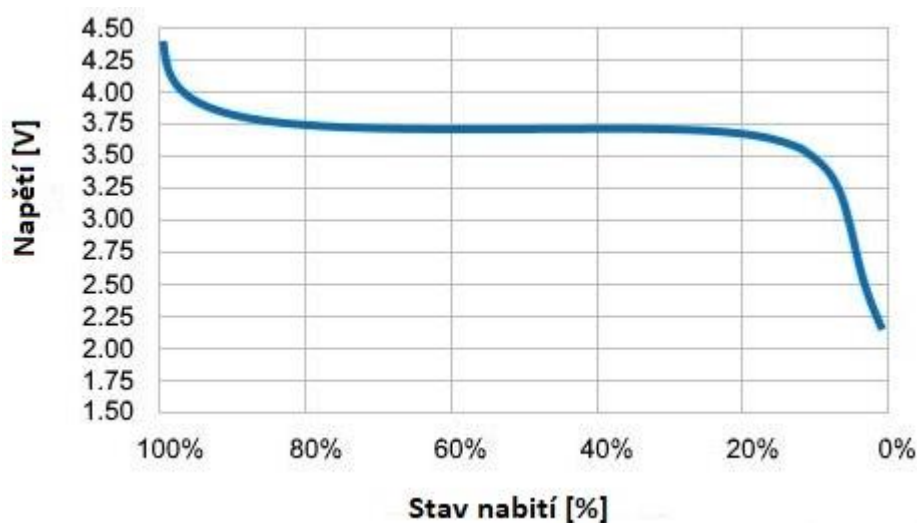
Bateriové články jsou už od dob začátku elektronických cigaret jejich nedílnou součástí. Dříve se používaly Lithium-Polymerové, pro jejich tvárnost a jejich vlastnosti. Po rozšíření trhu s e-cigaretami se začala implementovat větší a chytřejší elektronika a Lithium-Polymerové baterie nestačily s jejich kapacitou. Začaly se používat Lithium-Iontové baterie. Oba bateriové články jsou následně popsány níže.

### 1.3.1 Lithium-Iontová baterie

Lithium-Iontová (dále jen Li-Ion baterie) je tvořena z anody, katody, separátoru, elektrolytu a dvěma sběrači proudu (pozitivní a negativní). Anoda a katoda uchovávají lithium. Elektrolyt nese kladně nabitě ionty lithia z anody ke katodě, a naopak přes separátor. Pohyb lithiových iontů způsobí vytvoření volných elektronů na anodě, které vytvoří elektrický náboj na kladném sběrači proudu (pólu). Elektrický proud následně teče z kladného pólu přes nabíjené zařízení (mobilní telefon, elektronická cigareta atd.) až k negativnímu pólu. Separátor blokuje proud elektronů uvnitř baterie. [13]

Jednou z hlavních výhod Li-Ion baterií je vysoká hustota energie oproti ostatním druhům bateriových článků. Díky tomu je lze použít například pro mobilní telefony nebo třeba pro elektronické cigarety (články 18650 a 21700/20700). Další výhodou je napětí

článku, které je okolo 3,6 V a je konstantní po celou dobu výdrže baterie, než se baterie vybije úplně. Vybíjecí charakteristiku lze vidět na obrázku 2. [14]

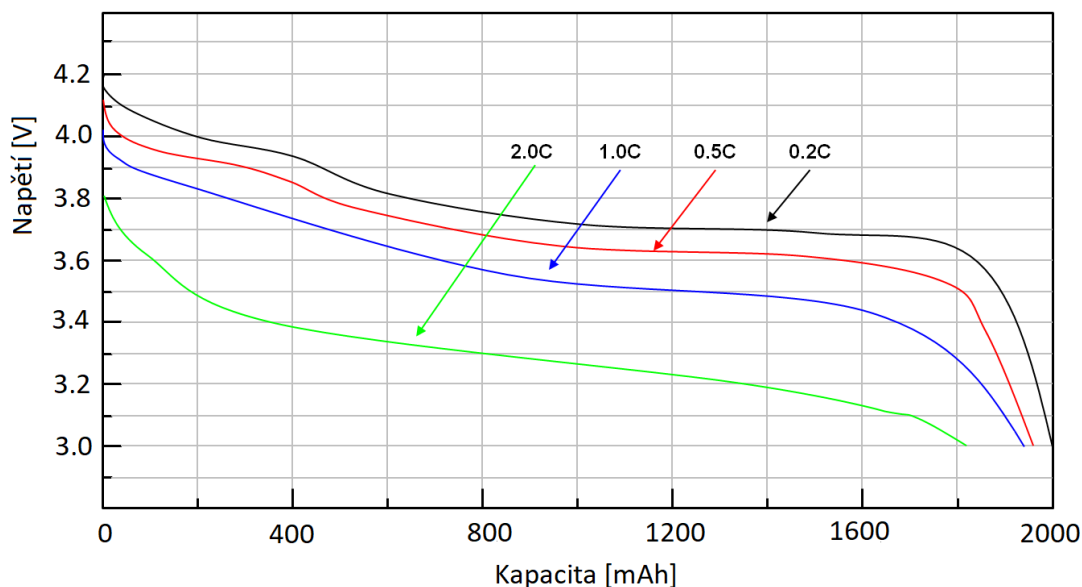


Obrázek 2: Vybíjecí charakteristika Li-Ion baterie, převzaté z [15]

Stárnutí baterie patří mezi hlavní nevýhody Li-Ion baterie. Mají 500–1000 nabíjecích cyklů, než se jejich kapacita zmenší, a jejich následná výměna je obtížnější při zabudování baterie v zařízení. Další z nevýhod je přeprava baterií. Při přepravě ať už letecké, pozemní nebo lodní, musí být každý článek speciálně zabalen a jednotlivé póly musí být zakryty před vyzkratováním. Kvůli tomu může být počet převážených baterií omezen, což způsobí zdražení baterie. [14]

### 1.3.2 Lithium-Polymerová baterie

Lithium-Polymerová (dále jen Li-Po baterie) je vyrobena vrstvením anody, katody a separátoru do obdélníkovitého nebo válcovitého tvaru. Jednotlivé anody a katody jsou vždy spojené spirálovitě. Mezi nimi je vložena vysoko porézní polyethylenová vrstva. V Li-Po bateriích se používá organický tekutý elektrolyt. Kvůli nežádoucím efektům, jako je přehřátí baterie, příp. následná exploze, se do baterie umísťují bezpečnostní termočlánky s kladným teplotním koeficientem (PTC, z angl. *Positive Temperature Coefficient*). Bateriové články mají napětí 3,6 V a vybíjecí charakteristiku lze vidět na obrázku 3. Články lze zapojovat k sobě sériově, nebo paralelně dle požadovaného celkového napětí. [16]



Obrázek 3: Vybíjecí charakteristiky Li-Po baterie, převzaté z [17]

Li-Po baterie jsou dobíjecí a dají se vyrobit v různých tvarech. Tyto dvě vlastnosti jsou velkými výhodami oproti ostatním bateriím. Mezi výhody také patří i nízká míra samovybití, přibližně 5 % za měsíc. [17]

Nevýhodou Li-Po bateriových článků je méně nabíjecích cyklů, mezi 500 až 800 cykly. V náročnějších zařízeních mají životnost zhruba 250 až 500 nabíjecích cyklů. Bateriové články jsou náročnější na skladování kvůli náchylnosti chemických vazeb uvnitř článku. Kvůli špatnému skladování může dojít až k explozi baterie. Další nevýhodou je složitější a dražší přeprava. [17]

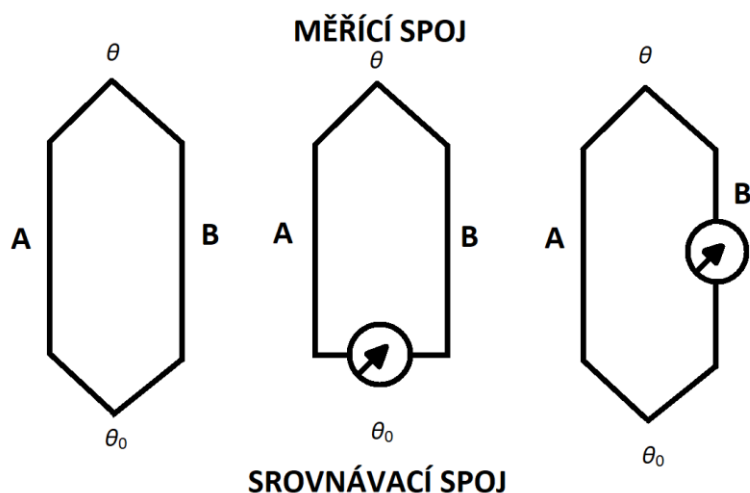
## 1.4 Měření teploty

Nedílnou součástí elektronických cigaret je měření teploty, které může být změřeno různými teplotními senzory. Tato podkapitola je věnována popisu termočlánků, jejich fungování, vysvětlení jejich vlastností a tvarů. Následně jsou popsány jejich charakteristiky.

### 1.4.1 Termočlánky

Termočlánky fungují na principu Seebeckova jevu, kdy dva vodiče A a B rozdílných materiálů jsou spojeny na konci v jednom bodě a na druhém konci do měřicího přístroje. Ohřátím jednoho konce vzniká termoelektrické napětí vlivem rozdílné práce elektronu z kovu. [18, 19] Při měření termoelektrického napětí lze využít zapojení termoelektrického snímače, viz obrázek 4.





Obrázek 4: Základní zapojení termoelektrického snímače, převzato z [19]

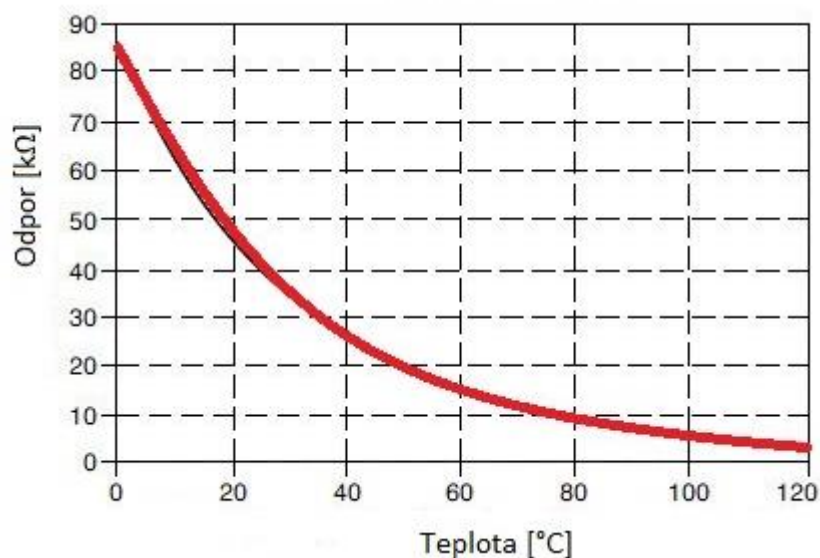
Jeden z bodů spojení označujeme jako měřicí spoj, druhý jako srovnávací spoj. Teplota srovnávacího spoje  $\theta_0$  musí být konstantní, nebo se kompenzuje vliv termoelektrického napětí. Pro změření termoelektrického napětí se musí připojit měřicí přístroj. [19]

#### 1.4.2 Termistory

Termistory jsou teplotně závislé rezistory. Slovo termistor je odvozeno z anglických slov *thermal* a *resistor*. Jsou tvořeny z oxidů kovů, které se shlukují nejčastěji do perliček, disků a tyček (podobně jako rezistory). Termistory se dělí podle typu na termistory se záporným teplotním koeficientem (NTC, z angl. *Negative Temperature Coefficient*) a termistory s kladným teplotním koeficientem PTC. [20]

##### **Termistory se záporným teplotním koeficientem**

U NTC termistorů při vzrůstající teplotě jejich hodnota odporu klesá, viz obrázek 5. Jsou tvořeny z manganu, kobaltu, mědi, titanu, železa a niklu. Na výrobu se používají směsi dvou a více metaloxidových prášků těchto kovů. Díky různým poměrům a kombinacím prášků vzniká široká škála jednotlivých druhů termistorů a jejich závislostí. Provozní teploty NTC termistorů mohou dosahovat od  $-200\text{ °C}$  až po  $1000\text{ °C}$ . Z hlediska tvaru se NTC termistory vyrábějí ve tvaru perliček, které mají vývody z platinové slitiny zasazené přímo do těla termistoru. Dále se vyrábějí s metalizovanými kontakty, které jsou vytvořeny metalizací plošek na povrchu termistoru, nejčastěji jako disky, SMD apod. [21]



Obrázek 5: Teplotní závislost NTC termistoru, převzaté z [22]

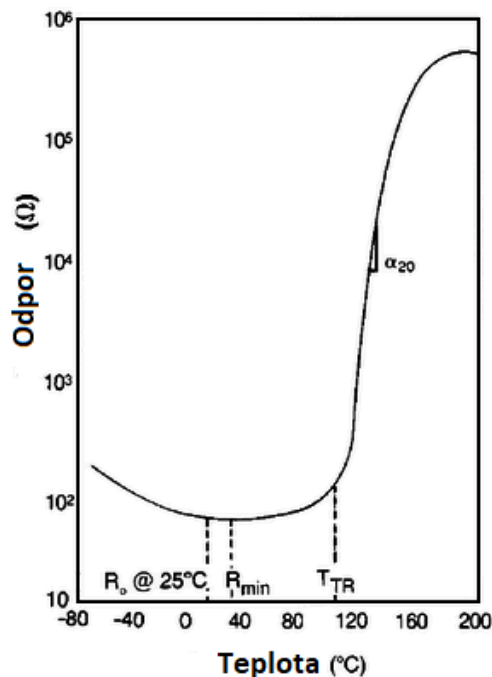
NTC termistory jsou velikostně menší a mají rychlou odezvu oproti ostatním teplotním senzorům. Jejich výhodou je oproti článkům značná citlivost, stabilita a přesnost při nižších teplotách. [23]

### **Termistory s kladným teplotním koeficientem**

Tyto termistory jsou teplotně závislé keramické rezistory, které se používají při potřebě velkého přírůstku odporu v určitém rozsahu teplot. Existují dva typy PTC termistorů, jsou to silistory, které jsou teplotně závislé křemíkové rezistory a druhý typ jsou pozistory. Pozistory se řadí mezi klasické PTC termistory, které jsou tvořeny například z feroelektrické keramiky a používají se jako pojistky. [21]

Silistory mají téměř konstantní kladný teplotní koeficient (okolo 0,77 %/°C), ale při teplotě nad 150 °C mohou vykazat i záporný koeficient. Tyto druhy se nejčastěji používají k teplotní kompenzaci obvodů s polovodiči v rozsahu -60 °C až 150 °C. [21]

PTC termistory mají nelineární závislost odporu na teplotě, což je znázorněno na obrázku 6. Odpor termistoru nejdříve mírně klesá a po dosažení Curieovy teploty začne strmě růst. Když vzroste odpor zhruba o tři řády, teplota se rapidně nezvětší, hodnota odporu začne mírně klesat. [24]



Obrázek 6: Teplotní závislost PTC termistoru, převzatá z [24]

Počáteční odpor termistoru je  $R_0$  při pokojové teplotě, minimální odpor  $R_{min}$ , teplota přechodu  $T_{TR}$  a teplotní koeficient  $\alpha$ , který dosahuje svého maxima tehdy, kdy dosahuje několik stupňů Celsia od přechodné teploty  $T_{TR}$ .  $T_{TR}$  je teplota, při které je odpor termistoru v poměru  $R_{min}$ . [24]

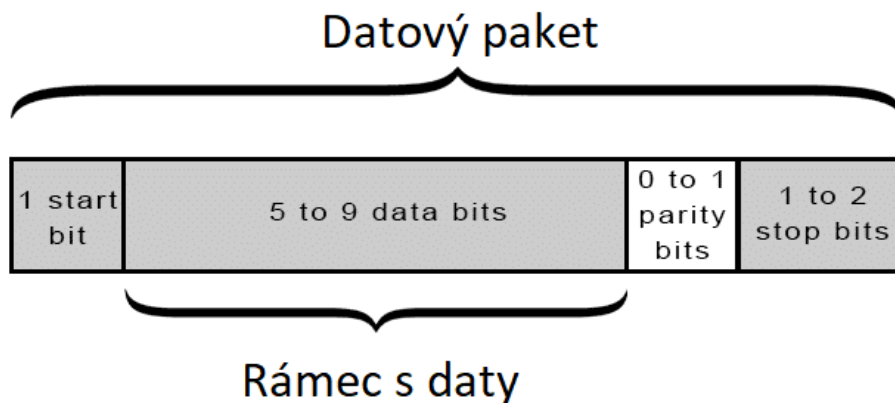
## 1.5 Sériové sběrnice

V této podkapitole jsou popsány základní datové sběrnice mikrokontroleru, které se používají pro různé účely, ať už pro zobrazování dat na displeji nebo pro A/D, D/A převodníky.

### 1.5.1 UART sběrnice

Univerzální asynchronní přijímací/vysílací sběrnice (UART, z angl. *Universal Asynchronous Receiver – Transmitter*) posílá data na dvou vodičích. Jeden vodič je pro přijímání Rx (z angl. *Receive*) a druhý je pro odesílání Tx (z angl. *Transmit*). Tyto dva vodiče jsou propojené vždy mezi dvěma UART-y jednotlivých zařízení a funguje tu úplný duplex (oboustranný přenos dat). UART posílá data bez hodinového signálu, který by data posílal synchronně, a za každý paket s daty přiřadí startovací a ukončovací bit. Komunikace mezi UART-y musí probíhat na stejné přenosové rychlosti (angl. *baud rate*). Přenosová rychlost udává rychlost přenášených dat měřených v jednotkách bitů za jednu sekundu (z angl. *bps, bit per second*). Rychlost mezi dvěma UART-y se může lišit maximálně o 10 %, než data začnou být příliš nečitelná. [25]

Data jsou posílána paralelně z datové sběrnice přes UART do datové sběrnice mikrokontroleru, procesoru, nebo do jiného zařízení. Jakmile vysílací UART obdrží data ze sběrnice, přiřadí jim paritní bit a ukončovací bit (STOP bit), tím se vytvoří datový paket, který lze vidět na obrázku 7. [25]



Obrázek 7: Datový paket UARTu, převzato z [25]

Startovacímu bitu je v případě neodesílání žádných dat přidělena napěťová úroveň 1 a před začátkem přenosu se nastaví na 0. Jakmile přijímací strana zaznamená změnu napěťových úrovní, začne číst data z datového rámce. [26]

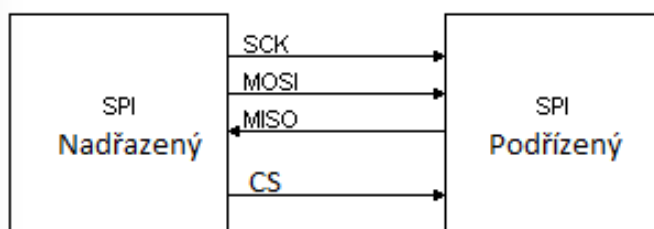
V datovém rámci se nacházejí odesílaná data, která mohou být 5-bitová, eventuálně 9-bitová, případně 8-bitová při použití paritního bitu. Data se posílají od nejméně významného bitu (LSB, z angl. *Least Significant Bit*). [26]

Paritní bit se stará o lichost nebo sudost odeslaných bitů, které mohou být během přenosu poškozeny elektromechanickým rušením, neshodou přenosové rychlosti nebo velkou vzdáleností mezi UART-y. Přijímací UART si přečte data a následně spočítá počet bitů s napěťovou úrovní 1 a určí, jestli je lichý nebo sudý. V okamžiku, kdy je počet sudý, tak parita je v 0 (sudá parita), pro lichý počet bude parita v 1. Přenos dat je úspěšný v případě, že se data shodují s paritou, ale jakmile parita je na 0 a data jsou lichá, nebo naopak parita je 1 a data jsou sudá, tak UART ví, že se data pozměnila. [26, 27]

Ukončovací bit označuje konec datového paketu a může být velký 1 až 2 bity. Pro ukončení přenosu je potřeba, aby se tento bit udržoval na vyšší napěťové úrovni – logická 1. [27]

### 1.5.2 Serial Periphetal Interface sběrnice

Serial Periphetal Interface (dále jen SPI) sběrnice je jedna z několika sériových externích datových sběrnic, které se vyznačují propojením dvou a více komunikujících uzlů. Jeden uzel se vždy považuje za nadřazenou sběrnici a ostatní uzly musí být nastavené jako podřízené sběrnice. Nadřazená sběrnice generuje hodinový signál a je vedena vodičem označován jako SCK. Signál je následně rozeslán do všech ostatních komunikačních uzlů a dochází tak k obousměrnému a synchronnímu přenosu dat. Kromě SCK jsou uzly propojeny dvěma vodiči MISO (*Master In, Slave Out*) a MOSI (*Master Out, Slave In*), které se starají o oboustranný přenos. Poslední z důležitých signálů, který se používá k výběru některé podřízené sběrnice, je CS (*Chip Select*). Zapojení mezi nadřazenou a podřízenou sběrnici lze vidět na obrázku 8. [28]



Obrázek 8: Zapojení SPI, převzato z [29]

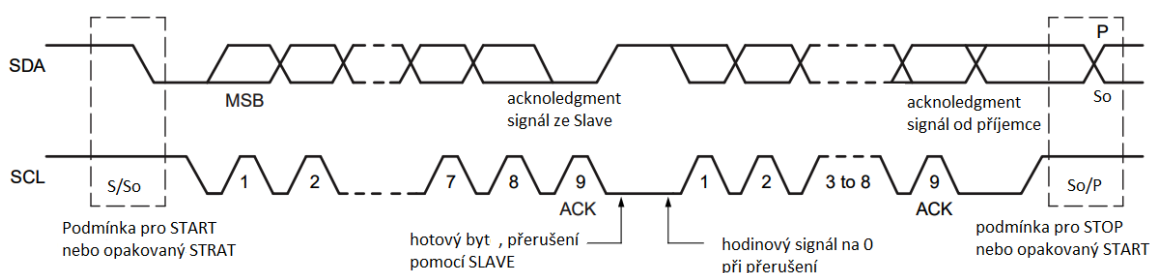
Přenos dat funguje na principu posílání jednotlivých bitů postupně mezi zařízeními s tím, že se zároveň pošle hodinový signál z nadřazeného zařízení. Pomocí posuvného registru se data MOSI posílají společně s SCK a ve stejnou chvíli, kdy další posuvný registr obdrží data z MISO. Nadřazené zařízení vždy zahajuje přenos pomocí hodinového signálu a podřízená zařízení jsou vybírána pomocí CS, který je řízen softwarově. [30]

Díky své implementační jednoduchosti se SPI sběrnice používají ke komunikaci pro paměti EEPROM (z angl., *Electrically Erasable Programmable Read-Only Memory*), A/D a D/A převodníky a mnoho dalších. Jedna z výhod SPI sběrnice je její vysoká rychlost. Běžně se frekvence pohybuje v rozsahu od 1 MHz po 10 MHz a při malé kapacitě spoje je možné dosáhnout až 70 MHz, tudíž počet přenesených bytů za sekundu je  $140 \cdot 10^6$ . Další výhodou je elektrické rozhraní sběrnice a přenosový protokol, protože SPI je v podstatě řada externě zapojených posuvných registrů, tím pádem je posun tvořen jednotným hodinovým signálem. [28]

Jedna z nevýhod SPI sběrnice je možnost pouze jednoho zařízení, které funguje jako nadřazené zařízení. Použití více nadřazených zařízení by vyžadovalo zkomplikování celé topologie SPI. U SPI je možné použít několik metod pro synchronizaci dat hodinovým signálem, jako je například synchronizace na náběžnou či sestupnou hranu. To způsobí, že mikrokontrolery obsahují konfigurační registry, kterými se určuje, která metoda se zvolí. Poslední nevýhodou je použití čtyř vodičů pro oboustranný přenos dat. [28]

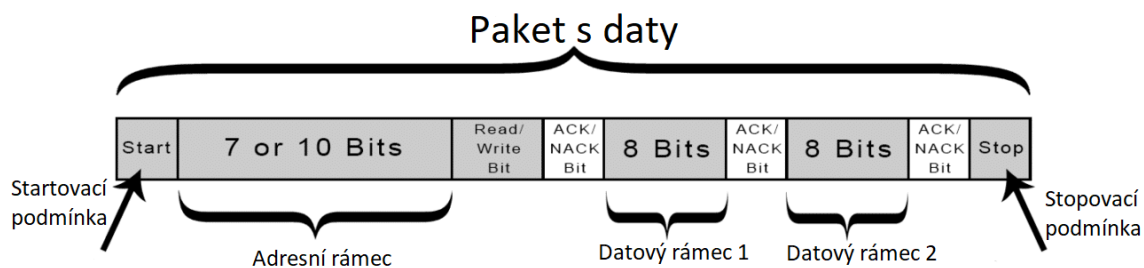
### 1.5.3 Inter-Integrated Circuit sběrnice

*Inter-Integrated Circuit* (I2C) sběrnice je kombinací UART a SPI. Lze použít několik podřazených zařízení a připojit je na jedno nadřazené, ale lze připojit i několik nadřazených zařízení k ovládání jednoho podřízeného. Tento způsob je vhodný, jestliže se požaduje zapisování dat do paměti od několika mikrokontrolerů najednou a následné zobrazení na displeji. Stejně jako v případě UART sběrnice, I2C sběrnice také používá dva vodiče pro oboustrannou komunikaci. Jeden je pro sériová data (SDA, z angl. *Serial Data*), který slouží pro přenos dat mezi nadřazeným a podřazeným zařízením a druhý sériový hodinový signál (SCL, z angl. *Serial Clock*). K vodičům SDA a SCL jsou připojeny na napájení mikrokontroleru přes *pull-up* rezistory. I2C protokol je mnohem složitější než u UARTu nebo SPI, jak lze vidět na obrázku 9. [31,32]



Obrázek 9: I2C protokol, převzato z [33]

Podmínku pro START zajišťuje nadřazené zařízení, které dává najevo podřízeným, že se připravuje ke komunikaci. Jakmile se tato podmínka splní, všechna podřízená zařízení začnou odposlouchávat data na sběrnici a nadřazené nastaví SDA na 0 a SCL na 1. V případě módu několikanásobného nadřazeného zařízení, kdy se připojí více nadřazených zařízení najednou, se připojí to, které bylo rychlejší. Celý paket dat lze vidět na obrázku 10. [33]



Obrázek 10: Datový paket, převzato z [32]

Následně se posílá adresní rámeček, který je poslán během celé komunikace hned po první startovací podmínce. Nadřazené zařízení určí adresu podřízenému zařízení, se kterým chce komunikovat. Komunikovat je možné pomocí 7-bitové nebo 10-bitové adresace. V 7-bitové adresaci se posílá jako první adresa s nejvýznamnějším bitem (MSB,

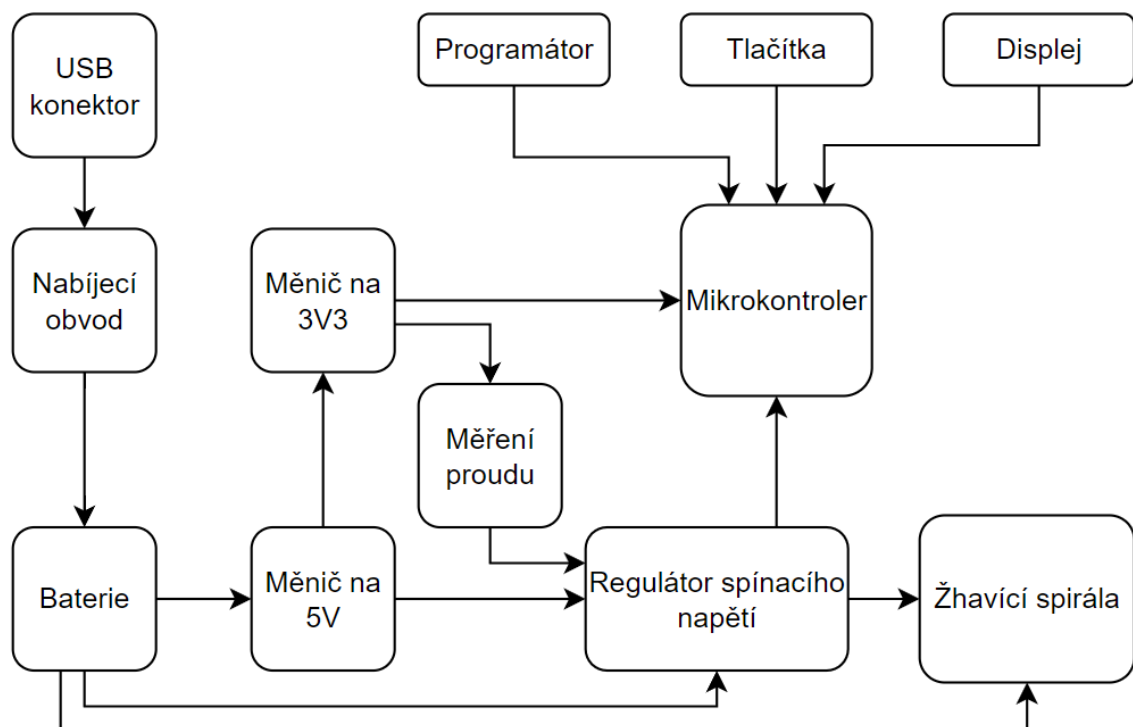
z angl. *Most Significant Bit*). Následuje bit pro čtení/zapisování (R/W, z angl. *Read/Write*), kde 0 znázorňuje zápis a 1 čtení. Tato adresace je limitována pouze na 127 zařízení, a proto se pro složitější komunikaci používá 10-bitová adresace, kde počet zařízení je zhruba desetinásobný. [33]

Datový rámeček se posílá těsně po adresním rámečku. Tento rámeček lze posílat obousměrně, záleží na R/W bitu. Nadřazené zařízení bude pokračovat v posílání hodinového signálu a zařízení může posílat požadovaná data. Každý datový rámeček se posílá po osmi bitech, ale MSB je první v pořadí. Za každým datovým rámečkem následuje schvalovací bit (ACK/NACK, z angl. *Acknowledge/Not Acknowledge*). ACK musí být doručen před dalším odesláním datového rámečku. [33]

Nadřazené zařízení musí poslat podmínku pro STOP podřazeného zařízení, po odeslání všech datových rámečků. Podmínka pro STOP je skok napětíové úrovně z 0 na 1 na SDA a z 0 na 1 pro SCL, které zůstane na logické 1. [33]

## 2. NÁVRH ZAŘÍZENÍ

Hlavním cílem návrhu je vytvoření elektronické cigarety dle stanovených požadavků. Návrh obsahuje napájení, měření proudu na baterii, napěťové měniče, mikrokontroler a jeho programátor, OLED (z angl. *Organic Light-Emitted Diode*) displej, regulátor spínacího napětí a žhavicí spirálu jakožto zátěž. Přepínání mezi pracovními režimy elektronické cigarety je provedeno pomocí tlačítek. Zapojení jednotlivých funkčních bloků je ukázáno na obrázku 11.



Obrázek 11: Blokové schéma elektronické cigarety

V této kapitole jsou detailně popsány jednotlivé bloky návrhu elektronické cigarety. Dále jsou zde provedeny výpočty pro správnou funkčnost jednotlivých komponentů.

### 2.1 Napájení elektronické cigarety

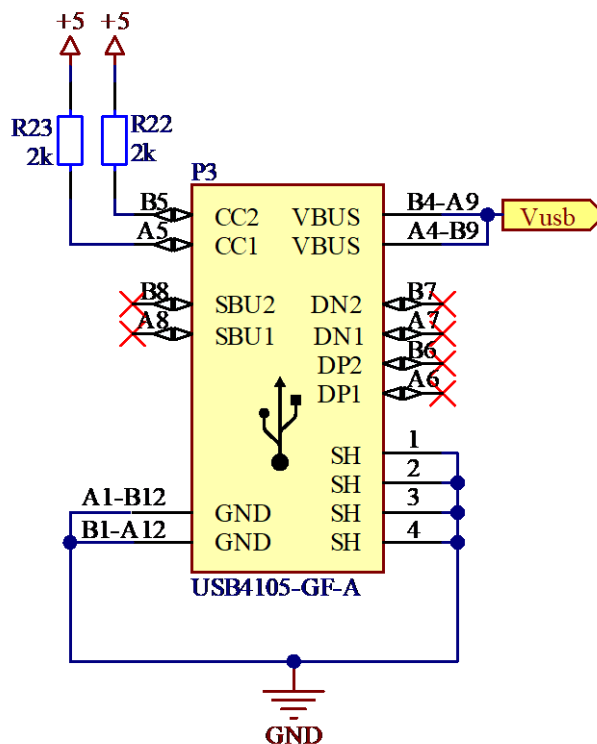
Elektronické cigarety jsou napájeny Li-Ion bateriovým článkem buď zabudovaným, nebo odnímatelným článkem typu 18650 nebo 21700. [34] Pro tento návrh je nutné, aby byl zvolen takový bateriový článek, který dodá v bypass režimu alespoň 100 W. Potřebný proud  $I$  je dle vztahu:

$$I = \frac{P}{U} = \frac{100}{4,2} = 23,8 \text{ A}, \quad (2.1)$$



kde  $P$  je požadovaný výkon a  $U$  je maximální napětí baterie a výsledný proud je 23,8 A.

Jelikož baterie 21700 poskytuje větší proud při nepřetržitém vybíjení, byl zvolen typ INR21700-30T od firmy Samsung [35]. Kapacita baterie je 3000 mAh s maximálním napětím 4,2 V. Její jmenovité napětí je 3,6 V a maximální proud při nepřetržitém vybíjení je 35 A. Bateriový článek se dá nabíjet dvěma způsoby. Buď pomocí externí nabíječky anebo nabíjením v zařízení přes USB-C konektor. O nabíjení baterie se stará nabíjecí obvod, který je napájen ze sítě skrze USB-C konektor, jehož zapojení je znázorněno na obrázku 12.



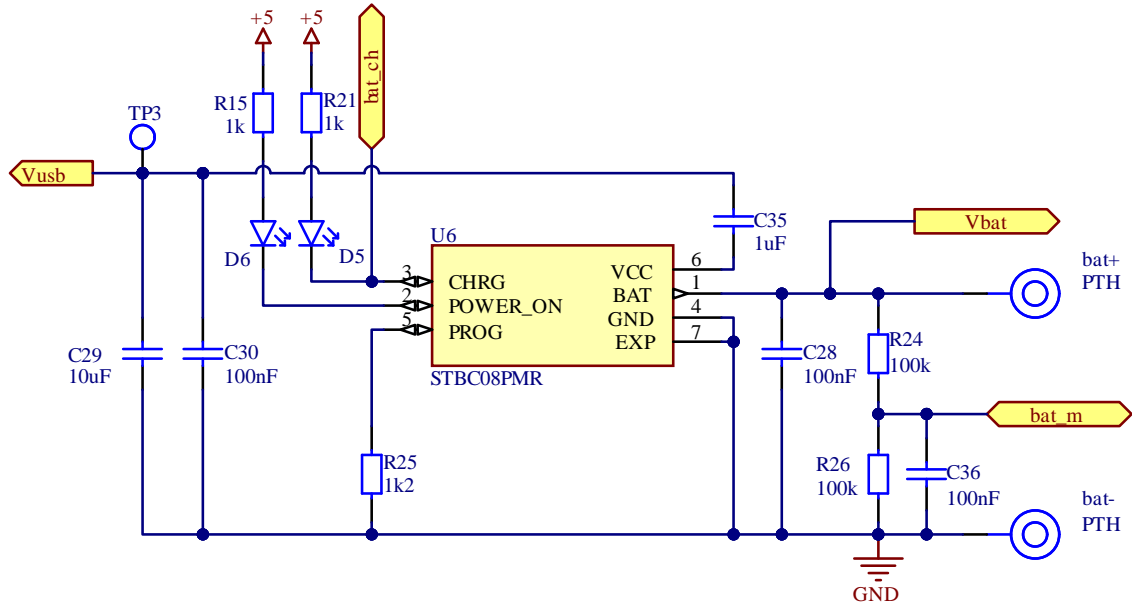
Obrázek 12: Zapojení USB-C konektoru

Konektor P3 slouží k připojení USB kabelu na dobíjení baterie, a proto byl zvolen USB4105-GF-A. Vývody SH, GND jsou uzemněné z důvodu stínění signálu. Jelikož přes USB konektor se pouze nabíjí baterie, tak vývody DN a DP, které slouží pro přenos dat, jsou nezapojené. Na USB-C konektor jsou přivedeny *pull-up* rezistory R22 a R23 s hodnotou 2 k $\Omega$ , které jsou připojeny na vývody CC1 a CC2. Dále napětí z USB-C konektoru  $V_{usb}$  jde do nabíjecího obvodu.

### 2.1.1 Nabíjecí obvod s měřením proudu

Nabíjecí obvod se stará o nabíjení baterie, aniž by bylo zapotřebí vyjmout baterii ze zařízení. Nabíjecí čip byl vybrán STBC08PMR od firmy STMicroelectronics. Tento čip je schopen nabíjet Li-Ion a Li-Pol baterie [36]. U tohoto nabíjecího obvodu není potřeba připojovat vnější měřicí rezistor ani blokovací diodu na vstupní napětí, což je znázorněno

na obrázku 13. Vnitřní blokovací systém je schopen regulovat proud jakmile teplota přechodu vzroste, aby ochránil zařízení při vysokém výkonu nebo při změně teplotních podmínek [36].



Obrázek 13: Nabíjecí obvod baterie

Nabíjecí napětí je přímo dáno na 4,2 V a nabíjecí proud je určen rezistorem, který je zapojen mezi vývod PRG a zem, avšak tento proud je maximálně 0,8 A. Hodnota rezistoru byla vypočtena pomocí vzorce 2.1

$$R_{PROG} = 1000 * \frac{V_{PROG}}{I_{BAT}} [k\Omega], \quad (2.1)$$

kde proud  $I_{BAT}$  0,8 A je nabíjecí proud a  $V_{PROG}$  je napětí z USB-C konektoru 5 V, ke kterému je nutné dle katalogového listu přičíst 0,3 V [36]. Po dosazení hodnot do rovnice 2.1 je získána hodnota 6,625 k $\Omega$ .

$$R_{PROG} = 1000 * \frac{5 + 0,3}{0,8} = 6,625 k\Omega \rightarrow R_{PROG} = 6,8 k\Omega, \quad (2.2)$$

kde výsledná hodnota rezistoru se nepohybuje v řadě E24, ve které probíhá výběr hodnot, tudíž se vybrala nejbližší hodnota v této řadě a tou je 6,8 k $\Omega$ . Výsledný nabíjecí proud je nutno znovu přepočítat s reálnou hodnotou rezistoru dle rovnice 2.3:

$$I_{BAT} = \frac{V_{PROG}}{R_{PROG}} * 1000, \quad (2.3)$$

po dosazení do rovnice 2.3 je zjištěn výsledný nabíjecí proud o hodnotě 0,779 A, viz rovnice 2.4:

$$I_{BAT} = \frac{5 + 0,3}{6800} * 1000 = 0,779 \text{ A.} \quad (2.4)$$

Nabíjecí cyklus je automaticky přerušen jakmile proud, který teče do baterie, dosáhne desetiný hodnoty na rezistoru R25 a napětí na baterii klesne na 2,9 V. Při odpojení nabíjecího napětí, tudíž vypojení kabelu z USB-C konektoru, se STBC08PMR vypne a do čipu z baterie může projít maximálně 2  $\mu$ A. [36]

Nabíjecí obvod disponuje dvěma LED diodami D5 a D6, které signalizují, jestli se baterie nabíjí, anebo nabíjení skončilo. Další indikace slouží pro nedostatečné napájecí napětí. V tabulce 2. lze nalézt kombinace rozsvícených LED diod.

Tabulka 2: Indikace LED diod u nabíjecího obvodu STBC08PMR [36]

Vývod POWER ON	Vývod CHRG	Funkce
0	0	před nabíjecí nebo nabíjecí mód (VCC > 2,9 V)
0	1	pohotovostní režim (nabíjení skončilo), nebo odpojen R25
1	1	pedostatečné napájení

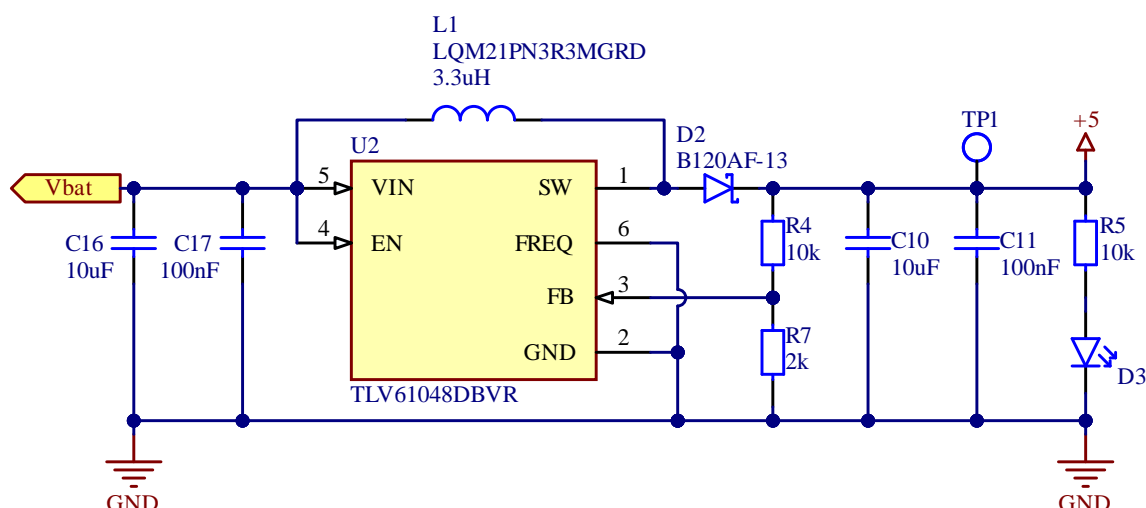
Ke sledování stavu nabití baterie byl použit dělič napětí R24 a R25, který umožňuje sledovat stav nabití pomocí displeje přes mikrokontroler. K rezistoru R26 je paralelně připojen keramický kondenzátor C36, aby odfiltroval vysokofrekvenční šum. Dále je z vývodu CHRG vyveden signál do mikrokontroleru pro zobrazení stavu nabíjení na OLED displeji. [36]

## 2.2 Měníče napětí

Kvůli postupnému vybíjení baterie, a tudíž nekonstantnímu napětí, je nutné do obvodu zapojit měniče napětí, které toto napětí budou udržovat na požadovaných hodnotách. Byly navrženy dva regulátory napětí, jelikož jednotlivé komponenty vyžadují různou napěťovou úroveň.

### 2.2.1 Měníč napětí z baterie

Měníč napětí z baterie na 5 V napájí výkonovou část obvodu a byl zvolen asynchronní budící měnič TLV61048DBVR od firmy Texas Instrument [37]. V obvodu je označen jako U2 a jeho zapojení lze vidět na obrázku 14. Měníč pracuje v proudovém režimu s kvazi konstantní frekvencí s implementovanou kompenzační smyčkou. Spínací frekvence je volitelná mezi 600 kHz a 1 MHz. Kvůli velikosti součástek byla zvolena frekvence 1 MHz. Hlavní výhodou vyšší spínací frekvence je také nižší zvlnění výstupního napětí. Této frekvence je dosaženo tím, že se uzemní vývod FREQ. [37]



Obrázek 14: Schéma zapojení asynchronního budícího měniče na 5 V

Hodnotu výstupního napětí určuje dělič napětí R1 a R2, který je závislý na referenčním napětí měniče. Pro výpočet děliče napětí je nutné si zvolit hodnotu odporu R2 a dále provést výpočet dle rovnice 2.5:

$$R_1 = \left( \frac{V_{OUT}}{V_{REF}} - 1 \right) \cdot R_2 \quad [\Omega], \quad (2.5)$$

kde  $V_{OUT}$  je požadované napětí,  $V_{REF}$  je referenční napětí měniče a  $R_2$  je určený odpor [37]. Po dosazení hodnot do rovnice 2.5 vyjde odpor následovně:

$$R_1 = \left( \frac{5}{0,8} - 1 \right) \cdot 2 \cdot 10^3 = 10,5 \text{ k}\Omega, \quad (2.6)$$

kde výsledný odpor se zvolí podle odporové řady E24 a nejbližší hodnota je 10 k $\Omega$ . Poté je potřeba znovu přepočítat výstupní napětí úpravou rovnice 2.5:

$$V_{OUT} = 0,8 * \left( \frac{10 * 10^3}{2 * 10^3} + 1 \right) = 4,8 \text{ V}. \quad (2.7)$$

Zvolení hodnoty cívky L1 závisí na proudu, který jí prochází. Proud cívkou  $I_L$  lze určit vztahem 2.8:

$$I_L = \frac{V_{OUT} \cdot I_{OUT}}{V_{IN} \cdot \eta} \quad [mA], \quad (2.8)$$

kde  $V_{OUT}$  je výstupní napětí měniče,  $I_{OUT}$  výstupní proud měniče,  $V_{IN}$  napětí na baterii a  $\eta$  je efektivita měniče, která je 80 % [37]. Kvůli rezervě ve výpočtech byly zvoleny

hodnoty pro vybitou baterii a maximální proud zátěže. Po dosazení hodnot do rovnice 2.8 se získá proud, který prochází cívkou:

$$I_L = \frac{5 \cdot 200 \cdot 10^{-3}}{3,5 \cdot 100} = 2,86 \text{ mA}. \quad (2.9)$$

Dále je potřeba vypočítat proudové zvlnění  $\Delta I_{L(P-P)}$ , které je podle vztahu:

$$\Delta I_{L(P-P)} = \frac{V_{IN} \cdot (V_{OUT} + 0,8 - V_{IN})}{L \cdot f \cdot (V_{OUT} + 0,8)} \text{ [mA]}, \quad (2.10)$$

kde  $L$  je zvolená indukčnost  $3,3 \mu\text{H}$  a  $f$  je frekvence [37]. Po dosazení hodnot do rovnice 2.10 vyjde proudové zvlnění následovně:

$$\Delta I_{L(P-P)} = \frac{3,5 \cdot (5 + 0,8 - 3,5)}{3,3 \cdot 10^{-6} \cdot 1 \cdot 10^6 \cdot (5 + 0,8)} = 420,5 \text{ mA}. \quad (2.11)$$

Poté lze vypočítat špičkový proud  $I_{L(P)}$ , který prochází cívkou dle vztahu:

$$I_{L(P)} = I_L + \frac{\Delta I_{L(P-P)}}{2} \text{ [mA]}, \quad (2.12)$$

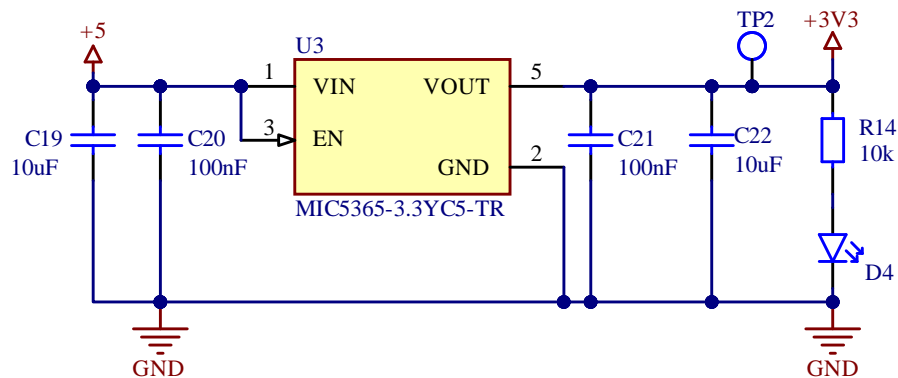
Po dosazení hodnot do rovnice 2.12 se získá špičkový proud:

$$I_{L(P)} = 2,86 + \frac{420,5}{2} = 213 \text{ mA}. \quad (2.13)$$

Pro usměrnění proudu na výstupu byla použita Schottkyho dioda, protože má menší úbytek napětí než klasická polovodičová dioda, a také protože zvládá frekvenci 1 MHz. Dále pro ověření funkce obvodu byla použita zelená LED dioda D3 s předřadným odporem R5, jehož odpor byl zvolen  $10 \text{ k}\Omega$ . Tato hodnota byla zvolena proto, jelikož při o řád nižší hodnotě LED dioda oslňovala.

### 2.2.2 Měníč napětí pro řídicí část

Jelikož je potřeba napájet zbytek zařízení  $3,3 \text{ V}$  a baterie nám poskytuje nestabilní napětí, byl navrhnut měnič napětí s nízkým úbytkem napětí tzv. LDO (z angl. *Low Drop-Out regulator*). Pro náš případ byl zvolen lineární LDO MIC5365-3.3YC5-TR od firmy Microchip [38], který poskytuje úbytek napětí  $150 \text{ mV}$  a přesnost na výstupním napětí  $\pm 2 \%$ . Tento měnič reguluje napětí z  $5 \text{ V}$  na  $3,3 \text{ V}$  a je označen U3 a jeho zapojení lze vidět na obrázku 15. [38]



Obrázek 15: Schéma zapojení měniče napětí s nízkým úbytkem napětí

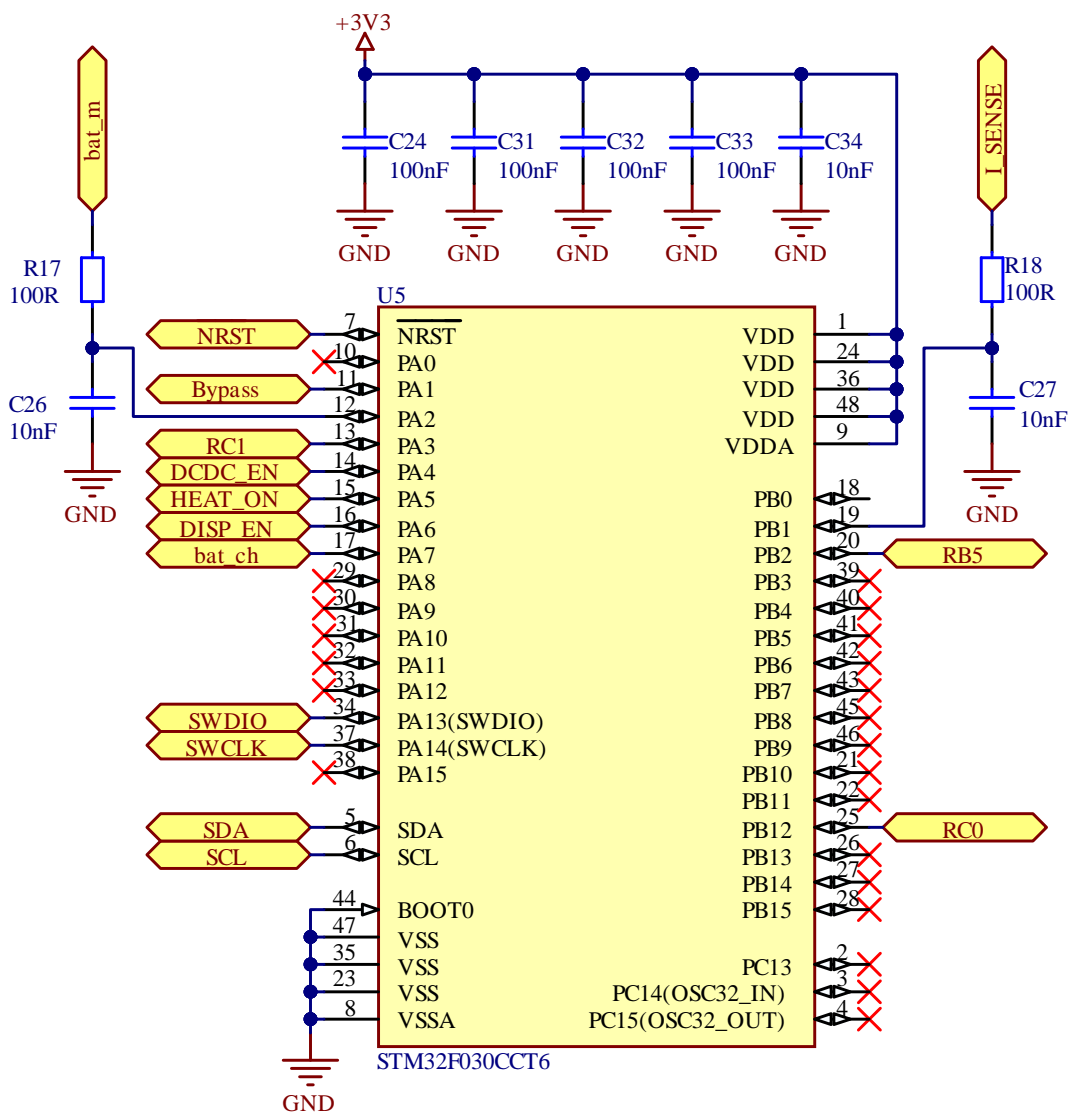
Když je signál přiveden na vstup *ENABLE*, regulátor napětí je aktivován a začne dodávat výstupní napětí na svých výstupních vývodech. Naopak, když je signál na *ENABLE* vývodu vypnutý, nebo je na něm přítomno nízké napětí, regulátor napětí je deaktivován a přestává dodávat výstupní napětí [38]. Pro ověření funkce obvodu, byla opět přidána zelená LED dioda s předřadným odporem 10 k $\Omega$  z důvodu oslnění.

### 2.3 Volba mikrokontroleru

Při výběru mikrokontroleru byla posuzována jejich paměť a počet vstupně-výstupních vývodů. Zvolen byl mikrokontroler STM32F030CC od firmy STMicroelectronics [39]. Důvodem výběru mikrokontroleru od této firmy byla zejména jeho častá využívanost v praxi a také možnost použití vývojové desky k programování externího mikrokontroleru. Dále výrobce poskytuje přehledné vývojové prostředí pro snadnější orientaci a programování.

Jedním z požadovaných parametrů tohoto mikrokontroleru je šest vývodů GPIO (z angl. *General-Purpose Input Output*). Mezi další požadavky patří jeden vývod PWM (z angl. *Pulse Width Modulation*), paměť typu FLASH o velikosti 256 KB, a také jsou zde požadovány tři analogové vstupy a jedna sériová datová sběrnice I2C. [39]

Napájecí napětí tohoto mikrokontroleru je v návrhu 3,3 V, ale je schopen pracovat až do napětí 3,6 V [39]. Na mikrokontroler, který je označen U5 jsou připojeny výstupní signály z nabíjecího obvodu pro sledování stavu baterie a signalizace nabíjení, také jsou zde přivedeny spouštěcí signály pro systém žhavení a pro modul s OLED displejem. Byly připojeny blokovací kondenzátory, jejichž zapojení je zobrazeno na obrázku 16. Tyto kondenzátory slouží pro zamezení šumu a kompenzují skokový proud při větším odběru proudu mikrokontrolerem.



Obrázek 16: Schéma zapojení mikrokontroleru

Vývod ~NRST (z angl. *Negated Reset*) je pouze vstupní a poskytuje metodu pro spuštění externího resetu mikrokontroleru. Reset se spustí, jakmile je hodnota na vývodu v logické 0. [39]

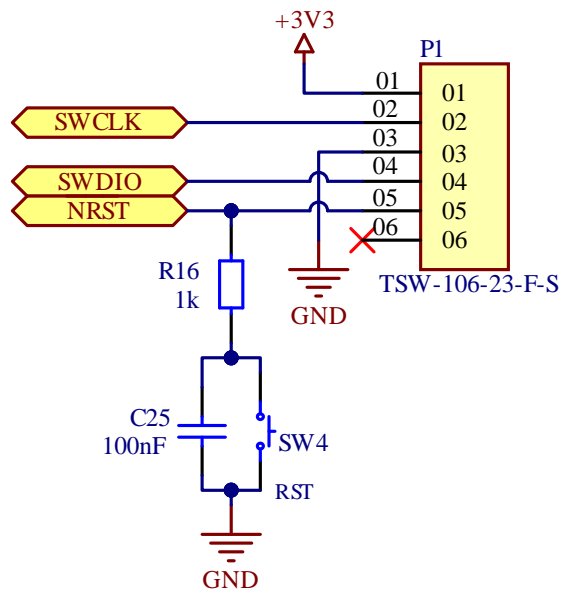
Vývody SWDIO a SWCLK slouží jako programovací vstupy a výstupy mikrokontroleru. Poskytují propojení mezi programátorem a mikrokontrolerem. Dvojice vývodů SDA a SCL slouží ke komunikaci s I2C sběrnici.

### 2.3.1 Výběr programátoru

Nedílnou součástí mikrokontroleru je také programátor a jeho správné zapojení. Existují dva způsoby nahrání programu do mikrokontroleru, jeden je přes programátor J-LINK a druhý, námi zvolený, ST-LINK. J-LINK má oproti druhému programátoru tu výhodu, že je kompatibilní s více druhy mikrokontrolerů, zatímco ST-LINK podporuje jen jeden

druh mikrokontroleru. ST-LINK je ale oproti J-LINKu výrazně cenově dostupnější a pro tento návrh zcela dostačující.

Programátor má své napájení vyvedené přímo ze zařízení a je napájen 3,3 V, dále jsou vyvedeny programovací vývody SWDIO a SWCLK. Pro správné fungování byl navrhnut resetovací taktilní spínač s pull-up rezistorem na ~NRST mikrokontroleru. Propojení programátoru s navrhnutým obvodem je za pomoci kolíkového konektoru. Schéma je vyobrazeno na obrázku 17.



Obrázek 17: Schéma zapojení programátoru

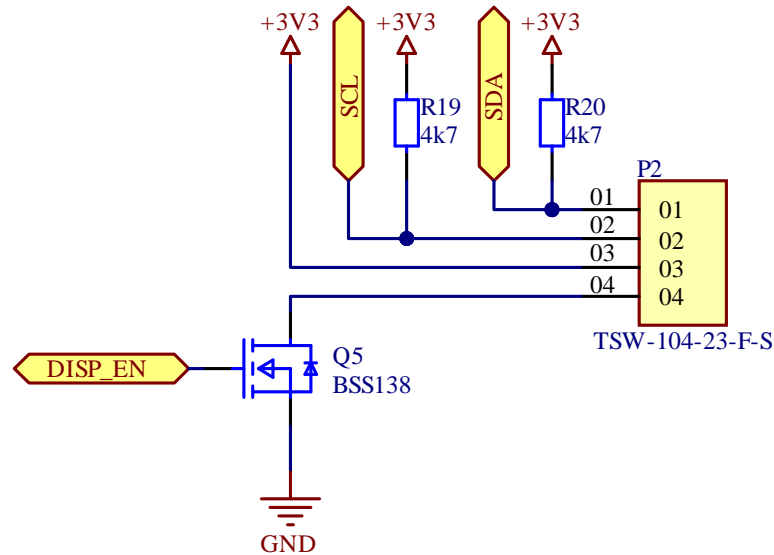
Taktilní spínač FSMSMTR, označen jako SW4, slouží ke zmíněnému resetu programátoru, pomocí kterého se resetuje daný program. K tomuto spínači je paralelně zapojený kondenzátor o hodnotě 100 nF, který slouží k potlačení vysokofrekvenčního šumu a k filtraci zámkitů při zmáčnutí tlačítka. Ke konektoru typu kolíková lišta P1 je následně připojen již zmíněný programátor S-LINK, který je součástí vývojové desky NUCLEO – F070RB od firmy STMicroelectronics [40]. Programátor na této desce lze využít i pro programování externího mikrokontroleru, a to po odstranění několika nulových odporů a vypojení zkratových propojek z konektoru CN2 [40]. Dále je požadována ochrana proti přepětí na desce z napájecího napětí. Programátor disponuje konektorem CN4, který slouží k propojení s navrhnutým obvodem. Orientace konektoru je označena tečkou a jeho vývody korespondují s návrhem. [40]

## 2.4 Grafické a uživatelské rozhraní

OLED displej používá ke komunikaci sériovou datovou sběrnici I2C, která je připojena na vývody SDA a SCL mikrokontroleru. Pro návrh elektronické cigarety byl vybrán OLED displej s řadičem SSD1306 [41]. OLED displej na modulu je v zapojení se

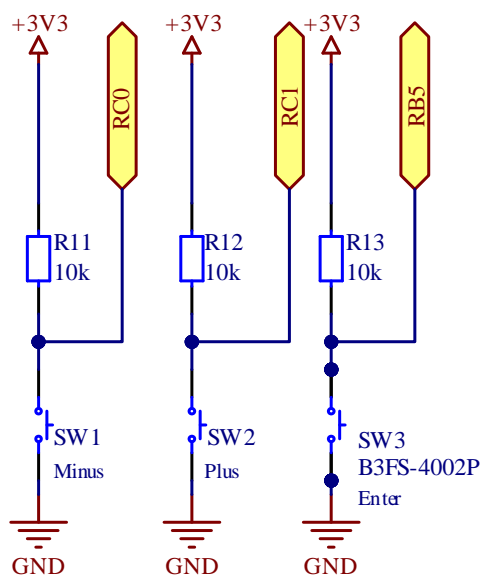


společnou katodou. Jak již bylo zmíněno v první části kapitoly 2.3, je třeba k displeji fyzicky připojit pull-up rezistory, protože komunikují skrze sériovou I2C sběrnici. Modul není součástí schématu a připojuje se pomocí pinového konektoru P2, jehož zapojení je ukázáno na obrázku 18. [41] Unipolární tranzistor NMOS, který je označen jako Q5, slouží ke zhasnutí displeje, jakmile již není potřeba vidět nastavované hodnoty.



Obrázek 18: Schéma zapojení k modulu SSD1306

Uživatelské rozhraní, pomocí kterého je možné ovládat elektronickou cigaretu, se skládá ze tří ovládacích taktilních spínačů. Dva taktilní spínače FSMSMTR plus a minus slouží pro zvolení hodnoty výkonu nebo pro pohyb v ovládacím menu a jsou označena jako SW1 a SW2. Třetí taktilní spínač B3FS-4002P je použit ke spuštění žhavení a je označen SW3. Tento spínač je rozměrově větší z důvodu rozlišení ovládacích spínačů od žhavicího spínače. Zapojení taktilních spínačů lze vidět na schématu na obrázku 19.



Obrázek 19: Schéma zapojení taktálních spínačů

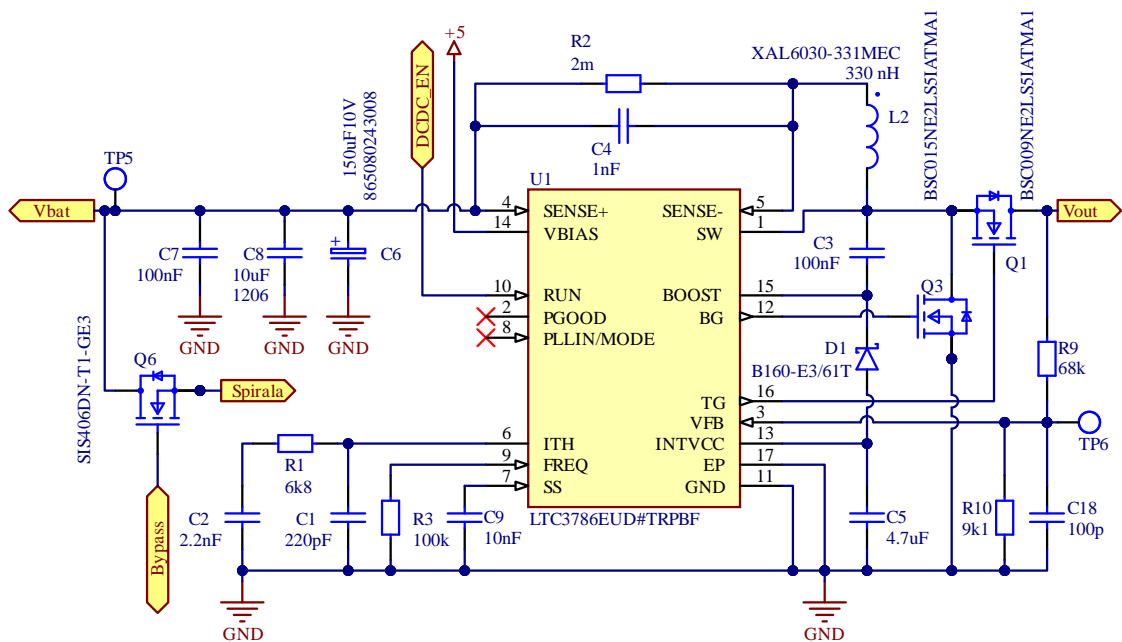
Ke každému spínači je nutné připojit *pull-up* rezistor a spínače jsou propojeny s mikrokontrolerem.

## 2.5 Systém žhavení

Výstupem elektronické cigarety je žhavicí spirála, která odpařuje e-liquid. Na to, aby se žhavicí spirála zahřála na patřičnou teplotu, je potřeba velkého výkonu, avšak maximální výkon nám udává napětí a proud baterie. Pro již zvolenou baterii je minimální výkon 87,5 W dle vztahu 2.14:

$$P = U * I = 2,5 * 35 = 87,5 W, \quad (2.14)$$

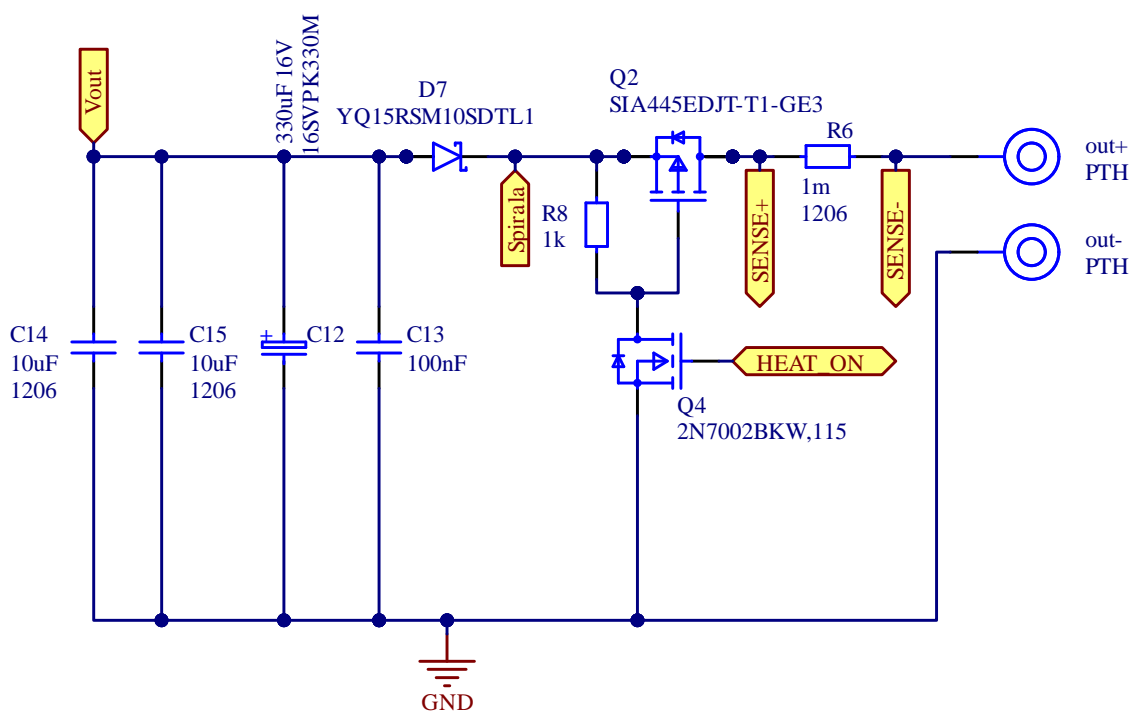
kde  $U$  je minimální napětí baterie, a  $I$  je maximální proud při nepřetržitém vybíjení. Po dosazení hodnot do rovnice 2.15 získáme minimální výkon, který je schopna poskytnout baterie 87,5 W. Kvůli nedostatečnému spínání unipolárních tranzistorů v asynchronním posilovači napětí byl navrhnout synchronní posilovací měnič (z angl. *Synchronous boost converter*), který žhavicí spirále dodá stabilní nastavený výkon bez ohledu na aktuální stav nabití baterie. Synchronní posilovací měnič byl vybrán LTC3786 od firmy Analog Devices. S pomocí unipolárních tranzistorů je schopen na spirálu dodat až 100 W [42]. Tento posilovač je na schématu označen jako U1 a zapojení celého žhavicího systému se synchronním posilovacím měničem lze vidět na obrázku 20.



Obrázek 20: Schéma zapojení systému žhavení

Posilovací měnič je napájen napětím 5 V. Při předpětí z výstupu posilovacího měniče nebo jiného pomocného zdroje může tento posilovací měnič pracovat po spuštění již od 2,5 V. Klidový proud bez zátěže je 55  $\mu\text{A}$  [42], který zajišťuje delší dobu provozu v daném rozsahu při napájení z baterie. Jelikož obvod má nastavitelnou frekvenci v rozsahu 75 kHz až 850 kHz, je potřeba danou frekvenci nastavit. Očekává se velice rychlé sepnutí, takže zvolená frekvence je 760 kHz a je nastavena pomocí rezistoru R9 jehož hodnota je 100 k $\Omega$ . [42]

Samotný proud, který je dodáván tímto obvodem, vzniká spínáním NMOS tranzistorů Q1 a Q3, které jsou řízeny z posilovače. NMOS tranzistor Q4 je ovládán mikrokontrolerem. Dále mají tranzistory PMOS Q2 a NMOS Q4 ochranou funkci proti neustálému žhavení spirály. Schottkyho dioda D7 funguje v obvodu jako ochrana synchronního posilovače a zabraňuje proudu tekoucím v závěrném směru od baterie, aby tekla do synchronního spínače. Toto spínání a ochranná dioda je vyobrazeno na obrázku 21, společně s výstupním filtrem synchronního posilovače.

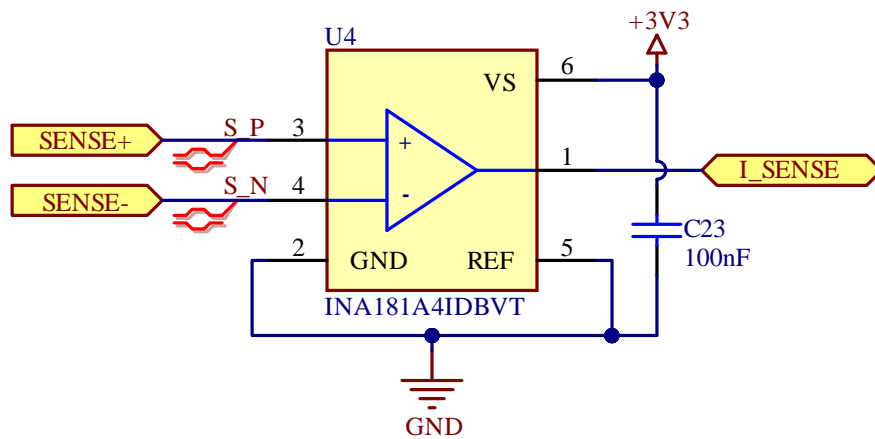


Obrázek 21: Spínání synchronního posilovače

Výstupní napětí a proud je přiveden na závit 510, na který je následně našroubován atomizér se žhavicí spirálou. Kontakty na závitu jsou označeny jako prokovené díry PTH, kde out+ je označen kladný pól závitu a out- záporný. Atomizér byl použit jednospirálový RBA (z angl. *Re-buildable Atomizer*) typu C4 od firmy Asmodus. [43]

## 2.6 Měření proudu

Měření proudu probíhá na rezistoru R6, tzv. *shunt* rezistoru, který přeměňuje proud na napětí. Jedná se o přesný měřicí rezistor v pouzdře 1206 s tolerancí hodnoty 1 %, který je zapojen v sérii s obvodem, kde je potřeba měřit proud. Měření probíhá pomocí integrovaného obvodu INA181A4IDBVT od firmy Texas Instrument [44], který je označen U4. Tento integrovaný obvod měří napětí na zmíněném rezistoru R6. INA181A4IDBVT dokáže pracovat ve dvou režimech a to v obousměrném (z angl. *Bidirectional*) nebo v jednosměrném (z angl. *Unidirectional*). V návrhu je použit jednosměrný režim, jelikož se měří jen výstupní proud. Pro správné fungování integrovaného obvodu je potřeba zapojit REF vývod na zem. Jakmile nebude protékat proud obvodem, tak výstup obvodu bude sveden na zem. [44] Když proud prochází napájením k zátěži, tak se vstupní signál zvyšuje a způsobí zvýšení výstupního napětí na výstupu [44]. Zapojení integrovaného obvodu INA181A4IDBVT lze vidět na obrázku 22.



Obrázek 22: Zapojení integrovaného obvodu U4

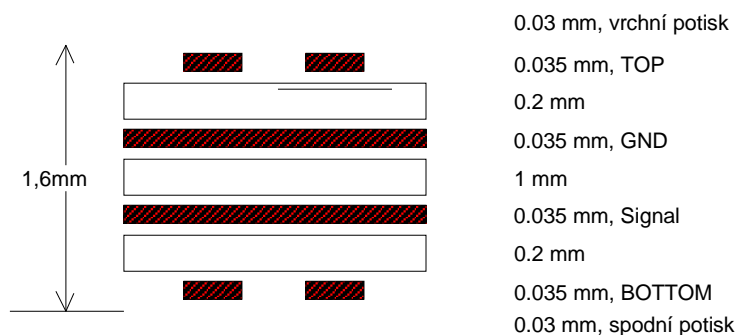
Na integrovaný obvod je přivedeno napájecí napětí 3,3 V, na které je připojen vyhlazovací kondenzátor C23. Jak už bylo zmíněno, rezistor R6 je připojen mezi vstupní vývody integrovaného obvodu a je propojen diferenciálními signály S\_P a S\_N, aby bylo zajištěno Kelvinovo zapojení [44]. Diferenciální pár má stejně dlouhé cesty na DPS, a také stejnou šířku, aby byla zachována stejná impedance signálů a *shunt* rezistor měřil jen proud tekoucí přes něj. Výstupní signál I\_SENSE je přiveden na analogový vývod mikrokontroleru.

### 3. OŽIVENÍ A TESTOVÁNÍ ZAŘÍZENÍ

Tato kapitola se zabývá realizací desky plošných spojů (DPS), následným oživením jednotlivých částí DPS a měřením. Dále je popsáno programové vybavení a jeho testování.

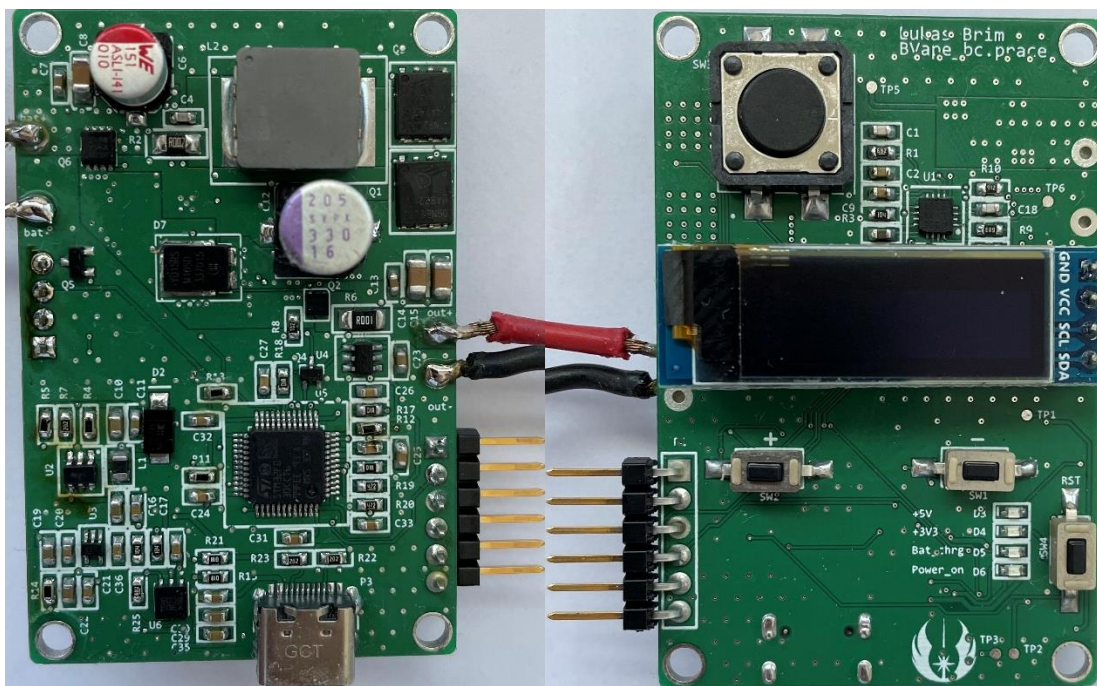
Celý návrh desky plošných spojů (DPS) byl proveden v návrhovém programu *Altium Designer ver. 22.3.1*. Realizace DPS byla provedena na 4 vrstvách. Volba 4-vrstvé desky byla provedena na základě odvedení tepla rovnoměrně po desce z výkonové části desky. Dále 4-vrstvá deska umožňuje propojení všech uzemnění komponentů. Jedna z vnitřních vrstev slouží pro vedení signálu a druhá vnitřní vrstva je napájecí. Horní a spodní vrstva je signálová. Tyto vrstvy lze vidět na obrázku 23, na kterém je vyobrazen průřez desky plošných spojů.

DPS byla vyrobena společností JLCPCB. Při návrhu byly dodrženy minimální parametry, které je schopna firma vyrobit. Šířka vodivé cesty je 0,2 mm s rozstupem taktěž 0,2 mm. Jednotlivé prokovy mají velikost 0,3 mm s roztečí 0,4 mm. Vnitřní vrstvy jsou široké 35  $\mu\text{m}$  a vnější vrstvy jsou široké taktěž 35  $\mu\text{m}$ . Výrobní materiály DPS nám umožňují vést vodivé cesty s kontrolovanou impedancí 50  $\Omega$ , která platí pro všechny vedené signály.



Obrázek 23: Průřez DPS

Kritická situace v návrhu vznikla při umístění součástek výkonové části. Vzhledem k této situaci byl kladen důraz na velmi přesné umístění součástek na DPS. Výsledný návrh DPS je ukázán na obrázku 24 a zobrazení jednotlivých vrstev DPS je součástí přílohy A.



Obrázek 24: Fotografie hotové a osazené DPS, vrchní strana vlevo, spodní strana vpravo

Konstrukce zařízení byla navrhnutá pomocí programu Fusion 360 od firmy Autodesk a byla vytisknuta na 3D tiskárně. Celá konstrukce je tvořena ze dvou dílů, kde v jednom dílu je umístěna DPS s baterií a závitem 510 a druhou částí jsou tzv. dvířka. Tyto dvě části jsou k sobě připevněny osmi neodimovými magnety (čtyři na každé části), které jsou umístěny vždy v rozích konstrukce a dvířek. K tisku byl použit plast typu PLA (chem. sloučenina Polyaktid). V konstrukci jsou vytvořeny díry pro tlačítka a pro displej, které byly taktéž vytisknuty. Dále je zde otvor pro závit 510, který je zahlouben do vrchní stěny konstrukce, aby tento závit byl v rovině se stěnou. Na spodní straně je vymezen otvor pro USB-C konektor. Tento celek, který lze vidět na obrázku 25, tvoří kompletní elektronickou cigaretu.



Obrázek 25: Kompletní elektronická cigareta

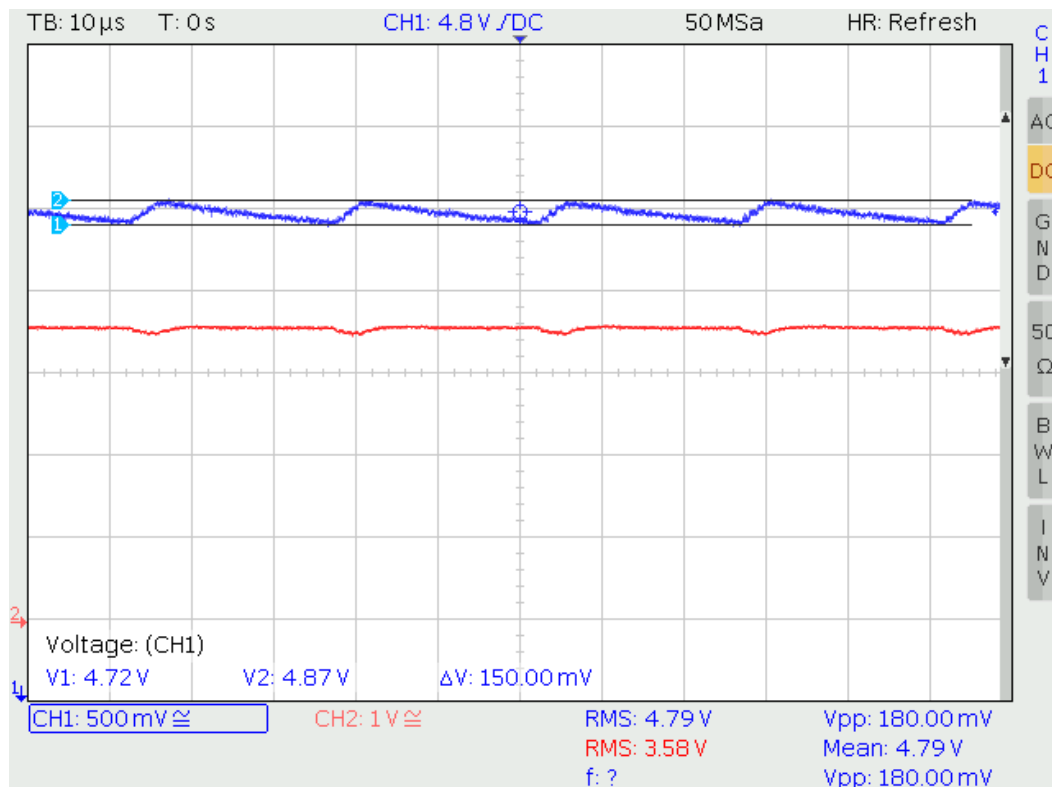
Navrhnutá DPS i s cenou součástek činí 1363,90 Kč. Tato suma byla vypočtena dle soupisky součástek, která je součástí přílohy B. Pro porovnání byla zvolena konkurenční firma Evolv, která poskytuje hotové DPS pro elektronické cigarety. Cena jejich DPS činí 1716,87 Kč. Jedná se o model DNA 100 Color, který má stejný výstupní maximální výkon 100 W. [45] Tento model má však displej, který je součástí DPS a také třetí nastavovací taktilní spínač. Lze tedy vyhodnotit, že konkurenční DPS je dražší oproti DPS navržené v této práci.

### 3.1 Oživení desky plošných spojů

Prvotní oživení DPS bylo provedeno na laboratorním zdroji napětí a proudu, který má proudovou limitaci 2 A. Po oživení napájecí části bylo nutno připojit baterii. Pro toto prvotní oživení slouží zmíněné LED diody, které jsou na DPS označené +5 V a +3V3. Tyto LED diody se rozsvítí, když je na výstupu měničů napětí.

Dále proběhlo měření výstupního napětí měničů po připojení baterie na osciloskopu HMO2022 od firmy ROHDE & SCHWARZ [46]. První měření proběhlo na měniči, který převádí napětí z baterie na 5 V a jeho průběh lze vidět na obrázku 26.

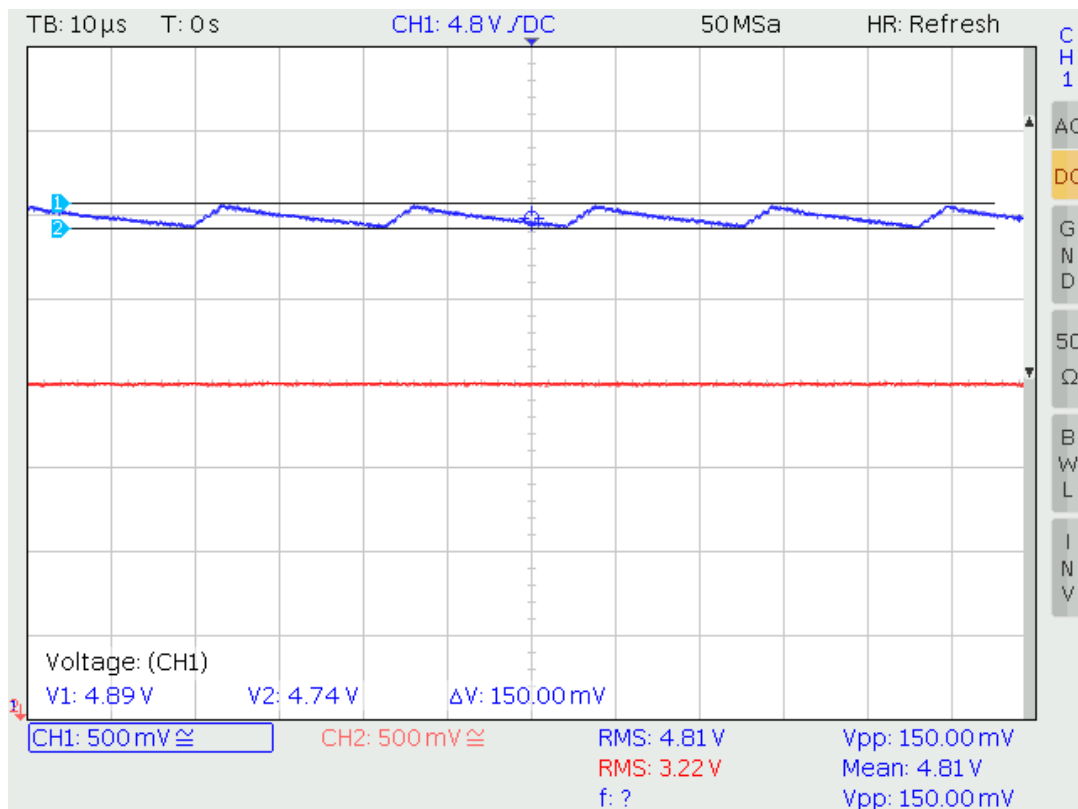




Obrázek 26: Zobrazení vstupního napětí baterie (červený průběh) a výstupní napětí měniče na 5V (modrý průběh) bez zátěže

Z průběhů signálů na obrázku 26 lze zjistit, že efektivní hodnota výstupního napětí na měniči je 4,79 V a od teoretické hodnoty se liší o 0,1 V. Tuto odchylku způsobily tolerance zvolených součástek. Rozlišení osciloskopu bylo zvoleno 0,5 V/dílek u výstupu a 1 V/dílek u vstupu. Dále zde byl naměřen pokles napětí o 150 mV, kdy měnič přestává stabilizovat. Tento pokles byl odečten pomocí kurzorů osciloskopu.

Posléze byl na osciloskopu změřen nízkoubytkový měnič napětí (LDO) z 5 V na 3,3 V. Na osciloskopu bylo naměřeno vstupní napětí 4,79 V a výstupní napětí 3,36 V a jeho průběh lze vidět na obrázku 27.

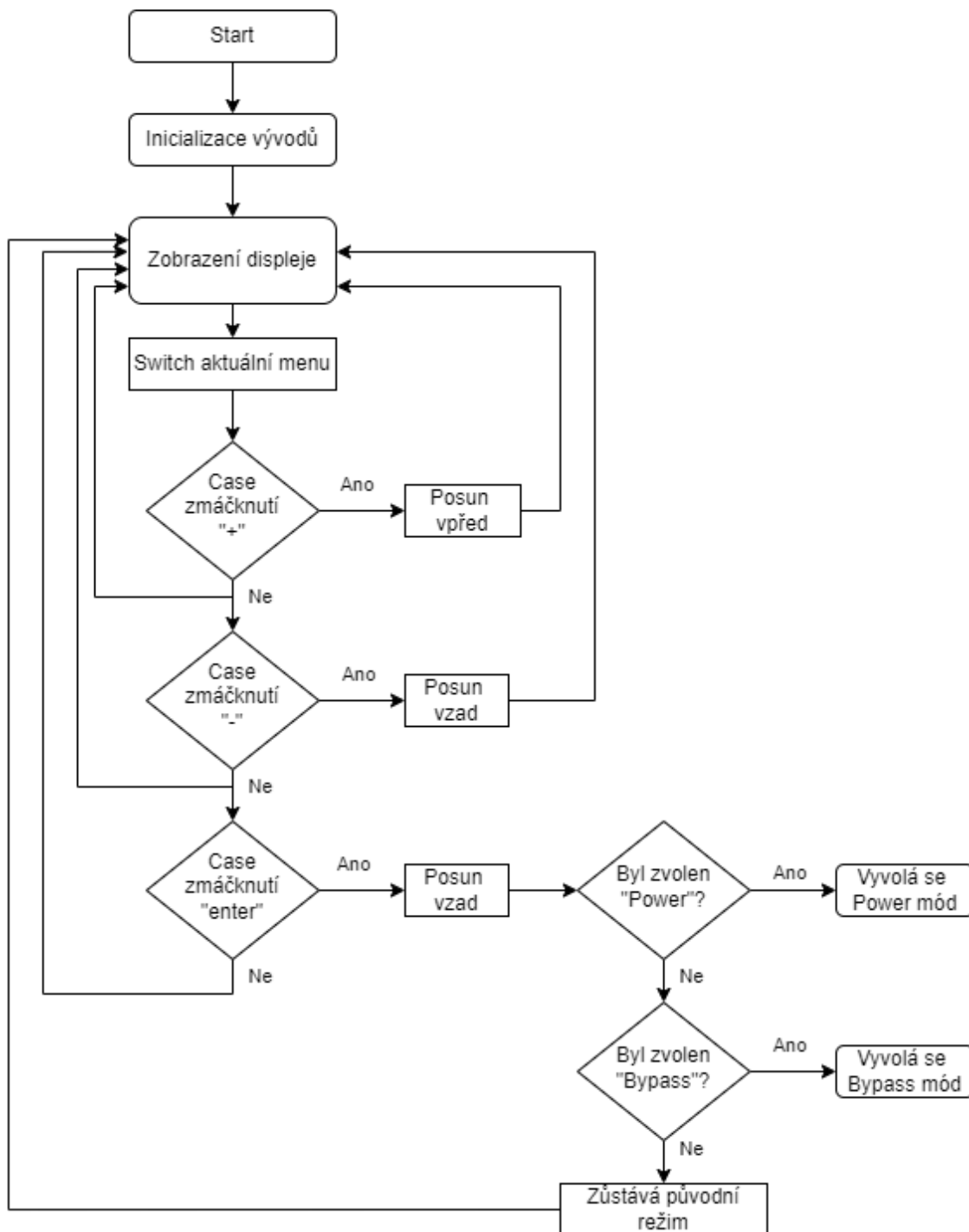


Obrázek 27: Zobrazení vstupní a výstupní napětí na měniči z 5 V (modrý průběh) na 3,3 V (červený průběh)

Bylo naměřeno výstupní napětí 3,22 V a oproti teoretické hodnotě se liší o 80 mV, tato odchylka byla způsobena tolerancí součástek. Rozlišení osciloskopu bylo zvoleno 0,5 V/dílek.

### 3.2 Programové vybavení zařízení

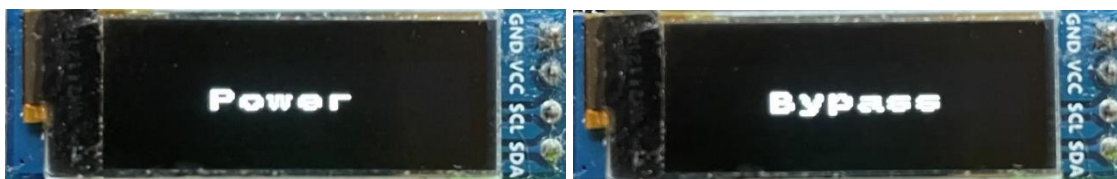
Tato podkapitola se zaměřuje na popis fungování zařízení na úrovni programového vybavení (z angl. *Software*). Programové vybavení bylo napsáno v jazyce C s využitím programu STMCube IDE ver. 1.13.2 a samotný program byl nahráván přes programátor pomocí USB-B kabelu. Mimo hlavní program byly vytvořeny také knihovny, a to pro OLED displej a knihovny pro I2C sběrnici, GPIO vývody a ADC vývody. Vytvořený program je součástí elektronické přílohy práce a vývojový diagram lze vidět na obrázku 28.



Obrázek 28: Vývojový diagram

Po zapojení baterie do zařízení dochází k inicializaci procesoru a časovače, k nastavení vývodů, OLED displeje a AD převodníku. Dále probíhá načtení hlavní nabídky v podobě posuvného seznamu, ve kterém se pohybuje pomocí tlačítek „+“ a „-“, a také probíhá kontrola, jestli dané tlačítko bylo stisknuto. Pokud bylo stisknuto tlačítko „+“, tak se seznam posune o jedna dopředu, a když bylo stisknuto tlačítko „-“, tak se seznam posune o jednu zpět. V tomto seznamu neprobíhají žádné výpočty a ani spínání

řídících tranzistorů. Na výběr je mezi Power režimem a Bypass režimem. Daná položka v seznamu se zobrazí na OLED displeji viz obrázek 29.



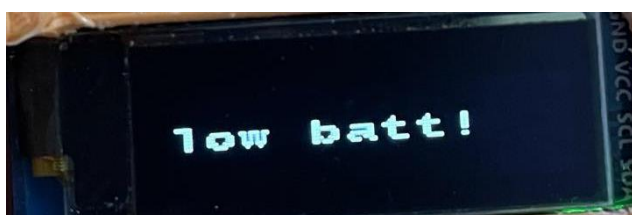
Obrázek 29: Výběr režimů na OLED displeji

Program také kontroluje u obou režimů, jestli bylo stisknuté potvrzovací tlačítko „enter“. Pokud toto tlačítko bylo stisknuto u Bypass režimu, program zavolá funkci Bypass. Touto zvolanou funkcí se zobrazí na displeji, že byl zvolen právě tento režim a dále se zobrazí aktuální napětí na baterii, které je měřeno převedením analogové hodnoty na digitální pomocí AD převodníku mikrokontroleru. Obrazovka zvoleného „Bypass“ s měřeným napětím lze vidět na obrázku 30.



Obrázek 30: Zvolený Bypass režim s měřeným napětím

Součástí této funkce je také chybová hláška „low batt!“, která upozorňuje uživatele na vybitou baterii. Hláška se zobrazí na displeji v momentě, kdy napětí na baterii klesne pod 2,9 V. Tato hláška je znázorněna na obrázku 31.



Obrázek 31: Chybová hláška pro vybitou baterii

Dále v této funkci probíhá sepnutí MOSFET tranzistorů tak, aby teklo napětí a proud z baterie přímo na žhavicí spirálu. Funkce také hlídá, jestli bylo zmáčnuto tlačítko „enter“, které zde funguje jako spínání samotné spirály a napájení. Zmáčknutí tlačítek „+“ nebo „-“ způsobí návrat do výběru režimů.

## ZÁVĚR

Cílem této bakalářské práce byl návrh elektronické cigarety k němuž se docílilo seznámením se s částmi, ze kterých se elektronická cigareta skládá. V první kapitole byly popsány jednotlivé druhy elektronických cigaret a různé pracovní režimy, kterými disponují. Dále byly popsány dva druhy bateriových článků Li-Ion a Li-Po, které se používají pro elektronické cigarety. Byly zde také popsány teplotní senzory. Následně byly detailně vysvětleny tři sériové datové sběrnice I2C, UART a SPI, se kterými pracují mikrokontrolery.

V části návrhu zařízení bylo popsáno blokové schéma s funkčními bloky s jejich navázáním. Byl proveden výpočet potřebného proudu, který musí baterie dodávat, a následně byla zvolena baterie INR21700-50E. Dále byl navržen nabíjecí obvod STB08PMR, který byl napojen na USB-C konektor.

V další části návrhu byly navrženy dva měniče. První z nich převádí napětí z baterie na 5 V. Druhý měnič převádí 5 V na 3,3 V a napájí řídicí elektroniku. Proběhl výpočet děliče napětí pro 5V. Následně byl proveden návrh a výběr mikrokontroleru. Zvolený mikrokontroler je STM32F030CCT6 a byl navržen tak, aby byl schopen komunikovat pomocí I2C sběrnice, měl velkou paměť a dostatek GPIO vývodů. Dále byl popsán výběr programátoru ST-LINK a jeho následné zapojení na DPS. Posléze bylo navrženo grafické a uživatelské rozhraní, ve kterých byly popsány jednotlivé funkce taktálních spínačů.

Byl navrhnut žhavicí systém, který obsahuje synchronní posilovací měnič LTC3786EUD s tranzistorem pro vypnutí žhavení. Tento systém obsahuje také tranzistor pro přepnutí na režim bez tohoto posilovače. Posilovací měnič má vyvedený výstup na závit, na kterém je přidělán atomizér se žhavicí spirálou.

V předposlední části bakalářské práce byl popsán proces oživení desky plošných spojů a její výrobní specifikace. Byla zde ukázána konstrukce elektronické cigarety a následně celé zařízení. Byl zde popsán měřicí postup a výsledné grafy měření.

Poslední část se věnovala popisu programového vybavení elektronické cigarety. Byl zde ukázán vývojový diagram a následně popsány jednotlivé funkce programu včetně vysvětlení ovládání celého programu.

## LITERATURA

- [1] *About Electronic Cigarettes (E-Cigarettes)* [online]. 2022 [cit. 2022-10-29]. Dostupné z: [https://www.cdc.gov/tobacco/basic\\_information/e-cigarettes/about-e-cigarettes.html#print](https://www.cdc.gov/tobacco/basic_information/e-cigarettes/about-e-cigarettes.html#print)
- [2] *E-Cigarettes (Vaping)*. In: College of Saint Benedict and Saint John's University [online]. USA: College of Saint Benedict and Saint John's University, 2020 [cit. 2022-11-12]. Dostupné z: <https://www.csbsju.edu/health-promotion/health-resources/e-cigarettes>
- [3] *ARTMAN, Jason. What Are the Different Vaping Modes and What Do They Mean?*. In: Vapejuice.com [online]. Phoenix, Arizona, USA: Jason Artman, 2021 [cit. 2022-11-12]. Dostupné z: <https://vapejuice.com/blogs/vape-juice-news/vaping-modes>
- [4] JOHNSON, Lee. Vaping Modes Explained. Ashtray blog [online]. 2021 [cit. 2022-12-06]. Dostupné z: <https://www.ecigarettdirect.co.uk/ashtray-blog/2020/02/vaping-modes.html>
- [5] What Mode Should I Use On My Vape?: Wattage/Voltage (Power Mode). Vape store blog [online]. USA, 2018 [cit. 2022-12-14]. Dostupné z: <https://blog.180smoke.ca/what-mode-should-i-use-on-my-vape/>
- [6] Vaping Modes Explained: Wattage Mode. Vapekit [online]. UK, 2018 [cit. 2022-12-14]. Dostupné z: <https://vapekit.co.uk/vape-kits-c932/vaping-modes-explained-c1427>
- [7] Temperature Control Mode: How it Works and Why You'll Love It. Versed Vaper [online]. USA: Versed Vaper Team, 2021 [cit. 2022-12-14]. Dostupné z: <https://versedvaper.com/temperature-control-mode-guide/>
- [8] Understanding Vaping Coil Wire Basics. [online]. 2021 , s. 1 [cit. 2023-07-22]. Dostupné z: <https://www.buyv2cigs.co.uk/blog/understanding-vaping-coil-wire-basics/>.
- [9] What are Clapton Coils, Fused Claptons, Alien Coils & More. [online]. 2023. [cit. 2023-07-22]. Dostupné z: <https://vaping360.com/learn/vape-wire-types/>.
- [10] Vape Wires: Kanthal, Nichrome, Stainless Steel and More. [online]. 2023. [cit. 2023-07-22]. Dostupné z: <https://vaping360.com/learn/vape-wire-types/>.
- [11] A chemist's advice: Don't Dry-Burn your coil. [online]. 2016. [cit. 2023-07-22]. Dostupné z: <https://www.vapingpost.com/2016/03/08/a-chemists-advice-dont-dry-burn-your-coil/>.
- [12] Types of Vape Wires and How to Use Them. [online]. 2018. [cit. 2023-07-30]. Dostupné z: <https://versedvaper.com/types-of-vape-wires/>.
- [13] *How Does a Lithium-ion Battery Work?* [online]. 2017 [cit. 2022-10-29]. Dostupné z: <https://www.energy.gov/eere/articles/how-does-lithium-ion-battery-work>
- [14] Lithium Ion Battery Advantages & Disadvantages [online]. [cit. 2022-11-29]. Dostupné z:

- [https://www.electronics-notes.com/articles/electronic\\_components/battery-technology/li-ion-lithium-ion-advantages-disadvantages.php](https://www.electronics-notes.com/articles/electronic_components/battery-technology/li-ion-lithium-ion-advantages-disadvantages.php)
- [15] Li-ion Voltage Analysis. *Silicon lightworks* [online]. USA, Florida [cit. 2022-11-29]. Dostupné z: <https://siliconlightworks.com/li-ion-voltage>
- [16] *What is Lithium Polymer Battery?*. Dnkpowers [online]. Shenzhen City, Guangdong Province, China, 2020 [cit. 2022-11-12]. Dostupné z: <https://www.dnkpowers.com/lithium-polymer-battery-guide/#chapter2>
- [17] *What is Lithium Polymer Battery?*. Dnkpowers [online]. Shenzhen City, Guangdong Province, China, 2020 [cit. 2022-11-12]. Dostupné z: <https://www.dnkpowers.com/lithium-polymer-battery-guide/#chapter3>
- [18] AGARWAL, Tarun. *What is a Thermocouple : Working Principle & Its Applications*. EL-PRO-CUS [online]. Indie: Elprocus, 2018 [cit. 2022-11-13]. Dostupné z: <https://www.elprocus.com/what-is-a-thermocouple-definition-working-principle-diagram-applications/>
- [19] *Měření teploty*. Měření teploty [online]. Česká republika: VŠCHT, 2018 [cit. 2022-11-13]. Dostupné z: <http://uprt.vscht.cz/ucebnice/mrt/F4/F4k43-tepl.htm>
- [20] *Thermistor Basics*. Application Note AN-TC11 [online]. 2013, Rev A, 6 [cit. 2022-11-27]. Dostupné z: <https://www.teamwavelength.com/download/applicationtechnotes/an-tc11.pdf>
- [21] DOLEČEK, Jaroslav. *Moderní učebnice elektroniky 2. díl*. Praha: BEN – technická literatura, 2007. ISBN 978-80-7300-161-2.
- [22] HOW TO SIZE A RESISTOR TO READ A 10K OHM THERMISTOR. ESP8266 Community Forum [online]. 2016 [cit. 2022-12-03]. Dostupné z: <https://www.esp8266.com/viewtopic.php?p=45320>
- [23] NTC Thermistor. EEPower [online]. USA, 2010 [cit. 2022-12-15]. Dostupné z: <https://eepower.com/resistor-guide/resistor-types/ntc-thermistor/#>
- [24] Měření teploty – polovodičové odporové senzory teploty. Vyvoj.hw.cz [online]. Praha: Redakce HW serveru, 2004 [cit. 2022-11-27]. Dostupné z: <https://vyvoj.hw.cz/teorie-a-praxe/dokumentace/mereni-teploty-polovodicove-odporove-senzory-teploty.html>
- [25] BASICS OF UART COMMUNICATION [online]. USA, 2007 [cit. 2022-12-10]. Dostupné z: <https://www.circuitbasics.com/basics-uart-communication/>
- [26] PEÑA, Eric a Mary G. LEGASPI. UART: A Hardware Communication Protocol Understanding Universal Asynchronous Receiver/Transmitter. Analog [online]. USA, 2020 [cit. 2022-12-16]. Dostupné z: <https://www.analog.com/en/analog-dialogue/articles/uart-a-hardware-communication-protocol.html>
- [27] Basics of UART Communication [online]. 2017 [cit. 2022-12-16]. Dostupné z: <https://www.electronicshub.org/basics-uart-communication/>
- [28] TIŠNOVSKÝ, Pavel. Externí sériové sběrnice SPI a I<sup>2</sup>C. Root.cz [online]. 2008, 1 [cit. 2022-12-15]. Dostupné z: <https://www.root.cz/clanky/externi-seriove-sbornice-spi-a-i2c/>

- [29] NICOLLE, Jean. SPI 1 - What is SPI?. In: FPGA4fun [online]. 2010 [cit. 2022-12-15]. Dostupné z: <https://www.fpga4fun.com/SPI1.html>
- [30] MAIN, John. SPI interface Tutorial. TronicsBench [online]. United Kingdom, 2006 [cit. 2022-12-15]. Dostupné z: <https://www.best-microcontroller-projects.com/spi-interface.html>
- [31] Inter Integrated Circuit. O'REILLY [online]. USA: O'Reilly Media, 2002 [cit. 2022-12-15]. Dostupné z: <https://www.oreilly.com/library/view/designing-embedded-hardware/0596003625/ch09s02.html>
- [32] CAMPBELL, Scott. BASICS OF THE I2C COMMUNICATION PROTOCOL. Circuit Basics [online]. USA, 2007 [cit. 2022-12-10]. Dostupné z: <https://www.circuitbasics.com/basics-of-the-i2c-communication-protocol/>
- [33] I<sup>2</sup>C – Inter-Integrated Circuit. Electro Some [online]. 2017 [cit. 2022-12-16]. Dostupné z: <https://electrosome.com/i2c/>
- [34] Beginner's guide to vaping. INOKIN [online]. Shenzhen, Čína [cit. 2023-05-30]. Dostupné z: <https://www.innokin.com/guide-to-vaping>
- [35] INR21700-30T, Samsung [online katalogový list]. [cit. 2022-05-25]. Dostupné z: <https://www.tme.eu/Document/d6147ab6f2b82f7e0b98d79910473d06/samsung-INR21700-30t-datasheet.pdf>
- [36] STBC08PMR, STMicroelectronics. [online katalogový list]. [cit. 2023-07-30]. Dostupné z: <https://cz.mouser.com/datasheet/2/389/stbc08-1850547.pdf>
- [37] TLV6104DBVR, Texas Instrument [online katalogový list]. [cit. 2022-05-27]. Dostupné z: <https://www.ti.com/lit/ds/symlink/tlv61048.pdf?ts=1685127343755>
- [38] MIC5365-3.3YC5-TR, Microchip [online katalogový list]. [cit. 2022-05-27]. Dostupné z: <https://ww1.microchip.com/downloads/en/DeviceDoc/mic5365.pdf>
- [39] STM32F030CCT6, STMicroelectronics. [online katalogový list]. [cit. 2023-12-22]. Dostupné z: <https://cz.mouser.com/datasheet/2/389/stm32f030f4-1851168.pdf>
- [40] NUCLEO-F070RB, STMicroelectronics. [online katalogový list]. [cit. 2023-12-22]. Dostupné z: [https://www.st.com/resource/en/user\\_manual/um1724-stm32-nucleo64-boards-mb1136-stmicroelectronics.pdf](https://www.st.com/resource/en/user_manual/um1724-stm32-nucleo64-boards-mb1136-stmicroelectronics.pdf)
- [41] SSD1306, Solomon Systech [online katalogový list]. [cit. 2022-12-16]. Dostupné z: [https://www.laskakit.cz/user/related\\_files/ssd1306.pdf](https://www.laskakit.cz/user/related_files/ssd1306.pdf)
- [42] LTC3786, Analog Devices [online katalogový list]. [cit. 2022-05-27]. Dostupné z: <https://www.analog.com/media/en/technical-documentation/data-sheets/3786fc.pdf>
- [43] C4, Asmodus [online]. Ostrava, Česká republika [cit. 2023-05-30]. Dostupné z: <https://www.vaporism.cz/asmodus-c4-lp-single-coil-rda-P/>
- [44] INA181A4IDBVT, Texas Instrument [online katalogový list]. [cit. 2022-05-26]. Dostupné z: [https://www.ti.com/lit/ds/symlink/ina181.pdf?ts=1685113668023&ref\\_url=https%253A%252F%252Fwww.ti.com%252Fproduct%252FINA181%252Fpart-details%252FINA181A2IDBVT%253Futm\\_source%253Dgoogle%2526utm\\_medium%253Dcpc%2526utm\\_campaign%253Dcob-tistore-promo-asc\\_opn\\_en-cpc-](https://www.ti.com/lit/ds/symlink/ina181.pdf?ts=1685113668023&ref_url=https%253A%252F%252Fwww.ti.com%252Fproduct%252FINA181%252Fpart-details%252FINA181A2IDBVT%253Futm_source%253Dgoogle%2526utm_medium%253Dcpc%2526utm_campaign%253Dcob-tistore-promo-asc_opn_en-cpc-)



storeic-google-  
wwe%2526utm\_content%253DDevice%2526ds\_k%253DINA181A2IDBVT%25  
26DCM%253Dyes%2526gclid%253DCjwKCAjwscGjBhAXEiwAswQqNNkNIL  
bB4ttDw\_3rHXzag4rD5vjhksoK\_UiicvNfipaDceL8sQVQHhoC9BcQAvD\_BwE  
%2526gclsrc%253Daw.ds

- [45] Evolv DNA 100 Color, [online]. Ohio, USA [cit. 2022-05-29]. Dostupné z:  
<https://www.evolvapor.com/products/evolv-dna-100-color>
- [46] Digitální osciloskop HMO2022, ROHDE&SCHWARZ, [online katalogový list].  
[cit. 2024-01-20]. Dostupné z:  
[https://www.tme.eu/Document/c8e96277f2dd5ffd091a1094183d7cc6/HAMEG\\_  
MAN\\_CZ\\_HMO72x-202x.pdf](https://www.tme.eu/Document/c8e96277f2dd5ffd091a1094183d7cc6/HAMEG_MAN_CZ_HMO72x-202x.pdf)

# SEZNAM SYMBOLŮ A ZKRATEK

## Seznam zkratek

E-cigareta		Elektronická cigareta
H/N/S	Hard/Normal/Soft	Tvrký/Normální/Jemný
E-liquid		Náplň pro elektronické cigarety
DIY	Do It Yourself	Udělej si sám
Li-Ion		Lithium-Iont
Li-Po	r	Lithium-Polymer
PTC	Positive Temperature Coeficient	Pozitivní Teplotní Koeficient
NTC	Negative Temperature Coeficient	Negativní Teplotní Koeficient
SMD	Sourface Mount Device	Povrchově montovaná součástka
A/D	Analog/Digital	Analogově/Digitální
D/A	Digital/Analog	Digitálně/Analogový
UART	Universal Asynchronous Reciever – Transmitter	Univerzální Asynchronní Přijímač – vysílač
Rx	Recieve	Obdržet
Tx	Transmit	Poslat
bps	bit per second	bit za sekundu
LSB	Least Significant Bit	Nejméně významný bit
SPI	Serial Periphetal Interface	Sériově periferní rozhraní
SCK	Serial Clock	Sériový časovač
MISO	Master In, Slave Out	Nadřazený dovnitř, Podřazený ven
MOSI	Master Out, Slave In	Nadřazený ven, Podřazený dovnitř
CS	Chip Select	Chip Select
EEPROM	Electricaly Erasable Programmable Read-Only Memmory	Elektricky Vymazatelná Programovatelná paměť pouze pro čtení
I2C	Inter-Integrated Circuit	Interní Integrovaný obvod
SDA	Serial Data	Sériové Data
SCL	Serial Clock	Seériové Hodiny
MSB	Most Significant Bit	Nejvíce významný bit
R/W	Read/Write	Číst/Psát
ACK	Acknowledge	Potvrzení
NACK	Not Acknowledge	Není Potvrzení
GND	Ground	Nulový potenciál
OLED	Organic Light-Emitted Diode	Organická Světlo-emitující dioda
USB	Universal Serial Bus	Univerzální sériová sběrnice
LED	Light-Emitted Diode	Světlo-emitující dioda
LDO	Low Drop-Out Regulator	Nízkoúbytkový stabilizátor
GPIO	General-Purpose Input Output	Univerzálně vstupně/výstupní vývod
NRST	Negated Reset	Negovaný Reset
NMOS	N-type Metal-Oxide Semiconductor	Unipolární tranzistor s N kanálem
PMOS	P-type Metal-Oxide Semiconductor	Unipolární tranzistor s P kanálem
DPS		Deska Plošných Spojů
PLA		Polyaktid
Kč		Korun českých

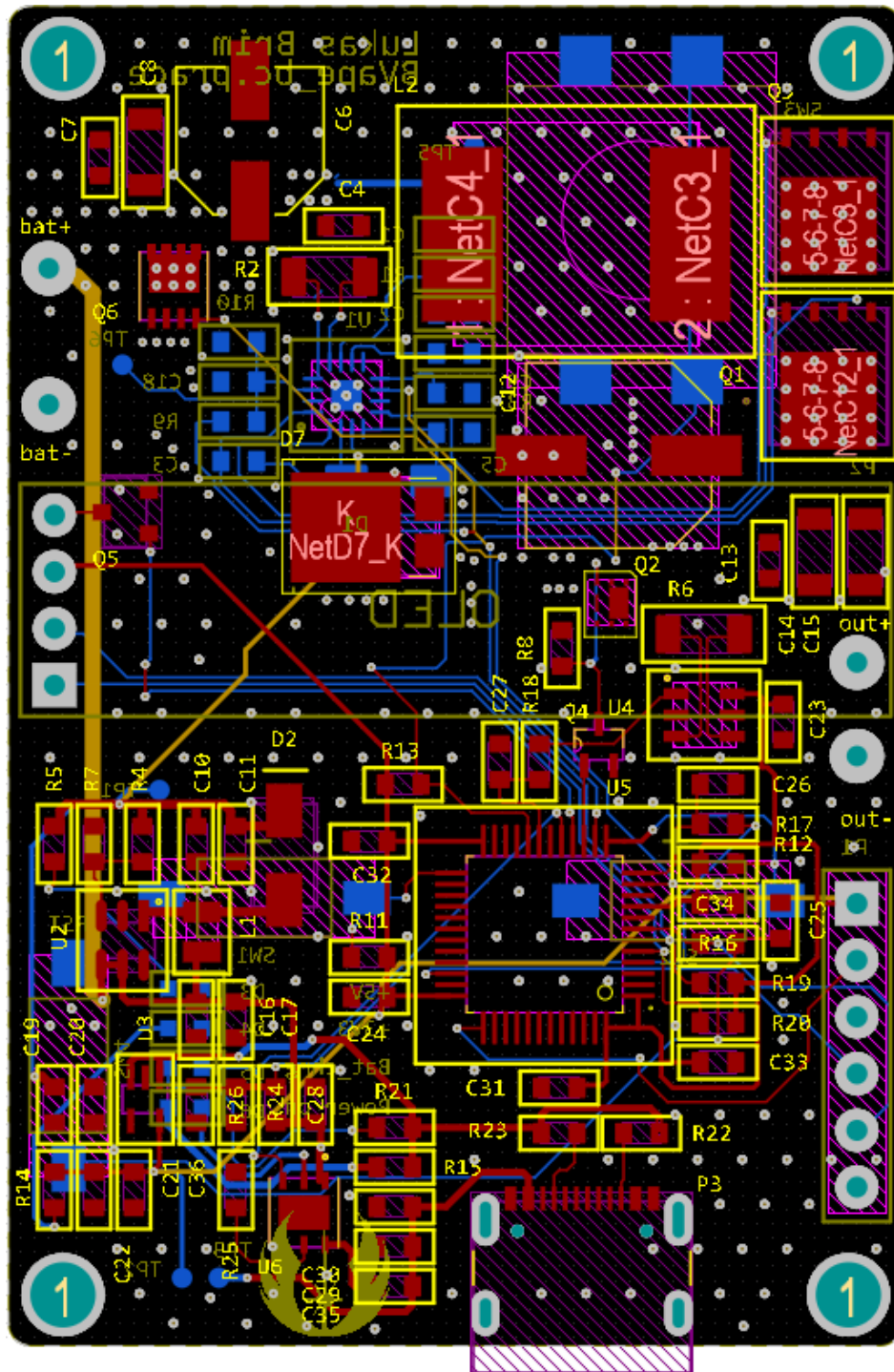
## Seznam symbolů

U	Napětí	(V)
t	Teplota	(°C)
R	Odpor	(Ω)
f	Frekvence	(Hz)
I	Proud	(A)
C	Kapacita baterie	(Ah)
P	Výkon	(W)
$\vartheta_0$	Teplota srovnávacího spoje	(°C)
$R_{\text{PROG}}$	Odpor na PRG vývodu	(Ω)
$I_{\text{BAT}}$	Nabíjecí proud	(A)
$V_{\text{PROG}}$	Napětí z USB konektoru	(V)
$I_{\text{L}}$	Proud cívkou	(A)
$V_{\text{OUT}}$	Výstupní napětí měniče	(V)
$V_{\text{IN}}$	Vstupní napětí měniče	(V)
$I_{\text{OUT}}$	Výstupní proud měniče	(A)
$\eta$	Efektivita měniče	(%)
$\Delta I_{\text{L(P-P)}}$	Proudové zvlnění cívky	(A)
$I_{\text{L(P)}}$	Špičkový proud	(A)
C	kapacita	(F)
d	Délka	(m)
s	čas	(s)

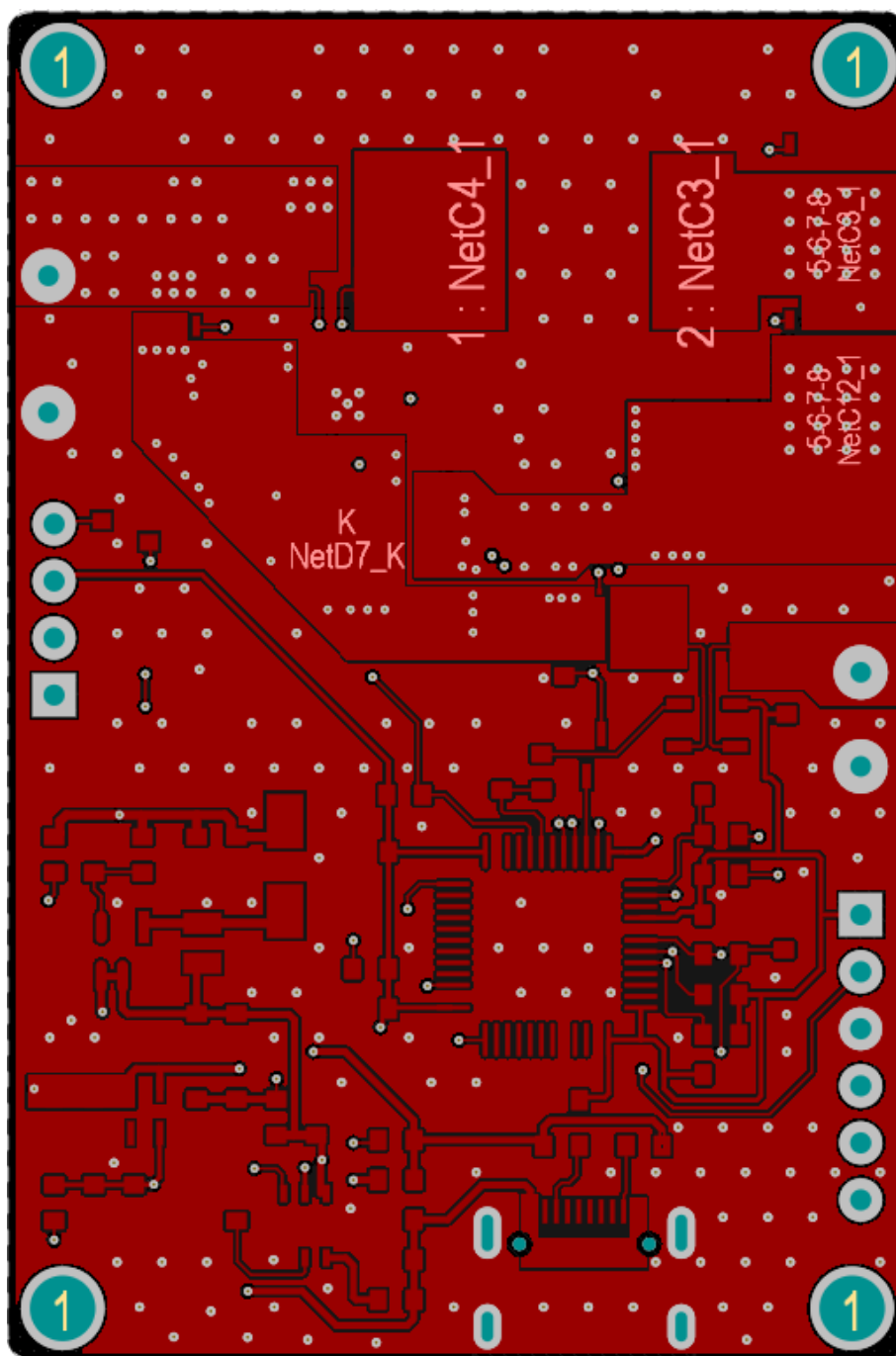
## **SEZNAM PŘÍLOH**

<b>PŘÍLOHA A - ELEKTRONICKÁ CIGARETA .....</b>	<b>53</b>
<b>PŘÍLOHA B - SOUPISKA SOUČÁSTEK .....</b>	<b>58</b>
<b>PŘÍLOHA C - SCHÉMA ZAPOJENÍ.....</b>	<b>61</b>

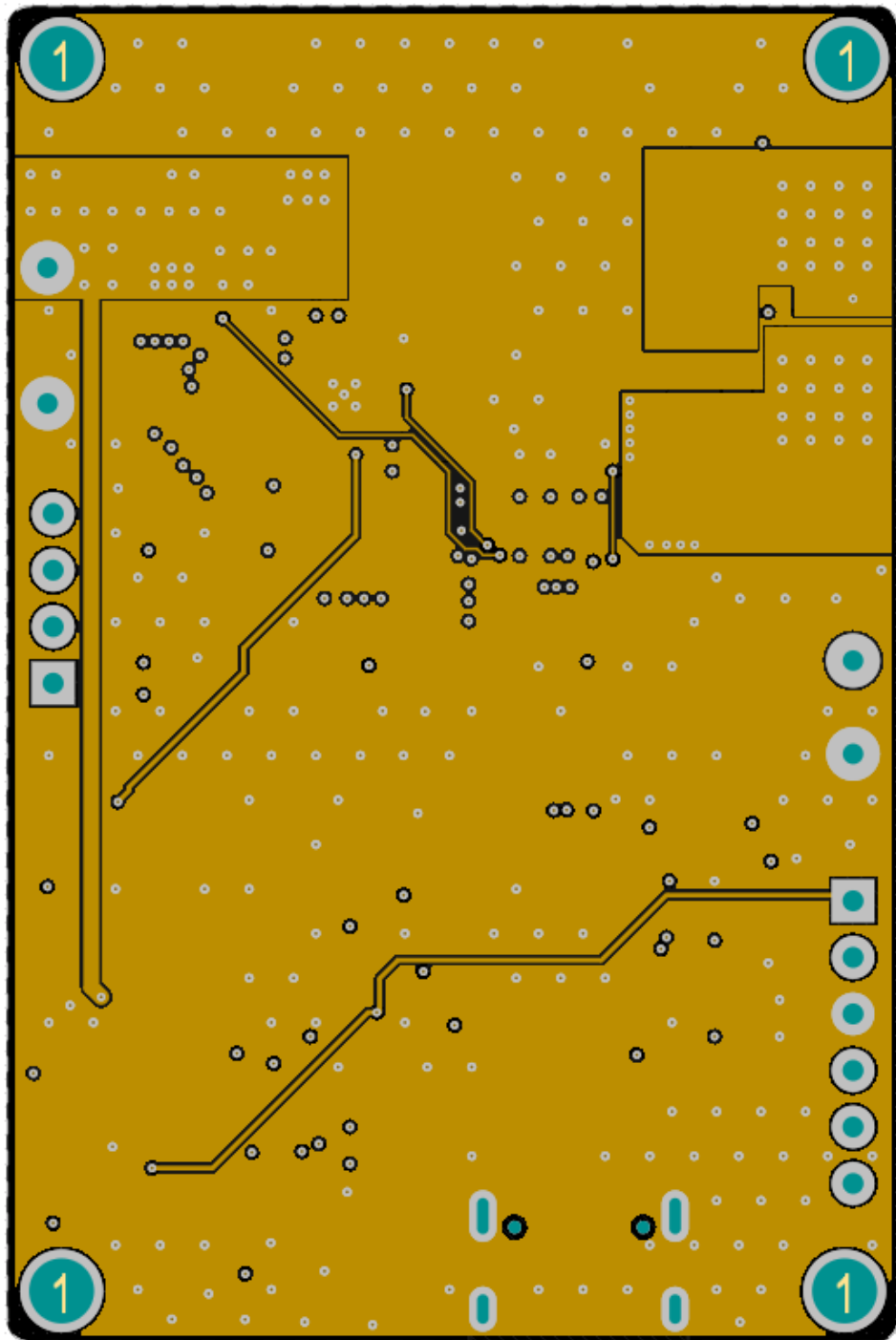
## Příloha A - Elektronická cigareta



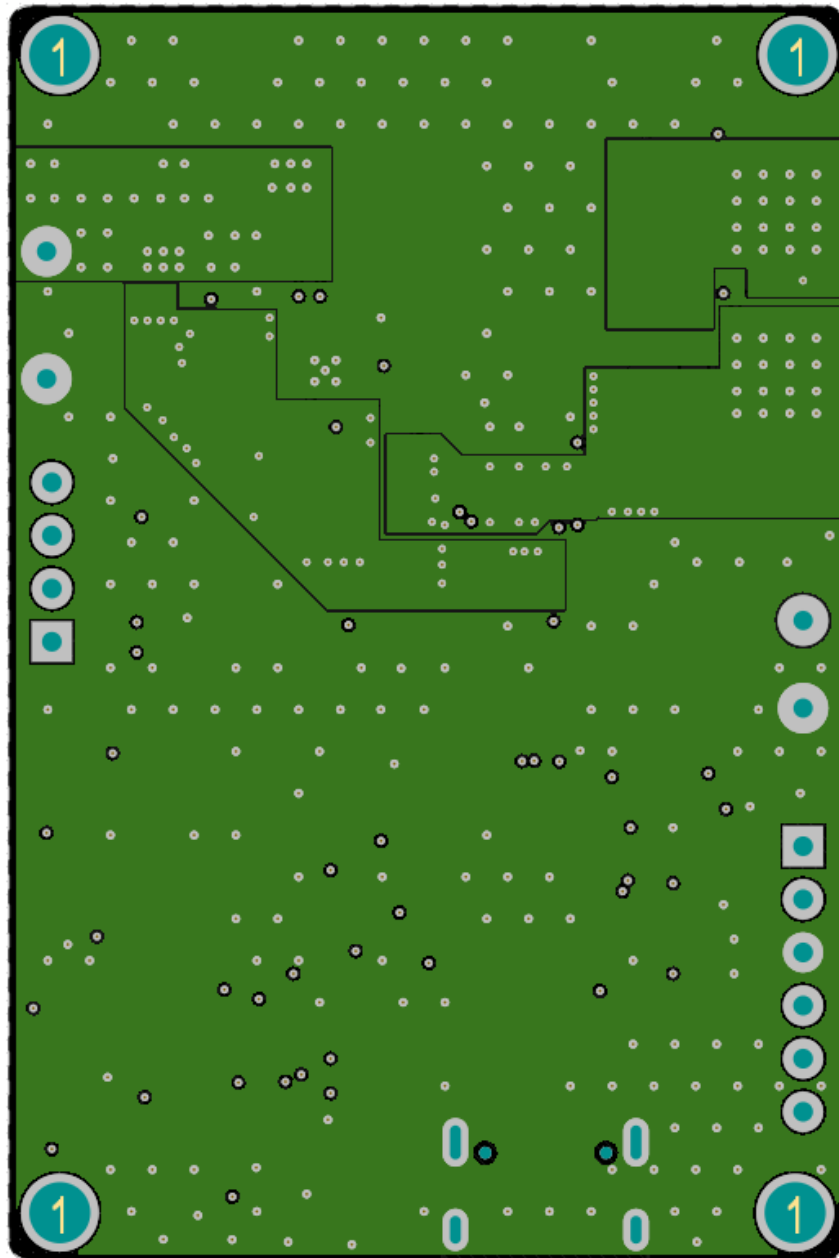
Obrázek A 1: Všechny vrstvy DPS



Obrázek A 2: Vrchní vrstva

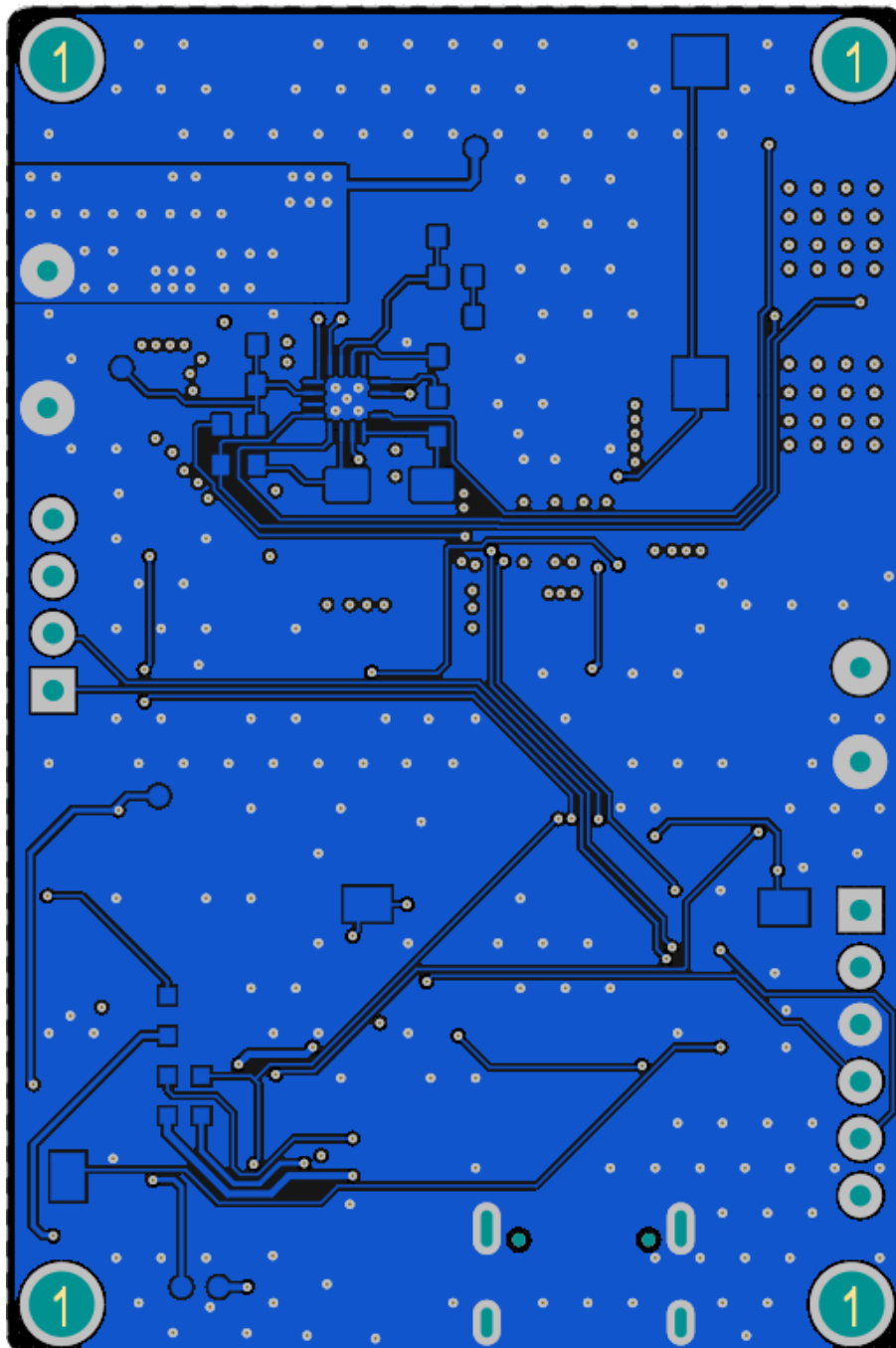


Obrázek A 3: Vnitřní vrstva signálová



Obrázek A 4: Vnitřní vrstva GND





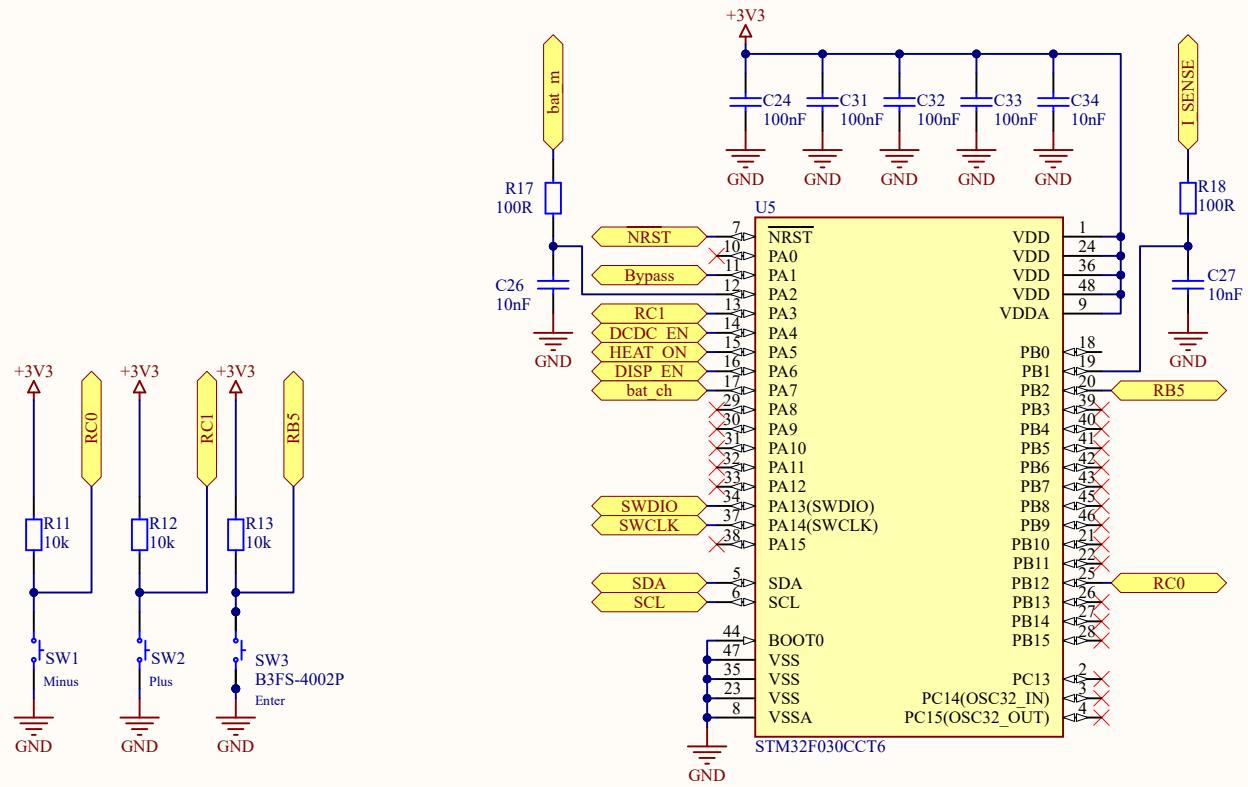
Obrázek A 5: Spodní vrstva

## **Příloha B - Soupiska součástí**

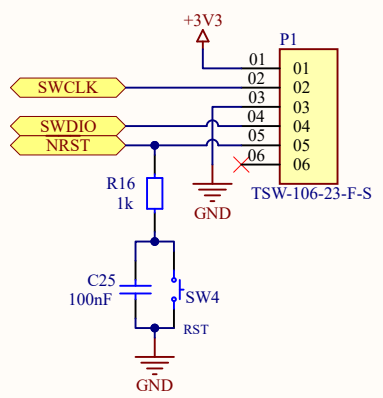
Součástka	Označení	Hodnota	Množství	Cena/ks
Integrované obvody				
Mikrokontroler	STM32F030CCT6	—	1	61,40 Kč
Lineární regulátor	MIC5365-3.3YC5-TR	—	1	4,06 Kč
Integrovaný obvod	STBC08PMR	—	1	35,59 Kč
Regulátor spínacího napětí	LTC3786EUD#TRPBF	—	1	170,91 Kč
Regulátor spínacího napětí	TLV61048DBVR	—	1	15,79 Kč
Zesilovač	INA181A4IDBVR	—	1	11,43 Kč
Operační zesilovač	TLV6001IDBVT	—	1	19,12 Kč
Polovodičové součástky				
MOSFET	BSC009NE2LS5IATMA1	—	1	54,88 Kč
MOSFET	BSC015NE2LS5IATMA1	—	1	33,83 Kč
MOSFET	SIA445EDJT-T1-GE3	—	1	10,95 Kč
MOSFET	2N7002BKW,115	—	1	7,92 Kč
MOSFET	SIS406DN-T1-GE3	—	1	18,17 Kč
MOSFET	BSS138	—	1	8,57 Kč
LED zelená	LTST-C191KGKT	—	4	5,86 Kč
Shottkyho dioda	B120AF-13	20V/1A	1	7,68 Kč
Shottkyho dioda	B160-E3/61T	60V/1A	1	7,90 Kč
Cívky				
Cívka	LQM21PZ3R3MG0D	3,3 $\mu$ H	1	7,90 Kč
Cívka	ETQP5MR33YLC	330 nH	1	60,72 Kč
Kondenzátory				
MLCC kondenzátor	06035C104KAT2A	100 nF	15	0,60 Kč
MLCC kondenzátor	GCM188R71H103KA37J	10 nF	4	3,60 Kč
MLCC kondenzátor	CL10A106MQ8NNNL	10 $\mu$ F	5	2,26 Kč
MLCC kondenzátor	0603ZD105KAT2A	1 $\mu$ F	1	2,56 Kč
Elektrolitický kondenzátor	710-865080243008	150 $\mu$ F	1	6,77 Kč
MLCC kondenzátor	963-TMK316B7106KL-TD	10 $\mu$ F	3	6,68 Kč
MLCC kondenzátor	963-JMK107C6475MA-T	4,7 $\mu$ F	1	2,71 Kč
MLCC kondenzátor	81-GRM39C102J50	1 nF	1	2,26 Kč
MLCC kondenzátor	581-0603YC101KAT2A	100 pF	2	3,84 Kč
MLCC kondenzátor	80-C0603C221K5GACLR	220 pF	1	2,26 Kč
MLCC kondenzátor	06035C222JAT4A	2,2 nF	1	2,93 Kč
Elektrolitický kondenzátor	AEF0812331M016R	330 $\mu$ F	1	18,05 Kč

Rezistory				
Rezistor	279-CRG0603F10K/10	10 k $\Omega$	5	2,26 Kč
Rezistor	CR0603-JW-202ELF	2 k $\Omega$	3	2,26 Kč
Rezistor	652-CR0603FX-1001ELF	1 k $\Omega$	4	2,26 Kč
Rezistor	MSMA1206R0020FCM	2 m $\Omega$	1	5,31 Kč
Rezistor	PCS1206FR0010ET	1 m $\Omega$	1	14,21 Kč
Rezistor	279-CRGCQ0603J100K	100 k $\Omega$	4	2,47 Kč
Rezistor	652-CR0603JW-683ELF	68 k $\Omega$	1	2,26 Kč
Rezistor	652-CR0603JW-912ELF	9,1 k $\Omega$	1	2,26 Kč
Rezistor	ESR03EZPJ472	4,7 k $\Omega$	2	3,03 Kč
Rezistor	652-CR0603FX-6801ELF	6,8 k $\Omega$	1	2,26 Kč
Konektory				
Pinový header	826949-6	6 pozic	1	12,13 Kč
USB-C	USB4105-GF-A	—	1	18,64 Kč
Taktilní spínače				
Spínač	FSMSMTR	—	3	12,41 Kč
Spínač	B3FS-4002P	—	1	28,07 Kč
Ostatní				
Displej	OLED displej 0,91" 128x32, I2C	—	1	125,00 Kč
DPS	—	—	1	176,54 Kč
Celková cena Elektronické cigarety			bez DPH:	1 127,19 Kč
			s DPH:	1 363,90 Kč

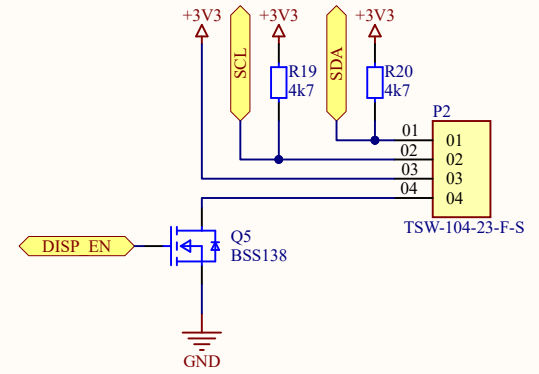
## **Příloha C - Schéma zapojení**



### Pinout k programátoru

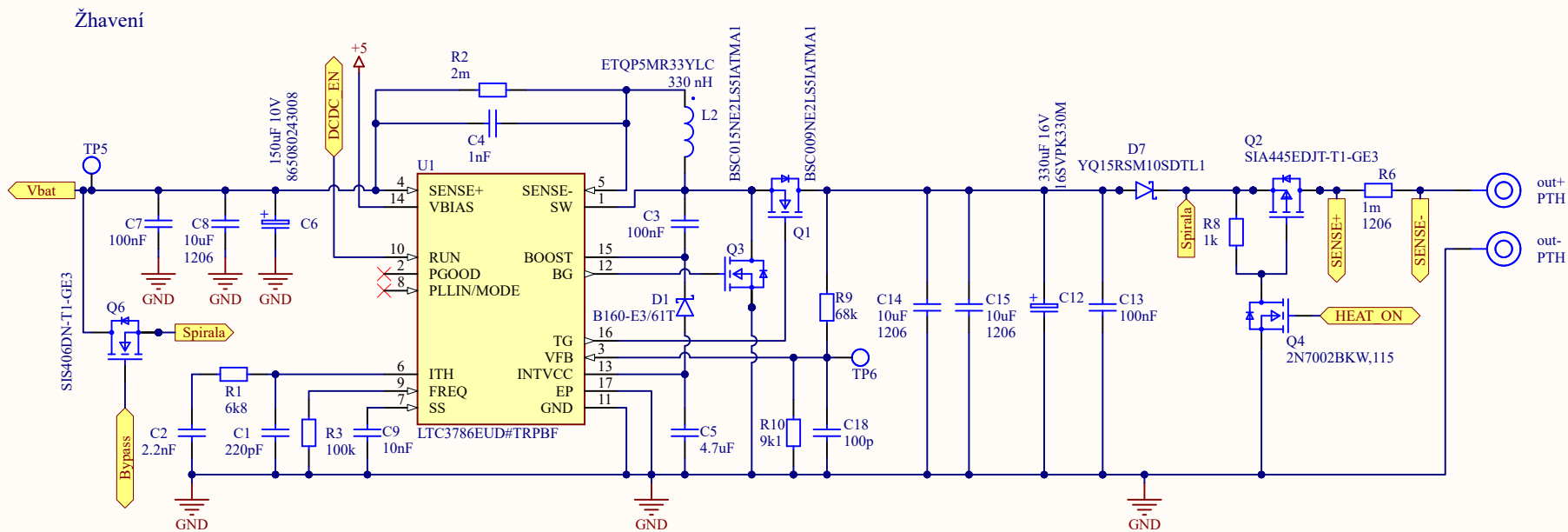


### OLED Displej

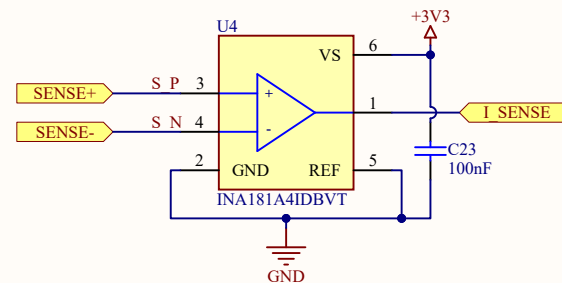


Pokud není uvedeno jinak, všechny SMD rezistory jsou v pouzdrě 0603  
 Pokud není uvedeno jinak, všechny SMD keramické kondenzátory jsou v pouzdrě 0603

Title <b>Řídící elektronika</b>		
Size A4	Number	Revision
Date: 5.30.2024	Sheet of 2	
File: C:\Users\...\Ridici elektronika.SchDoc	Drawn By: Lukáš Brím	



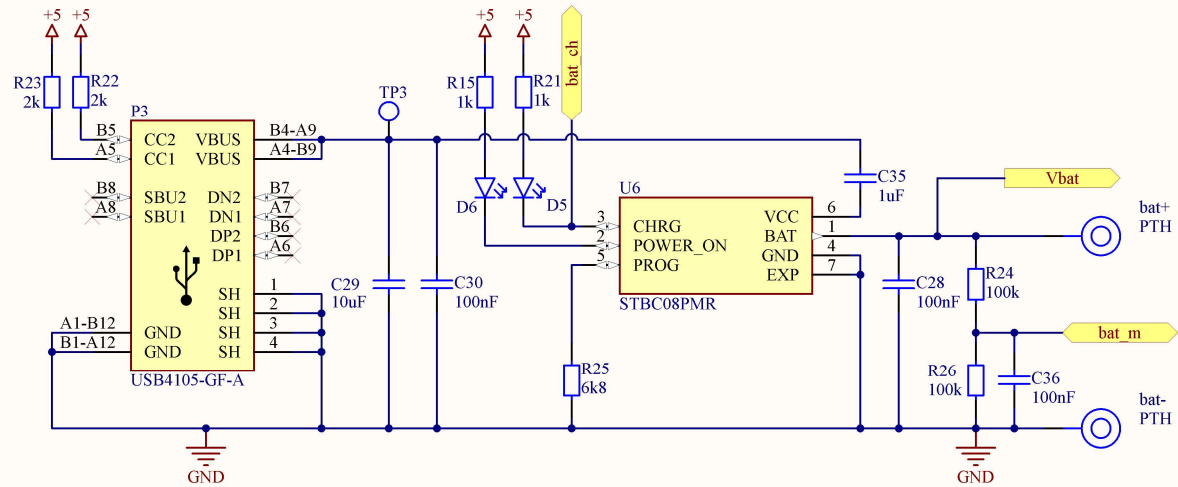
**Měření proudu**



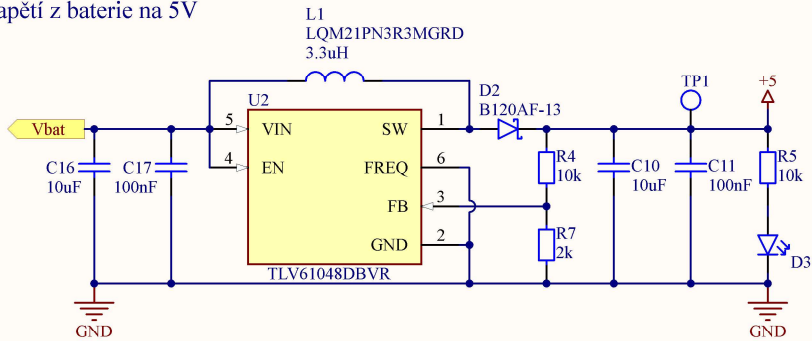
Pokud není uvedeno jinak, všechny SMD rezistory jsou v pouzdře 0603  
 Pokud není uvedeno jinak, všechny SMD keramické kondenzátory jsou v pouzdře 0603

Title <b>System žhavení</b>		
Size A4	Number	Revision
Date:	5.30.2024	Sheet of 3
File:	C:\Users\...\System zhaveni.SchDoc	Drawn By: Lukáš Brím

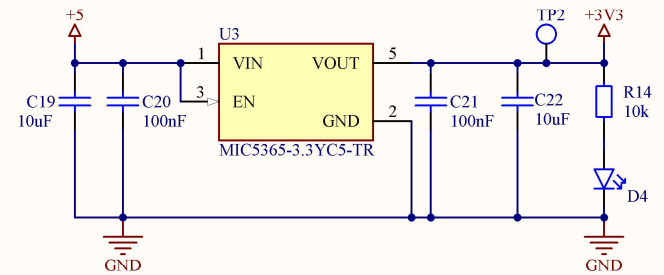
### USB konektor a nabíjecí obvod



### Napětí z baterie na 5V



### Napětí z 5V na 3V3



Pokud není uvedeno jinak, všechny SMD rezistory jsou v pouzdře 0603  
 Pokud není uvedeno jinak, všechny SMD keramické kondenzátory jsou v pouzdře 0603

### Montážní díry



Title		
<b>Napájení</b>		
Size	Number	Revision
A4		
Date:	5.30.2024	Sheet of 1
File:	C:\Users\...\Napajeni.SchDoc	Drawn By: Lukáš Brím